

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

## **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей  
II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции

**13–15 декабря 2022 г.**

Томск 2022

УДК 621.31(063)  
ББК 31л0  
Б93

**Бутаковские чтения** : сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Заворина ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 638 с.

Сборник посвящён теоретическим и практическим проблемам цифровой энергетики и интеллектуальным энергетическим системам, теплофизическим спектрам энергетических технологий, производству тепловой и электрической энергии, экологическим проблемам энергетики, энергетическим системам и комплексам, энергосбережению и энергоэффективности, а также новациям инженерного образования.

Представлен широкий круг исследований аспирантов, студентов и молодых учёных Томска и ряда других городов России.

УДК 621.31(063)  
ББК 31л0

*Редакционная коллегия*

А.С. Заворин, доктор технических наук, профессор ТПУ;  
А.С. Матвеев, кандидат технических наук, доцент ТПУ;  
С.Г. Обухов, доктор технических наук, профессор ТПУ;  
Г.В. Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор ТПУ;  
Б.В. Лукутин, доктор технических наук, профессор ТПУ;  
А.Я. Пак, кандидат технических наук, доцент ТПУ;  
А.С. Гарганеев, доктор технических наук, профессор ТПУ;  
В.В. Литвак, доктор технических наук, профессор ТПУ;  
С.В. Лавриненко, кандидат педагогических наук, доцент ТПУ;  
И.И. Шолохова, старший преподаватель ТПУ;  
Л.В. Савостьянова, кандидат технических наук, ассистент ТПУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПЕРВАЯ СЕКЦИЯ. Цифровая энергетика и интеллектуальные энергетические системы .....</b>	<b>13</b>
<b>Лепихин Н.А.</b> Обзор подходов к управлению сетевыми инверторами возобновляемых источников энергии .....	13
<b>Малюта Б.Д.</b> Применение модального анализа для изучения динамических свойств энергосистем при интеграции в них возобновляемых источников энергии.....	15
<b>Петрова А.Е.</b> Анализ причин возникновения низкочастотных и субсинхронных колебаний в современных энергосистемах .....	18
<b>Шароян А.Б.</b> Катушка Роговского в энергетике: проблемы и перспективы.....	22
<b>Шумный К.И., Литвинов С.А.</b> Фотоэлектрические установки: опыт применения в России и мире.....	24
<b>Уманский И.В., Воронин С.В.</b> Обзор темпов развития и внедрения ветряных электростанций в электроэнергетические системы.....	27
<b>Бухаров Е.В., Гусаров И.Н.</b> Использование нейронных сетей для определения коротких замыканий.....	31
<b>Рудник В.Е., Уфа Р.А., Малькова Я.Ю.</b> Настройка системы управления солнечной электростанции для обеспечения устойчивости энергосистемы .....	34
<b>Покацкий М.Ю., Троицкий Е.Д.</b> Защита от импульсных перенапряжений в сетях 0,4 кВ ..	36
<b>Радько П.П., Бахур А.В., Разживин И.А.</b> Анализ влияния синтетической инерции в ветроэнергетической установке четвертого типа на устойчивость по частоте .....	38
<b>Бай Ю.Д., Малюта Б.Д., Радько П.П.</b> Определение оптимальных узлов подключения ветроэнергетических установок в электроэнергетические системы по критерию минимизации потерь мощности .....	41
<b>Малькова Я.Ю.</b> Верификация алгоритма оптимизации режима работы объекта возобновляемой генерации.....	44
<b>Якименко К.К.</b> Автоматика разгрузки при коротких замыканиях и управляющие воздействия для сохранения синхронной динамической устойчивости .....	46
<b>Хромов М.В.</b> Гибкая система передачи переменного тока.....	49
<b>Жиленков А.А.</b> Централизованная архитектура автоматики ликвидации асинхронного режима.....	52
<b>Ivanov N.S.</b> Early forest fire detection system near power transmission lines using wireless sensor network .....	54
<b>Николаев Д.С.</b> Вспользование водородных топливных элементов в системах электроснабжения .....	58
<b>Сарнаков Д.Д.</b> Устройства Facts (Статком).....	61
<b>Боргояков А.А.</b> Анализ влияния синтетической инерции фотоэлектрических установок на динамическую устойчивость электроэнергетических систем.....	63
<b>Лощенков В.Д.</b> Анализ поведения дистанционной защиты с помощью интерактивных моделей .....	66
<b>Гранская А.А., Гранский Г.А., Мустафин Р.Г.</b> Применение технологии синхронизированных векторных измерений для выполнения функций релейной защиты.....	69
<b>Гранский Г.А., Гранская А.А.</b> Повышение эффективности работы АПВ на кабельно-воздушной линии .....	71
<b>Бондаренко Н.А.</b> Двухфазные и двойные замыкания на землю в распределительной сети с резистивно-заземленной нейтралью.....	73

<b>Филимонов А.А.</b> Использование дронов-роботов для контроля безаварийной работы АЭС .....	75
<b>Ревякин Е.Е.</b> Разработка системы управления инверторным источником напряжения .....	76
<b>Коновалова Е.А.</b> Исследование влияния устройства продольной компенсации на функционирование дистанционной защиты линии электропередачи 220 кВ .....	79
<b>Садулаев А.А.-В., Садыков М.С.</b> Интеллектуальная система управления спросом на электроэнергию бытовых потребителей .....	83
<b>Юровская В.Д., Кижин В.В.</b> Цифровое отопление .....	86
<b>Ансабекова Г.Н.</b> Применение нечеткой логики для построения защиты элементов электрической сети от однофазного короткого замыкания .....	89
<b>Гранская А.А., Гранский Г.А.</b> Применение системы векторных измерений на цифровой подстанции .....	92
<b>Азанов К.Е.</b> Автоматизация процессов проектирования энергетического оборудования на основе использования параметрического 3D-моделирования .....	94
<b>Радько П.П.</b> Анализ причин возникновения низкочастотных колебаний .....	97
<b>Галиев Э.И.</b> Влияние насыщения измерительных трансформаторов тока на функционирование устройств РЗА .....	99
<b>Селезнев Н.А., Куколев М.И., Лапалайнен И.А.</b> Управление требованиями и функциональный анализ на стадии проектирования как средство лицензирования атомных электростанций .....	102
<b>Ибрагим М.</b> Стратегия управления для поддержки частоты сети переменного тока через соединение VSC-HVDC .....	105
<b>Фазлеев М.Н.</b> Этапы внедрения информационных систем в энергетике .....	109
<b>Васильев В.О.</b> Архитектура системы управления тепловой энергией в режиме реального времени в интеллектуальном здании .....	112
<b>Мухаметзянов Р.Р., Мухамедзянов Э.А., Токтаров И.В.</b> Разработка радиоинформатора чрезвычайной ситуации на основе платформы ARDUINO .....	116
<b>Кожемякин В.Е., Ачитаев А.А.</b> Анализ современных систем управления инверторами, преобразующими энергию распределенных генераторов, работающих на базе возобновляемых источников энергии .....	118
<b>Davletyarov F.I.</b> Automatic change of automatic equipment overload limitation settings depending on the ambient temperature .....	122
<b>Барулин В.В., Кашкаров М.Е.</b> Средства повышения пропускной способности линии .....	124
<b>Полуносик Л.А.</b> Анализ аварий на ГЭС .....	125
<b>Змиевский А.А.</b> Анализ технологий ветроэнергетических установок разного типа .....	128
<b>ВТОРАЯ СЕКЦИЯ. Теплофизические аспекты энергетических технологий .....</b>	<b>132</b>
<b>Новиков А.Э.</b> Моделирование газификации твёрдого топлива в высокотемпературной среде окислителя .....	132
<b>Романов Д.С.</b> Зажигание и горение группы капель топливных суспензий на основе угольного шлама .....	135
<b>Пурин М.В., Косторева Ж.А.</b> Характеристики зажигания и горения водоугольных топлив на основе каменноугольного полукокса .....	138
<b>Абедтазехабади А.</b> Зажигание и горение капель жидких и суспензионных топлив в условиях их взаимодействия с модифицированными поверхностями нагрева лазерными способами обработки .....	141
<b>Дорожкин А.В.</b> Новый подход к управлению температурой Лейденфроста .....	144

<b>Вяткина В.А.</b> Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в лесном горючем материале при воздействии фронта низового лесного пожара .....	146
<b>Вяткин А.В.</b> Анализ влияния свойств ограждающих конструкций и оборудования на тепловой режим помещения, обогреваемого газовым инфракрасным излучателем в условиях смешанной конвекции.....	149
<b>Кужин Р.Ю.</b> Особенности формирования конвективных течений в двухжидкостных каплях .....	152
<b>Долгих В.В.</b> Численное моделирование нагрева и испарения капель сложной формы.....	154
<b>Коротких А.Г., Сорокин И.В., Теплов Д.В.</b> Влияние бора и алюминия на горение высокоэнергетического материала на основе ПХА/СКДМ.....	156
<b>Фрицлер В.Я.</b> Численное моделирование нагрева и испарения двухкомпонентного суррогатного топлива .....	158
<b>Землянский Н.А.</b> Исследование взаимного влияния компонентов твердотопливной смеси при горении.....	159
<b>Мязина С.А.</b> Математическое моделирование влияния лесного пожара на элементы деревянного строения .....	163
<b>Плешко А.О., Паушкина К.К.</b> Влияние мелкодисперсных твердых добавок к гелеобразным топливам на характеристики микровзрывного диспергирования.....	166
<b>Пискунова А.Е., Хомутов Н.А.</b> Взаимодействие полимерных микрочастиц геля с гладкой поверхностью и мембранным покрытием.....	170
<b>Курапов Р.М.</b> Подавление пламенного горения и термического разложения модельного лесного и торфяного пожара составами на основе воды .....	174
<b>Абрамов Н.В.</b> Численное исследование физико-химических процессов в камере сгорания газотурбинного двигателя.....	175
<b>Дорохов В.В.</b> Многофакторная оценка процесса горения углей и шламов в паровоздушной среде.....	177
<b>Гусев А.А.</b> Светоиндуцированная газификация смесей отходов деревообработки и отработанных моторных масел.....	181
<b>Коротких А.Г., Паримала Ранган Фидел Кастро</b> Heat transfer of fuel assemblies with four rods.....	183
<b>Арефьев К.Ю., Абрамов М.А.</b> Метод расчетно-экспериментального исследования пространственного распределения частиц дисперсной фазы в несущем потоке .....	188
<b>Колесова А.А.</b> Исследование структуры течения пелены охладителя за отверстиями различной геометрической формы методом PIV.....	190
<b>Фалейчик Д.В.</b> Термогравиметрический анализ коксозольного остатка и карбонизированных опилок лиственницы .....	192
<b>Хайнак Л.М., Астафьев А.В., Слоновская А.А.</b> Влияние степени минерализации органического сырья на его теплофизические характеристики.....	195
<b>Костюков А.В., Косач Л.А.</b> Влияние дистанцирующих элементов в щелевом канале малой ширины на тепловые характеристики ламинарного течения в нём .....	198
<b>Маслов В.А., Селезнёва М.Д., Князев С.А., Яковлева В.В.</b> Теплообмен в паре круговых цилиндров при их рядном и шахматном расположении.....	202
<b>Будко С.И.</b> Постановка задачи моделирования тепловых процессов при разработке системы плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ без отключения нагрузки .....	206
<b>Золин Д.А., Горшков М.С.</b> Расчет температурных полей в телах простейшей формы в процессе нестационарной теплопроводности .....	209
<b>Димитрюк И.Д., Гайдабрус М.А., Табакаев Р.Б.</b> СВЧ-пиролиз навоза крупнорогатого скота .....	212

<b>Листопадская Т.А., Кожухов Н.Н., Махоренко А.А.</b> Модернизация метода определения коэффициента теплопроводности строительного материала.....	215
<b>Шавадзе С.Э.</b> Использование ПК Ansys Fluent для моделирования работы пиролизной печи по переработке твердых коммунальных отходов .....	217
<b>Шувалов Е.А.</b> Вследствие кавитации при течении несжимаемой среды в вихревой трубе .....	219
<b>Шилов А.А.</b> Гидравлические характеристики эжектора со шнеком .....	221
<b>Смоленцев П.О.</b> Моделирование тепловых режимов резервуаров для хранения топлив ...	224
<b>Колотилкина К.В.</b> Математическое моделирование системы автоматического регулирования температуры воды на выходе из проточной ёмкости .....	226
<b>ТРЕТЬЯ СЕКЦИЯ. Производство тепловой и электрической энергии .....</b>	<b>230</b>
<b>Дадашов Р.В.</b> Организация водно-химического режима питательной воды АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 .....	230
<b>Мальцев К.И.</b> Исследование эффективности выгорания топлива в камерной топке пылеугольного котла .....	232
<b>Шабаловский В.С.</b> Перспективы использования ГТД в различных отраслях .....	235
<b>Цыбочкина Ю.С., Крутовский И.А.</b> Расчет потерь реактивности за счет шлакования реактора ВВЭР-1200 .....	236
<b>Hegazy M.A.E.</b> NPP power unit for the city of alexandria with a desalting plant .....	239
<b>Abdelzaher A.F.</b> Advanced turbine regeneration system with different number of high- pressure heaters .....	242
<b>Elsayed A.Y.</b> Analysis of the efficiency of steam reheating schemes and design of nuclear power plants .....	245
<b>Abdelal M.M., Gubin V.E.</b> Design of a NPP power unit with a VVER-type reactor with an electric power 1000 MW .....	247
<b>Shahin Y.R., Gubin V.E.</b> Design of a power unit with vver for a NPP with electric capacity of 870 MW .....	248
<b>Mahany Mohamed A.A.</b> Study of the efficiency of different separation and reheating schemes for a turbine unit of nuclear power plant with a VVER-1250 reactor .....	251
<b>Пузырёв С.А.</b> Организация сжигания твёрдых топлив в котлах с ЦКС .....	253
<b>Бенедиктов А.А., Ромашова О.Ю., Долиный В.С.</b> Выбор оптимального коэффициента теплофикации при отпуске теплоты от ПГУ-ТЭЦ .....	256
<b>Супуева Д.</b> Анализ процесса скопления накипи на внутренних поверхностях теплогенерирующих элементов, их влияние на эффективность агрегатов.....	258
<b>Кульбида О.В.</b> Оптимизация параметров и схемы одноконтурного энергоблока с гелийохлаждаемым реактором.....	261
<b>Samy K.S.</b> Comparative the efficiency analysis of different steam generators types for a power unit with a VVER-700 reactor .....	265
<b>Khalaf M.M.</b> Justification for the choice of material for condenser tubes for steam turbine plants of nuclear power plants .....	268
<b>Ibrahim I.M., Lavrinenko S.V.</b> Choose the materials for steam turbines NPP .....	270
<b>Mohamed Mustafa E.A.</b> Project of NPP power unit with an electric capacity of 1250 MW with dry coolers.....	273
<b>Mohamed Sayed</b> The project of a nuclear power plant unit for the golden triangle area in Egypt with a turbine capacity of 600 MW .....	275

<b>Романов А.С., Лаптев М.А., Барсков В.В.</b> Влияние закона закрутки лопатки газовой турбины, закрученной по закону постоянства циркуляции, на напряженно- деформируемое состояние .....	278
<b>Фоменко Н.Е., Фоменко М.В.</b> Разработка схемы сжигания твердого топлива в инвертной топке энергетического котла с применением различных методик численного моделирования .....	281
<b>Berdimyradova O. Begliyew B. Durdyyev A.</b> Use of improved methods for determining reservoir productivity .....	285
<b>Низамаева А.В.</b> Анализ водных режимов систем водопотребления на ТЭС .....	286
<b>Репин И.И.</b> Оценка максимальной мощности теплового насоса ТЭЦ-7 при интергации в прямоточную систему технического водоснабжения .....	288
<b>Зарецкий Н.Д., Ли А.Р.</b> Влияние переходного сопротивления дуги в месте короткого замыкания на успешность дальнего резервирования в сетях 0,4 кВ .....	290
<b>Ахметшин А.В.</b> Отключение трансформаторов без выключателя на стороне высокого напряжения .....	294
<b>Баршутина Д.С., Еремин В.В., Баршутин С.Н.</b> Исследование энергетических затрат в системе повышения концентрации радикалов в пламени .....	296
<b>Ларин А.Б., Ухалова Е.Г., Савинов М.П.</b> Использование искусственного интеллекта в оценке качества теплоносителя ТЭС .....	298
<b>Ларин Б.М., Киет С.В., Зотова К.В.</b> Диагностика возможных нарушений ВХР паровых энергетических котлов с применением расчетных методов .....	301
<b>Мугинов А.М.</b> Анализ временной или абсолютной остановки подачи филамента при аддитивном производстве .....	303
<b>Гатина Д.Р.</b> Интеграция энергии ветра в производство электрической энергии .....	304
<b>Баршутина Д.С., Баршутин С.Н.</b> Перспективы применения электрического поля для повышения эффективности получения энергии от сжигания углеводородного топлива .....	307
<b>Галактионова А.А., Ромашова О.Ю.</b> Анализ эффективности промежуточного перегрева пара на двухконтурной ПГУ-ТЭЦ .....	310
<b>Погребной Д.В.</b> Проверка соответствия техническим требованиям системы расхолаживания бассейна выдержки реактора ВВЭР-1000 при переходе на ремикс топливо .....	313
<b>Логонова А.Ю.</b> Расчетное исследование технологии частичного умягчения воды с использованием Н-карбоксильного фильтра .....	316
<b>Крылов Г.А., Гаврилова С.В.</b> Особенности проектирования систем автоматического управления горелочных устройств теплогенерирующих установок .....	318
<b>Новикова В.Е.</b> Применение ветрогенератора в условиях низких температур .....	321
<b>Панькина А.Д.</b> Расчет циркуляционного насоса методом подобия .....	324
<b>Белиловец В.И., Шишкова Е.Е.</b> Резервный генератор энергии на алюминиевом топливе для тепло- и электроснабжения северных территорий России .....	326
<b>Цветкова В.В.</b> Модернизация внутрикорпусных устройств компенсатора давления АЭС с ВВЭР-1000 .....	329
<b>Ашуров Ш.С.</b> Моделирование ручного насоса .....	331
<b>ЧЕТВЁРТАЯ СЕКЦИЯ. Экологические проблемы энергетики .....</b>	<b>334</b>
<b>Yeboah E., Yakovlev G.A.</b> Radon and its decay products dynamics inside the accumulative chamber .....	334

<b>Берикболов А.К., Мисюкова А.Д., Янковский С.А.</b> Исследование процессов термической конверсии смесевых твердых топлив с получением полезных продуктов .....	336
<b>Тавадрос Мина Сами Булес.</b> Экспериментальные исследования утилизации имитированных радиоактивных отходов .....	340
<b>Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б., Губин В.Е.</b> Исследование характеристик зажигания и горения водоугольного топлива выполненного на основе пирогенетической жидкости, полученной в результате переработки различных типов биомассы .....	342
<b>Кокорина А.И., Болатова Ж.</b> Определение параметров электродугового синтеза карбида вольфрама из вольфрамового концентрата руды .....	344
<b>Поваляев П.В., Францина Е.В., Аркаченкова В.В.</b> Высокотемпературная переработка асфальтенов в атмосферной плазме дугового разряда .....	346
<b>Горшков А.С., Губин В.Е., Ларионов К.Б.</b> Исследование кинетических характеристик процесса совместного пиролиза биомассы и синтетических отходов .....	348
<b>Мисюкова А.Д., Янковский С.А.</b> Исследование влияния способа приготовления топливных смесей из каменного угля и отходов лесопиления на угол раскрытия факела ....	350
<b>Гумовская А.А., Корчагина А.П.</b> О возможности использования органических отходов как источника углерода для синтеза карбидов .....	354
<b>Пронин А.К.</b> Численное исследование эффективности применения пофракционного сжигания пылеугольного топлива .....	356
<b>Губин А.В., Ларионов К.Б.</b> Модификатор горения твердого топлива на основе предшественников оксидов металлов .....	358
<b>Лойко В.П., Долгов Ю.С., Мезенцева В.С.</b> Перспективность использования водорода, получаемого методом паровой конверсии метана, в качестве экологически чистого топлива на примере ТЭЦ Ачинского глиноземного комбината .....	360
<b>Закиров Ф.Н.</b> Исследование факторов, влияющих на эффективность способов звукоизоляции теплового оборудования .....	363
<b>Бейкенова М.М.</b> Проблема загрязнения гидросферы энергетическими предприятиями. Её влияние на человечество .....	366
<b>Введенский И.В.</b> Оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду .....	368
<b>Кыргыз А.В.</b> Способы тушения лесных пожаров в республике Тыва .....	371
<b>Лурьев И.В., Лурьева И.И.</b> Физические процессы при фильтрации сероводородсодержащего природного газа .....	373
<b>Левченко М.Ю., Губин В.Е., Омельчук Ю.А.</b> Основные этапы декарбонизации топливно- энергетического комплекса .....	376
<b>Слоновская А.А., Хайнак Л.М.</b> Биоуголь как перспективное направление утилизации отходов агропромышленного комплекса .....	379
<b>Петрова А.Н., Карамов Д.Н., Самаркина Е.В.</b> Оценка возможности использования энергии солнца для горячего водоснабжения г. Байкальска .....	382
<b>Гуляев Д.Д.</b> Бензапирен в атмосферном воздухе экономических центров Кемеровской области .....	385
<b>Komekov R.J., Garayev G.T., Ishangulyyev G.A.</b> The role of hydrogen energy in the transition to low carbon energy .....	387
<b>Демидов Н.А.</b> Исследование возможности использования отработанной кофейной гущи в качестве альтернативного топлива .....	389
<b>Краевой К.А.</b> Оценка изменения запасов углерода в нефтезагрязненных почвах Ямало- Ненецкого автономного округа после рекультивации .....	392
<b>Быкова А.Н., Шмидт С.А.</b> Технология изготовления антибактериального полупроводникового источника излучения для дезинфекции воздуха помещений .....	395
<b>Rechnikova S.N.</b> An ecological approach to sustainable electricity production .....	397



<b>Пронина Д.Э.</b> Методы контроля выбросов в атмосферный воздух при сжигании топлива .....	399
<b>Терешин Н.А.</b> Проблемы реализации климатических проектов .....	401
<b>Соловской А.С.</b> Развитие принципов контроля электромагнитной обстановки с учетом дополнительных характеристик .....	403
<b>Баранов И.А., Соловской А.С.</b> Оценка нагрева биологических тканей в условиях воздействия микроволнового электромагнитного излучения .....	405
<b>Добровольская А.С.</b> Ключевые тренды ESG-стратегии для энергетической отрасли России.....	407
<b>Кривошеева А.М., Волкова М.Г.</b> Очистка сточных вод модифицированным диоксидом титана .....	410
<b>Никифорович А.А., Зарипова Р.С.</b> Альтернативные источники получения электроэнергии для станций зарядки электро автомобилей как способ заботы об экологии .....	412
<b>Артюшенко Д.В.</b> Проект создания экологически чистой водородной инфраструктуры в г. Находка.....	414
<b>ПЯТАЯ СЕКЦИЯ. Энергетические системы и комплексы .....</b>	<b>415</b>
<b>Масалина Е.А.</b> Извлечение посторонних предметов из технологических скважин .....	415
<b>Гайнутдинов Ф.Р., Базин Д.А.</b> Генерация тепловой и электрической энергии гибридными энергоустановками топливный элемент – газовая турбина .....	418
<b>Кукушкин А.С.</b> Метод обнаружения частичных разрядов в высоковольтной полимерной изоляции.....	420
<b>Федоров В.С.</b> Грозоотметчик.....	423
<b>Риф А.Э., Губин В.Е.</b> Имитационное моделирование процесса демонтажа графитовой кладки при выводе из эксплуатации .....	425
<b>Стецов Н.В.</b> Анализ влияния управляемых параметров на работу замкнутой ГТУ с водородным комплексом.....	427
<b>Кузяков Г.С., Космынина Н.М.</b> Системы охлаждения турбогенераторов мощностью до 110 МВт.....	430
<b>Гордынский Е.И., Ефремов И.С.</b> Исследование электрофизических свойств модифицированной изоляции кабельных изделий.....	432
<b>Юдин П.В., Николаевич В.Ш.</b> Организация освещения автодороги правобережной плотины БГЭС и разработка решения по установке опор освещения в условиях гидротехнического сооружения .....	434
<b>Khalifa, Slyusarskiy K.V.</b> Effect of replacement of condenser tubes on characteristics of NPP with VVER-800 reactor.....	437
<b>Гелдимуратов А.Г., Агалыев С.Д.</b> Особенности удаления жидкости из скважин ПХГ в водоносных пластах.....	440
<b>Рамазанова Р.И.</b> Диагностика изоляции кабеля 35 кВ методом анализа частичных разрядов.....	442
<b>Раднаев А.Б., Доржиева Б.С.</b> Оценка возможности применения в асинхронных электродвигателях массивного ротора из стали с высокой электропроводностью .....	445
<b>Доржиева Б.С., Хамидуллин А.Б. И.Н., Маслов С.Ю.</b> Разработка модели турбогенератора в среде Ansys Maxwell.....	446
<b>Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю.</b> Система обнаружения гололедно-изморозевых отложений.....	448
<b>Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю.</b> Рассмотрение автономных роботизированных комплексов для высоковольтных линий электропередачи.....	450

<b>Сидорова А.В., Митрофанов С.В.</b> Имитационная модель каскада ГЭС в условиях аварийного режима .....	452
<b>Сидорова А.В.</b> Подходы к оптимизации технического обслуживания и ремонтов высоковольтного оборудования .....	456
<b>Тутунин А.С., Клоков А.В.</b> Согласование мощностей гибридной энергосистемы с возобновляемыми источниками и регулируемой сезонной холодильной нагрузкой .....	459
<b>Пичугова О.А.</b> Обзор численности и установленной мощности гидроэлектростанций энергосистемы Таджикистана .....	463
<b>Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю.</b> Система для автоматизированного управления наружным освещением на железнодорожных платформах.....	466
<b>Харитонов К.А.</b> Перспективное решение для снижения массы бортовых кабелей и проводов.....	468
<b>Никулина Е.Н.</b> Использование твердооксидных топливных элементов в теплоэнергетических установках.....	470
<b>Kerim G.H., Soltanmyrat B.V., Ayna A.Y.</b> Applicability of laser technology as an alternative to hydraulic fracturing.....	473
<b>Лавренчук А.А., Сперанский М.Ю., Поваляев П.В.</b> Исследование температурных режимов работы электродугового плазменного реактора переменного тока для синтеза материалов .....	475
<b>Клоков А.В., Тутунин А.С.</b> Конфигурирование гибридной системы автономного энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии в арктической зоне .....	479
<b>Старунская Е.И.</b> Новые материалы и перспективные технологии в атомной науке и энергетике.....	482
<b>Овчинников А.А.</b> Применение технологических потоков в качестве рабочей жидкости эжектора для утилизации газов низкого давления .....	485
<b>Найпак К.А.</b> Техничко-экономический анализ различных технологий производства водорода, интегрированных в атомные электростанции .....	487
<b>Volgin V.A.</b> Remote testing and monitoring of fuel .....	489
<b>Tikhonov I.V.</b> Monitoring of cable lines by non-destructive testing.....	491
<b>Морозова Е.А.</b> Оценка пригодности существующего теплообменника системы аварийно- планового расхолаживания ВВЭР-1000 при переходе на мощность реактора 107% от номинальной.....	493
<b>Безруких В.В.</b> Сжигание генераторного газа горновой газификации в камере сгорания ГТУ .....	495
<b>Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В.</b> Использование мультиразрядных операционных систем для повышения надежности работы энергетических систем .....	497
<b>Сафиуллин Т.Н.</b> Обеспечение стабильности напряжения в системах электроснабжения ..	499
<b>Михайлович М.А.</b> Применение автономных источников электроэнергии в предприятиях нефтегазовой промышленности.....	501
<b>Литовка М.А.</b> Аккумуляция энергии.....	503
<b>Сафиуллин Т.Н.</b> Потери электроэнергии в распределительных сетях .....	505
<b>Журиков Р.Н.</b> Анализ влияния основных внешних воздействующих факторов на надёжность кабельных изделий.....	507
<b>Токтаров И.В., Мухаметзянов Р.Р., Мухамедзянов Э.А.</b> Генератор переменного тока с гравитационной установкой.....	510
<b>Sharafiev D.F.</b> Overhead wire temperature control. Purpose and description of the device.....	511

**ШЕСТАЯ СЕКЦИЯ. Энергосбережение и энергоэффективность .....514**

<b>Минор А.А., Болдушевский Е.С., Туболев А.А., Галашов Н.Н.</b> Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания ГТУ на её энергетические характеристики .....	514
<b>Горячев В.Г., Полева А.А.</b> Утилизация тепловой энергии от центров обработки данных ..	517
<b>Тамашевич М.С.</b> Использование биомассы в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки водоугольной суспензии.....	519
<b>Некля Ю.А., Васильева Ю.З.</b> Синтез бориды молибдена в атмосферной электродуговой плазме.....	521
<b>Титов А.Д., Кеслер А.Д.</b> Проблема эффективности использования электро- и теплоэнергии в системах сушки пиломатериала.....	523
<b>Стовпец Д.Е.</b> Синтез порошков на основе карбида кремния электродуговым методом.....	526
<b>Саммур А.А., Комаров О.В.</b> Оценка эффективности и необратимости компонентов газотурбинной установки по второму закону термодинамики .....	528
<b>Федосеев А.Г.</b> Развитие методологических основ комплексной технико-экономической оценки эффективности систем энергообеспечения объектов энергетики и ЖКХ.....	530
<b>Воронович А.О.</b> Способы поддержания комфортной температуры элементов одежды специального назначения .....	534
<b>Соловьёв С.С.</b> Повышение энергоэффективности горных предприятий на основе анализа графиков электрических нагрузок .....	536
<b>Глотов Д.Д., Федотов Е.А.</b> Способы обогрева элементов пожарного водоснабжения ..	539
<b>Лапшова В.М., Козлова М.В.</b> Анализ эффективности утилизации вторичных энергоресурсов тяжелой промышленности.....	541
<b>Маленкова И.Н.</b> Разработка эмпирических моделей для оценки суммарной солнечной радиации с суточной детализацией.....	544
<b>Сорогин А.С., Хамитов Р.Н.</b> Экспериментальное сравнение способов охлаждения солнечной панели для изолированных потребителей.....	548
<b>Тупиков Д.Д., Никулина Д.Э.</b> Повышение энергоэффективности горных предприятий путем перехода к светодиодному освещению .....	550
<b>Луппов С.И., Самбулова М.Ю., Ковалев М.С.</b> Энергоэффективное потребление энергетических ресурсов на примере отработанных масел.....	554
<b>Курбатов Н.П., Щербакова Д.М.</b> Коэффициент полезного действия канала в зависимости от срока эксплуатации.....	557
<b>Еремочкин С.Ю., Жуков А.А., Дорохов Д.В.</b> Разработка функциональных блоков для исследования асинхронных электроприводов в среде simintech.....	560
<b>Перехвал М.Б., Перехвал П.А.</b> Сравнение эксергетической эффективности абсорбционного и парокомпрессионного тепловых насосов .....	563
<b>Киреев С.И.</b> Диагностика частичных разрядов в высоковольтной изоляции на основе анализа коммутационных процессов .....	565
<b>Ketter E.K., Korotkikh A.G.</b> Assessment of the reliability of the IRT-T reactor's centrifugal pump .....	568
<b>Айбасов Е.С.</b> Анализ и перспективы современных технологий диагностики частичных разрядов в высоковольтной изоляции.....	572
<b>Кавун И.А.</b> Исследование путей повышения эффективности диагностики обмоток высоковольтных силовых трансформаторов зондированием низковольтными импульсами в одноступенчатом режиме .....	574
<b>Иванова А.А.</b> Технология проектирования светодиодного светильника для аквариумных рыб .....	577

<b>Чириков М.Е.</b> К вопросу автоматизации водоподготовки и химводоочистки в энергетике .....	578
<b>Терешин Н.А., Исламгиров Н.Ш.</b> Анализ методов утилизации дистиллерной жидкости..	582
<b>Романюк Д.Н.</b> Энергетический переход в республике Беларусь.....	584
<b>Будко С.И.</b> Решение задачи оптимизации числа и мощности ТП в СЭС жилого района при помощи по «MS Excel». Программная постановка задачи.....	588
<b>Сидоров Е.В.</b> Исследование IGBT-транзисторов для электроприводов насосных установок .....	591
<b>Павлов С.Н.</b> Высоковольтные испытания электроизоляционных материалов .....	595
<b>Колесников С.В., Петренко П.А., Талдыкина Ю.С.</b> Оценка времени до пробоя стекловолнистой изоляции обмоточных проводов при действии модулированного напряжения.....	598
<b>СЕДЬМАЯ СЕКЦИЯ. Новации нового инженерного образования.....</b>	<b>600</b>
<b>Крутовский И.А., Цыбочкина Ю.С.</b> Способы повышения эффективности выполнения студенческих проектов в техническом вузе .....	600
<b>Hegazy M.A.E.</b> Life after graduation and the difficulties which mabe faced .....	602
<b>Попов З.Д., Попов С.К.</b> Новации нового инженерного образования .....	604
<b>Чаплыгин Н.А., Лукавцов О.О., Космынина Н.М.</b> Введение в историю энергетики .....	606
<b>Немкина П.Е., Демченко М.Е.</b> Комплекс тренажеров для организации самообучения по дисциплине математика .....	608
<b>Безбородов А.В.</b> Студенческое соуправление кафедры как ключевой элемент модели развития универсальных компетенций студентов инженерных направлений подготовки....	610
<b>Домарацкая М.П.</b> Интегрированный подход в обучении иностранного языка студентов технического вуза .....	613
<b>Ibrahim I.M.</b> Education in eru and tpu during studying specialist in nuclear power plant design and operation.....	615
<b>Куликов К.Д., Фирсова Д.Е.</b> Анализ проблем студентов технического профиля с успеваемостью и поиск их решения.....	617
<b>Mohamed Sayed.</b> Internship opportunities for international students studying under the nuclear power plants program.....	620
<b>Меньшикова А.А.</b> Гибридная форма обучения как перспектива развития высшего образования инженерных специальностей.....	623
<b>Luprov S.I., Sambulova M.Yu.</b> Introduction of vr&ar technologies in the process of training students of specialties in the FEC .....	625
<b>Tsyplenko M.M.</b> Case study in the context of higher professional education of geologists.....	627
<b>Суханов Д.Д., Бердыева М.И., Бакшаев В.Н.</b> Роль физического и психологического развития в подготовке инженеров.....	629
<b>Мугинов А.М.</b> Влияние количева углов захвата кадров на качество цифровой трехмерной модели при сканировании .....	633
<b>Лийн Е.А., Хомутская О.В.</b> Применение возможностей имитационного моделирования в обучении принципам организации производства .....	635

# Первая секция. ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

## ОБЗОР ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ СЕТЕВЫМИ ИНВЕРТОРАМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Н.А. Лепихин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А0-42

За последние десять лет отмечается рост генерирующих установок на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Осуществления подключения данного оборудования к электроэнергетической системе происходит при помощи силовых преобразователей, а именно через сетевые инверторы. Исходя из этой особенности, свойства и возможности генерирующих установок преимущественно зависят от динамики силового преобразователя.

В свою очередь, это вызывает ряд проблем. Например, наиболее немаловажным фактором является зависимость существенного увеличения скорости и глубины снижения частоты от снижения механической инерции электроэнергетической системы. Также можно отметить, работа ВИЭ осуществляется в режиме максимальной мощности, что не способствует регулированию режима сети.

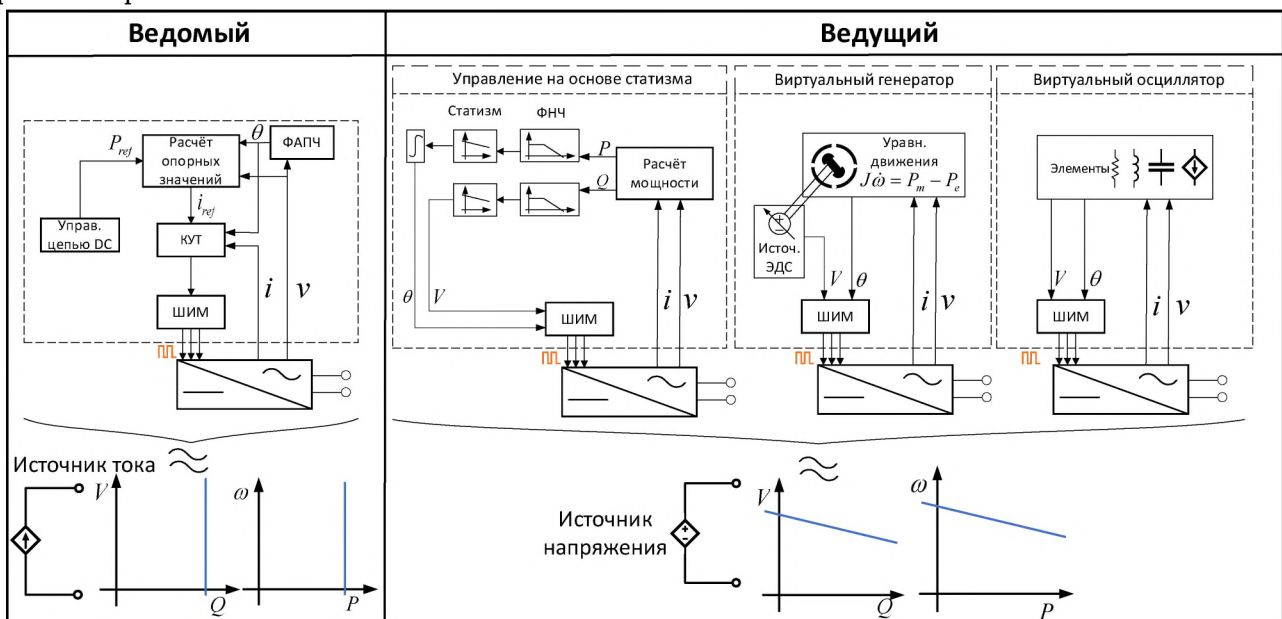


Рис. 1. Функциональные схемы инверторов, работающих в режиме «ведомого» и «ведущего»

Определяющей поведение преобразователей является система управления (рисунок 1). В настоящее время «классической» является система, при которой силовой преобразователь работает в режиме ведомого. При таком варианте, инвертор представляет источник тока, а синхронизацию с сетью осуществляет блок фазовой автоподстройки частоты. ФАПЧ осуществляет функцию оценки мгновенного угла измеряемого напряжения на клеммах преобразователя.

Однако, с увеличением сопротивления сети, трудно гарантировать устойчивость работы преобразователя. Связано это с высокими коэффициентами усиления во внутреннем контуре управления током и в ФАПЧ, а также неспособностью последнего быстро синхронизироваться с напряжением сети.

Решением данной проблемы является переход к управлению сетевыми инверторами в режиме ведущего. В свою очередь это позволит формировать опорные напряжения и угол для

широтно-импульсной модуляции. За счет этого появится возможность регулировать частоту, напряжение сети и вносить вклад в инерциальный отклик. В режиме ведущего силовой преобразователь будет представлять источник напряжения.

Таблица 1. Сравнение систем в режиме «ведомой» и «ведущей»

Система в режиме «ведомой»	Система в режиме «ведущей»
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Предполагается, что сеть уже сформирована при нормальной работе</li> <li>• Прямоугольное (dq) векторное управление током, подаваемым в сеть</li> <li>• Раздельное управление P и Q</li> <li>• Требуется ФАПЧ</li> <li>• Требуется напряжение в точке общего соединения для доставки P и Q</li> <li>• Не может работать при 100% внедрении силовой электроники; существуют пороги нестабильности (переломные моменты)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Предполагается, что формирует сеть и поддерживает устойчивость энергосистемы</li> <li>• Контроль величины напряжения и частоты/фазы</li> <li>• Небольшая связь между P и Q</li> <li>• Использует управление ФАПЧ для переключения между режимами.</li> <li>• Может запустить энергосистему из обесточенного состояния</li> <li>• Теоретически может работать при 100% внедрении силовой электроники; может сосуществовать с сформированной сетью</li> <li>• Нестандартизированный, из-за нехватки опыта эксплуатации с системной точки зрения</li> </ul>

Системы управления инверторов, работающих в режиме ведущего, подразделяется на несколько категорий (рисунок 1): управление на основе статизма, виртуальный генератор и виртуальный осциллятор.

В настоящее время наиболее перспективным является концепция виртуального синхронного генератора, которые в свою очередь отличаются внутренними и внешними контурами управления, уровнем детализации модели генератора и т. д.

Исследование и анализ существующих вариаций позволит выявить сильные и слабые стороны данного подхода виртуального синхронного генератора. А также в случае положительных результатов разработать систему управления сетевых инверторов в режиме ведущего.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters / Lin, Yashen, Joseph H. Eto, Brian B. Johnson, Jack D. Flicker, Robert H. Lasseter, Hugo N. Villegas Pico, Gab-Su Seo, Brian J. Pierre, and Abraham Ellis. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-73476. – 2020. – P. 49.
2. Система автоматического управления силовым преобразователем на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора / А.А. Суворов, А.Б. Аскараров, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай, В.Е.Рудник // Электричество, 2022. – № 4, с. 15–26.
3. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок силовым преобразователем / А.А. Суворов, А.Б. Аскараров, В.Е.Рудник, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // Электрические станции. Энергопрогресс, Автоматизированные системы управления, 2022. – № 3. – С. 43-57.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Суворов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ПРИМЕНЕНИЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ В НИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Б.Д. Малюта  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ1Ч

## Введение

В настоящее время активно развиваются и интегрируются в энергосистемы (ЭС) возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их мощности растут, в связи с чем становится острее вопрос сохранения устойчивости ЭС при растущем участии в них ВИЭ. Данная проблема обусловлена тем, что инверторы, посредством которых осуществляется подключение различных ВИЭ, низкоинерционны.

Одним из решений данной проблемы является формирование подходящего алгоритма управления инвертором. Актуальной на данный момент является концепция виртуального синхронного генератора (ВСГ), в рамках которой алгоритм управления инвертором имитирует характерные особенности синхронных генераторов: инерционность, статизм по напряжению и частоте.

В то же время важным вопросом является изучение динамических характеристик энергосистемы, её устойчивости при интеграции генерирующих установок с силовыми преобразователями, управляемых посредством ВСГ. В данном аспекте значимую роль играет модальный анализ, позволяющий исследовать динамические свойства рассматриваемого объекта без осуществления численного моделирования во временной области. В рамках данной работы модальный анализ применяется для изучения мод колебаний рассматриваемой системы, определения параметров, влияющих на наиболее значимые из них.

## Описание структуры исследуемой системы

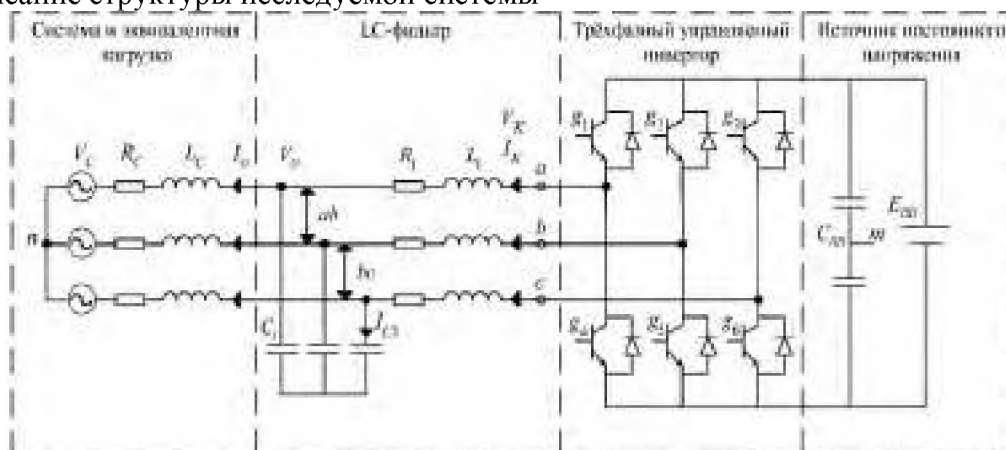


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой системы

В рамках данной работы рассматривается система, состоящая из источника постоянного напряжения, трёхфазного инвертора, RLC-фильтра и энергосистемы, эквивалентированной по теореме Тевенена до источника и эквивалентных активного сопротивления и индуктивности. Стоит отметить, что источник постоянного напряжения подаёт питание на вход инвертора через буферную ёмкость – она необходима для имитации инерционности ротора генератора при его пуске/остановке. Принципиальная схема данной системы приведена на рисунке 1 [1].

## Построение модели в пространстве состояний

В данном случае система описывается посредством 13 переменных состояния. Соответственно, необходимо 13 уравнений. Однако, решение столь громоздкой системы осложняется

её нелинейным характером. Для дальнейших расчётов целесообразно линеаризовать рассматриваемую систему уравнений.

Математическое описание данной системы возможно представить в матричном виде следующим образом:

$$\Delta \dot{X} = A \cdot \Delta X + B \cdot \Delta U, \quad (1)$$

где  $A$  – матрица состояния математической модели рассматриваемой системы,  $\Delta X, \Delta \dot{X}$  – вектор-столбец линеаризованных переменных состояния и их производных соответственно,  $B$  – матрица коэффициентов при входных величинах,  $U$  – вектор-столбец линеаризованных входных величин.

Для применения инструментов модального анализа необходим анализ только матрицы состояния  $A$ , поэтому имеет смысл продемонстрировать только её [1]:

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6 \ A_7 \ A_8 \ A_9 \ A_{10} \ A_{11} \ A_{12} \ A_{13}]^T \quad (2)$$

$$A_1 = \left[ 0 \ \omega_b \omega_{g0} \ 0 \ 0 \ \frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right] \quad (3)$$

$$A_2 = \left[ -\omega_b \omega_{g0} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ -\omega_b v_{od0} \ 0 \right] \quad (4)$$

$$A_3 = \left[ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -m_q \ 0 \ 0 \right] \quad (5)$$

$$A_4 = \left[ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right] \quad (6)$$

$$A_5 = \left[ \frac{-1-k_{pc}k_{pv}+k_{FFv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad -\frac{k_{pc}c_1\omega_{g0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad \frac{k_{pc}k_{iv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\frac{k_{pc}+r_1}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{ic}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{FFi}k_{pc}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{-k_{pc}k_{pv}m_q}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \right] \quad (7)$$

$$A_6 = \left[ \frac{k_{pc}c_1\omega_{g0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad \frac{-1-k_{pc}k_{pv}+k_{FFv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{pc}k_{iv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\frac{k_{pc}+r_1}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{ic}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{FFi}k_{pc}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{pc}c_1v_{od0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \right] \quad (8)$$

$$A_7 = \left[ -k_{pv} \quad -c_1\omega_{g0} \quad k_{iv} \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad k_{FFi} \quad 0 \quad -k_{pv}m_q \quad 0 \quad 0 \right] \quad (9)$$

$$A_8 = \left[ c_1\omega_{g0} \quad -k_{pv} \quad 0 \quad k_{iv} \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad k_{FFi} \quad 0 \quad c_1v_{od0} \quad 0 \right] \quad (10)$$

$$A_9 = \left[ \frac{1}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{r_g}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad \omega_b \omega_{g0} \quad 0 \quad \omega_b i_{oq0} \quad \frac{v_{g0} \sin \delta \theta_0}{\frac{l_g}{\omega_b}} \right] \quad (11)$$

$$A_{10} = \left[ 0 \quad \frac{1}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\omega_b \omega_{g0} \quad -\frac{r_g}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\omega_b i_{od0} \quad \frac{v_{g0} \cos \delta \theta_0}{\frac{l_g}{\omega_b}} \right] \quad (12)$$

$$A_{11} = \left[ -\omega_f i_{oq0} \quad \omega_f i_{od0} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\omega_f i_{od0} \quad -\omega_f \quad 0 \quad 0 \right] \quad (13)$$

$$A_{12} = \left[ -\frac{i_{od0}}{T_a} \quad -\frac{i_{oq0}}{T_a} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{v_{od0}}{T_a} \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{k_d}{T_a} \quad 0 \right] \quad (14)$$

$$A_{13} = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \omega_b \quad 0 \right] \quad (15)$$

Анализ модели в пространстве состояний

Одной из задач модального анализа систем является определение мод колебаний системы – её собственных чисел, точнее собственных чисел матрицы состояний  $A$ . Это можно осуществить посредством различных математических программных комплексов. В данной работе все расчёты осуществляются в программном комплексе Matlab. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Собственные числа матрицы состояний  $A$

$\lambda_1$	$-174 + j2607$	$\lambda_4$	$-37 - j2127$	$\lambda_7$	$-1776 + j144$	$\lambda_{10}$	$-0,1 - j4$	$\lambda_{13}$	$-0.3$
$\lambda_2$	$-174 - j2607$	$\lambda_5$	$-5000$	$\lambda_8$	$-1776 - j144$	$\lambda_{11}$	$-31$		
$\lambda_3$	$-37 + j2127$	$\lambda_6$	$-3200$	$\lambda_9$	$-0,1 + j4$	$\lambda_{12}$	$-32$		

Наибольший интерес представляют корни, обуславливающие колебательный характер переходных процессов в рассматриваемой системе. Такие корни имеют мнимую часть. Вели-



чина мнимой составляющей представляет собой частоту колебаний в рад/с, величина действительной части характеризует демпфирование моды (чем она меньше в абсолютном выражении, тем больше демпфирование моды).

С этой точки зрения особый интерес представляют пары комплексно-сопряжённых мод  $\lambda_{3,4}$  и  $\lambda_{9,10}$ , т. к. в первом случае частота колебаний высока при довольно слабом демпфировании, а во втором демпфирование крайне мало.

Поскольку ВСГ представляет собой программу управления трёхфазным инвертором, существует набор регулируемых параметров. Изменяя их, возможно повлиять на характер переходных процессов в рассматриваемой системе. Для анализа данного влияния воспользуемся инструментарием модального анализа, позволяющим оценить влияние отдельных параметров матрицы состояния на конкретные моды – коэффициентом чувствительности (КЧ) моды к параметру. Он рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$\alpha_{n,k} = \frac{\partial \lambda_n}{\partial \rho_k} = \frac{\Psi_n \frac{\partial A}{\partial \rho_k} \Phi_n}{\Psi_n \cdot \Phi_n} \quad (16)$$

В данной формуле  $\Psi_n$  –  $n$ -я строка левой собственной матрицы,  $\Phi_n$  –  $n$ -й столбец правой собственной матрицы,  $\frac{\partial A}{\partial \rho_k}$  – матрица частных производных элементов матрицы состояния  $A$  по интересующему параметру  $\rho_k$ .

Рассчитаем чувствительность моды  $\lambda_3$  для следующих параметров:  $R_1, L_1, C_1, R_g, L_g, k_{pc}, k_{ic}, k_{pv}, k_{iv}, m_q, \omega_f, k_D, T_a, k_{FFi}, k_{FFv}$ . Результаты расчёта в графическом виде приведены на рисунке 2. Коэффициент чувствительности может быть действительным, мнимым или комплексным. Соответственно, в первом случае параметр влияет только на действительную часть моды, во втором – на мнимую, в третьем – на обе. Причем, если действительная часть коэффициента положительна, при увеличении параметра вырастет и действительная часть моды, а при уменьшении – уменьшится. При отрицательном знаке действительной части всё будет ровно наоборот. В случае с мнимой частью логика ровно обратна. Стоит отметить, что ниже приведены результаты только для действительных частей коэффициентов чувствительности.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод: на моду  $\lambda_3$  наибольшее влияние имеют индуктивность фильтра, параметры эквивалентной сети, а также коэффициенты  $k_{pc}, k_{pv}, k_{FFi}, k_{FFv}$  – настраиваемые параметры ВСГ. Проверка полученных результатов осуществляется на примере зависимостей действительной части моды  $\lambda_3$  от изменения параметров  $k_{FFv}$  и  $k_{pv}$ . Результаты расчёта данных зависимостей приведены так же на рисунке 2.

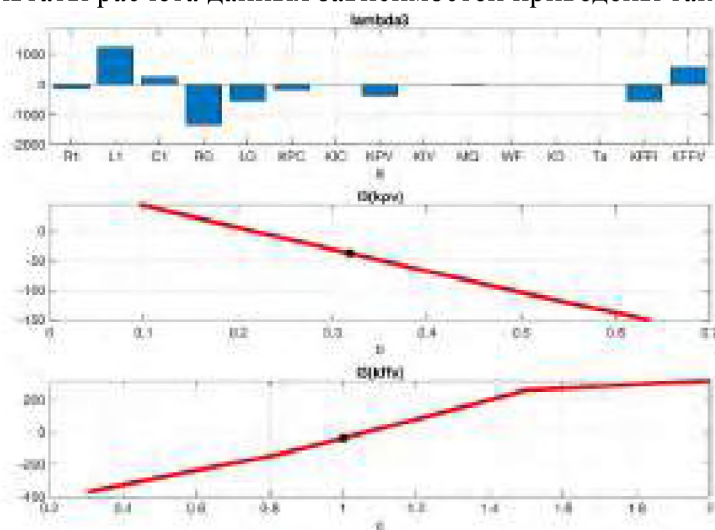


Рис. 2. Результаты расчёта:

$a$  – действительные части КЧ моды  $\lambda_3$ ,  $b$  – зависимость действительной части моды  $\lambda_3$  от величины  $k_{pv}$ ,  $c$  – зависимость моды  $\lambda_3$  от величины  $k_{FFv}$

Анализируя полученные графические зависимости, можно сделать вывод: теоретические положения верны. Действительно, действительная часть коэффициента чувствительности моды  $\lambda_3$  к параметру  $k_{FFV}$  положительна, значит, с ростом этого параметра должна увеличиваться и действительная часть данной моды. Данное положение выполняется. То же верно и в случае с параметром  $k_{pv}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Automatic Tuning of Cascaded Controllers for Power Converters Using Eigenvalue Parametric Sensitivities/ S. D'Arco, J. Are Suul, O. Bjarte Fosso// IEEE Transactions on Industry Applications, 2015. – V. 51 – P. 1743-1753.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Суворов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ И СУБСИНХРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ**

А.Е. Петрова

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), в 2021 году установленная мощность электростанций на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) во всем мире увеличилась на 9,2 %: с 2807 ГВт до 3064 ГВт. В частности, установленная мощность ветряных электростанций (ВЭС) увеличилась на 12,7% (с 732 ГВт до 825 ГВт), солнечных электростанций (СЭС) – на 18,4 % (с 717 ГВт до 849 ГВт) [1].

С ростом числа такого рода электростанций и их доли в общей выработке электроэнергии встает вопрос о влиянии, которое они оказывают на устойчивость энергосистем. В большинстве случаев объекты ВИЭ-генерации устанавливаются в энергорайонах с малым количеством источников традиционной генерации: тогда связь между электростанцией на ВИЭ и традиционной осуществляется посредством длинных линий с большим индуктивным сопротивлением. Указанные сети принято называть слабыми, потому что они являются менее стабильными по напряжению при неисправностях в сети, чем сильные сети. В качестве меры слабости сети применяют отношение короткого замыкания (ОКЗ или англ. SCR), значение которого можно вычислить, зная мощность короткого замыкания сети при номинальном напряжении и номинальную мощность электростанции на ВИЭ на постоянном токе [2]. ОКЗ обратно пропорционален индуктивному сопротивлению, следовательно, чем меньше ОКЗ, тем больше электрическая удаленность объекта ВИЭ-генерации от традиционной. Так, к слабым сетям относят системы с ОКЗ меньше 3, к очень слабым – с ОКЗ меньше 2. ОКЗ является универсальным показателем слабости сети для исследования ее способности поддерживать необходимый уровень напряжения при внешних возмущениях. Поэтому неудивительно, что большинство аварий, происходивших в разных энергосистемах мира с ВИЭ-генерацией в составе, происходило в слабых сетях. Причем в зависимости от конкретной схемно-режимной ситуации при нарушении колебательной устойчивости частота колебаний оказывалась различной. Например, в Техасе, США были зафиксированы случаи низкочастотных колебаний, тогда как в Китае имели место субсинхронные изменения параметров режима [3]. В связи с этим целью данной работы является анализ факторов, приводящих к нарушению колебательной устойчивости энергосистем с ВИЭ.

Тренд на увеличение установленной мощности в структуре генерирующих мощностей характерен и для ЕЭС России. Например, в настоящее время в объединенной энергосистеме (ОЭС) Сибири суммарная установленная мощность ВИЭ-генерации составляет 407 МВт, большая часть из которых приходится на солнечные электростанции (СЭС) [4]. В связи с наличием длинных и протяженных линий, связывающих ВИЭ генерацию с традиционной, существенным объемом ВИЭ генерации, для некоторых энергорайонов ОЭС Сибири проблема изучения возникновения и предотвращения колебательных взаимодействий становится актуальной.

В отечественной литературе по природе происхождения выделяют три вида колебательной неустойчивости, которая возникает в энергосистеме с традиционными генерирующими источниками: самораскачивание, самовозбуждение и крутильные колебания [5]. Согласно исследованиям, представленным в [6], устойчивые колебания на субсинхронной частоте, зарегистрированные на ветряных электростанциях (ВЭС) с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) 4-го типа в Синьцзян-Уйгурском автономном районе (СУАР, Северо-Западный Китай), представляют собой принципиально новый вид субсинхронного взаимодействия. Поэтому указанная ранее классификация колебательной неустойчивости не применима к энергосистемам с ВИЭ.

В [7] рассматривается следующая классификация колебаний, возникающих в энергосистеме с высоким уровнем внедрения ВИЭ: низкочастотные колебания (от 0,1 до 3 Гц), субсинхронные (сверхсинхронные) колебания и резонанс. Данная классификация отражена на рисунке 1.



Рис. 1. Классификация колебаний в энергосистеме с высоким уровнем внедрения ВИЭ

В дальнейшем при рассмотрении колебательных взаимодействий в энергосистеме с ВИЭ использована указанная классификация.

Механизм возникновения низкочастотных и субсинхронных колебаний для указанных ВЭУ 4-го типа может быть справедлив для всех генерирующих установок, подключаемых к сети посредством силовых преобразователей. К таким генерирующим установкам относятся, например, СЭС на основе фотоэлектрических установок.

В [6] авторы, при рассмотрении удаленных от потребителей ВЭС в сетях с низким ОКЗ, выделяют следующие факторы, влияющие на характеристики субсинхронных взаимодействий: индуктивное сопротивление ЛЭП и параметры контроллера сетевого преобразователя. Вследствие увеличения индуктивного сопротивления электропередачи, ОКЗ уменьшается, что приводит к нестабильности возникающих субсинхронных взаимодействий и к уменьшению их частоты. Это значит, что колебания распространяются на большее расстояние и оказывают негативное влияние на большее количество оборудования и потребителей. Наиболее сильное влияние на распространение колебаний по результатам исследования оказывают параметры сетевого инвертора: пропорциональные и интегральные коэффициенты усиления передаточ-

ных функций, которыми представляется указанный инвертор. Кроме того, авторы особо отмечают ситуацию, когда частота колебаний субсинхронных взаимодействий ВЭУ совпадает с собственной частотой крутильных колебаний турбогенератора, расположенного неподалеку. В таком случае с большой вероятностью возникают сильные крутильные колебания на валу генератора.

Более детальное рассмотрение параметров сетевого инвертора в контексте возникновения колебательной неустойчивости описано в [8]. Авторами было рассмотрено влияние на характер колебаний и возможность их возникновения параметров контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), структурная схема которого изображена на рисунке 2 [9].

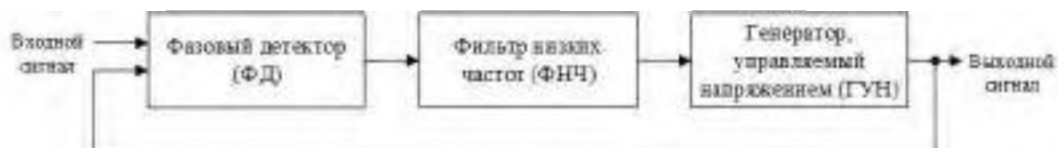


Рис. 2. Структурная схема контура фазовой автоподстройки частоты сетевого инвертора

ФАПЧ можно охарактеризовать как систему автоматического управления, которая подстраивает фазу управляемого генератора таким образом, чтобы она была равна фазе входного сигнала. Входной сигнал сравнивается в выходным при помощи фазового детектора, который представляет собой детектор разности фаз. ФНЧ используется для подавления высокочастотных составляющих сигнала после ФД. После фильтрации сигнал ФД поступает на ГУН, выполняя функцию управляющего сигнала и влияя на частоту колебаний генератора [9].

Влияние ФАПЧ было рассмотрено для двух типов управления преобразователем: управление по активной мощности и управление по напряжению цепи постоянного тока (ЦПТ). При увеличении реактивного сопротивления передачи первый режим управления показал больший запас колебательной устойчивости, чем второй. Дальнейшие исследования второго режима управления показали, что при ступенчатом изменении напряжения в зависимости от ширины полосы пропускания ФАПЧ возможно возникновение только низкочастотных (ширина полосы пропускания 17 Гц), преимущественно субсинхронных (40 Гц), обоих видов (60 Гц) и субсинхронных колебаний (70 Гц). Колебания в первом и последнем случаях оказались затухающими, во втором и третьем – затухающими. Таким образом, параметры настройки ФАПЧ оказывают существенное влияние на характер возникающих колебаний. С увеличением ширины полосы пропускания увеличивается частота возникающих колебаний. Кроме того, низкочастотные и субсинхронные колебания могут существовать независимо друг от друга. Если же говорить о режимах управления сетевым инвертором, то наиболее предпочтительным является управление по активной мощности, поскольку в данном режиме преобладают низкочастотные колебания, тогда как при управлении по напряжению ЦПТ существуют как низкочастотные, так и субсинхронные колебания.

Однако, как показано в [10], система оказывается более стабильной в пределах от 10 Гц до 100 Гц при увеличении ширины полосы пропускания ФАПЧ. Это следует из характера корневой характеристического уравнения, описывающего сетевой преобразователь с ФАПЧ в составе. При построении корневого годографа для различных значений коэффициента усиления ФАПЧ было выявлено, что чем больше ширина полосы пропускания фильтра, тем при большем коэффициенте усиления корневой годограф пересекает мнимую ось, то есть тем больше запас устойчивости. В случае малых значений для полосы пропускания (8 Гц и 20 Гц) в момент пересечения мнимой оси коэффициент усиления меньше требуемого для обеспечения устойчивости системы. Отдельно выделено влияние пропорционального коэффициента ФАПЧ: чем больше указанный коэффициент, тем больше ширина полосы пропускания ФАПЧ. Также авторами статьи была выявлена зависимость между изменением количества передаваемой мощности и нарушением колебательной устойчивости: при увеличении мощности запас колебательной устойчивости системы уменьшается.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы. На возникновение колебательных процессов в энергосистеме с ВИЭ влияют несколько факторов. Первый из них это

ОКЗ – чем он меньше, тем больше электрическая удаленность от традиционных источников генерации, тем слабее система. Такая система становится более чувствительной к возникающим колебательным процессам, среди которых преобладают колебания с низкой частотой. Второй важный фактор – это параметры сетевого преобразователя. В частности, авторы указанных исследований особенно выделяют такие параметры ФАПЧ, как пропорциональный и интегральный коэффициенты, от которых зависит ширина полосы пропускания. С увеличением ширины полосы пропускания преобладающими становятся субсинхронные колебания, однако, они могут как успешно демпфироваться, так и переходить в незатухающие колебания. В качестве третьего фактора можно выделить режим управления сетевым преобразователем.

Для решения проблемы возникновения колебательных процессов в энергосистемах со значительной долей ВИЭ резонно предложить изменить параметры системы автоматического управления сетевого преобразователя. Например, ФАПЧ имеет ряд модификаций: традиционно в сетевых преобразователях используется ФАПЧ на основе синхронной системы отсчета (SRF-PLL), однако в [3] авторы предлагают использовать ФАПЧ с индикацией опережения и запаздывания (the lead/lag PLL), поскольку данная модификация обеспечивает лучшую фильтрацию гармоник, что подтверждается результатами моделирования. Возможно также подключение дополнительного подсинхронного контура управления демпфированием к контроллерам синхронного генератора на постоянных магнитах. Такой контур описывается в [6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Renewable Capacity Statistics 2022 // IRENA, April 2022. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022> (дата обращения 15.11.2022).
2. ГОСТ Р 59027-2020. Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 39 с.
3. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions / Y. Li, L. Fan, Z. Miao // IEEE Transactions on Power Systems. – January, 2020. - Vol. 35. - No. 1. – P. 109–118.
4. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития: информационный бюллетень // Ассоциация развития возобновляемой энергетики, июль 2022. URL: <https://rreda.ru/information-bulletin-july2022> (дата обращения 10.11.2022).
5. Гуревич, Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
6. Subsynchronous Interaction Between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks / H. Liu, X. Xie, J. He, T. Xu, Z. Yu, C. Wang, C. Zhang // IEEE Transactions on Power Systems. – November, 2017. – Vol. 32. – No. 6. – P. 4708–4720.
7. Power System Stability with Power-Electronic Converter Interfaced Renewable Power Generation: Present Issues and Future Trends / L. Meegahapola, A. Sguarezi, J.S. Bryant, M. Gu, E.R. Conde D., R.B.A. Cunha // Energies. – 2020. – No. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/en13133441> (дата обращения 09.11.2022).
8. Wind in Weak Grids: 4 Hz or 30 Hz Oscillations? / L. Fan, Z. Miao // IEEE Transactions on Power Systems. – September, 2018. – Vol. 33. – No. 5. – P. 5803–5804.
9. What Exactly Is a Phase-Locked Loop, Anyways? / R. Keim // All about circuits. – March 09, 2018. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-exactly-is-a-phase-locked-loop-anyways/> (дата обращения 19.11.2022).
10. Modeling Type-4 Wind in Weak Grids / L. Fan // IEEE Transactions on Power Systems. – April, 2019. - Vol. 10. - No. 2. – P. 853–864.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Суворов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# КАТУШКА РОГОВСКОГО В ЭНЕРГЕТИКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Б. Шароян

Томский политехнический университет,  
ОЭЭ, ИШЭ, группа 5А03

В настоящее время очень актуальна цифровизация электроэнергетической отрасли в условиях импортозамещения. Основными целями цифровизации являются: повышение надёжности работы энергосистем, снижение потерь при передаче электрической энергии, точное измерение параметров сети в различных режимах, правильная работа устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА). Достижение последней указанной цели требует, в частности, замены используемых повсеместно измерительных трансформаторов на более современное оборудование.

Сегодня в энергетике широко используются стандартные измерительные трансформаторы (ИТ) со стальными сердечниками. ИТ обеспечивают гальваническую развязку первичных и вторичных цепей, снижают токи фаз первичных цепей до номинальных значений 1, 2 или 5 А. К вторичным обмоткам ИТ подключаются устройства РЗА, измерительные приборы, приборы учета электрической энергии. Погрешности ИТ обусловлены, главным образом, способностью к насыщению стального сердечника. Погрешности при преобразовании первичных токов и напряжений могут привести к отказу или излишнему срабатыванию устройств РЗА. Также из-за наличия сердечника с нелинейной вольт-амперной характеристикой возможно явление феррорезонанса для трансформаторов напряжений, которое часто приводит к выходу из строя ИТ.

Альтернативой стандартным ИТ могут быть оптические ИТ. В данных устройствах нет стальных сердечников, электромагнитное поле установки преобразуется в световой сигнал, передается по оптоволокну и снова преобразуется в электрический сигнал. Однако повсеместная замена традиционных ИТ на оптоволоконные в ближайшие годы практически невозможна в связи с пока недостаточным их производством в РФ. Например, в 2022 г. оптическими ИТ оснащаются только 40 новых цифровых подстанций из действующих 12393 (данные от Межвузовского Методического совета по электроэнергетике) [1].

Другой, более реальной, альтернативой традиционным ИТ может быть катушка Роговского (КР), которая представляет собой датчик тока с круглым немагнитным сердечником и небольшим воздушным зазором. Вторичная обмотка наматывается на сердечник равномерно в несколько слоев, один из выводов обмотки приводится к другому через ось полого сердечника (рисунок 1). В [2] рассмотрены примеры применения КР в качестве ИТ для устройств РЗА и утверждается, что КР обладают компактными размерами, весят в десятки раз меньше традиционных ИТ, обеспечивают требуемую точность измерений как для РЗ, так и для учета отпуска электрической энергии.

В данной работе решаются задачи:

- разработка математической модели КР для автоматизации расчета её размеров и выходного напряжения;
- изготовление экспериментального образца КР;
- проведение испытаний КР.

При решении первой задачи применялся метод математического моделирования с помощью программного комплекса (ПК) «Mathcad». В данной программе был проведен расчёт напряжения на выходе КР в зависимости от её геометрических параметров по (1)

$$E_m = \frac{\mu_0 \cdot n}{2} \cdot \frac{d_v^2}{D_r + \sqrt{D_r^2 - d_v^2}} \cdot \omega \cdot I_m, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость,  $d_v$  – диаметр витка,  $D_r$  – диаметр осевой линии сердечника,  $n$  – количество витков КР,  $I_m$  – амплитуда переменного тока.

Экспериментальный образец КР изготавливается, он будет иметь сердечник в форме тороида с размерами: внешний диаметр 15 см, внутренний диаметр 6 см. Для изготовления обмотки используется медная проволока диаметром 0,5 мм.

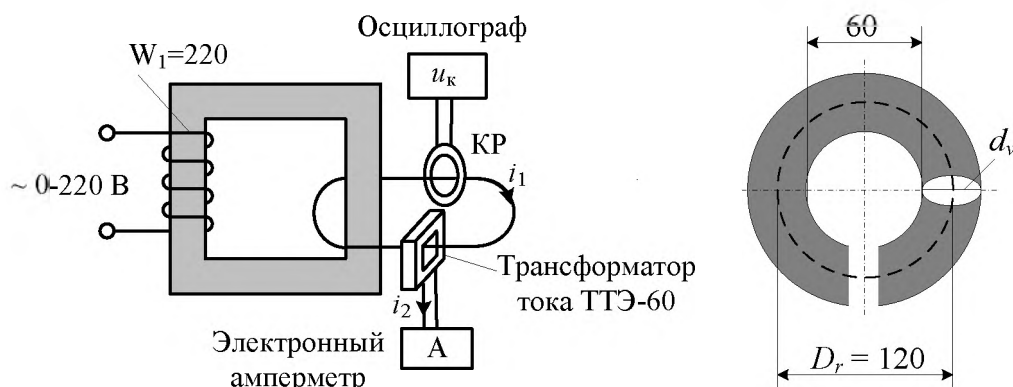


Рис. 1. Планируемая схема эксперимента и размеры сердечника КР

Таблица 1. Оборудование для эксперимента

№	Название	Характеристика
1	ЛАТР	Ток до 10 А; выходное напряжение 0 – 240 В
2	Лабораторный однофазный трансформатор	Мощность 4 кВт; первичная обмотка – 220 витков, вторичная обмотка – 1 виток
3	Трансформатор тока	ТТЭ-60-500/5А 0,5
4	Осциллограф	UNI-T UTD2025CL
5	Катушка Роговского	Примерное количество витков – 680-700

Самым сложным условием для выполнения третьей задачи является необходимость наличия проводника с током в сотни ампер. Как показывают расчеты, минимальный первичный ток для надежного измерения выходного напряжения должен быть не менее 100 А. Для получения таких больших токов в лаборатории ИШЭ была собрана схема по рисунку 1. Как показали эксперименты, при увеличении напряжения на входе первичной обмотки до 220 В в одном витке вторичной обмотки протекает ток около 3100 А. Такое значение токов вполне достаточно для испытаний КР.

В заключение отметим, что традиционные ИТ имеют широкое распространение в связи с наличием хорошо зарекомендовавших себя стандартов и методик, а также хорошим знанием персонала технологий их эксплуатации. Однако замена ИТ на КР может существенно повысить точность преобразований токов и напряжений и принципиально не представляет больших затруднений, так как не требует вносить существенных изменений в первичную схему соединений подстанций.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Профотек: Цифровые трансформаторы. – Текст: электронный // TADVISER, 2022. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения 12.10.2022).
2. Кожович Любомир. Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным ТТ. – Текст: электронный // Цифровая подстанция, 2017. – URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/> (дата обращения 22.10.2022).

Научный руководитель: к.т.н. В.В. Шестакова, доцент ОЭЭ ИШЭ

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ И МИРЕ

К.И. Шумный<sup>1</sup>, С.А. Литвинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ

<sup>2</sup>Ямбургское районное энергетическое управление «Газпром добыча Ямбург»

Солнечная энергетика – это один из видов нетрадиционной энергетики, построенный на применении солнечного излучения для производства энергии в каком-либо виде [1]. Солнечное излучение – это лучистая энергия ионизации, излучаемая солнцем, и одна из энергий, которая широко используется во всем мире [2]. Получение энергии с помощью солнечных электростанций хорошо согласовывается с концепцией распределенного производства энергии.

Солнечная энергетика имеет очень много преимуществ, к которым можно отнести:

- Возобновляемость. Солнечная энергия относится к возобновляемым источникам энергии.
- Постоянство. Солнечная энергия постоянна – ее не получится перерасходовать по ходу удовлетворения человеческих нужд.
- Количество энергии. На Землю каждый год поступает около 1 млрд тераватт-часов, а человечество в это время производит 20 тыс. тераватт-часов, то есть 0,002 % от солнечной энергии, что поступает на землю.
- Бесшумность. В системах солнечной энергетике нет движущихся частей, что позволяет ей быть бесшумной.
- Большая область использования. Солнечная энергия покрывает большую часть поверхности Земли.
- Экономичность. Затраты на обслуживание солнечных панелей очень низкие – достаточно лишь несколько раз в год их чистить.
- Экологичность. Этапы от производства до эксплуатации солнечных электрических станций влекут за собой минимальное количество вредных выбросов в атмосферу.
- Технологичность. В сфере производства солнечных батарей постоянно происходят новые открытия [3].

В мире используются несколько типов солнечных электростанций [4]:

- башенного типа;
- тарельчатого типа;
- использующие фотоэлектрические модули;
- использующие параболические концентраторы;
- использующие двигатель Стирлинга;
- аэростатные;
- солнечно-вакуумные электростанции.

Самым перспективным источником солнечной энергии в будущем являются фотоэлектрические установки. Фотоэлектрические устройства прочны и просты по конструкции, требуют минимального обслуживания, а их самым большим преимуществом является то, что они построены как автономные системы [5].

Для устойчивого снабжения потребителя электричеством с использованием фотоэлектрических панелей, необходимо, кроме самих панелей, ряд вспомогательных устройств, набор которых определяется видом и целью использования электростанции. В мире используются основных типа фотоэлектрических систем:

- Автономные системы;
- Системы, работающие параллельно с сетью.



Для использования автономных систем дополнительно необходимо иметь аккумуляторные батареи и контролеры заряда к ним. Если данные системы будут работать в сети с напряжением 220/380 В необходимо добавить инвертор [6]. Автономные фотоэлектрические системы обычно используются в местах где отсутствует центральное энергоснабжение. На рисунке 1 представлен пример автономной фотоэлектрической системы.

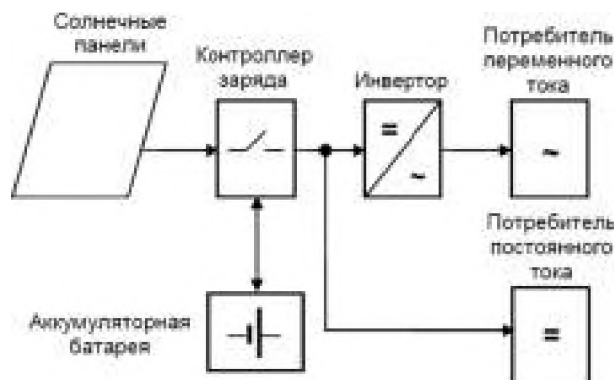


Рис. 1. Автономная фотоэлектрическая система

Фотоэлектрические системы, работающие параллельно с сетью, используют сеть как источник энергии и аккумулятор. Первый случай нужен тогда, когда потребитель использует большую мощность, чем может выдать источник. В этом случае недостающая мощность будет браться из сети. Во втором случае наоборот, если солнечные батареи будут генерировать излишек энергии, то этот излишек будет уходить в сеть.

Первое поколение фотоэлектрических технологий основано на кристаллической структуре, в которой используется кремний для производства солнечных элементов, объединяющихся в фотоэлектрические модули. Однако эта технология не устарела, а постоянно совершенствуется для повышения ее возможностей и эффективности.

По итогам 2019 года мощность мировой солнечной энергетики дошла до отметки 629 ГВт после того, как в течение года было построено 115 ГВт фотоэлектрических станций [7]. На рисунке 2 приведена обобщённая статистика по объёму установленной мощности фотоэлектрических установок в разных странах мира. Рассматривая этот рисунок можно сделать вывод, что развитие солнечной энергетики, и фотоэлектрических установок в частности, не стоит на месте.

В России прошли конкурс проекты фотоэлектрических станций общей мощностью около 2000 МВт с предположительными датами введения в эксплуатацию до 2022 года [8]. На рисунке 3 приведена статистика по построенным фотоэлектрическим станциям к концу 2018 года. Данные этого рисунка показывают, что фотоэлектрические станции в России активно развиваются.



Рис. 2. Топ 10 стран по общей установленной мощности в 2019 году

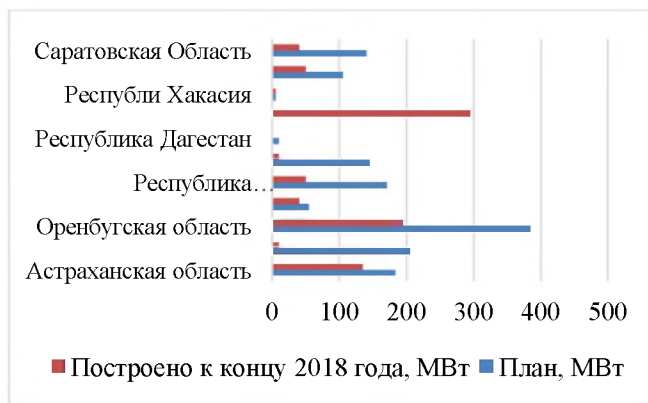


Рис. 3. Суммарная мощность фотоэлектрических станций по субъектам РФ

На рисунке 4 приведены крупные фотоэлектрические станции в мире [9].

На рисунке 5 приведены крупные фотоэлектрические станции в России [10].

Эксплуатация 0,0125 % солнечного излучения может насытить все сегодняшние нужды мировой энергетики, а использование 0,5 % может обеспечить все потребности на перспективу. Но есть и препятствие – это низкая интенсивность солнечного излучения. Чтобы солнечные установки были рентабельные, необходимо разместить их на территории размером 130 тыс. км<sup>2</sup>, из-за этого возникает необходимость использовать коллекторы огромных размеров.

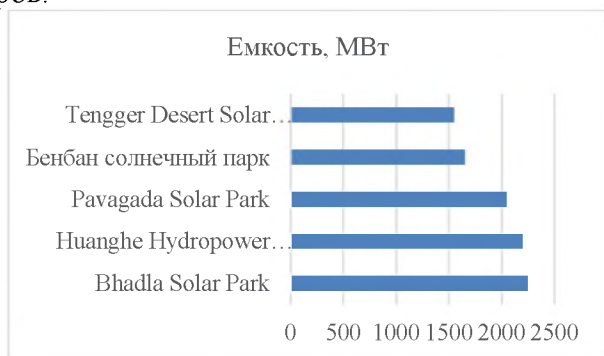


Рис. 4. Крупные фотоэлектрические станции в мире

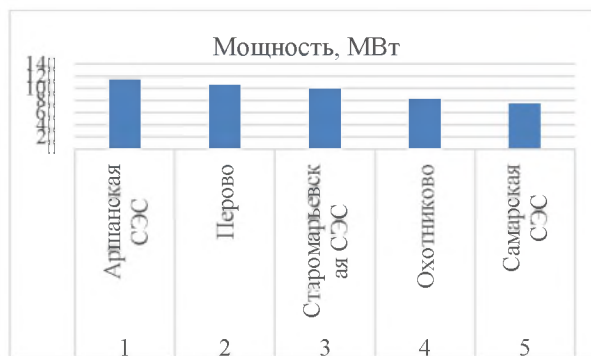


Рис. 5. Крупные фотоэлектрические станции в России

Для изготовления данных коллекторов необходимо затратить огромное количество ресурсов. Это одна из главных проблем которую необходимо решить для эффективного использования солнечной энергетики [11]. Таким образом можно отметить существующие перспективы развития солнечной энергетики в современных электроэнергетических системах.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Солнечная энергетика [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная\\_энергетика](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_энергетика) (Дата обращения: 07.11.2022).
2. I. Alhamrouni, M. Danial, M. Salem, L.J. Awalin, B. Ismail. Design of 2LC-Y DC – DC converter for high voltage/low current renewable energy application. Test Eng. Manag., 83 (2020), pp. 2111-2117.
3. Преимущества и недостатки солнечной энергии [Электронный ресурс]: SolarElectro. – URL: <https://solarelectro.ru/articles/preimuschestva-i-nedostatki-solnechnoj-energii> (дата обращения: 07.11.2022).
4. Солнечная электростанция [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная\\_электростанция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_электростанция) (Дата обращения: 07.11.2022).
5. L. Alhafadhi, J. Teh, C.-M. Lai, M. Salem. Predictive adaptive filter for reducing total harmonics distortion in PV systems. Energies, 13 (12) (2020), p. 3286.
6. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б.В. Лукутин [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015 – 47 с.
7. Strategic PV Analysis and Outreach. Energy, Snapshot of Global PV Markets. IEA PVPS, 2020. – 10 p. - ISBN 978-3-906042-94-7.
8. Дягтярев К.С., Панченко В.А. Развитие и реализованные проекты солнечной энергетики в России // С.О.К. Электросбережение. – 2019. – №9. – С. 74-79.
9. Список фотоэлектрических станций [Электронный ресурс]: ВикибриФ. URL: [https://ru.wikibrief.org/wiki/List\\_of\\_photovoltaic\\_power\\_stations](https://ru.wikibrief.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations) (Дата обращения: 07.11.2022).

10. Список солнечных электростанций России [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_солнечных\\_электростанций\\_России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_солнечных_электростанций_России) (Дата обращения: 07.11.2022).
11. Возможности и перспективы солнечной энергетики [Электронный ресурс]: Neftegaz.RU. – URL: <https://neftegaz.ru/science/Energetika/331966-vozmozhnosti-i-perspektivy-solnechnoy-energetiki> (Дата обращения: 07.11.2022).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственное задание "Наука" № FSWW-2020-0017.

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ОБЗОР ТЕМПОВ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

И.В. Уманский<sup>1</sup>, С.В. Воронин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Ямбургское районное энергетическое управление «Газпром добыча Ямбург»

Глобальное изменение климата, надежность энергоснабжения, стоимость энергии становятся все более актуальными вопросами современного общества. При этом в последние десятилетия в мире предпринимаются определенные шаги по сокращению выбросов загрязняющих веществ, усиливающих последствия глобального потепления. Международные протоколы, такие как Киотский протокол (1998), Парижское соглашение (2015), Европейская рамочная программа по климату и энергетике на период до 2030 года, направлены на сокращение неблагоприятных последствий изменения климата. Россия также активно участвует в формировании международной климатической политики. В рамках реализации международных договоров и соглашений страны пересматривают свои подходы к производству энергии, в связи с чем, возрастает необходимость разработки и создания установок с использованием возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии. Подобные установки внедряются для выработки электроэнергии с нулевым или почти нулевым выбросом загрязняющих веществ в атмосферу.

Одним из перспективных направлений является внедрение ветряных электростанций в электроэнергетические системы. Ветряная энергетика – это развивающаяся отрасль энергетики, в основе которой лежит преобразование кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии, необходимую для потребления людей. Ветроэнергетика имеет определенные преимущества относительно традиционных источников энергии и других возобновляемых источников. Прежде всего, ветросиловые ресурсы огромны и не могут быть полностью освоены даже в перспективе. Для эксплуатации ветряных электростанций не требуется добычи и использования любых видов топлива, их действие основано только на возобновляемом источнике энергии – силе ветра. Основные части конструкции ветряной установки расположены на значительной высоте над землей, а наземная часть установки занимает небольшую площадь на земле, что позволяет использовать окружающее пространство для размещения зданий и сооружений, ведения сельского хозяйства. Также не требуется дополнительной подготовки земельных участков при проведении монтажа ветряных установок. Для работы ветряных электростанций не используется вода. Производство электроэнергии экологически безопасно, так как в процессе работы энергетических установок данного вида отсутствуют отходы производства и вредные выбросы.

Энергия ветра востребована и является рентабельной во многих регионах мира. Использование ветряных комплексов, прежде всего, экономически целесообразно для автономного

обеспечения изолированных либо отдаленных территорий. Учитывая, что ветрогенераторы можно устанавливать на небольшом расстоянии от населенных пунктов, то потери на передачу электроэнергии потребителям и затраты на строительство линий электропередач значительно ниже. Соответственно значительно снижается стоимость киловатт-часа генерируемой электроэнергии для потребителей [1].

Ветряные электростанции подразделяются на виды по различным признакам. По функциональности электроустановки делятся на мобильные (передвижные) и стационарные; по типу конструкции – на роторные и крыльчатые. Роторные электрические станции имеют устройства с вертикальной осью вращения. Они менее эффективны, обладают малой мощностью и целесообразно их использовать для выработки электроэнергии для небольших населенных пунктов либо отдельных объектов. При этом, конструкции не требовательны к установке по направлению ветра и не издадут сильный шум в период работы.

Наибольшее распространение в мире получили крыльчатые станции – это устройства с горизонтальной осью вращения. Они эффективны, способны производить большое количество электроэнергии для обеспечения потребителей в масштабах целой энергетической отрасли. Конструкции ветряных электростанций данного типа требуют установки дополнительного оборудования и приспособлений для правильного ориентирования относительно потока ветра.

Принцип действия всех типов ветряных электростанций одинаков: поток ветра раскручивает подвижную часть, которая передает вращение на генератор, вследствие чего в системе образуется электрический ток. Далее, если рассматривать, например, автономные ветрогенераторы малой мощности, с помощью генерируемого тока заряжаются аккумуляторы, от которых питаются инверторы, преобразующие полученный ток в стандартное напряжение и частоту, подходящие для приборов потребления [2].

По расположению ветряные электростанции подразделяют на: прибрежные, оффшорные, наземные, плавающие. Их размещение, прежде всего, обусловлено параметрами местных ветров, их направлением и скоростью.

Анализ текущей статистики по ветроэнергетике в мире показывает, что в 2020 году на возобновляемые источники энергии пришлось почти 90 % новых установленных генерирующих мощностей. За 2020 год построено 200 ГВт новой зеленой генерации, из них 65 ГВт пришлось на ветряные электростанции, что на 8 % больше, чем в 2019 году. Предварительные оценки Всемирной ветроэнергетической ассоциации являются более высокими – в соответствии с ними по итогам 2020 года новый глобальный рекорд ввода ветроэлектростанций составил свыше 90 ГВт, что на 50 % больше мощностей, установленных в 2019 году. Планируется, что к 2025 году возобновляемые источники энергии станут крупнейшим в мире источником электроэнергии после полувекового доминирования угля. В связи с чем, ветряные электростанции к 2050 году смогут поставлять более 1/3 всей электроэнергии в мире и стать основным видом генерации.

В России этим тенденциям не уделяется должного внимания, объемы ветроэнергетики малы и несопоставимы с темпами развития данного сектора в мире. События глобальной энергетики отражаются и на российском рынке. Введение трансграничного углеродного налога со стороны Европейского союза вызывает озабоченность, прежде всего в корпоративном секторе энергетики. Строительство и введение в эксплуатацию объектов ветроэнергетики поможет снизить экономические убытки от введения такого налога. Международные вызовы и текущая политическая ситуация могут стать стимулом для развития зеленых проектов на стыке энергетики и промышленности.

Вместе с тем, установленные целевые показатели в секторе возобновляемых источников энергии в России не достаточны. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 08 января 2009 г. № 1р «Об утверждении основных направлений государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года» в России предусмотрено достижение следующих долей возобновляемых источников энергии в генерации электроэнергии

(кроме ГЭС мощностью более 25 МВт) на период до 2024 года: 2010 год – 1,5 %, 2015 год – 2,5 %, 2024 год – 4,5 % (до 2015 года предполагалось достигнуть 4,5 % к 2020 году). Таким образом, в России цели на 2010 и 2015 гг. не реализованы и отсутствуют перспективы выполнения поставленной цели на 2024 год.

С 2015 года в России осуществляется государственная поддержка возобновляемых источников энергии на розничных рынках электроэнергии, однако ее вклад в развитие рынка не является значимым. Все российские стратегические документы предполагают, что ископаемое топливо продолжит составлять основу энергетического комплекса нашей страны, а использование электростанций, работающих от возобновляемых источников энергии (без учета крупных ГЭС) возможно лишь на отдельных ограниченных территориях. Так, Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной в июне 2020 года, определено только «повышение эффективности энергоснабжения удаленных и изолированных территорий», а в качестве показателя решения задачи предусмотрено снижение экономически обоснованных затрат на производство 1 кВт\*ч электроэнергии на территориях децентрализованного электроснабжения на 6 % к 2024 году и на 17 % к 2035 году. Таким образом, в настоящее время создание условий для развития зеленой энергетики с использованием любых возобновляемых источников не является задачей российского энергетического сектора на ближайшие десятилетия [3].

В Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики на период до 2035 года, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 июня 2017 г. № 1209р, определено увеличение установленной мощности генерирующих объектов возобновляемых источников энергии до 11,6 ГВт к 2035 году, что составит около 4,5 % от установленной мощности в стране и около 2% от генерации. Соответственно Генеральная схема не предусматривает выполнение цели по возобновляемым источникам энергии на 2024 год даже к 2035 году.

При этом ветроэнергетика успешно используется на коммерческой основе более чем в половине всех стран мира. В 2020 году доля ветроэнергетики в Дании составила 56 %, 40 % – в Уругвае, 36 % – в Литве, 35 % – Ирландии, 23 % – в Португалии, 24 % – в Великобритании, 23 % – в Германии, 20 % – в Испании, 18 % – в Греции, 16 % – в Швеции, 8 % – в США и 6 % – в Китае.

Крупнейшие ветряные комплексы созданы в самых густонаселенных странах мира. Так, мощность ветряной электростанции «Ганьсу» (Китай, введена в эксплуатацию в 2009 г.) составляет 7965 МВт, что сопоставимо с крупнейшими АЭС и ГЭС. И в ближайших перспективах китайского правительства довести эту цифру до 20 ГВт.

В Индии действуют два крупных ветроэнергетических объекта: ветряная электростанция «Муппандал» с установленной мощностью 1500 МВт, и ветряная электростанция «Джайсалмер» с общей мощностью производства 1,064 ГВт.

Российская Федерация по развитию ветроэнергетики значительно уступает другим странам. По состоянию на 2021 год все ветряные электростанции России имеют мощность всего 1700 МВт, что составляет 0,56 % от мощности всей энергосистемы. Наиболее крупные ВЭС: Кочубеевская (Ставропольский край, мощность 210 МВт), Каменско-Красносулинская (Ростовская область, 198 МВт), Адыгейская (Республика Адыгея, мощность 150 МВт), Гуково-1 (Ростовская область, мощность 98,8 МВт) введены в эксплуатацию в 2020 году. В 2021 году введена в эксплуатацию Азовская ВЭС (Краснодарский край) с мощностью 90,09 МВт [4].

Таким образом, в целом в России слабо используются возможности ветряных электростанций. Преобладают традиционные электростанции, которые удовлетворяют потребности населения, в связи с чем, субсидирование ветроэнергетики у нас в стране недостаточно.

Значительные перспективы развития ветряной энергетики связаны с использованием морской ветроэнергетики. Ожидается, что совокупная мощность морской ветроэнергетики во всем мире увеличится с 14 ГВт, зарегистрированных в 2016 году, до 41 ГВт в 2022 году. Европейские страны и Китай будут лидировать на рынке оффшорной ветроэнергетики. В последние годы европейский оффшорный сектор ветроэнергетики быстрыми темпами осваивается

на Северное море, что означает крупномасштабное коммерческое развертывание морских ветряных электростанций. К 2030 году планируемые новые морские ветряные электростанции в Северном и Балтийском морях будут иметь общую установленную мощность 45 ГВт и 8 ГВт соответственно. Например, крупнейшая в мире морская ветроэлектростанция Walney Extension вырабатывает экологически чистую электроэнергию для полумиллиона домов, что сопоставимо с возможностями атомной электростанции (659 МВт).

Эксплуатируемые морские ветряные электростанции внедрены по всему миру – большинство из них в Европе и Азии. В Европе оффшорные ветряные электростанции установлены в Бельгии (6 шт.), Финляндии (2 шт.), Дании (13 шт.), Германии (19 шт.), Ирландии (1 шт.), Нидерландах (6 шт.), Швеции (4 шт.) и Великобритании (30 шт.). Морской ветровой потенциал азиатского континента базируется в таких странах, как Китай (21 шт.), Япония (4 шт.), Южная Корея (2 шт.), Тайвань (1 шт.) и Вьетнам (2 шт.). При меньшем расширении оффшорного ветроэнергетического сектора США являются единственной страной в Северной и Южной Америке, имеющей оффшорные ветроустановки (1 шт.). Среди регионов Европа остается континентом с наибольшей установленной мощностью оффшорных ветроэлектростанций (16,3 ГВт), за которым следуют Азия (2,7 ГВт) и Америка (0,03 ГВт) [5].

Россия обладает значительным потенциалом развития оффшорной ветроэнергетики. Вместе с тем, Российская Ассоциация Ветроиндустрии отдает приоритет строительству наземных ветряных электростанций. В связи с чем, в ближайшее десятилетие создание российской оффшорной ветроэнергетики можно рассматривать, как глобальный вызов с политической и социальной точек зрения. Морские ветряные электростанции оказывают незначительное визуальное и шумовое воздействие, связанное с расстоянием до берега. Доступные морские районы могут обеспечить благоприятные ветровые условия. Кроме того, крупномасштабные проекты повлекут за собой создание значительного количества рабочих мест, что связано с крупным строительством с использованием передовых новейших материалов, созданием автономных систем мониторинга и современных систем электропередачи, совершенствованием цепочек поставок и созданием прибрежных логистических центров [6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
2. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Справочное и методическое пособие. – Москва, ИД «Энергия», 2010. – 315 с.
3. Ланьшина Т. Ветроэнергетический рынок России: потенциал развития новой экономики, 2021. URL: <http://library.fes.de/pdf files/bueros/moskau/17579-20210408.pdf> (дата обращения 20.10.2022).
4. Развитие возобновляемой энергетики на фоне энергетических кризисов // Энергетические тренды. Выпуск № 104, январь 2022. URL: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo\\_104.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo_104.pdf) (дата обращения 16.10.2022).
5. Ефимцева Т.В., Дьяконова А.А., Михайлова Е.С., Рахматуллина О.В., Салиева Р.Н. Возобновляемая энергетика в России и в других государствах ЕАЭС и СНГ: проблемы и перспективы правового регулирования // Вопросы российского и международного права, 2019. Том 9. № 12А. С. 90-110. URL: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-law-2019-12/11-efimtseva.pdf> (дата обращения 06.10.2022).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственное задание "Наука" № FSWW-2020-0017.

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, ассистент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Е.В. Бухаров, И.Н. Гусаров  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А93

Данная работа представляет возможность применения нейронных сетей в качестве релейной защиты электрооборудования. В ходе работы была спроектирован классификатор, определяющий наличие или отсутствие короткого замыкания в фазе по набору мгновенных значений тока.

## Обучение

Для обучения нейронной сети использовалась модель энергосистемы различных классов напряжения в программном комплексе Real Time Digital Simulator. В программном комплексе моделировалось короткое замыкание на различных элементах системы, при различных параметрах режима работы. Так варьировались значения мощности, выдаваемой генераторами, параметры нагрузки, место КЗ, сдвиг по фазе КЗ.

Данные одного моделирования представляют из себя таблицу из ста значений. Во время моделирования КЗ программа фиксирует 20 мгновенных значений нормального режима (один период), предшествующего короткому замыканию. Затем 80 мгновенных значений аварийного режима (4 периода). Для лучшего анализа режима требуются значения из нормального режима работа. Так нейронная сеть может чётко определить бросок тока в первый момент КЗ.

Также для обучения моделировались нормальные режимы. Так как при обучение нейронной сети только режимами короткого замыкания увеличивается вероятность её ошибки.

Всего было смоделировано 42 уникальных режима. 30 режимов КЗ и 12 нормальных режимов. Далее данные разделяются на тестовые и тренировочные. Тренировочные данные используются для непосредственного обучения нейронной сети. По тестовым производится проверка эффективности нейронной сети, для большей объективности тестовые данные и тренировочные должны быть различны.

## Структура

Нейронная сеть на вход как уже отмечалось получает мгновенные значения, для придания универсальности работы нейронной сети, происходит переход от абсолютных значений к относительным. Так программа отбирает модуль максимального значения тока в представленном наборе данных, затем все значения тока делятся на максимальное. Данный подход был выбран, так как позволяет использовать данные в промежутке от 0 до 1 (что необходимо для выбранной функции активации), а также помогает нейронной сети определять чёткую кратность увеличения тока.

## Функция активации

Функция активации предназначена для усреднения полученных значений между входным и промежуточным слоем, а также между промежуточным и выходным. Функция активации усиливает слабые сигналы и не даёт сильным сигналам критично повлиять на результат. Функцией активации для нейронной сети была принята сигмоида. Уравнение данной функции:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

График данной функции представлен на рисунке 1.

Так как нейронная сеть работает с гармоническими источниками, то значение тока может иметь около нулевое значения. Чтобы данные значения вносили свой вклад в конечный результат, требуется усиление данных сигналов [1]. Из графика видно, что при получении функцией на входе нулевого значения, на выход функция передаст значение 0,5. Так как оперирование идёт лишь в пределах от 0 до 1, то как отмечалось выше сигмоида усредняет значения.

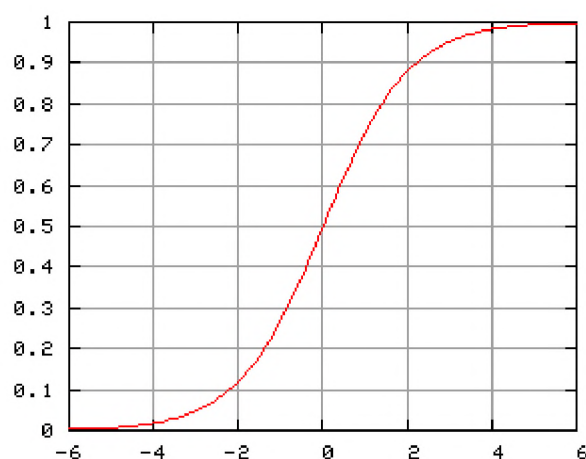


Рис. 1. График функции активации сигмоиды

Также в ходе исследования работы нейронной сети была выбрана оптимальной методика работы лишь с модулями значений токов. Данный выбор позволил ускорить процесс обучения, так как в ходе вычисления ошибки методом обратной ошибки избегается попеременное сложение и вычитание значений, что позволяет находить весовые коэффициенты с использованием метода градиентного спуска. Так же данное решение унифицирует нейронную сеть, так как становится непринципиальным начальное значение фазового сдвига.

#### **Допущения**

Нейронная сеть была обучена исключая возможность насыщения трансформаторов, данное допущение возможно устранить [2], но требует создание ещё одного классификатора, определяющего наличие высших гармоник, и моделирование режимов с насыщением и без насыщения.

Нейронная сеть обучалась на однофазных коротких замыканиях. Принципы, заданные нейронной сети, позволяют распространить область её работы и на другие типы коротких замыканий. Так текущая нейронная сеть, обученная только на однофазных коротких замыканиях, способна определять двухфазные фаза-фаза и трёхфазные короткие замыкания с эффективностью более 80 %.

#### **Результаты**

Данные режимов делятся на тренировочные и тестовые. Из общей тренировочной базы отбираются 8 режимов, исключаются из тренировочной базы и переносятся в тестовую. Нейронная сеть обучается на тренировочных данных и выдает анализ тестовых режимов. Для большей объективности тестовые данные были несколько раз заменены. То есть происходила ротации тестовых и тренировочных данных, но результаты работы неизменны.

В результате экспериментов были выбраны следующие параметры: количество эпох обучения (количество итераций прохождения тренировочных данных через нейронную сеть) может быть выбрано в пределах от 15 до 50. Количество узлов скрытого слоя составляет не менее 400 (в 4 раза больше входного слоя). Обучающий коэффициент от 0,05 до 0,3. Выбор начальных значений весовых коэффициентов по нормальному распределению с границами от 0 до значения обратного корня их количества узлов последующего слоя [3].

В итоге результативность нейронной сети для однофазных коротких замыканий составляет 100 %. Что означает, что даже обладая небольшим набором тренировочных данных нейронная сеть способна обучиться и быть использована в качестве защитного оборудования. Результат работы программы представлен на рисунке 2.

Важно отметить, что для сети существуют проблемные режимы, так, например, при невысоком броске тока короткого замыкания на выходе нейронной сети приходят значения менее 0,995, хотя в основном значения превышают данный показатель, что может свидетельствовать о высокой уверенности нейронной сети. Один из таких режимов можно наблюдать под номером 5, график тока по значениям представлен на рисунке 3.



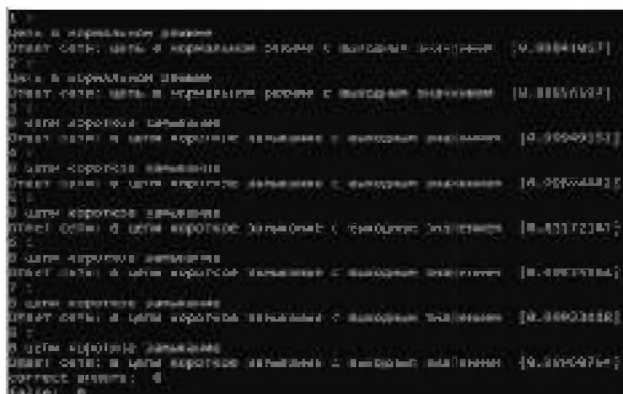


Рис. 2. Окно итогов режима работы программы

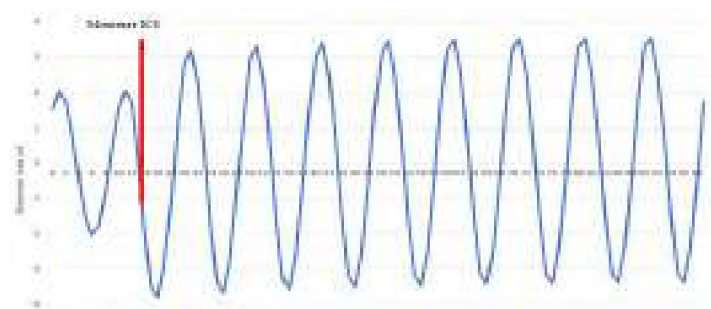


Рис. 3. График тока для пятого тестового режима

Для затруднительных режимов значение колеблется от 0,7 до 0,9. Но данный показатель всё равно является доминирующим, так как противоположенный вход получает значения лишь в пределах от 0,02 до 0,1. Данный факт свидетельствует о высокой точности нейронной сети. Возможность работы классификатора даже с низкими значениями токов коротких замыканий открывает возможность применения нейронной сети и как резервирующей защиты.

Так дальнейшим вектором работы является тренировка нейронной сети на режимы энергосистемы, схожие с короткими замыканиями, например, такие как бросок намагничивающего тока. Так же потенциал нейронной сети как защитной автоматики огромен, так как сеть способна по параметрам режима с высокой скоростью анализировать и чётко определять режим работы.

### Вывод

Нейронные сети являются перспективной разработкой дальнейшего развития релейной защиты и автоматики, так как в меньшей степени, чем классическая защита подвержены к ложным срабатываниям. На текущий момент уже сформирована защита от однофазных коротких замыканий со 100 % эффективностью. Дальнейшее развитие программы ведётся в обучении более сложным режимам. Если программа докажет в свою эффективность при работе и с такими режимами, то данный факт откроет возможность её применения в промышленности.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тарик Рашидов Создаем Нейронную сеть. – Москва: Вильямс, 2018. – 272 с.
2. Rudra, P. M. Power Transformer Differential Protection Based On Optimal Probabilistic Neural Network / P. M. Rudra, H. K. Verma, Tripathy Manoj. – // IEEE. – 2010. – № 25. – С. 102-112.
3. Fault Prediction of Intelligent Electricity Meter Based on Multi-classification Machine Learning Model / Jincheng Yan, Zelin Guo, Tiejiang Yuan [и др.]. // IEEE. – 2021. – С. 293-297.

Научный руководитель: к.т.н. М.В. Андреев, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В.Е. Рудник, Р.А. Уфа, Я.Ю. Малькова  
Томский политехнический университет

С каждым годом число проектов по внедрению энергетических объектов, функционирующих на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), увеличивается. Для разных частей энергосистем, в частности удаленных районов со слабыми связями, ВИЭ играют важную роль, когда речь заходит о электроснабжении потребителей. Одними из основных видов ВИЭ являются ветроэнергетические установки (ВЭУ) и фотоэлектрические установки (ФЭУ). При высокой доли внедрения ВИЭ в электроэнергетическую систему (ЭЭС) усугубляется задача управления и регулирования режима ЭЭС в случаях возникновения каких-либо возмущений [1, 2].

Особенностью современных крупных ФЭУ является способ подключения к сети с помощью инвертора, который выполнен на базе статического преобразователя напряжения. Динамические свойства такой связи отличаются от той что используется при подключении классических синхронных генераторов, соответственно снижается общая инерция энергосистемы в целом [3–6]. Таким образом, ввиду снижения общей инерции энергосистемы в зависимости от доли внедрения ВИЭ, появляются проблемы регулирования частоты, что связано с увеличением скорости изменения и отклонения частоты [5, 6].

Для решения обозначенной проблемы, возможно повысить инерционный отклик ФЭУ путем настройки и модернизации системы управления (СУ). Под модернизацией системы управления понимается применение блока синтетической инерции (СИ), а также настройка блока фазовой автоподстройки частоты [7–10].

На рисунке 1 представлена обобщенная схема блока синтетической инерции, которая используется в системе управления фотоэлектрической установки.

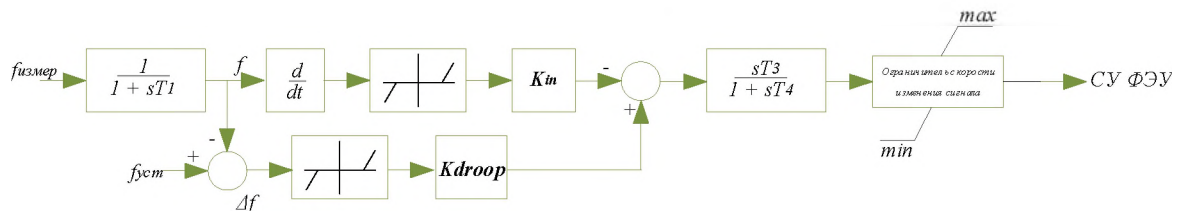


Рис. 1. Структурная схема блока двухканальной синтетической инерции

Применение дополнительных алгоритмов в системе управления ФЭУ позволяет обеспечивать отклик по частоте в виде выдачи мощности при изменении нагрузки в сети (отклик по частоте обеспечивается за счет наличия резерва мощности ФЭУ.), что отражает рисунок 2 [3, 6, 11].

Рисунок 2 демонстрирует, что с внедрением ФЭУ в ЭЭС наблюдается более глубокое снижение частоты до значения 41,16 Гц (кривая 3) при возмущении в ЭЭС (увеличение нагрузки в энергорайоне) в сравнении со сценарием без внедрения ФЭУ и том же возмущении, где частота снизилась до значения 49,48 Гц (кривая 1), данный сценарий считается более устойчивым, и чтобы приблизится к нему использовалась модернизация СУ ФЭУ. При применении блока СИ частота сети снижается с меньшей скоростью, величина снижения частоты становится меньшей (кривая 2). Для получения более устойчивого переходного процесса возможно варьировать коэффициенты  $K_{in}$  и  $K_{droop}$  блока СИ.

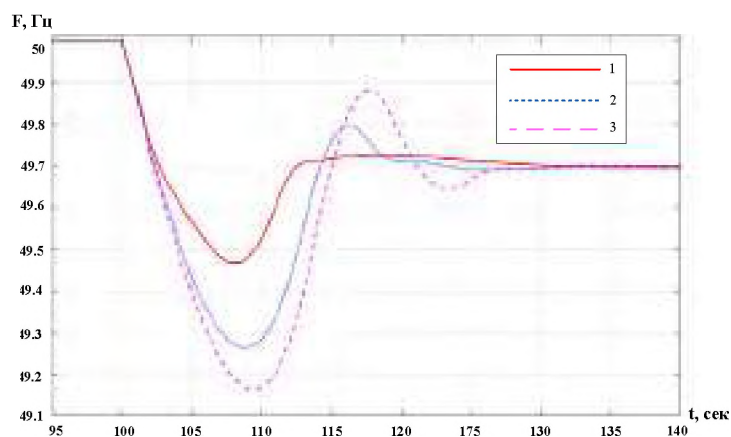


Рис. 2. Осциллограммы изменения частоты энергосистемы:  
 кривая 1 – изменение частоты без внедрения фотоэлектрической установки, кривая 2 – изменение частоты с внедрением фотоэлектрической установки с модификацией системы управления, кривая 3 – изменение частоты с внедрением фотоэлектрической установки без модификации системы управления

Результаты показывают, что при изменении нагрузочного режима в сети с солнечной генерацией величина снижения частоты становится значительной, также возрастает скорость изменения частоты. Модернизация СУ ФЭУ приближает переходный процесс к традиционным ЭЭС и позволяет поддерживать устойчивую работу ЭЭС. Резервируемая мощность в ФЭУ, которая инжектируется за счет использования блока СИ, обеспечивает необходимый инерционный отклик.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Wu J. Z., Yan J. Y., Jia H. J., Hatziaargyriou N., Djilali N., Sun H. B. Integrated energy systems // Applied Energy, 2016, vol. 167, pp. 155–157. doi:10.1016/j.apenergy.2016.02.075.
2. Renewable Energy Market Update 2021 // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021>.
3. Huang S., Schmall J., Conto J., Adams J., Zhang Y., Carter C. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-7. doi: 10.1109/PESGM.2012.6344713.
4. Liu H. et al. Subsynchronous Interaction between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks // IEEE Transactions on Power Systems, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4708-4720. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2682197.
5. Rudnik, V.E., Ufa, R.A., Malkova, Y.Y. Analysis of low-frequency oscillation in power system with renewable energy sources // Energy Reports, 2022, 8, pp. 394–405.
6. Ufa, R.A., Malkova, Y.Y., Rudnik, V.E., Andreev, M.V., Borisov, V.A. A review on distributed generation impacts on electric power system // International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(47), pp. 20347–20361.
7. Cheng Y., Azizipanah-Abarghooee R., Azizi S., Ding L., Terzija V. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review // Applied Energy, 2020, vol. 279, 115798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115798>.
8. JWG C2/C4.41: Impact of High Penetration of Inverter-based Generation on System Inertia of Networks // [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cigre.org/publication/wbn022-impact-of-high-penetration-of-inverter-based-generation-on-system-inertia-of-networks>.
9. Johnson S.C., Rhodes J.D., Webber M.E. Understanding the impact of nonsynchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways // Applied Energy, 2020, vol. 262, 114492. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>.

10. Seneviratne Chinthaka, Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 57, pp. 659-668. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.051.
11. Рудник В.Е., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности // iPolytech Journal, 2022. Т. 26. № 3. С. 465-486.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 21-79-00275.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

## ЗАЩИТА ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 0,4 КВ

М.Ю. Покацкий, Е.Д. Троицкий  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А04

В современных домах стало нормой, что в распределительных щитках должны устанавливаться электросчетчик, автоматические выключатели, и многие другие компоненты, но целью данной работы является рассказать почему следует применять ограничитель перенапряжения (ОПН) в сетях 0,4 кВ. Принцип работы ОПН строится на том, что при штатной работе он не пропускает ток, но в случае возникновения перенапряжения, ограничитель перенапряжения способен резко понизить свое сопротивление, побуждая импульс пройти через него, тем самым убережет содержимое щитка, либо бытовые приборы.

На рисунке 1 показаны примерные размеры 8 корпуса ТПУ, высота  $H$  равняется примерно пятнадцати метрам. Используем формулу для вычисления вероятности удара молнии в дом с определенными размерами:

$$N = ((A + 6H)(B + 6H) - 7,7 \cdot H^2) \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $A$  – длина здания, 120 м;  $B$  – ширина здания, 102 м;  $H$  – высота здания, 15 м;  $n$  – среднегодовое число ударов молнии в 1 км<sup>2</sup> земной поверхности, 1/(км<sup>2</sup>\*год) (по данным, в Томской области, среднегодовое число ударов молнии на км<sup>2</sup> равняется 4,2).

Используя формулу 2, вычислим период прямого удара молнии по зданию.

$$T = \frac{1}{N}. \quad (2)$$



Рис. 1. Линейные размеры 8 корпуса ТПУ

Подставляя данные в формулу, получается, что молния ударяет 1 раз в 6 лет. На основе полученной информации делаем вывод, что удар молнии и, соответственно, появление импульсного перенапряжения достаточно вероятно. В таком случае, электрооборудование может

получить большой ущерб, либо выйти полностью из строя. Ремонт или замена электрооборудования довольно трудоемкий процесс, который займет время и требует дополнительных вложений. ОПН, по себестоимости, существенно дешевле, чем ремонт какого-либо оборудования. Для наглядности составим принципиальную схему освещения условного помещения, которая работает от сети 380 В (рисунок 2).

На принципиальной схеме освещения изображены: А, В, С – фазные шины, QF1 и QF2 – автоматические трехполюсный и четырёхполюсный выключатели, соответственно, HRL1 – HRL9 лампы с выводом на нейтраль, ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН), который служит для защиты осветительной части схемы. После того, как автоматические выключатели QF1 и QF2 взведены, схема готова к работе. Схема работает в нормальном режиме, но в случае каких-либо неисправностей, а в частности – возникновение перенапряжения на участке цепи, то ОПН переходит из штатного режима в «рабочий», его сопротивление резко снижается и через варистор проходит разряд на шину заземления.

Выше был рассмотрено явления импульсного перенапряжения, вызванного ударом молнии, но также импульсное перенапряжение может быть вызвано коммутационными явлениями в сети. Эти импульсные перенапряжения могут вывести из строя или серьезно сократить сроки эксплуатации оборудования. Ниже приведен пример осциллограммы импульсного перенапряжения при коммутации в сети (рисунок 3).

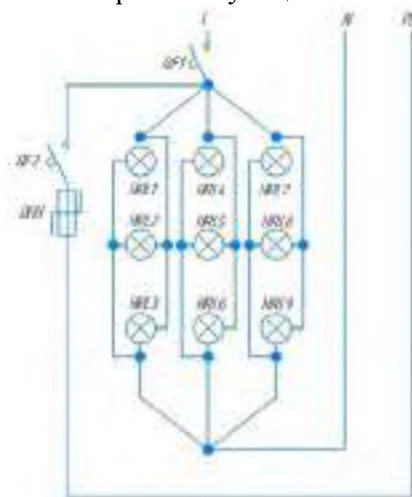


Рис. 2. Принципиальная схема электрической цепи помещения

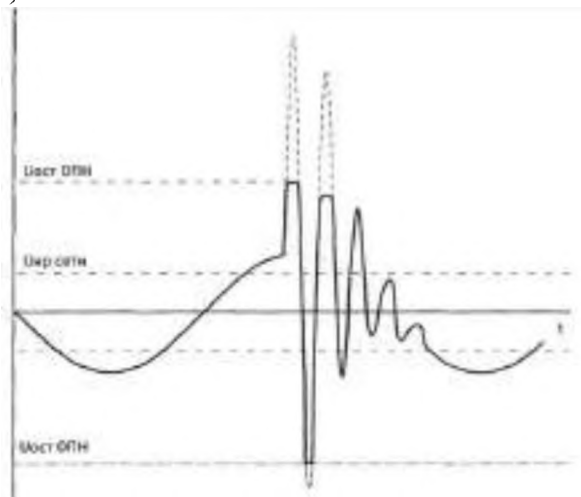


Рис. 3. Осциллограмма импульсного перенапряжения

На рисунке 3 показана осциллограмма работы сети и всплеск напряжения, вызванный коммутацией. На этом графике видна суть работы ограничителя перенапряжения, как только напряжение достигает номинального для выбранного ограничителя, варистор переходит в открытое положение, следовательно, избыток напряжения уходит на заземление. В данном случае разумно будет установить ОПН параллельно оборудованию, которое необходимо защитить.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Инструкция по эксплуатации средств защиты от перенапряжений. РД 34.35.514 (И 34-70-021-85). – М.: Энергия, 2012. – 136 с.
2. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,22–10 кВ от грозовых перенапряжений СТО 56947007-29.240.02.001-2008. – М.: Энергия, 2014. – 72 с.
3. Цапенко, Е. Ф. Перенапряжения в системах электроснабжения / Е.Ф. Цапенко. – М.: Горная книга, 0. – 86 с.

Научный руководитель М.М. Попов, ст. преп. ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ЧЕТВЕРТОГО ТИПА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПО ЧАСТОТЕ

П.П. Радько<sup>1</sup>, А.В. Бахур<sup>2</sup>, И.А. Разживин<sup>3</sup>  
Томский политехнический университет<sup>1,2,3</sup>  
ИШЭ, доцент ОЭЭ<sup>1,2,3</sup>, группа 5АМ21<sup>1</sup>, группа 5АМ2Н<sup>2</sup>

Инерция от вращающихся масс генераторов на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях представляет собой источник кинетической энергии, которая используется чтобы дать сети время отреагировать на возмущение в течение нескольких секунд. Именно инерция не позволяет частоте изменяться скачком, и чем больше значение постоянной инерции, тем проще системе поддерживать номинальное значение частоты [1].

Однако из-за глобальной тенденции перехода к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) общесистемное значение постоянной инерции уменьшается. Солнечные электростанции в принципе не имеют вращающихся частей, способных накопить кинетическую энергию, в то время как ветроэнергетические установки (ВЭУ) не могут напрямую использовать энергию вращающихся масс из-за того, что они отделены от сети силовыми преобразователями (рисунок 1) [2].

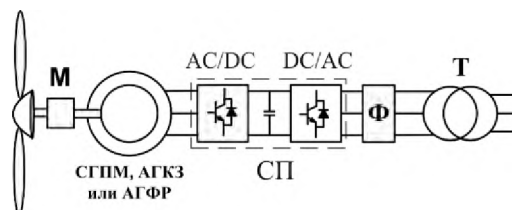


Рис. 1. Схема подключения ВЭУ посредством преобразователя полной мощности (ВЭУ 4-го типа): АГКЗ – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; АГФР – асинхронный генератор с фазным ротором; СГПМ – синхронный генератор с постоянным магнитом; М – мультипликатор; Т – трансформатор

Одной из мер увеличения постоянной инерции в электрической сети является использование кинетической энергии вращающейся части ВЭУ (рисунок 2) с помощью специальных каналов управления (рисунок 3). Инерционный отклик в этом плане обеспечивается таким же образом, что и при традиционных генераторах, только если там значение инерции определяется непосредственно массой ротора, то при ветряных электроустановках инерция обеспечивается косвенно, через их систему управления. Соответственно блоки управления, с помощью которых достигается увеличение постоянной инерции, называются блоками синтетической инерции (СИ) [3].

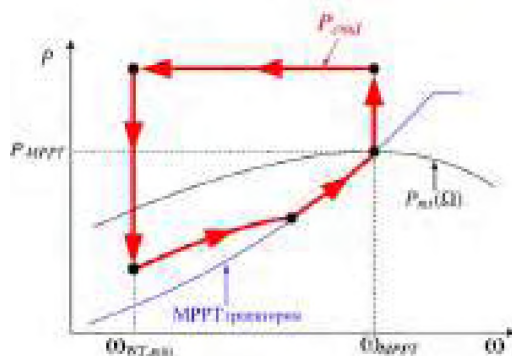


Рис. 2. Диаграмма процесса высвобождения кинетической энергии ветряного колеса

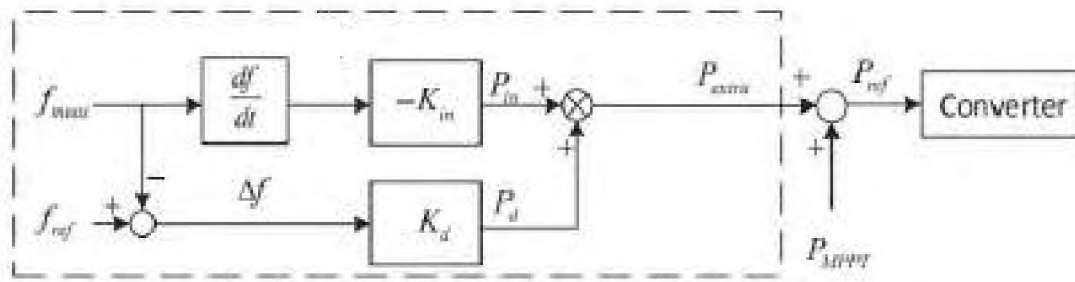


Рис. 3. Структурная схема модуля синтетической инерции

Анализу влияния синтетической инерции в ветроэнергетической установке 4-го типа на устойчивость по частоте и посвящена данная работа.

Для исследования частоты системы используется учебная тестовая модель ЭЭС 9 bus IEEE, представленная на рисунке 4. Объем мощности, вырабатываемый ветряной электростанцией (ВЭС), которую образуют ВЭУ 4-го типа, постепенно замещает объем мощности от синхронного генератора Г3. Опыты проводятся путем моделирования увеличения нагрузки для случаев 80 %, 50 % и 25 % замещения традиционной генерации на ВЭУ. Соответственно, в опыте без ВЭУ шина 7 была отключена при включении шины 6, а в опыте 80 %-ого замещения традиционной генерации на ВЭУ наоборот. При этом объем общей генерируемой мощности, как и величина наброса нагрузки, были одинаковыми во всех трех опытах. Модель реализована в программном комплексе «Eurostag».

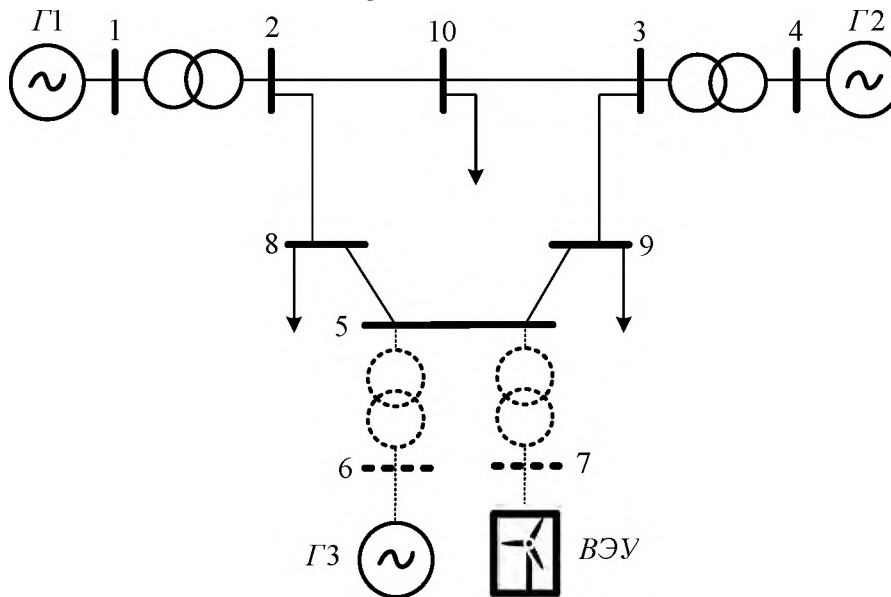


Рис. 4. Схема сети 9 bus IEEE

### 1. Оценка влияния на частоту при 80 % замещения ВЭУ

Из результатов первого эксперимента, приведенных на рисунке 5, можно сделать два вывода. Во-первых, при значительной доле ВЭУ в энергосистеме из-за уменьшения постоянной инерции скорость изменения частоты действительно увеличивается (сравнение красной и зеленой осциллограммы). Во-вторых, применение синтетической инерции позволяет значительно сократить максимальное отклонение частоты и длительность переходного процесса (сравнение красной и синей осциллограммы). Второй и третий опыты посвящены исследованию настроек управления синтетической инерцией.

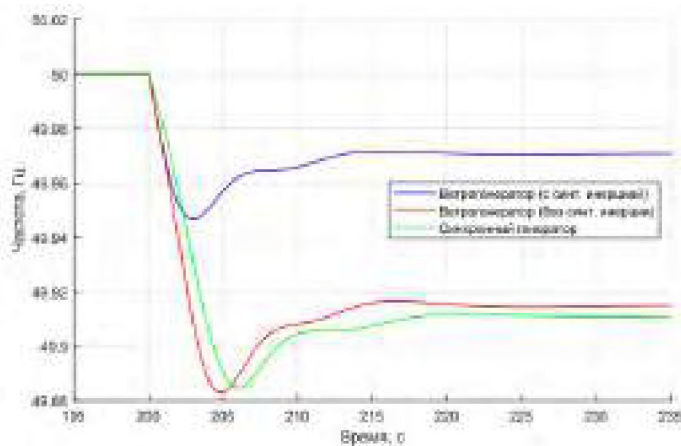


Рис. 5. Осциллограммы частоты при 80% замещения

### 2. Оценка влияния на частоту при 50 % замещения ВЭУ

Из графика на рисунке 6 видно, как значение коэффициентов влияет на поведение частоты в энергосистеме. Если увеличить коэффициент  $K_i$ , отвечающий за скорость изменения частоты, можно достичь более плавного изменения параметра. Однако с увеличением данного коэффициента частота будет увеличивать величину падения, что может негативно сказаться на энергосистеме. Поэтому сильно замедлить падение частоты не получится.

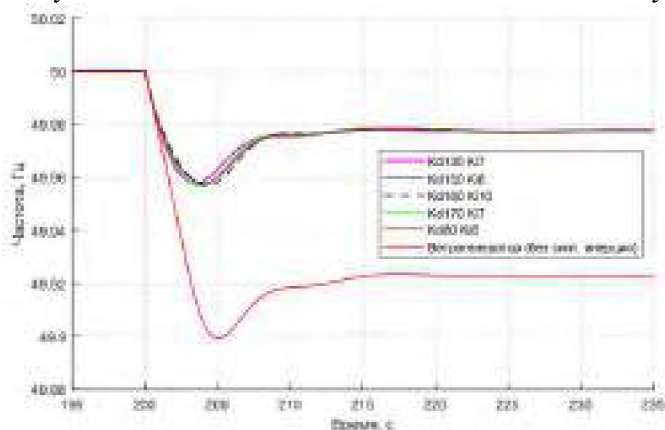


Рис. 6. Осциллограммы частоты при 50% замещения

### 3. Оценка влияния на частоту при 25 % замещения ВЭУ

Как видно на графике, приведенном на рисунке 7, при неправильно выбранных значениях коэффициентов (пунктирная осциллограмма) система становится нестабильной и долго не может перейти в установившейся режим.

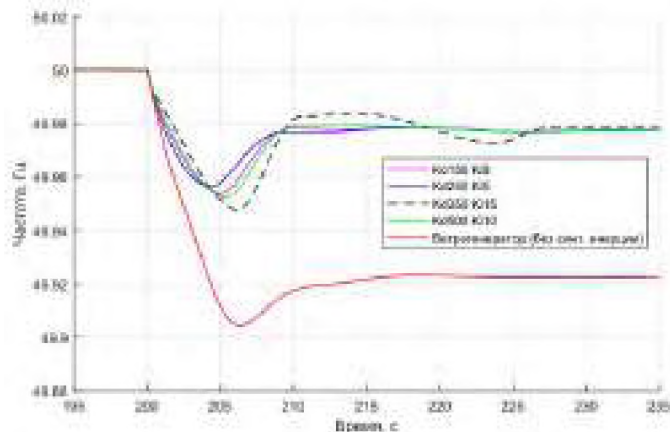


Рис. 7. Осциллограммы частоты при 25% замещения



Применение метода высвобождения кинетической энергии ветряного колеса ВЭУ 4-го типа в связке с модулем СИ может привести к нарушению устойчивой работы ВЭУ. Стабильная работа обеспечивается лишь в некотором диапазоне коэффициентов модуля СИ.

Наблюдаемая неустойчивость работы ВЭС 4-го типа обуславливается реактивным набором скорости ветрового колеса свыше номинальной после торможения ротора.

Исследование показало, что внедрение в энергосистему возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок 4-го типа, влечет за собой более резкое изменение частоты после возмущений. Однако применение блоков синтетической инерции улучшает устойчивость системы, значительно сокращая предельное отклонение частоты. В свою очередь неправильная настройка параметров управления может привести к тому, что даже при относительно небольшой доле внедрения ВИЭ переходный процесс будет длиться значительно дольше и опаснее.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Xiong, Liansong, Yujun Li, Yixin Zhu, Ping Yang, "Coordinated Control Schemes of Super-Capacitor and Kinetic Energy of DFIG for System Frequency Support" *Energies* 11, no. 1: 103. 2018 <https://doi.org/10.3390/en11010103>.
2. Teodorescu, R. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems* / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez // Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
3. P. Tielens and D. Van Hertem, "Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables," in *Young Researcher Symposium Delft*, April 2012, pp. 1- 6.

Научный руководитель: к.т.н. Рубан Н. Ю., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УЗЛОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ**

Ю.Д. Бай, Б.Д. Малюта, П.П. Радько  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ

#### **Введение**

В связи с наблюдающейся в последние 15–20 лет тенденцией роста электропотребления актуальной задачей является устойчивое развитие электроэнергетических систем (ЭЭС). Учитывая стремление ведущих стран к энергетической независимости, в настоящее время активно внедряется низкоуглеродная энергетика на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Одной из основных задач при внедрении ВИЭ в существующие электроэнергетические системы без дополнительных изменений в сети является максимизация выработки электроэнергии с наименьшими потерями мощности и соблюдение требований сети.

В случае использования метаэвристических алгоритмов оптимизации нахождение глобального оптимума в общем случае не может быть гарантировано. В статье предложен метод повышения достоверности расчета вероятностных характеристик потерь мощности для оптимальной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) и их размещения.

#### **Используемый метод определения вероятностных параметров**

В первую очередь, реализуется алгоритм определения вероятностных параметров установившихся режимов [3] для предварительного определения возможных мест присоединения ветроэнергетической установки (ВЭУ). Для данной цели была отобрана тестовая схема

IEEE-14 [4]. Вторым этапом является определение вероятностных характеристик потерь мощности в ответвлениях цепи. Наибольшие потери наблюдаются в линиях 1, 2, 8, 10, 14 (рисунок 1). Потери мощности наблюдались и на других линиях, однако, в соответствии с топологией ЭЭС и местами подключения ВЭУ, их потери меньше.

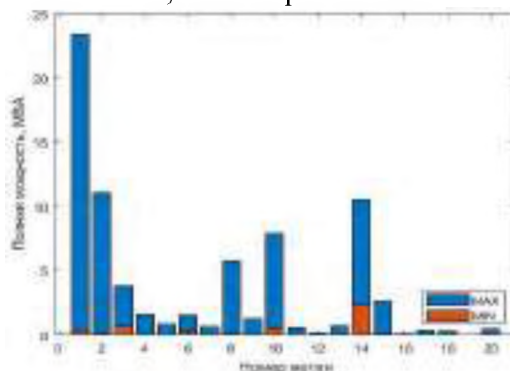


Рис. 1. Потери полной мощности в ЭЭС

Для рассмотрения дальнейшего подключения ВЭУ выделены ветви 1, 2, и 14. Согласно финальной оценке вероятностных характеристик напряжений, полученных данных, для присоединения выбраны узлы №2, 5, и 8. Планируемая мощность подключения – 5, 10, 20 и 50 МВт [5].

Таблица 1. Вероятностные данные потерь мощности выборки ветвей

Ветвь	$\Phi Z_{\min}$	$\Phi Z_{\max}$	$\Phi P > 0,99$	$\Phi Z$ (%) от $\Phi Z_{\max}$
$S_{л1}$ , МВА	0,3617	23,3366	5,34	23,24
$S_{л2}$ , МВА	0,203	11,035	5,168	47,71
$S_{л14}$ , МВА	2,317	10,534	6,563	53,93

### Эксперименты

Далее были проведены эксперименты по внедрению ВИЭ. Во время основного эксперимента, согласно алгоритму, ВЭУ с заданным законом распределения и мощностью была подключена к ряду predetermined узлов. По завершению, была сформирована таблица полных результатов, включающая данные об изменениях потерь электроэнергии в основных исследуемых ветвях, общих потерях и соответствующих вероятностных характеристиках и их параметрах [6]. В таблице 2 приведена краткая выдержка основных вероятностных параметров общих потерь мощности схемы IEEE-14 при подключении ВЭУ ко 2-му узлу.

Таблица 2. Выдержка основных вероятностных параметров полных потерь мощности

Шина подключения	Мощность ВЭУ, МВт	ЗРВ ветра	$\mu$	$M_0$	$\sigma$	Максимум $\Phi Z$	$\Phi P > 0,99$
Данные установившегося режима			16,95	16,62	1,62	78,17	18,54
Данные с учетом нормально допустимых требований			20,35	19,46	1,95	82,08	22,25
№2	5,00	Weibull	17,28	17,19	0,65	75,60	19,48
		Rayleigh	17,28	17,39	0,65	76,90	19,72
		Normal	17,09	16,80	0,61	76,94	19,72
	10,00	Weibull	17,75	17,76	0,67	75,60	20,05
		Rayleigh	17,74	17,58	0,68	78,23	19,96
		Normal	17,32	17,59	0,62	78,32	19,94
	20,00	Weibull	18,78	18,91	0,72	75,60	21,20
		Rayleigh	18,73	18,61	0,77	80,96	21,08
		Normal	17,79	18,01	0,66	81,13	20,48
50,00	Weibull	19,36	19,36	0,78	90,27	22,14	
	Rayleigh	22,24	22,08	1,10	89,79	25,54	
	Normal	21,34	21,03	1,22	92,17	23,45	
5	5,00	Weibull	17,31	17,19	0,64	77,22	19,79
		Rayleigh	17,30	17,44	0,65	77,16	19,79
		Normal	17,10	16,86	0,62	77,29	19,79
	10,00	Weibull	17,36	17,18	0,63	75,41	20,06

Шина подключения	Мощность ВЭУ, МВт	ЗРВ ветра	$\mu$	$M_0$	$\sigma$	Максимум ФЗ	ФРВ > 0,99
		Rayleigh	17,89	17,71	0,69	78,78	20,11
		Normal	17,36	17,13	0,63	78,89	20,13
		Weibull	18,97	18,93	0,74	75,38	21,21
	20,00	Rayleigh	18,92	18,88	0,79	82,27	21,39
		Normal	17,88	17,65	0,67	82,50	20,80
		Weibull	23,82	23,92	1,00	75,27	26,74
	50,00	Rayleigh	23,60	24,05	1,21	93,52	26,92
		Normal	20,20	19,84	0,77	94,16	23,44
		Weibull	19,05	18,96	0,73	76,60	21,29
8	5,00	Rayleigh	18,99	19,16	0,77	81,29	21,64
		Normal	18,03	17,92	0,68	81,44	20,41
		Weibull	21,30	21,29	0,85	76,60	23,62
	10,00	Rayleigh	21,19	21,30	0,96	86,21	23,95
		Normal	19,08	19,32	0,72	86,52	21,98
		Weibull	26,37	26,53	1,15	76,60	28,86
	20,00	Rayleigh	26,11	26,23	1,44	96,72	29,23
		Normal	21,37	21,00	0,83	97,41	24,79
		Weibull	46,18	46,64	2,55	90,74	50,14
	50,00	Rayleigh	45,15	45,95	3,59	133,93	50,19
		Normal	45,15	45,95	3,59	133,90	47,19

По этим данным определяется разница в изменении потерь мощности при подключении ВЭУ к одному узлу с разными законами ветра (рисунок 2) и ко всем узлам с одинаковым законом (рисунок 3).

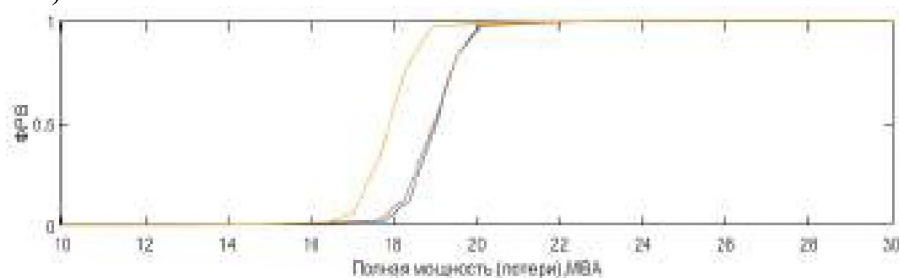


Рис. 2. Изменение ФРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с разным ЗРВ ветра мощностью 20 МВт в узел 5

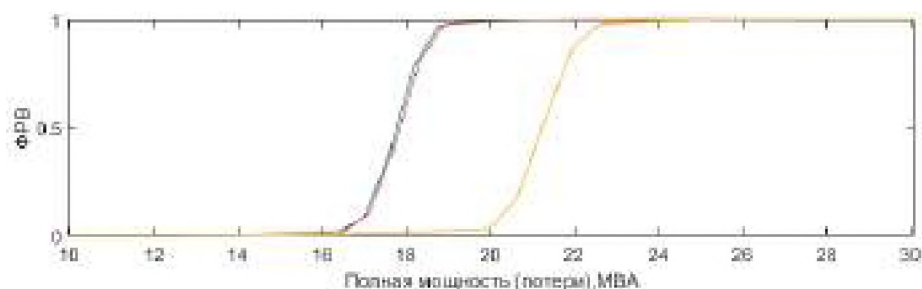


Рис. 3. Изменение ФРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с ЗРВ Рэля мощностью 10 МВт в перечень узлов

Согласно полученным данным:

- для мощности подключения ВЭУ равной 5 МВт оптимальным вариантом будет: № 2 (нормальный закон);
- для мощности подключения ВЭУ равной 10 МВт в узле № 8 возможно использование только нормального закона. Оптимальным вариантом будет: № 5 (закон Вейбулла);
- для мощности подключения ВЭУ 20 МВт оптимальным вариантом будет: № 5 (нормальный закон);
- мощность подключения ВЭУ 50 МВт допустима только к узлу № 2 (закон Вейбулла).

## **Выводы**

В данной работе получены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, имеющие отношение к изучению оптимальных сценариев подключения ВЭУ. Проведенные контрольно-экспериментальные исследования подтвердили свойства и возможности разработанного метода повышения достоверности формирования вероятностных характеристик установившихся параметров ЭЭС, в том числе значений редкой повторяемости.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Преобразование глобальной энергетической системы: дорожная карта до 2050 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/>.
2. Optimal Placement of Wind Farm on the Power System Using Multiobjective Bees Algorithm / Ph. Prakornchai // Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011. – V. 10. – P. 1–5.
3. Stochastic Modeling of a DFIG Wind Turbine in Matpower / Y.D. Bay, A.S. Gusev, A.A. Suvorov, I.A. Razzhivin, A.B. Askarov // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 76005–76014.
4. Design, Simulation, and Construction of an IEEE 14-Bus Power System / J. Boudreaux – Louisiana: Louisiana State University, 2009. – 42p.
5. Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scott G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [Электронный ресурс] // NREL, Colorado, USA, Tech. Rep. NREL/TP-500-38060. – 2009. – 75 p.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание "Наука" № FSWW-2020-0017.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. М.В. Андреев, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ОБЪЕКТА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Я.Ю. Малькова

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ11

Ввод нового объекта генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) предупреждает процедура определения параметров данного объекта, в том числе, его мощности и узла подключения к энергосистеме, а также параметров оборудования, размещаемого совместно, например, системы накопления энергии (СНЭ) [1, 2].

В том случае, если объект ВИЭ – автономный (здесь и далее по тексту под объектом ВИЭ будем поднимать солнечную электростанцию), в качестве единственного источника заряда СНЭ выступает сам объект локальной генерации.

Так, СНЭ может заряжаться в дневные часы, когда генерация объекта ВИЭ достигает своего максимального значения, а текущая нагрузка при этом минимальна. Затем, накопленную энергию можно использовать в часы пикового спроса на электроэнергию: в вечерний пик в течение этих же суток или же на следующий день, во время утреннего пика [3]. Кроме того,

в зависимости от той формы, в которую переводится излишне выработанная мощность объекта ВИЭ, может быть рассмотрен также и вариант длительного хранения запасенной энергии, в случае экономической целесообразности последнего.

При решении оптимизационной задачи выбора оптимальных параметров размещаемой совместно с объектом ВИЭ СНЭ (в составе объекта ВИЭ) «излишек» мощности генерации, который подлежит накоплению СНЭ, может быть оценен по идеальному графику выработки мощности объекта ВИЭ, для чего необходимо лишь обладать сведениями об установленной мощности объекта генерации [4, 5].

В работе зададимся целью установить корректность использования идеального графика выработки мощности объекта ВИЭ при определении оптимальной емкости и режима работы, размещаемой совместно с объектом ВИЭ СНЭ. Расчетный эксперимент проведем на примере реальных данных, полученных с автономной солнечной электростанции, расположенной на территории карбонового полигона ГГНТУ имени акад. М.Д. Миллионщикова.

Для анализа имеются данные суточной солнечной инсоляции (изменения солнечной инсоляции в течение суток) для двух сезонов года: летнего и осеннего соответственно. Выберем контрольные дни для каждого из сезонов года, а именно: для лета – 9 августа 2022 г., для осени – 6 сентября 2022 г. Используя данные, построим следующие графики и для наглядности представим их в одних осях (рисунки 1а и 1б):

- идеальный график выработки мощности объекта ВИЭ;
- реальный график выработки мощности для летнего сезона (рисунок 1а);
- реальный график выработки мощности для осеннего сезона (рисунок 1б).

Согласно рисунок 1а и рисунок 1б, можно сделать вывод, что использование идеального графика в контексте обозначенной выше оптимизационной задачи определения оптимальной емкости и режима работы, размещаемой совместно с объектом ВИЭ СНЭ, без введения соответствующих поправочных коэффициентов для учета географии местности локализации объекта местной генерации и сезонов года не является корректным. Полученное таким образом решение задачи не будет являться оптимальным. В случае автономной солнечной электростанции выбор емкости СНЭ, значительно превышающей «излишек» выработка мощности объектом генерации, определяет недоиспользование всего имеющегося энергетического потенциала СНЭ.

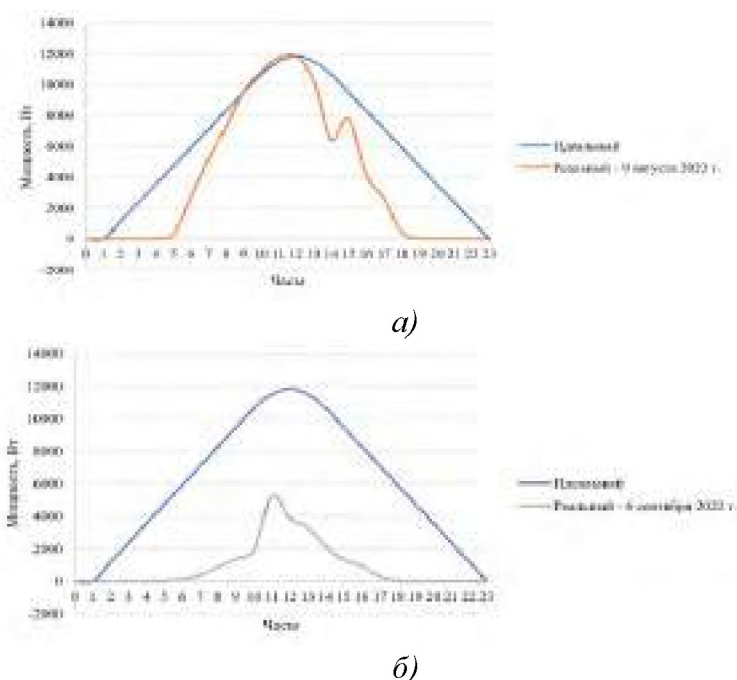


Рис. 1. Суточные графики (идеальный и реальный) выработки мощности автономной солнечной электростанции, размещенной на территории карбонового полигона ГГНТУ имени акад. М.Д. Миллионщикова, в зависимости от сезона года: а) для летнего сезона; б) для осеннего сезона

В свою очередь, в отсутствие необходимости разряда СНЭ непосредственно на месте следует рассмотреть возможность организации и проведения следующих мероприятий на исследуемой автономной солнечной электростанции:

– увеличить емкость существующей СНЭ на аккумуляторных батареях и снабжать электроэнергией близлежащего потребителя;

– преобразовывать «излишек» в водород, который затем (а) переводить в электроэнергию в непосредственной близости от конечного потребителя (КПД двойного преобразования водорода находится в диапазоне 50–70 %) или же (б) переводить в аммиак и использовать в качестве удобрений для сельскохозяйственных нужд, либо же поставлять в виде аммиака в другие отрасли экономики, например, в качестве топлива для морского транспорта.

Таким образом, при использовании идеального графика выработки мощности объекта возобновляемой генерации в контексте решения оптимизационной задачи определения оптимальной емкости и режима работы, размещаемой совместно с объектом ВИЭ СНЭ полученное решение не будет являться оптимальным. Для корректности и адекватности проведенных расчетов необходим ввод соответствующих поправочных коэффициентов, а также проведение дополнительных исследований функционирования СНЭ в составе объекта ВИЭ в современных энергосистемах, характеризующихся существенной долей возобновляемой генерации в суммарной мощности генерации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Wu Q., Zhou J., Liu S., Yang X., Ren H. Multi-objective optimization of integrated renewable energy system considering economics and CO2 emissions // *Energy Procedia*, 2016. – V. 104. – P. 15-20.
2. Suresh M.C.V., Belwin E.J. Optimal DG placement for benefit maximization in distribution networks by using dragonfly algorithm // *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2018. – V. 5. – Is. 4. – P. 1-8.
3. De A., Mittal A. An optimal positioning and voltage stability analysis of renewable distributed generation and grid integrated energy systems – a review // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER)*, 2019. – V. 9. – Is. 2. – P. 13-20.
4. Ufa R.A., Malkova Y.Y., Rudnik V.E. Andreev M.V., Borisov V.A. A review on distributed generation impacts on electric power system // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. – V. 47. – Is. 47. – P. 20347-20361.
5. Fadaee M., Radzi M.A.M. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. – V. 16. – Is. 5. – P. 3364-3369.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **АВТОМАТИКА РАЗГРУЗКИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ И УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ СИНХРОННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

К.К. Якименко

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Сегодняшняя стадия развития сферы электроэнергетики влечет за собой изменения состава и процентного соотношения генерирующего оборудования, принципов и логики противоаварийного и режимного управления при протекании переходных процессов, характер ко-

торых также меняется. Появляются новые особенности сохранения надежности и устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС), баланса мощности. Возникают сложности в управлении режимами, которые не были характерны для традиционных систем, основанных преимущественно на углеродсодержащем топливе. Среди направлений развития ЭЭС, которые влияют на развитие систем противоаварийной автоматики (ПА), можно выделить [1]:

- активно растущая доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ), влияние которых на режим ЭЭС сказывается в отсутствии вращающихся масс, что проявляется в снижении суммарной инерции (системы с меньшей инерцией в случае серьезных аварий теряют свою устойчивость быстрее из-за большей скорости изменения режимных параметров), наличии непостоянных перетоков активной мощности в сети из-за стохастического характера генерации ВИЭ;

- развитие методов цифровой обработки сигналов позволяет организовывать своевременное противоаварийное управление с учётом актуального состояния аварийного процесса;

- улучшение производительности и ускорение быстрогодействия вычислительных систем и алгоритмов, которые смогут осуществить и выбрать управляющее воздействие (УВ) с минимальными задержками по времени.

Одним из ключевых требований при управлении ЭЭС является соблюдение требований к устойчивости параллельной работы энергосистемы, то есть сохранению синхронизма в системе. В соответствии с «Методическими указаниями по устойчивости» [2], статическая апериодическая и динамическая устойчивость (ДУ) должны сохраняться при наиболее тяжёлых нормативных возмущениях, как короткие замыкания с отключениями элементов сети, скачкообразный аварийный небаланс активной мощности по любым причинам, то есть нормативных возмущениях.

При решении задачи предотвращения нарушения динамической устойчивости следует принимать во внимание особенности электромеханических переходных процессов на слабых и сильных связях. На слабых связях, к которым в основном относятся межсистемные связи, менее вероятны нарушения динамической устойчивости. Дело в том, что относительное скольжение, вызванное возмущением, является незначительным для нарушения устойчивости. Поэтому автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) для данных связей обеспечивает условия статической апериодической устойчивости. Так как рассматриваются нормативные возмущения, применяются нормальные и ремонтные схемы и в послеаварийных режимах. Сильная связь – общее число линий, связывающих отдельную электростанцию с энергосистемой. Сильные связи с большей вероятностью подвержены возможности нарушения ДУ, потому что их предел по статической апериодической устойчивости значительно превышает суммарную мощность меньшей из соединяемых частей системы [3].

На базе современных программных комплексов можно смоделировать множество вариантов ЭЭС и различные варианты нормативных возмущений в них. Большая часть экспериментов покажет, что при тяжёлых нормативных возмущениях нарушится синхронная динамическая устойчивость (СДУ). Именно поэтому в данный момент активно ведутся исследования в этой области для сохранений устойчивости и надежности системы.

Автоматику для предотвращения нарушения СДУ при названных выше возмущениях принято называть «Автоматика разгрузки при близких коротких замыканиях и затяжных коротких замыканиях (АРБКЗ и АРЗКЗ)». Автоматика разгрузки при коротких замыканиях наравне с автоматикой разгрузки при отключении ЛЭП, сетевого и генерирующего оборудования (АРО СГО) и автоматикой разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) входит в автоматическую предотвращающую устойчивость (АПНУ) [4].

В АРКЗ в качестве УВ применяются:

- импульсная разгрузка турбин (ИРТ),

- электрическое торможение (ЭТ);

- отключение генераторов (ОГ);

- изменение топологии сети («отдаления» генерирующего оборудования от места КЗ).

Отличительной особенностью АРКЗ является необходимость выполнения в этом виде автоматики функции определения тяжести короткого замыкания, как признака возможного

нарушения динамической устойчивости. Эту функцию принято называть «Фиксация тяжести короткого замыкания» (ФТКЗ). Вид и дозировка УВ в АРКЗ определяются с использованием информации о тяжести короткого замыкания, а также информации о схеме и электрическом режиме в доаварийном состоянии.

ФТКЗ должна выполняться путем непосредственного и прямого измерения одного или нескольких из следующих параметров во время короткого замыкания:

- величины сброса активной мощности электростанции (отдельных генераторов или групп генераторов электростанции);
- величины напряжения прямой последовательности на шинах электростанции;
- величины угла между ЭДС и напряжением на шинах генераторов электростанции.

Одним из наиболее эффективных способов по сохранению динамической устойчивости генераторов является использование импульсной разгрузки турбин и длительной разгрузки турбин для сохранения статической устойчивости в послеаварийном режиме. Разгрузка турбин применяется для уменьшения момента, создаваемого турбиной, и заключается в быстром снижении механической мощности турбины с последующим ее плавным восстановлением до заданного значения. Это делает возможным оставление агрегата подключенным к сети, что существенно повышает надежность электроснабжения. Для эффективной разгрузки турбины необходимо сформировать управляющие импульсы тока через электрогидравлический преобразователь (ЭГП), соответствующим значением уровня сигнала (амплитуды), длительности и характером снятия управляющего воздействия. Работая с изменен амплитуду и длительность прямоугольной части импульса, можно менять глубину и скорость разгрузки турбины. Однако при прямоугольном импульсе могут возникнуть глубокие качания, вызывающие нарушения ДУ. Исправить это можно путем подачи более плавного импульса со спадающим задним фронтом по экспоненте, то есть замедлением восстановления мощности турбины [5]. Однако применение данного метода осложнено индивидуальностью импульсных характеристик турбин, которые могут быть непостоянными даже на одних и тех же турбинах [3].

В большинстве случаев под электрическим торможением понимают подключение в электрически близкой к генераторам точке сети параллельно или последовательно специальных тормозных резисторов. Основная задача ЭТ состоит в предотвращении выпадения из синхронизма генераторов электростанции.

Отключение генераторов используется для сохранения устойчивости при возмущениях, связанных с ослаблением связей энергосистемы путем изменения баланса мощностей в энергосистеме. ОГ заключается в разгрузке "опасного сечения" во время переходного процесса и в послеаварийном режиме.

Однако бывают случаи, когда технически невозможно применить ни разгрузку турбин, ни отключение генераторов, ни электрическое торможение. Это может быть связано со множеством факторов, но зачастую большие объемы УВ недопустимы в дефицитных или сложных энергосистемах. Тогда рассматривают изменение топологии электрической сети. Эффективность метода заключается в снижении тяжести КЗ из-за его «отдаления» от генераторов электростанций. Возможны варианты, когда систему необходимо делить на динамические зоны и применять к ним разные объемы УВ для сохранения устойчивости [6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Сенюк, М. Д. Апробация алгоритма анализа динамической устойчивости и противоаварийного управления режимом синхронного генератора на многомашинной модели энергосистемы / М. Д. Сенюк, А. А. Дмитриева // *Электротехнические системы и комплексы*, 2022. – № 1(54). – С. 46-53.
2. Методические указания по устойчивости энергосистем (утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 №277). – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 16 с.



3. Гречушников, В. В. Оценка эффективности управляющих воздействий для сохранения синхронной динамической устойчивости на сильных связях при близких затяжных коротких замыканиях / В. В. Гречушников, Н. Р. Вагапов, Е. А. Понамарев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 162- 165.
4. ГОСТ Р 55105-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 24 с.
5. Киевец, А. В. Исследование методики настройки противоаварийной разгрузки турбогенератора / А. В. Киевец, А. С. Гусев, А. Ю. Пишулин // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 224-226.
6. Сергеев, Е. В. Изменение топологии электрической сети как управляющее воздействие автоматики разгрузки при близких и затяжных коротких замыканиях / Е. В. Сергеев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 371-374. – EDN YZDWOI.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. С.М. Юдин, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ГИБКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

М.В. Хромов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А03

Технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS) являются одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть, которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

### **Что такое FACTS и для чего используется**

Система транспортировки переменного тока, включающая в себя силовую электронику и статические контроллеры, для улучшения управления и увеличения мощности передачи.

### **Задачи Facts**

- Увеличить пропускную способность ЛЭП до тепловых пределов нагрева.
- Поддержка постоянной работы энергосистемы при различных проблемах.
- Обеспечение заданной мощности в электрической сети в соответствии с требованиями диспетчера.
- Управление напряжениями в сетях.

### **Основные элементы FACTS**

Система силовой электроники, которая управляет многими параметрами системы передачи переменного тока.

### **Виды подключения FACTS**

- Контроллеры серии;
- Шунтирующие контроллеры;
- Комбинированная серия-контроллеры серии;

- Комбинированные последовательные шунтирующие контроллеры.

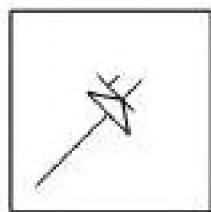


Рис. 1. Общее обозначение контроллера FACTS

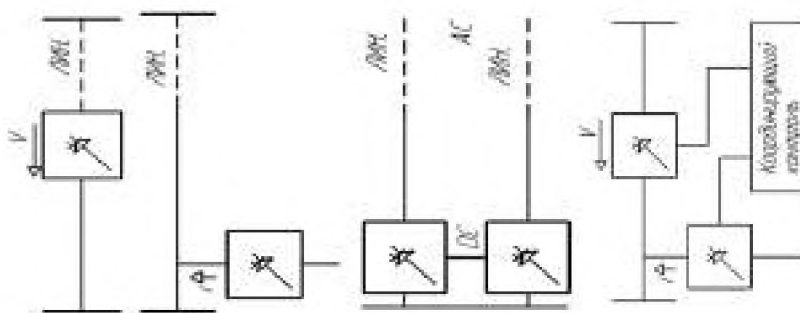


Рис. 2. Виды подключения FACTS

### Контроллеры серии

Последовательный контроллер может быть переменным импедансом или переменным источником, оба являются модулями силовой электроники для удовлетворения желаемых потребностей. Все контроллеры серии вводят напряжение последовательно с линией.

### Шунтирующие контроллеры

Шунтирующие контроллеры FACTS вводят реактивные токи или комбинацию активных и реактивных токов для управления напряжением в точке соединения и вокруг нее из-за их малой мощности, что приводит к более эффективному управлению напряжением и параметризации сети. Часто используется для гашения колебаний.

### Комбинированная серия

Комбинация может представлять отдельные контроллеры серии или унифицированный контроллер серии. Модули объединяемого действия, универсальный контроллер мощности предлагает возможность регулировать фазный угол между напряжениями по концам линия электропередачи и сопротивление.

### Последовательные шунтирующие контроллеры

Комбинация может представлять отдельные последовательные и шунтирующие контроллеры или единый контроллер потока мощности. В принципе, комбинированные шунтирующие и последовательные контроллеры вводят ток в систему с помощью шунтирующей части контроллера и напряжение последовательно в линии с последовательной частью контроллера.

### Преимущества технологии FACTS

- Управление потоком энергии в соответствии с заказом.
- Увеличение грузоподъемность линий до их тепловых возможностей, в том числе краткосрочных и сезонных.
- Повышение безопасности системы за счет повышения предела стабильности при переходных, ограничения токов короткого замыкания и процессах перегрузок, управления каскадными отключениями и демпфирования электромеханических колебаний энергосистем и машин.
- Обеспечение надежности подключение к линиям связи с соседними коммунальными службами и регионами, тем самым снижая общие требования к резервированию генерации с обеих сторон.
- Уменьшение потока реактивной мощности, что позволит линиям передавать больше активной мощности.
- Увеличение использование генерации с наименьшими затратами.

### Проблемы в России

- Недостаточная пропускная способность соединительных и магистральных линий передачи, что ограничивает возможность удовлетворения требований рынка.

- Ограничения по мощности электростанций.
- Низкая подконтрольность сети и малая мощность контроля регулирования напряжения вызывали повышение напряжения до критических значений в периоды снижения нагрузки.
- Малый уровень устойчивости.
- Неоптимальное распределение потока мощности по параллельным линиям разных классов напряжения в результате недозагрузки сети, повышенных потерь в сети.

#### **Применение в реальной жизни**

- Определение возможности использования управляемых координирующих систем FACTS в энергосистеме России.
- Установка двух модулей DSR в одном пролете на каждую фазу увеличивает реактивное сопротивление на 20 %.

#### **DSR модулей в Богучанской ГЭС**

- При изучении Богучанской ГЭС предложен режим перетока с помощью модулей DSR из Сибири в Урал.
- В ходе проведенных исследований рассмотрена возможность установки DSR
  1. При увеличении сопротивления воздушных линий на двадцать процентов, позволяет понижать токовую нагрузку в ней и перенаправить мощность на другие направления.
  2. Модули позволяют избежать аварийного снижения активной мощности.
  3. В нормальном режиме установка DSR модули перераспределяют потоки мощности и уменьшают потери активной.
  4. При установке DSR модулей в районе Богучанской ГЭС выявлена экономичность, которая может составить около 17,5 млн руб./год.

#### **Выводы**

- Данная технология предлагает более улучшенный уровень функционирования электроэнергетических систем.
- Способ основан на силовой энергетике, которая позволяет контролировать множество параметров.
- Исходя из примера, можно сказать, что технология актуальна для России.
- Необходимо провести расчеты на других станциях с использованием этого проекта.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Гибкие системы электропередачи переменного тока // Блог электрика URL: <https://lemzspb.ru/gibkiye-sistemy-elektroperedachi-peremennogo-toka/?ysclid=lackzkr488829745132> (дата обращения: 11.11.2020).
2. Чебанов К. А. Бурляева В. А. Бурляев А. М. Мировой и отечественный опыт использования технологии facts // Colloquium-journal. – 2020
3. RusCable.Ru // Развитие устройств FACTS URL: [https://www.ruscable.ru/article/Razvitie\\_ustrojstv\\_FACTS?ysclid=lackkqcvze932598635](https://www.ruscable.ru/article/Razvitie_ustrojstv_FACTS?ysclid=lackkqcvze932598635) (дата обращения: 11.11.2022).
4. FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) – гибкие системы передачи переменного тока // LiveJournal URL: <https://poisk.livejournal.com/589787.html?ysclid=lackvq7kzm764073502> (дата обращения: 11.11.2022).

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИКИ ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

А.А. Жиленков

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А0-42

Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) является последней ступенью перед массовым отключением потребителей электроэнергии. Однако используемые локальные устройства АЛАР обладают рядом недостатков, связанных с низким быстродействием, которое может привести к развитию двухчастотного асинхронного режима (АР) в многочастотный, с низкой чувствительностью, связанной с непопаданием годографа сопротивления дистанционного АЛАР в пределы характеристики срабатывания под влиянием внешних факторов, а также с низкой селективностью, связанной с возможным пересечением характеристик срабатывания нескольких локальных устройств АЛАР [1]. Кроме того, схемы размещения локальных устройств не всегда позволяют выполнить сбалансированное деление энергосистемы, что приводит к увеличению количества отключаемых потребителей, которого можно было бы избежать.

Перечисленные недостатки предлагается устранить за счет централизации АЛАР. При такой реализации, деление системы может выполняться не по сечению, на элементах которого располагается электрический центр качаний (ЭЦК), а по сечению, выбранному с учетом критериев обеспечения устойчивости отделившихся частей энергосистемы и минимизации небаланса активной мощности в них, что позволит сократить количество и объем управляющих воздействий противоаварийной автоматики, в особенности отключения потребителей электроэнергии действием автоматической частотной разгрузки (АЧР). При этом эффективность деления системы с точки зрения ликвидации асинхронного режима, обеспечивается за счет учета расположения когерентных групп генераторов относительно сечения деления системы. Сокращение времени ликвидации АР обеспечивается за счет интеллектуальных алгоритмов прогнозирования, позволяющих выявить АР до момента его возникновения. Централизация сбора информации о состоянии режима энергосистемы устраняет необходимость в наличии большого числа локальных устройств АЛАР, оперирующих ограниченным объемом данных. Использование синхронизированных векторных измерений (СВИ) за счет высокой дискретизации данных позволит обеспечить работу централизованной АЛАР (ЦАЛАР) в режиме реального времени.

Прогнозирование АР происходит в четыре этапа:

1. Формирование набора данных путем моделирования возмущений и переходных процессов.
2. Выполнение кластеризации данных, полученных по результатам моделирования, методом нечетких С-средних.
3. Обучение классификаторов на основе полученных кластеров методом опорных векторов [2–4].
4. Использование обученного классификатора для прогнозирования АР в режиме онлайн.

Если появление АР идентифицировано, необходимо выполнять деление системы. Для успешного деления необходимо определить группы когерентных генераторов, которые должны располагаться в разных частях разделенной энергосистемы. Их предлагается определять на основе центра инерции системы [5–7].

Когда спрогнозировано появление АР и определены группы когерентных генераторов, необходимо выбрать сечение, по которому будет выполняться деление системы. Для обеспечения динамической устойчивости отделившихся частей энергосистемы после деления должны выполняться критерии:

1. напряжение в узлах должно быть выше критического;
2. напряжение в контролируемых узлах должно быть ниже уставки второй ступени АОПН;
3. разность углов напряжений по концам линий электропередач не должно превышать  $\pm\pi$ ;
4. переток активной мощности в контролируемом сечении не должен превышать аварийно допустимого перетока;
5. ток по электросетевому оборудованию не должен превышать аварийно допустимой токовой нагрузки.

При выполнении вышеперечисленных критериев определяется окончательное сечение деления системы по условию минимизации небаланса активной мощности в отделившихся частях энергосистемы для уменьшения отключаемой посредством АЧР нагрузки.

На рисунке 1 представлена укрупненная структура ЦАЛАР. Предложенная архитектура системы ЦАЛАР включает в себя три блока, помеченных цветами на рисунке:

1. блок идентификации АР (желтый);
2. блок определения групп когерентных генераторов (фиолетовый);
3. блок выбора сечения деления системы (синий).

Работа ЦАЛАР включает в себя три этапа: II-До, I-До и После. На этапе II-До с помощью специализированных программных комплексов для расчета установившихся режимов и переходных процессов выполняется формирование наборов данных, на основе которых сразу выбираются потенциальные сечения для выполнения деления системы и обучаются классификаторы для идентификации АР. На этапе I-До на основе телеметрии уточняется состав потенциальных сечений и классификаторов, которые соответствуют текущей схемно-режимной ситуации. На этапе После, на основе данных СВИ в режиме онлайн, выполняется идентификация АР, определение групп когерентных генераторов и выбор окончательного сечения деления системы.

В таблице 1 представлено сравнение времени, при котором ЦАЛАР определил сечение деления системы и готов выдать управляющие воздействия (УВ), со временем наступления АР от момента появления возмущений, которые привели к АР, и указанные номерами 1–8.

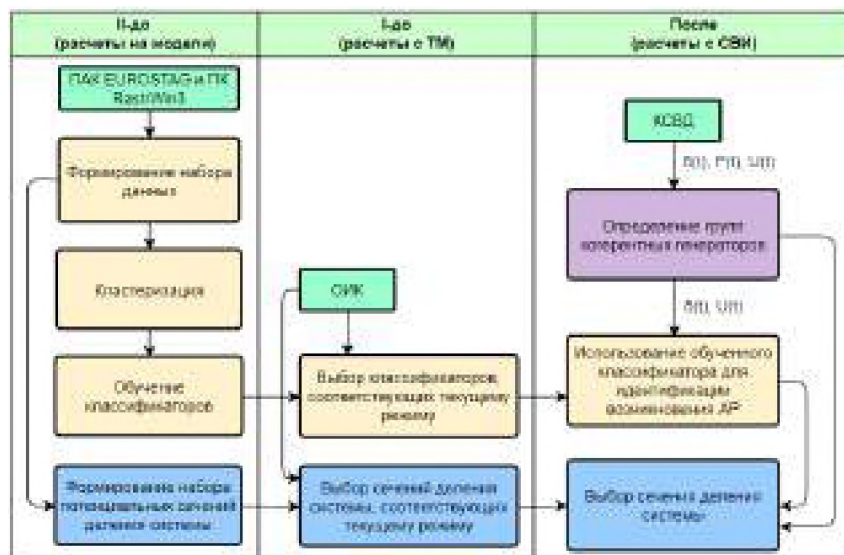


Рис. 1. Укрупнённая структура ЦАЛАР

Таблица 1. Время готовности к выдаче УВ для ликвидации АР посредством ЦАЛАР

Номер возмущения	1	2	3	4	5	6	7	8
Время готовности к выдаче УВ, мс	620	620	620	520	340	320	400	400
Момент наступления АР, мс	1390	1350	1385	690	1260	1295	580	580

Таким образом, ЦАЛАР позволяет идентифицировать АР и определить сечение, по которому необходимо выполнять деление системы, за меньшее время, чем непосредственно наступает АР (таблица 1). А деление по сечению, соответствующему сформулированным критериям, позволяет уменьшить объем управляющих воздействий противоаварийной автоматики, в частности АЧР, в отделившихся частях энергосистемы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Анализ настройки устройств АЛАР в схеме выдачи мощности Нижне-Бурейской ГЭС / Крикун А.А. // ЭЭГМ: материалы X Международной научно-технической конференции. – 2019. – В 3 т. Т 1. – Иркутск, ИРНТУ. – 440 с.
2. Support Vector machine-based algorithm for post-fault transient stability status prediction using synchronized measurements / F.R. Gomez, A.D. Rajapakse, U.D. Annakkage, I.T. Fernando // IEEE Trans. Power Syst. – 2011.
3. Rotor Angle Instability Prediction Using Post-Disturbance Voltage Trajectories / A. Rajapakse, F. Gomez et al. // IEEE PES General Meeting. – 2010.
4. Прогнозирование нарушений динамической устойчивости генераторов на основе данных векторных измерений / Чухманов В.Ю., Прохоров А.В., Жиленков А.А. // ЭЭГМ: материалы X Международной научно-технической конференции, – 2019. – В 3 т. Т 2. – Иркутск, ИРНТУ. – 7 с.
5. Adaptive out-of-step protection schemes based on synchrophasors / D. Fan, V. Centeno // IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition. – 2014.
6. A Wide Area Synchrophasor Based ANN Transient Stability Predictor for the Egyptian Power System / F. Hashiesh, H. E. Mostafa, I. Helal, M. M. Mansour // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). – 2010.
7. An Intelligent Wide Area Synchrophasor Based System for Predicting and Mitigating Transient Instabilities / F. Hashiesh, H. E. Mostafa, A.-R. Khatib // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2012.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Прохоров, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **EARLY FOREST FIRE DETECTION SYSTEM NEAR POWER TRANSMISSION LINES USING WIRELESS SENSOR NETWORK**

N.S. Ivanov

Tomsk polytechnic university  
School of Energy and Power Engineering, Division for Power  
and Electrical Engineering, group 5AM21

Forest fire activity has been only increasing over the past decade, on the territory of Russia in particular. The scale of wildfires in Siberia in 2021 turned out to be larger than all other fires in the world combined. Although the Ministry of Natural Resources' data indicates that more than 77 thousand km<sup>2</sup> of forest burned in 2021, according to Greenpeace data, the damage done is twice as much as to data stated by Ministry of Natural Resources, that assessed only damage to forests near nature reserves and settlements.

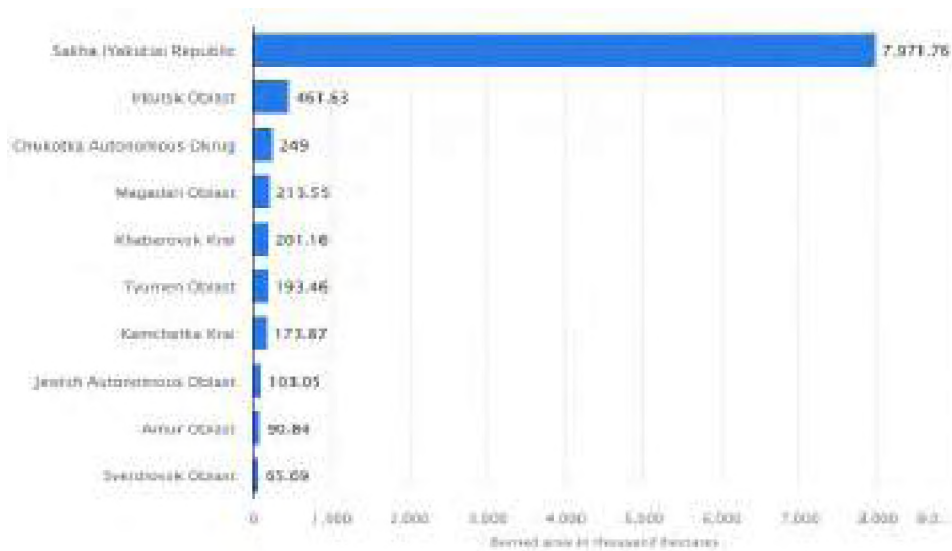


Fig. 1. Area burned in Russia in 2021, by federal subject (in 1,000 hectares). Research conducted by Statista [1]

Wildfires on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) have a seasonal pattern and their frequency is influenced by many factors. Considering that the wildfires can be caused by different heat sources, there are natural and human-caused wildfires. The major natural causes of the fire are the ones brought by global climate change: record-breaking high temperatures, reduced precipitation leads to lightning strikes creating fire during drought. And, according to Greenpeace's data [2], approximately 90 % of the all wildfires that occurred on the republic territories were caused by human action.

Moreover, the low level of forest service funding (6 rubles per hectare, in contrast to 180–200 rubles per hectare in the central Russia) resulted in poor monitoring of high-risk wildfire areas and lack of fire-fighting resources. It led the Government to increase funding of forest protection in Yakutia and, according to the head of the republic, Aisen Nikolaev, it has been increased by 5.6 times compared to the previous year.

Wildfires detriment our lives. In addition to the negative impact they have on environment and human health, they can deal catastrophic damages and lead to instability in the power system. Wildfires pose great threat to the utility infrastructure with the ability to cause power outages therefore putting reliable electricity service at risk. Additionally, the damage done by wildfires cause large financial losses and it also contributes to climate change.

When the fires are spreading the integrity of grid infrastructure is at risk of being damaged. Nearby burnt debris and trees may fall directly on utility infrastructures, such as substations and most frequently power lines causing serious physical damage to them full recovery of which will take long periods of time. Also, wooden poles burn easily during wildfires. The longer poles are exposed to heat of the fire, the more likely they are to be damaged or destroyed.

As for the wildfire damage done to the power infrastructure of Yakutia, according to information of Deputy Chief engineer of PJSC "Yakutskenergo" Sergey Prakapenka, in total 396 poles on 25 lines of all voltage classes were damaged over the fire-hazardous period in 2021 [3]. It is almost one tenth of the total number of poles of the Yakutia power infrastructure. It should also be mentioned that fires near power facilities lead to frequent power shut-offs which are necessary measure in preventing and putting out fires.

There are many methods that are currently implemented for forest fires detection, such as camera-based systems set on watchtowers, the use of satellite images with machine learning application, all having different sets of positive and negative aspects and fire detection performance. Additionally, in recent times the wireless sensor network (WSN) method has been attracting a lot of attention of researches mainly for its application versatility and potential positive features such as early and accurate fire detection.

The purpose of this report is to cover operation principles of a wildfire detection system based on WSN and consider implementation of such detection system near power transmission lines in order to monitor environmental parameters around them, therefore increasing the power transmission safety. The potential shortcomings and strengths of such design are also going to be stated.

Wireless sensor network refers to a group of multiple and dispersed sensors over the particular area for monitoring, measuring environmental parameters in real-time. The essential elements of the wireless sensor network are the wireless sensor nodes, cluster heads (CHs) and base station (BS).

A basic model of a sensor node includes a sensor module, processing module, communication module and a power supply module (figure 3). The sensor module senses the required environment's parameters. The processing module controls the operation of a sensor, managing the node's collected data or the data transmitted by other nodes. The wireless communication module is responsible for receiving/transmitting data and overall communication with other nodes. The power supply module supplies power to the modules of a node and is crucial in network's performance.

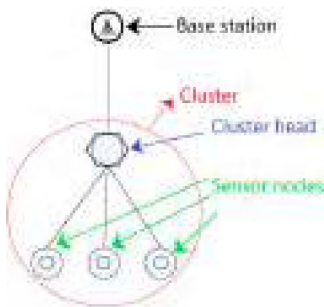


Fig. 2. WSN Topology

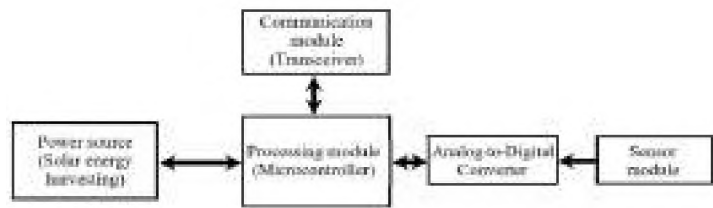


Fig. 3. Block diagram of a Sensor node

The sensor readings for each parameter are checked with a preset threshold ratio and a real-time ratio, once the ratios exceed the preset, the gathered data is then sent to the BS for analytical processing. In order to collect data from sensor nodes and ease process of communication with the base station, the sensor nodes are arranged into clusters. Each cluster has a cluster head which gathers sensor nodes' data and transmits them to the BS.

Base station is a crucial in WSN-based detection systems because of processing limitations of the nodes. Important data is transferred to the base station which acts as the gateway. If after analysis the model indicates a fire in a specific area, a message is sent to the responsible unit user.

A lot of research has been carried out and developments have been made in the field of WSN, in monitoring and detecting wildfires particularly. There are many works based on different sensors that focus on certain environmental parameters such as barometric pressure, temperature, relative humidity, gases such as CO, CO<sub>2</sub>, methane, H<sub>2</sub>, to detect forest fire conditions.

To detect wildfires near power transmission lines let us consider implementing sensors that were used in the work carried out in Germany by Institute of Forest Ecosystems. In the given work the hydrogen detection sensors were used that can detect hydrogen concentration increase at a distance up to 115 meters within 30 minutes which is considered quite effective for an early wildfire warning system [4].

It is also important take into the account the features of the power lines' landscape because of how it affects wind dynamics. To start off, let us consider how wind dynamics change in the landscape of powerline corridors. In order to prevent fire or any other type of hazards and maintain system reliability powerline corridors are created that lead to clearance of vegetation underneath and around powerlines. According to EPM [5], the shortest horizontal distance between the 220 kV power transmission lines and the crowns of nearby trees is 5 meters. This leads to changes of original shape of the landscape and creation of powerline corridors. According to the study "How fragmentation and corridors affect wind dynamics and seed dispersal in open habitats" [6], wind, entering such corridors, accelerates inside a patch which leads to high-speed winds at the end of corridors. Moreover, as seen in the figure 3, corridors rotate the wind direction so it is in line with the patch's long axis, in the same direction as the corridor.



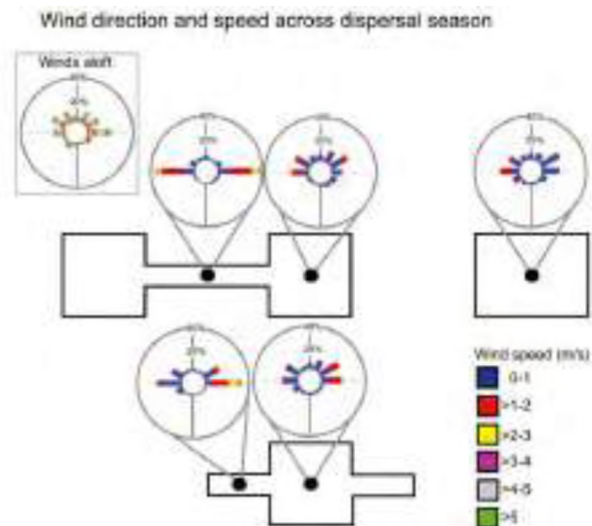


Fig. 4. Wind direction and speed across dispersal season

With this data, one can assume that during wildfires the landscape features of powerline corridors from the viewpoint of early and effective hydrogen detection are in favor of sensor-based wildfire detection system operation. Because gases released by a wildfire are mostly transported in line with a corridor powerline corridor at a high-speed which, hypothetically, has to lead to earlier fire detection.

However, from the technical point of view, there are obstacles for sensor operation near powerlines. One of the major issues is radio-frequency interference (RFI) generated by high-voltage transmission lines. The electromagnetic field due to corona discharge capable of interfering communication channels or devices over a wide frequency range. The frequency range of interference, approximately covers the range from 14 kHz to 1 GHz [7]. For instance, if we consider using system proposed in the work “Solar Powered Wireless Forest Fire Detection” that has a RF communication module [8], its operation close to high-voltage powerlines might be compromised. However, in the research “Investigating the Impact of High Voltage Power Lines on GPS Signal” it has been stated that electromagnetic interference is a significant problem when the following conditions are present: the power transmission line voltage is above 230 kV, the operation frequency of a device is less than 30 MHz and the distance between the power line and the device is minimal [9]. Since the chosen module is capable of operating at radio frequency up to several GHz, it should help decrease the lines’ interference impact. Nonetheless, it is desirable to keep an optimal distance between transmission lines and transmitter/receiver modules to keep the level of electromagnetic interference low.

To summarize the article, after the coverage of operation principles of a WSN system near power transmission the advantages and disadvantages of such design were noted. The main advantage being the powerline corridors’ landscape features that would increase speed of fire detection. Speaking of disadvantages, the main technical problem that was highlighted in this article is the radio-frequency interference (RFI) generated by high-voltage transmission lines which threatens the operation of WSN system but should not be a large problem since some devices can operate in higher frequencies. Moreover, the sensor nodes can be set in a safe distance from lines.

#### REFERENCES:

1. URL: <https://www.statista.com/statistics/1036723/russia-area-burnt-by-forest-fires-by-region/> (дата обращения 6.11.2022)
2. URL: <https://theecologist.org/2019/may/30/russian-wildfires-caused-human-activity> (дата обращения 29.10.2022)
3. URL: <https://www.sakha.gov.ru/news/front/view/id/3285237> (дата обращения 25.10.2022)

4. Early forest fire detection using low energy hydrogen sensors, Eberswalde, Germany / Jürgen Müller, Jan-Eric Bienge // SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS. – 2016. – V. 14. – No. 4. – P. 51-52
5. Правила Устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7 2022 год. Последняя редакция. – Москва: Изд-во ЦЕНТРМАГ, 2022. – 464 с.
6. How fragmentation and corridors affect wind dynamics and seed dispersal in open habitats / E.I. Damschena, D.V. Bakera, G. Bohrer // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – V. 111. – No. 9. – P. 3487–3488.
7. Ю.Е. Седельников: Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Казань: Изд-во ЗАО “Новое Знание”, 2006 – 300 с.
8. Solar Powered Wireless Forest Fire Detection, Pune, India / D.Y. Patil // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2018. – V. 7. – No. 4. – P. 80–83.
9. Investigating the Impact of High Voltage Power Lines on GPS Signal, Egypt / M. Rabba, A. El-Hattab // Fachbeitrag. – 2011. – V. 4. – P. 338–343.

Scientific advisor: PhD in Engineering M.V. Andreev, associate professor of Division for Power and Electrical Engineering, ISHE TPU.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Д.С. Николаев  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А01

С каждым годом экологическая повестка становится всё более серьёзной и распространённой. Многие промышленные компании и в частности электроэнергетические начинают задумываться о том, чтобы путём постепенного снижения выбросов углерода в атмосферу прийти к полному отсутствию выбросов парниковых газов. Одним из следствий «зеленой» повестки является развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В наше время среди ВИЭ наиболее распространены ветер (ветряные электростанции), вода (гидроэлектростанции) и солнце (солнечные электростанции). У всех них есть ряд серьёзных недостатков, но кроме этих источников существует огромная перспектива использования водорода.

В этой работе будет рассмотрено использование водородных топливных элементов в системах энергоснабжения, будут рассмотрены их перспективы, проведён экономический анализ и современные примеры использования топливных элементов, работающих на водороде.

Уже на протяжении нескольких десятилетий возобновляемые источники энергии занимают свою долю на рынке генерации тепловой и электрической энергии. С каждым годом доля ВИЭ в генерации электроэнергии становится всё больше и в 2021 году уже достигла 30%, большую часть из которых (более 15%) занимает генерация на гидроэлектростанциях. Доля водорода же на сегодняшний день безумно мала и составляет менее 0,5% от общего объёма генерации. Хотя в России развитие ветроэнергетики ограничено непостоянством скорости ветра, дороговизной установки и эксплуатации ветропарков. Солнечные электростанции также сталкиваются с проблемами сложного климата в большей части России: неэффективность в ночное время и сравнительно небольшое количество солнечных дней.

Также всё более актуальным для обсуждения становится вопрос о большем распространении электростанций малой мощности, и для этого есть свои причины. Электростанции малой мощности намного дешевле в строительстве и эксплуатации, при их возведении не требуется инвестировать средства в дополнительную инфраструктуру, а именно в линии электропе-

редачи и подстанции. Связано это с тем, что малые электростанции можно располагать в городах или на небольших расстояниях от них, возможно это благодаря намного меньшему шуму и выхлопам. Также электростанции малой мощности намного проще ввести в объединённую энергосистему, по сравнению со станциями большой мощности.

Таким образом, соединив между собой два актуальных и перспективных направления – электростанции малой мощности и водород в качестве источника электрической энергии, мы можем создать эффективную и экологически более чистую систему энергоснабжения городов и предприятий.

Интерес со стороны экологов к использованию водорода как альтернативного угля, нефти и газу вызван несколькими факторами. Первый фактор – это отсутствие горения, а значит и полное отсутствие или очень низкие уровни выбросов парниковых газов, таких углекислый газ, метан и окись азота.

Принцип работы топливных элементов заключается в принципе обратного электролиза воды. Электроды находятся в электролите, далее водород поступает в элемент, где в реакции с анодом разделяется на протон и электрон. Электроны уходят во внешний контур создавая электроэнергию и приходя на катод, а протоны уходят на катод через мембрану. На катоде же разделённые протон и электрон снова становятся молекулой водорода, а затем водород соединяется с кислородом из чего следует, что на выхлопе мы получаем водяной пар.

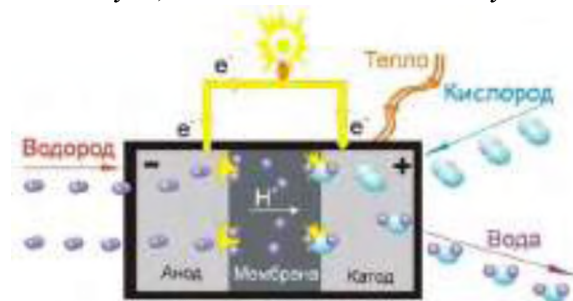


Рис. 1. Принципиальная схема топливного элемента

Сами же ТЭ подразделяются на низкотемпературные и высокотемпературные (ТОТЭ). Помимо водорода также может использоваться ряд углеводородов, биогаз и спирты. Главное отличие таких топливных ячеек от аккумуляторов – необходимость постоянного наличия источника топлива и кислорода, для поддержания химической реакции. По окончании реакции генерация закончится практически сразу.

Самые первые электростанции на топливных были пущены в конце прошлого века, а именно в 1983 году в Японии, тогда эксплуатационные и расчётные оказались сопоставимы друг с другом. При нагрузке от 25 до 80 % от номинальной мощности КПД оказался в пределах 30–37 %, что довольно близко к показателям современных крупных тепловых электростанций. Время пуска из холодного составляло от 4 часов, до 10 минут, а время, которое потребовалось для изменения мощности от нулевой, до максимальной составило всего 15 секунд.

Помимо Японии, экспериментальный ввод небольших установок до 40 кВт практиковался в США. Там установки уже проработали сотни тысяч часов. Использовались они в прачечных, спортивных комплексах и других местах для нагрева воды, коэффициент использования топлива около 80 %. Экологичность данных установок позволила устанавливать их в городах.

Фирма Westinghaus Electric (в наши дни не существует) исследовала свойства топливных элементов на твердых оксидах с 1958 года. В Европе крупнейшими производственными мощностями и наиболее обширными инвестициями в разработку элементов занимаются такие компании как Elenko, Siemens, EnBW, RWE, Fiat, Jonson Metju.

В период с 2004 по 2008 года ГК «Норникель» инвестировала около 160 миллионов долларов в разработки и производство ТЭ, но инвестиционную программу свернули из-за слишком высоких затрат. В 2012 году Институт органической и физической химии им. Арбузова запатентовал топливный элемент малой мощности, позволяющий вырабатывать от 1 до

5 кВт, и выступил с инициативой о возможности создания на базе института производство топливных элементов либо их отдельных деталей при наличии должного финансирования. Также разработки проводились и в Институте физики твёрдого тела РАН, там был разработан твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ). Разработанный элемент имеет до 90 % КПД с учётом теплового выхода и до 50 % при учёте только электричества. Ещё одним преимуществом по сравнению с аналогами можно выделить автономность, т. к. такой источник может работать без обслуживания до 4 лет, разработка велась для выполнения задач на удалённых территориях в условиях тяжёлого климата.

Очевидно, что электростанции малой мощности с возможностью быстрого запуска и такой же быстрой остановки найдут своё применение в изолированных энергосистемах. К таким можно отнести местности, приравненные к районам Крайнего Севера (ХМАО, ЯНАО), большая часть Республики Саха, остров Сахалин, полуостров Камчатка и др. В таких местах выход из строя основного источника электро- и теплоэнергии может стать критическим. Так, например, авария на дизельной электростанции в посёлке Депутатский, что располагается в Якутии стала чёрным днём в жизни многих людей. Так 16 февраля 2001 года, после пожара на станции, посёлок погрузился в кромешную темноту и холод. На протяжении нескольких недель не было ни света, ни отопления. Именно такие примеры должны наталкивать на создание дублирующих и резервных систем.

Так, одной из наиболее заинтересованных компаний в надёжных резервных генераторах является «Газпром». Ведя добычу в основе своей на Ямале, «Газпром» требует большого количества энергии, но тянуть высоковольтные линии на полуостров очень дорого и неэффективно, так как потери в линиях на таких расстояниях просто огромны. Следовательно, требуются локальные резервные источники электроэнергии, которые в свою очередь будут включаться во время аварийных ситуаций на основном источнике. Именно здесь максимально раскрываются преимущества водородных топливных элементов, а именно быстрое время включения и выключения, компактность и широкий температурный диапазон работы.

Но при этом есть серьёзные недостатки использования топливных элементов, как конкретно в случае Севера, так и в целом по России. Первое о чём хочется сказать, так это об экономике водородной энергетики. Рыночная стоимость индустриального водорода в баллоне 40 литров составляет около 1860 рублей. Стоимость промышленного модуля на 2,5 кВт составляет 12 185\$ (773 747,5 руб), рассматриваться будет ТЭ ReliOn E 2500 (таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики рассматриваемого ТЭ

ReliOn	E 2500	<p>Мощность номинальная: 2500 Вт;          Топливо: индустриальный водород с чистотой 99,95%;          Окислитель: наружный воздух;          Расход топлива: 30 л/мин (0,8 бар) или 3 часа работы из расчета использования одного 40 л баллона с давлением 150 бар;          Эффективный КПД: 42%;          Средний ресурс: 6000 ч.          Рыночная стоимость: 12 185 \$</p>
--------	--------	--

Суммарная выработка такого элемента будет равняться 15000 кВт·ч. Стоимость израсходованного топлива будет равна 3,72 млн. рублей. И таким образом себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии составляет 299,58 руб. В свою очередь, себестоимость киловатта энергии традиционными способами не превышает 5 рублей.

Другим недостатком водорода является его сложное хранение. Водород в твёрдом состоянии легче воды и бензина, а молекулы достаточно малы, чтобы проникать в структуру металла. Также водород взрывоопасен.

Ещё одной проблемой является добыча водорода. Ведь на сегодняшний день все методы его производства не являются экологичными, а некоторые скорее очень и очень вредные.

Топливные элементы не получили своего распространения из-за высокой стоимости оборудования и себестоимости продукта на выходе. Но результаты экспериментальных запусков показывают, что станции на водороде способны эффективно заменить современные методы

генерации. В России на данный момент есть очень яркие перспективы развития, но из-за высокой цены вопросы развитие данной перспективы откладываются.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гатина Р.З., Гафуров Н.М., Зайнуллин Р.Р. Перспективы развития малой энергетики с использованием топливных элементов. // Вестник КГЭУ, 2018, том 10, № 1 (37)
2. Петрущенко В.А., Коршакова И.А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 52-70
3. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70-83.
4. Плетнев М.А, Копысов А.Н. Социально-экономические проблемы развития водородной энергетики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 36-45.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

### УСТРОЙСТВА FACTS (СТАТКОМ)

Д.Д. Сарнаков

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А03

FACTS устройства подразделяются на устройства первого и второго поколения.

Устройства первого поколения или FACTS-1 – приборы, которые способны регулировать напряжение и компенсировать реактивную мощность.

Устройства второго поколения или FACTS-2 – это улучшенные устройства FACTS-1. Они обладают свойством векторного регулирования, это свойство, при котором регулируется величина и фаза вектора напряжения.

Из устройств FACTS наиболее часто используются такие устройства как: статический компенсатор реактивной мощности, устройства продольной компенсации, синхронный статический компенсатор (СТАТКОМ), компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения, фазовращательный трансформатор и так далее.

В дальнейшем будет подробнее рассмотрен СТАТКОМ.

Назначение:

Статический синхронный компенсатор решает проблемы с качеством электроэнергии, эффективностью её передачи и распределения. Решение данных проблем достигается за счёт компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения. Таким образом, можно сказать, что статком является управляемым источником напряжения, значение внутреннего сопротивления которого, близко к нулю. Подключение синхронного компенсатора производится через линейный реактор, он преобразует разность напряжения в сети в выходной ток компенсатора. Так статком преобразуется из источника напряжения в источник тока. Подключение статического компенсатора представлено на рисунке 1. На основе вышесказанного можно сформулировать, что принцип работы статкома заключается в том, чтобы за счёт векторного управления и широтно-импульсной модуляции выработать мгновенные значения токов и напряжений, которые поступят на устройства.

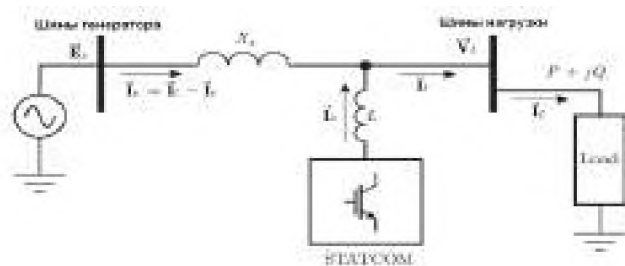


Рис. 1. Однолинейная схема подключения СТАТКОМа

Если сравнивать устройства FACTS первого и второго поколения, то у СТАТКОМА можно выделить ряд преимуществ по сравнению с СТК. К преимуществам СТАТКОМА относятся:

- Улучшенные динамические характеристики;
- Низкий уровень потерь;
- Имеет менее габаритные размеры (в 2 раза меньше, чем СТК);
- Высокие динамические характеристики;
- Лёгкость замены неисправных устройств;
- Способность вести активную фильтрацию гармонических токов нагрузки;
- Резервирование силовой части.

Примеры проектов:

В Чили в 2011 году на подстанции Cerro Navia 220 кВ была установлена система FACTS, которая включала СТАТКОМ. Данная подстанция принадлежит компании Transelec SA, крупнейшему оператору энергосети, которая поставляет энергию 90 % населения страны. Данная система была установлена для увеличения пропускной способности из-за повышения количества произведённой электроэнергии. Установкой статкома компанией были решены такие проблемы, как: динамическое регулирование реактивной мощности в условиях неисправности в сети, регулирование напряжения в условиях статической устойчивости, недостаток пропускной способности.

Статический компенсатор используется в электродуговых печах, т. к. печи создают проблемы связанные с качеством электроэнергии в сети. Работа без компенсатора вызывает напряжение вариации, которое передаётся другим потребителям в цепи. Со статкомом же мерцание сокращается.

В прокатных станках приводы понижают коэффициент мощности и могут стать причиной резких падений напряжения и гармонических искажений. Статком повышает коэффициент мощности и обеспечивает фильтрацию гармоник в режиме реального времени.

У ветровых электростанций высокие критерии подключения к энергоснабжающим организациям. Важнейшим требованием является возможность поглощения реактивных мощностей. Статком решает данную задачу и создаёт возможность динамического управления напряжением и током.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. nrec.com: NR Electric Co.: сайт. – Нанкин, 1995-2022 – URL: <https://www.nrec.com> (дата обращения: 10.11.2022).
2. Международная Энергосберегающая корпорация: сайт. – Санкт-Петербург, 2000-2022. – URL: <http://iescorporation.org> (дата обращения: 08.11.2022).
3. Музей энергетики: сайт. – Москва, 2014-2022. – URL: <http://energymuseum.ru> (дата обращения: 09.11.2022).
4. Нидек АСИ ВЭИ: сайт. – Москва, 2013-2022. – URL: <https://nidec-asi-vei.ru> (дата обращения: 10.11.2022).
5. Проект Cerro Navia. – URL: <https://new.abb.com/facts/ru/vypolnennyye-proekty/proekt-cerro-navia> (дата обращения 10.03.2020).

6. Шакарян, Ю.Г. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России. /Ю.Г. Шакарян. – Москва: открытое акционерное общество «федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2009. – 35 с.
7. Хромов электро: сайт. – Красногорск, 2005-2022. – URL: <https://khomovelectro.ru> (дата обращения: 09.11.2022).

Научный руководитель: к.т.н Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

А.А. Боргояков  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Одной из важнейших целей электроэнергетики является обеспечение надежности электроснабжения потребителей электроэнергии. Электроэнергетическая система (ЭЭС) должна обеспечивать бесперебойное питание потребителей качественной электроэнергией. Для достижения этой цели энергосистема должна быть устойчива к различным видам оказываемых на нее возмущений. Для оценки поведения энергосистемы при различных возмущениях, были введены понятия статической и динамической устойчивости. В данной работе будет подробнее рассмотрена именно динамическая устойчивость, так как ее нарушение может привести к тяжелым последствиям.

Динамическая устойчивость – это способность электроэнергетической системы, после сильного возмущения, вернуться в установившийся режим, при котором ее параметры возвращаются к нормальным значениям или допустимым для эксплуатации [1]. Сильным возмущением считается короткое замыкание, отключение или включение большого генерирующего оборудования, нагрузки, линии электропередач или трансформатора [1]. Эти факторы приводят к резкому изменению режима работы энергосистемы, которое проявляется в значительных отклонениях параметров от нормальных [1]. Получается, что динамическая устойчивость важна для энергосистемы, ведь если система не вернется после какой-либо аварии в устойчивое состояние, то это может привести к тяжелым последствиям и экономическим потерям, а самое главное, будет нарушена надежность электроснабжения потребителей.

В рамках современных тенденций развития ЭЭС происходит существенное изменение процессов, связанных с динамической устойчивостью. Одним из перспективных направлений развития электроэнергетики в мире является внедрение современных способов генерации электроэнергии, а именно использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Именно эта тенденция влияет на динамическую устойчивость энергосистемы, и иногда не в лучшую сторону. Данный тренд также характерен для ЭЭС России, в нее массово внедряется альтернативная энергетика, а именно солнечные и ветровые электростанции, и их доля с каждым годом возрастает и будет возрастать [2]. Данные генерирующие объекты подключаются к энергосистеме не напрямую, а с помощью силовых преобразователей, инверторов. Для объединенной энергетической системы (ОЭС) Сибири более свойственно внедрение солнечных электростанций (СЭС), и их доля выше, чем доля ветровых установок [3], в связи с этим, далее рассматриваем именно этот вид ВИЭ.

Солнечная электростанция – электростанция, которая преобразует солнечную радиацию в электроэнергию. Она состоит из солнечных панелей, которые и преобразуют энергию, цепей постоянного тока, а также преобразователя постоянного тока, который предназначен для управления режимом работы источника энергии для отбора его мощности в точке максимума

и согласования выходного напряжения источника и инвертора. На рисунке 1 представлена структурная схема СЭС.



Рис. 1. Структурная схема СЭС

Основным функциональным узлом СЭС является инвертор, выполненный на базе силового преобразователя. Силовой преобразователь является связующим элементом между СЭС и энергосистемой, он отвечает за режимы работы СЭС. Инвертор выполняет функции преобразования напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока, согласует уровни напряжения источника с нагрузкой и энергосистемой с помощью трансформатора, а также стабилизирует напряжение при изменении нагрузки.

Традиционные электростанции имеют инерцию, которая замедляет изменение частоты сети. Чем выше эквивалентная инерция энергосистемы, тем медленнее изменяется ее частота. С введением в энергосистему солнечных электростанций общая инерция системы снижается, так как ни сама СЭС, ни силовой преобразователь не имеют инерции вращающихся масс, в связи с отсутствием вращающихся частей. Согласно формуле (1) [4], при увеличении мощности СЭС снижается эквивалентная инерция ЭЭС:

$$T_{J, \text{ЭЭС}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{J,i} \cdot S_i}{S_{\text{ЭЭС}}} \quad (1)$$

В результате внедрения ВИЭ значительно снижается надежность функционирования современных энергосистем в нормальных и особенно аварийных режимах при различного рода возмущениях, поскольку, помимо неоспоримых преимуществ, внедрение подобных объектов вызывает ряд проблем, связанных с обеспечением режимного и противоаварийного управления ЭЭС:

- увеличение скорости протекания переходных процессов по причине снижения общей постоянной инерции ЭЭС;
- снижение резервов мощности и отсутствие инерционного отклика при внедрении ВИЭ, что приводит к сложностям первичного и вторичного регулирования частоты;
- стохастический и резкопеременный характер выработки электроэнергии, связанный с непостоянством погодных явлений и др.

В подтверждение вышеуказанных пунктов, исследования [5] показывают, что внедрение СЭС в реальный энергорайон приводит к снижению динамической устойчивости.

Для повышения динамической устойчивости энергосистемы и снижения негативного воздействия ВИЭ, необходимо адаптировать их автоматические системы управления к требованиям традиционной энергетики. Одним из решений данной задачи является синтетическая инерция, которая достигается путем перепрограммирования силовых преобразователей ВИЭ таким образом, чтобы они имитировали инерцию вращающихся масс. То есть мы должны искусственно повысить инерцию энергосистемы, вследствие чего уменьшится скорость изменения частоты и повысится динамическая устойчивость. Это достигается регулированием отдачи в сеть мощности фотоэлектрических установок. Мы обеспечиваем резерв мощности с помощью разгрузки СЭС, то есть, не загружая ее на 100%, и ту мощность, которая остается, выдаем в сеть, синтетическая инерция позволяет нам повысить динамическую устойчивость. С ее помощью СЭС сможет изменять выдачу мощности в систему почти мгновенно, из-за отсутствия вращающейся массы [6]. Это позволит солнечным электростанциям регулировать выдачу мощности в сеть и подстраиваться под режим работы энергосистемы, а также участвовать в регулировании частоты.



Синтетическая инерция – это процесс управления дополнительной активной мощностью блока таким образом, чтобы она была пропорциональна скорости изменения частоты на выходе этого блока [7]. Наиболее часто используемыми схемами синтетической инерции являются одноконтурная и двухконтурная схемы. Отличие одноконтурной схемы от двухконтурной состоит в том, что в первой активная мощность пропорциональна только скорости изменения частоты, когда вторая дополнительно учитывает отклонение частоты [8]. На рисунке 2 представлена одноконтурная схема синтетической инерции [9].

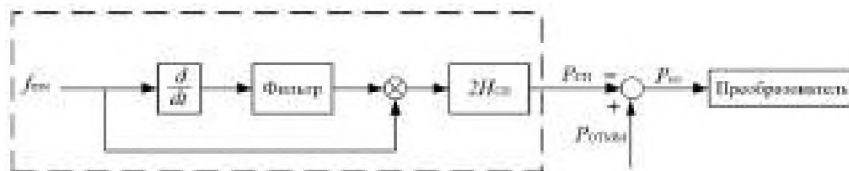


Рис. 2. Одноконтурная схема синтетической инерции

Синтетически инерционная активная мощность  $P_{СИ}$  вносится дополнительным контуром управления, она пропорциональна изменению скорости частоты системы  $f_{изм}$  и постоянной синтетической инерции  $H_{СИ}$ , данная мощность рассчитывается согласно формуле (2) [8]:

$$P_{СИ} = 2H_{СИ} \cdot \frac{df_{изм}}{dt} \cdot f_{изм} \quad (2)$$

С учетом точки максимальной мощности  $P_{отзм}$ , на выходе получаем опорную мощность  $P_{оп}$ , которую и нужно добавить, чтобы уменьшить изменение скорости частоты. Также рассмотрим двухконтурную схему синтетической инерции. На рисунке 3 представлена двухконтурная схема синтетической инерции [10].

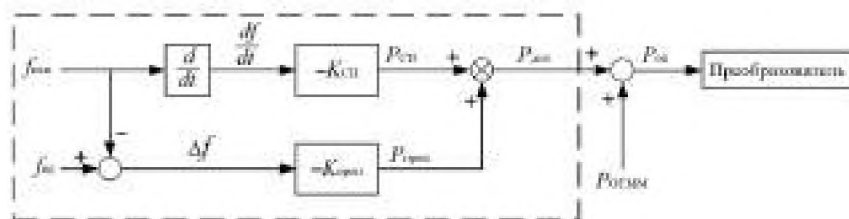


Рис. 3. Двухконтурная схема синтетической инерции

В данной схеме дополнительная активная мощность  $P_{доп}$  определяется двумя контурами, то есть контуром изменения скорости частоты и контуром отклонения частоты, она рассчитывается согласно формуле (3) [8]:

$$P_{доп} = -K_{СИ} \frac{df_{изм}}{dt} - K_{проп} \Delta f \quad (3)$$

Синтетически инерционная активная мощность  $P_{СИ}$  также пропорциональна измеренному изменению скорости частоты  $f_{изм}$  и постоянно синтетической инерции  $K_{СИ}$ , но в дополнение к этому появилась пропорциональная мощность, которая пропорциональна отклонению  $\Delta f$  опорной частоты  $f_{оп}$  и пропорциональной постоянной синтетической инерции  $K_{проп}$ .

Обе схемы позволяют участвовать СЭС в регулировании частоты, тем самым уменьшая изменение скорости частоты системы. Но в то же время, двухконтурная схема синтетической инерции включает в себя дополнительную мощность, которая пропорциональна отклонению частоты, что помогает более точно имитировать инерцию синхронных генераторов, а также гарантирует быстрое возвращение частоты сети к номинальным параметрам.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Калентионюк Е.В.: устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Изд-во Техноперспектива, 2008. – 375 с.

2. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению / П.В. Илюшин // Вестник МЭИ. Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии. – 2022. – №4. – С. 98–107.
3. Интерес инвесторов к теме ВИЭ в России сохраняется // Ассоциация развития возобновляемой энергетики. URL: <https://tredda.ru/information-bulletin-july2022> (дата обращения 10.11.2022).
4. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №36.
5. Исследование влияния крупной СЭС на переходные процессы при возмущениях во внешней сети / К.А. Скурихина, М.Г. Тягунов, В.В. Чумаченко, А.В. Субботин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – №3(48). – С. 52–59.
6. Synthetic inertia and its role in improving grid stability // Current±. URL: <https://www.current-news.co.uk/blogs/synthetic-inertia-and-its-role-in-improving-grid-stability> (дата обращения 10.11.2022).
7. Synthetic inertia versus fast frequency response: a definition / R. Eriksson, N. Modig, K. Elkington // IET Renew Power Gener. – 2017. – V. 12. – P. 507-514.
8. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review / Y. Cheng, R. Azizipanah-Abarghooee, S. Azizi, L. Ding, V. Terzija // Applied energy. – 2020. – V. 279.
9. Effects of inertia emulation in modern wind parks on isolated power systems // C. Rahmann, J. Jara, M. B. C. Salles / IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2015.
10. Frequency stability enhancement for low inertia systems using synthetic inertia of wind power // H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen, P. H. Jensen // Proceedings of 2017 IEEE PES General Meeting. – 2017. – P. 2–5.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Суворов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРАКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ**

В.Д. Лощенков

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Воздушные и кабельные линии электропередачи, имея большую протяженность, подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электрическое оборудование. Особенно это относится к воздушным линиям, которые подвержены повреждениям от грозовых ударов, гололеда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и т. п.

Неправильная работа релейной защиты является одной из главных причин крупных аварий в энергосистеме, поэтому поиск новых решений в области повышения надежности РЗА является актуальным на сегодняшний день. К ступеням дистанционной релейной защиты линии электропередачи, которая является основной защитой для линий 110-220 кВ, предъявляются высокие требования, в частности надежное распознавание аварийного режима и в то же время, необходимым требованием является несрабатывание на различные нагрузочные режимы и режимы качаний.

Актуальность данной работы заключается в том, что с развитием электроэнергетических систем связано постоянное совершенствование релейной защиты. Из-за повышения сложности электрических сетей, увеличением протяженности воздушных линий электропередачи и

передаваемых мощностей, предъявляют более высокие требования к эффективности функционирования РЗ. Короткие замыкания, аварийные режимы, изменения мощностей нагрузок являются причинами возникновения переходных процессов, которые характеризуются быстрым временем протекания и сильным влиянием на параметры энергосистемы. В результате данных процессов может быть спровоцировано ложное срабатывание релейной защиты и автоматики. Оценить поведение органов защиты за такой краткий промежуток времени достаточно сложно. Поэтому для повышения эффективности работы релейной защиты, а в частности дистанционной, предлагается детальный анализ поведения данной защиты с учетом всех возможных переходных процессов.

Целью данной работы, является создание математической модели электрической сети, с возможностью детального анализа дистанционной защиты, а именно поведения годографа сопротивления в различных переходных и аварийных режимах.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Разработка интерактивной модели высоковольтной линии для анализа процессов в энергосистеме.
- Разработка модели дистанционной защиты для анализа поведения вектора сопротивления в различных неблагоприятных режимах.

### Область применения дистанционной защиты

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания МТЗН не обеспечивает селективности действия. В этом случае применяют дистанционную защиту. Дистанционной называют защиту, выдержка времени которой автоматически изменяется в зависимости от удаленности места КЗ от места установки защиты. Основным элементом дистанционной защиты является дистанционный орган, определяющий удаленность КЗ от места установки защиты. В качестве такого органа используется реле сопротивления.

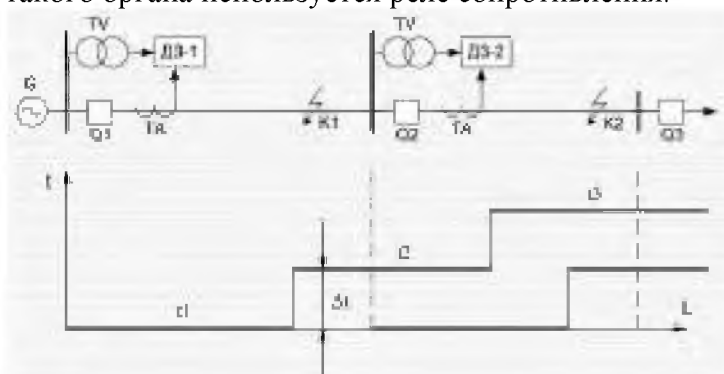


Рис. 1. Ступени дистанционной защиты

Обычно дистанционная защита выполняется в виде трех ступеней: 1-ступень охватывает около 85 % линии; 2-ступень выбирается из условия надежного охвата защищаемой линии; 3-ступень выполняет задачи ближнего и дальнего резервирования.

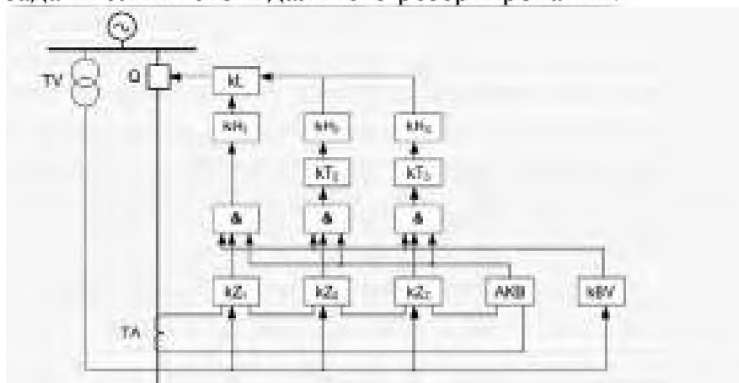


Рис. 2. Структурная схема дистанционной защиты

На рисунке 2 применены следующие обозначения: kZ1, kZ2, kZ3 – реле сопротивления, соответственно 1-ой, 2-ой и 3-ей ступеней защиты соответственно; АКВ – блокировка от качаний; kBV – блокировка от обрыва цепей напряжения; & – логический элемент «И». Срабатывает, когда все три условия, подводимые к нему, выполняются; кТ2, кТ3 – выдержки времени второй и третьей ступени соответственно; кН1, кН2, кН3 – сигнальные реле 1-ой, 2-ой и 3-ей ступеней защиты соответственно [1].

Разработка интерактивной модели высоковольтной линии для анализа процессов в энергосистеме. Схема модели защищаемой линии, построенная в Matlab Simulink представлена на рисунке 3.

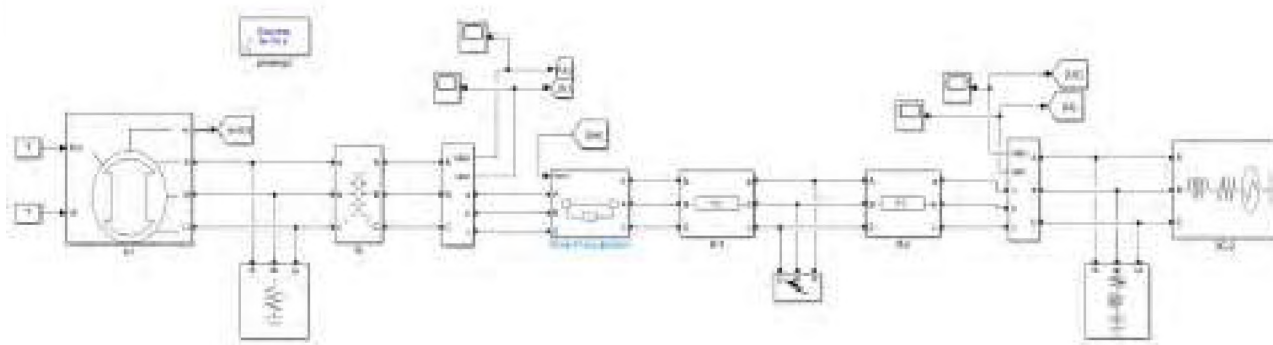


Рис. 3. Модель защищаемой линии в Matlab Simulink

Преимущество работы с энергосистемой, построенной в Matlab Simulink, заключается в том, что мы можем использовать программы графического построения графиков для более наглядного анализа.

Данная модель позволяет исследовать поведение защиты во время переходных процессов, которые в реальности происходят за секунды, и производить корректировки по функциональной составляющей защит.

Внося изменения в схему можно исследовать поведение дистанционной защиты для различных конфигураций: линии с продольной компенсацией, линии с отпайкой, варьируя местом положения отпайки, линии со взаимной индуктивностью и др.

На рисунке 4 показана характеристика срабатывания реле сопротивления и годограф вектора сопротивления для двух случаев: замыкание вне зоны (а) и в зоне действия защиты (б).

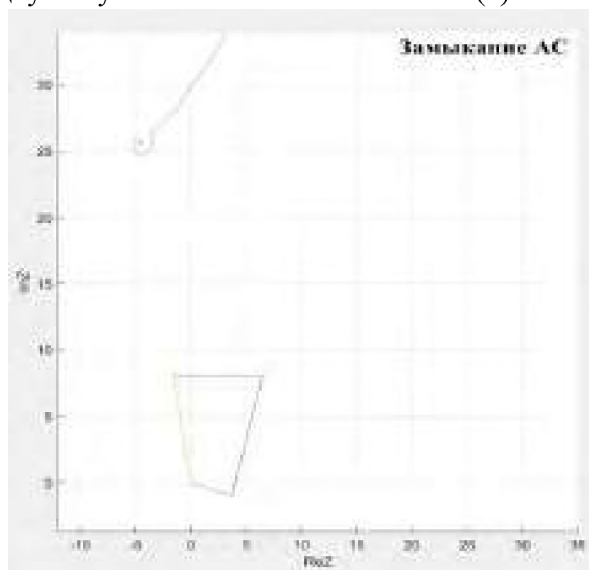


Рис. 4а. Характеристика срабатывания реле сопротивления и годограф вектора сопротивления при замыкании вне зоны действия защиты

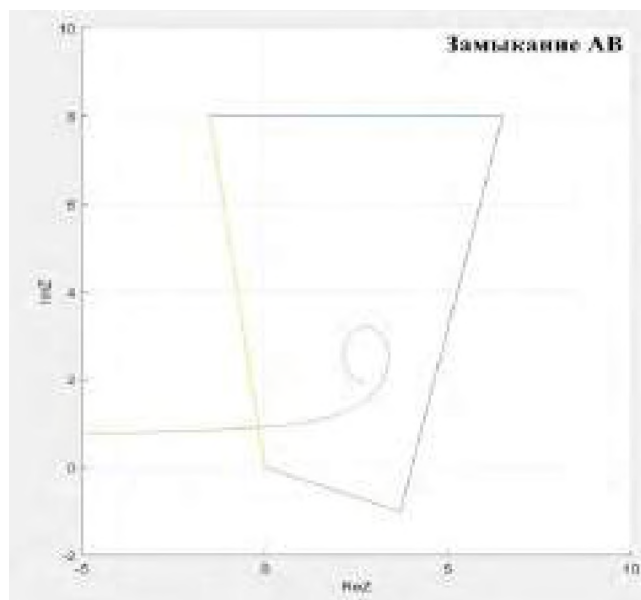


Рис. 46. Характеристика срабатывания реле сопротивления и годограф вектора сопротивления при замыкании в зоне действия защиты

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. URL:[https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PONAMAREV/uchebnaya/relayprotect/Tab1/Lecture\\_07.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PONAMAREV/uchebnaya/relayprotect/Tab1/Lecture_07.pdf). (дата обращения 11.11.2022)
2. Экспонента//Моделирование электроэнергетических сетей и объектов в MATLAB/SIMULINK. 2021. URL:<https://exponenta.ru/events/modelirovanie-elektroenergeticheskikh-setej-i-obektov-v-matlab-simulink>, (дата обращения 11.11.2022)
3. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА: URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.70.241-2017\\_izm\\_11122019.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.241-2017_izm_11122019.pdf). (дата обращения 11.11.2022)

Научный руководитель: доцент, к.т.н. С.М. Юдин, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

А.А. Гранская<sup>1</sup>, Г.А. Гранский<sup>2</sup>, Р.Г. Мустафин  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, РЗиА, АУСМ-1-21<sup>1,2</sup>

Цифровая подстанция (ЦПС) согласно протоколу МЭК 61850 является наиболее совершенной технологией для автоматизации подстанций [1]. Измеренные значения токов и напряжений на цифровой подстанции передаются по протоколу SV [2], и потоки пакетов SV сильнее всех остальных сигналов нагружают цифровую сеть подстанции: поток постоянен, и формирует пакеты с частотой 80 (или 256) измерений за период первой гармоники сети  $T_1 = 0,02$  секунды. В последнее время предлагается интегрировать технологии СВИ для замены сигналов измерений SV цифровой подстанции [3]. Использование СВИ приводит к снижению объема передаваемой информации, поскольку передается всего шесть синхронизированных векторов (тока и напряжения) за период  $T_1$  [4]. Переход от сигналов SV к сигналам СВИ особенно актуален для цифровой подстанции четвертого типа: на базе централизованного сервера РЗА [5],

поскольку полностью снимает нагрузку обработки потоков SV на сервере, в то же время сигналы СВИ напрямую могут использоваться в защитах.

Далее рассмотрим состав сигналов СВИ [3] и необходимые дополнения для работы релейных защит на подстанции. СВИ содержат амплитуду первой (с периодом  $T_1$ ) гармоники трехфазных токов и напряжений, частоты пофазно и частоту прямой последовательности, скорость изменения частоты. На основе данных сигналов могут работать:

- все токовые защиты (ТО, МТЗ, как фазные, так и на основе симметричных составляющих),
- дистанционные защиты,
- защиты по частоте (включая защиты по скорости изменения частоты),
- дифференциальные защиты (линии, шин).

Направленные защиты по мощности (активной, реактивной, полной) должны учитывать все гармоники тока и напряжения, а не только первую, содержащуюся в СВИ. В связи с этим предлагается добавить в стандартный набор СВИ:

1. Действующие значения токов и напряжений и углы между ними, поскольку действующие значения содержат полный набор гармоник.

Заметим, что квадрат действующего значения тока  $I_{д.з.}$  или напряжения  $U_{д.з.}$  равен сумме квадратов действующих значений гармоник ( $I_{i д.з.}$  или  $U_{i д.з.}$  соответственно), содержащихся в данном токе или напряжении:

$$I_{д.з.}^2 = \sum_i I_{(i) д.з.}^2 \quad (1)$$

$$U_{д.з.}^2 = \sum_i U_{(i) д.з.}^2 \quad (2)$$

В результате, действующие значения можно использовать для определения поврежденного фидера при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью [6], поврежденный фидер имеет максимальную (среди всех фидеров) сумму высших гармоник.

Кроме того, сумма высших гармоник используется для вычисления показателя качества электроэнергии – коэффициента искажения синусоидальной формы кривой напряжения  $K_U$ , который вычисляется как отношение среднеквадратического значения суммы гармонических составляющих до 40-го порядка, к значению основной составляющей [7],

$$K_U = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2} / U_{(1)}, \quad (3)$$

В современных защитах для обнаружения переходных процессов используются высшие гармоники. Поэтому предлагается в стандартный набор СВИ дополнительно включить:

2. амплитуду 2-ой гармоники тока, необходимую для отстройки дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ [8]) от бросков токов намагничивания;

3. амплитуду 3-ой гармоники напряжения, необходимую для защиты обмотки статора генератора от однофазных замыканий на землю, которая работает по напряжению третьей гармоники [9].

Таким образом, использование на цифровой подстанции для систем РЗА сигналов СВИ с описанными выше дополнениями (необходимыми в каждом конкретном случае) вместо сигналов SV, позволит:

- а) в десятки раз сократить количество передаваемой информации;
- б) значительно упростить реализацию центрального сервера РЗА, поскольку необходимые для работы релейных защит данные будут передаваться совместно с СВИ, а не рассчитываться на сервере по сигналам SV.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. СТО 56947007-29.240.10.299-2020 Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС.
2. ГОСТ Р 54835–2011/IEC/TR 61850–1:2003. Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 1. Введение и обзор. – Введ. С 2012–09–01 – М.: Стандартинформ, 2012. – 45 с.

3. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the efficiency and reliability of RPA systems of digital step-down substations and digital grids // E3S Web of Conf., Volume 216, 01044, 2020.
4. СТО 59012820.29.020.011-2016. Стандарт релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования.
5. Концепция развития релейной защиты, автоматике и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «РОССЕТИ». Приложение 1 к приказу ПАО «Россети» и ПАО «ФСК ЕЭС» от 24.06.2022 № 286/186.
6. Устройство определения поврежденного фидера «НЕВА-ОПФ» – URL: <https://www.energosoюз.spb.ru/node/157082> (дата обращения: 01.10.22).
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.
8. Шкаф защиты трансформатора и автоматике управления выключателем типа ШЭ2607 045073. Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.172 РЭ.
9. Терминалы микропроцессорные серии ЭКРА 200. Руководство по эксплуатации. ЭКРА.650321.001 РЭ.

Научный руководитель: к.т.н. Д.Ф. Губаев, зав. каф. РЗА, КГЭУ.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АПВ НА КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ**

Г.А. Гранский, А.А. Гранская  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, РЗиА, АУСм-1-21

Количество и протяженность кабельных линий в энергетической системе растет ежегодно. Это связано с развитием современных мегаполисов, где часто бывает невозможно проложить воздушную линию. В связи с этим применяют комбинированные линии: кабельно-воздушные линии (КВЛ) на напряжение 110 кВ. Существуют требования по надежности электроснабжения, которые определяют работу автоматического повторного включения комбинированных линий электропередачи.

Классический метод АПВ не позволяет использовать данную автоматику на комбинированных линиях, т. к. применяемые на практике алгоритмы (в случае КЗ на кабельной части линии) могут приводить к значительному объему повреждений и дорогостоящему ремонту кабельной части, а значит и снижению надежности электроснабжения. В то же время в правилах устройства электроустановок [1] предписано: «... Должно предусматриваться автоматическое повторное включение (АПВ) воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линий всех типов напряжений выше 1 кВ. Отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован». Однако в реальной жизни, на практике типовые технические решения, которые описывают работу АПВ кабельно-воздушных линий электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения отсутствуют [2], [3]. Преобладающая часть аварийных отключений воздушных линий электропередачи является следствием неустойчивых повреждений, а на высоковольтных кабелях, как правило, отсутствует явление самоустранения повреждения. Поэтому, для эффективного применения АПВ на смешанных линиях необходимо с высокой точностью определить на каком из участков (воздушном или кабельном) произошло повреждение и только после этого реализовать работу АПВ.

КВЛ могут иметь разную топологию, в зависимости от количества кабельных вставок и их расположения на трассе [4]:

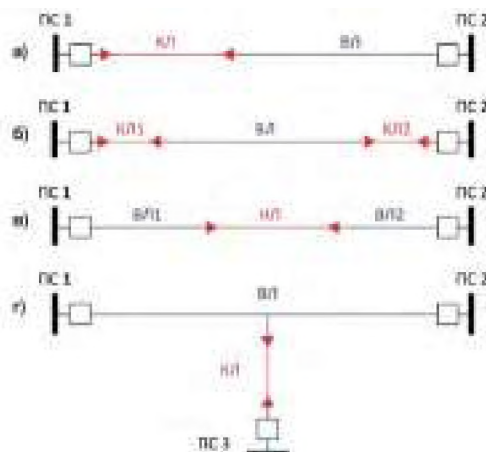


Рис. 1. Топология кабельно-воздушных линий

Поэтому, существуют различные методы определения места повреждения на КВЛ, например, дистанционный импульсный и дифференциальный методы.

Импульсный метод применяют тогда, когда кабельная вставка только одна и расположена в конце линии, согласно статистике о количестве КВЛ высокого напряжения, применяемых в России, преобладают линии с короткими кабельными вставками в конце линии.

Принцип импульсного метода для определения мест повреждений на ЛЭП основан на отражении электромагнитной волны от точек цепи, в которых входное сопротивление отличается от волнового, другими словами, от неоднородности среды.

Прибор, установленный в начале воздушной линии, посылает кратковременный импульс, который доходит до места повреждения и отражается обратно. Для того, чтобы определить расстояние до места повреждения или до неоднородности волнового сопротивления в линию посылают импульс, измеряют интервал  $t_x$  – время двойного пробега этого импульса до места повреждения и рассчитывают расстояние до места повреждения  $l_x$  по формуле (1):

$$l_x = t_x \frac{V}{2}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость распространения импульса в линии.

Если повреждения на воздушной линии нет, то импульс доходит до кабельной муфты и отражается. Прибор фиксирует только повреждения на воздушной части линии, не затрагивая кабельную. Прибор, зафиксировав повреждение на воздушной линии, дает команду на работу АПВ. Данный прибор может работать и в бестоковую паузу АПВ.

Наличие помех в в/ч тракте и возможность ложных срабатываний, отсутствие 100% селективности запрета АПВ ограничивает использования импульсного метода.

Дифференциальный метод основан на сравнении токов по концам кабельной части линии. Это предполагает установку измерительных трансформаторов по сторонам кабельного участка и каналов связи. Если токи текут в одном направлении, значит повреждение находится вне данного участка. При наличии повреждения на защищаемом участке токи будут течь во встречном направлении, что является основанием для блокировки работы АПВ [5]. К основному преимуществу дифференциального метода следует отнести высокую селективность. К недостаткам – сложность и дороговизна.

#### **Вывод:**

Рассмотрены импульсный и дифференциальный методы для эффективной работы автоматики повторного включения на кабельно-воздушных линиях 110 кВ.

Принимая во внимание актуальность проблемы выбора алгоритма работы АВП на кабельно-воздушных линиях для надежного электроснабжения потребителей и работы энергосистемы в целом, представляется целесообразным, при соответствующем технико-экономическом обосновании, использовать дифференциальный метод, обеспечивающий АПВ кабельно-воздушных линий электропередачи 110 кВ.



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1990. – Т. 2.
2. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1998. – Т. 5.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – 2016.
4. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями / Р. Г. Минуллин, Ю. В. Писковацкий, В. А. Касимов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 69-80.
5. Методика идентификации параметров магистральной линии распределительной сети по данным АСКУЭ / Т. Т. Оморов, Р. Ч. Осмонова, Б. К. Такырбашев, Ж. С. Иманакунова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 3(51). – С. 168-177.

Научный руководитель: к.т.н. Д.Ф. Губаев, зав. каф. РЗА КГЭУ.

## **ДВУХФАЗНЫЕ И ДВОЙНЫЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Н.А. Бондаренко  
Московский энергетический институт  
ИЭЭ, группа Э-02м-21

Техническая политика сетевых компаний предусматривает приоритетное развитие распределительных сетей напряжением 20 кВ и постепенную ликвидацию сетей напряжением 6 кВ [1]. Сети 20 кВ имеют резистивно-заземленную нейтраль. Методические указания для расчета замыканий на землю в таких сетях с учетом емкостных токов и переходных сопротивлений отсутствуют, что затрудняет выбор параметров срабатывания релейных защит.

С помощью расчетной модели, созданной с использованием программы Matlab Simulink, выполнено исследование двухфазных коротких замыканий и двойных замыканий на землю в распределительной сети 20 кВ с заземленной через резистор сопротивлением 12 Ом нейтралью. Параметризация модели осуществлена на основе типовой схемы питающего центра и соответствующего ему участка сети с пофазноэкранированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, рисунок 1. При верификации модели сопоставлялись результаты расчета токов на модели с натурными осциллограммами однофазных замыканий на землю.

На рисунке 2 представлены, сверху вниз, расчетные осциллограммы фазных напряжений в начале кабельной линии КЛ<sub>2,1</sub>, тока в резисторе заземления нейтрали обмотки 20 кВ трансформатора, фазные токи в токоограничивающем реакторе ТОР2, фазные токи в токоограничивающем реакторе ТОР1.

На осциллограммах показаны переходные процессы, вызванные на 40-ой мс двухфазным коротким замыканием на землю  $K_1^{(1,1)}$  и его отключением на 100-ой мс, на 140-ой мс двойным замыканием на землю  $D_1^{(1,1)}$  и его отключением на 200-ой мс, на 240-ой мс двухфазным коротким замыканием на землю  $K_2^{(1,1)}$  и его отключением на 300-ой мс, на 340-ой мс двойным замыканием на землю  $D_2^{(1,1)}$  и его отключением на 400-ой мс, на 440-ой мс двухфазным коротким замыканием на землю  $K_3^{(1,1)}$  и его отключением на 500-ой мс, на 540-ой мс двойным замыканием на землю  $D_3^{(1,1)}$  и его отключением на 600-ой мс.

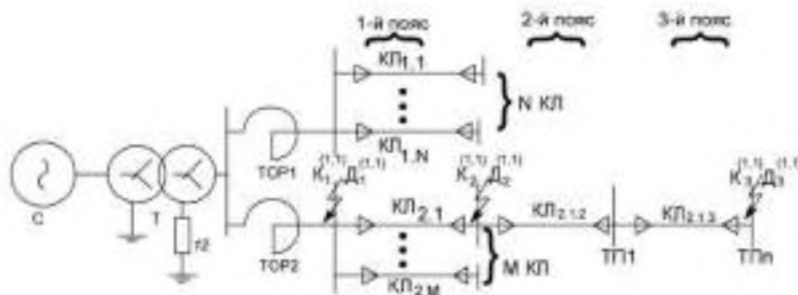


Рис. 1. Расчетная схема участка сети:

$K1^{(1,1)}$ ,  $K2^{(1,1)}$ ,  $K3^{(1,1)}$ , – двухфазное короткое замыкание на головном участке кабельной линии (КЛ) первого, второго и третьего пояса кабельной сети,  $D1^{(1,1)}$ ,  $D2^{(1,1)}$ ,  $D3^{(1,1)}$ , – двойное замыкание на землю на головном участке кабельной линии (КЛ) первого, второго и третьего пояса кабельной сети

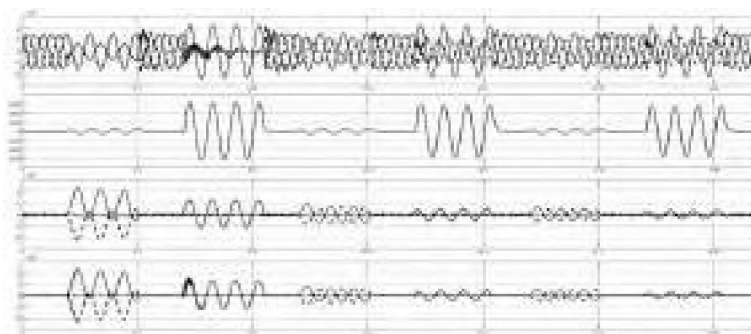


Рис. 2. Расчетные осциллограммы фазных напряжений, токов в резисторе и токоограничивающих реакторах

Активная составляющая тока двойного замыкания на землю практически не зависит от удаленности места повреждения от питающего центра, что подтверждается осциллограммой тока в резисторе нейтрали трансформатора.

Начальный момент двухфазного короткого замыкания выбран исходя из условия возникновения апериодической составляющей с амплитудой близкой к амплитуде периодической составляющей тока. При двойном замыкании на землю апериодическая составляющая быстро затухает из включения в контур тока резистора заземления нейтрали обмотки низкого напряжения силового трансформатора.

Таблица 1. Результаты расчета среднеквадратичных значений токов в поврежденных фазах при двухфазных коротких и двойных замыканиях на землю

Место и вид замыкания	Ток резистора нейтрали, А	Ток ввода секции, А	Ток КЛ первого пояса, А	Ток КЛ второго пояса, А	Ток КЛ третьего пояса, А
Без учета емкостных токов от КЛ и без переходного сопротивления					
$K_1^{(1,1)}$	456	9200	9200	-	-
$K_2^{(1,1)}$	407	4180	4180	4172	-
$K_3^{(1,1)}$	378	3060	3060	3060	3060
$D_1^{(1,1)}$	456	8580	8580	-	-
$D_2^{(1,1)}$	422	3460	3460	3460	-
$D_3^{(1,1)}$	400	2310	2310	2310	2310
С емкостными токами от КЛ суммарной длиной 250 км без переходного сопротивления					
$K_1^{(1,1)}$	442	9470	8920	-	-
$K_2^{(1,1)}$	400	4930	4420	3950	-
$K_3^{(1,1)}$	373	3850	3280	2840	2840
$D_1^{(1,1)}$	442	8250	8500	-	-
$D_2^{(1,1)}$	417	3530	3130	3170	-
$D_3^{(1,1)}$	398	2560	2040	2070	2070

С учетом емкостных токов от кабелей длиной 250 км и переходными сопротивлениями 90 Ом					
$K_1^{(1,1)}$	44,2	9270	8960	-	-
$K_2^{(1,1)}$	43,5	4220	4160	4160	-
$K_3^{(1,1)}$	43,0	3230	3040	3040	3040
$D_1^{(1,1)}$	893	1770	1220	-	-
$D_2^{(1,1)}$	760	1634	1030	1030	-
$D_3^{(1,1)}$	677	1549	925	924	923

Расчетные осциллограммы и результаты расчетов, приведенные в таблице 1, позволяют оценить возможность обеспечения чувствительности и селективности релейных защит от замыканий на землю, указывают на необходимость учета не только активной составляющей – 1000 А, обусловленной резистором в нейтрали трансформатора, но и емкостных составляющие токов от кабельных линий, а также и переходных сопротивлений в месте замыкания.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Положение о технической политике АО “ОЭК”. 2019. - 332 с.  
URL: [https://uneco.ru/sites/default/files/doc/tp\\_oek\\_v\\_red\\_pr\\_no\\_81\\_-\\_2019.pdf](https://uneco.ru/sites/default/files/doc/tp_oek_v_red_pr_no_81_-_2019.pdf) (дата обращения 22.11.2022)
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М., "Энергия", 1970. - 520 с.

Научный руководитель: к.т.н. Ю.П. Гусев, доцент ИЭЭ МЭИ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРОНОВ-РОБОТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЕЗАВАРИЙНОЙ РАБОТЫ АЭС

А.А. Филимонов

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, АТЭС

Атомные станции (АЭС) – это объекты повышенной опасности. Главный процесс в организации безопасной и надежной работы АЭС являются автоматизированные системы контроля, управления и защиты, например, автоматическое регулирование регенеративных подогревателей, конденсатора, давления в деаэраторе, редуционно-охладительных установок, уровня воды в парогенераторе. Они могут выполнять множество функций [1]. Для этого сконструированы датчики и приборы, автоматизирующие процесс работы.

Еще одним интересным решением является использование дронов-роботов для контроля безаварийного функционирования АЭС. Дроны могут служить для осмотра тепловых и вентиляционных труб, зданий, сооружений и трубопроводов с поиском дефектов, а также осмотра территории во время малой аварийной ситуации на станции, когда персоналу запрещено там находиться; для контроля и охраны территории во время угрозы террористического акта; для переноса малогабаритных грузов; осмотра линий электропередач и теплотрасс; также для наблюдения за реактором во время его работы, ремонта или замены в нем топлива. Преимущество беспилотных летательных аппаратов от установленных на станции датчиков заключается в их способности постоянно менять свое местоположение и оперативно контролировать ситуацию в любое время и почти в любом месте. Дрон в online – режиме передает информацию на удаленный пульт управления, на котором персонал может контролировать ситуацию.

Однако коптеры не могут быть использованы на “Крупной аварии” (уровень 7) и на “Серьезной аварии” (уровень 6), если на них не установлена дополнительная оболочка из материалов, которые не пропускают радиацию [2].

Данная автоматизированная система способна упростить контроль и управление АЭС в несколько раз, не вынуждая персонал заходить в зоны повышенной опасности и следить за всем дистанционно. Также во время чрезвычайной ситуации дроны могут находиться в очаге происшествия и передавать некоторую информацию, полезную для решения проблемы. Системы автоматического контроля и управления являются важной частью современных АЭС и обеспечивают их надежной и безопасной работой [3].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Автоматизированный системы управления АЭС: учеб. пособие / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова; Национальный Исследовательский Политехнический Университет – Томск – 2014.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила оценки соответствия оборудования, комплектующих, материалов и полуфабрикатов поставляемых на объекты использования атомной энергии, НП-071-06.
3. Системы для автоматического управления, контроля и защиты для АЭС / Вадим Дунаев, Евгений Медведовский – Текст : электронный // Control Engineering Россия – Июнь 2013 – URL: <https://controlengrussia.com/apparatnye-sredstva/sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-i-kontrolya-dlya-atomny-h-e-lektrstantsij/> (дата обращения: 04.11.2022)
4. URL: <https://integral-russia.ru/2021/12/09/drony-inspektory-dlya-promyshlennyh-predpriyatij-osnovnye-napravleniya-i-modeli/>

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Филимонова, доцент кафедры «Химия» КГЭУ.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРНЫМ ИСТОЧНИКОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Е.Е. Ревякин

Тюменский индустриальный университет  
ИПТИ, ЭЭ, ЭКа-19

Ежегодно растёт доля электрической мощности, вырабатываемой возобновляемыми и нетрадиционными источниками электроэнергии. Так, по прогнозу Минэнерго России установленная мощность таких источников к 2028 году увеличится до 4 % относительно общей установленной мощности [1]. При такой трансформации энергосистемы влияние возобновляемых и нетрадиционных источников на режимы её работы будет существенным.

Как правило, электроэнергия, получаемая из первичного энергоресурса, не соответствует нормируемому качеству электроэнергии. Поэтому, для сопряжения нетрадиционных источников электроэнергии с сетью промышленной частоты используют статические полупроводниковые преобразователи. Стандартная структура установки преобразования энергии нетрадиционного ресурса в электроэнергию промышленной частоты включает в себя: установку получения электроэнергии из первичного ресурса, выпрямитель, звено постоянного тока, инвертор, фильтр. Так как основным элементом такой установки, обуславливающим режимы её работы, является инвертор. Для совместной работы таких инверторных источников напряжения (ИИН) с энергосистемой используются инверторы, ведомые сетью (ВИН) [2].

Система управления (СУ) таких ВИН строится в функции слежения за вектором напряжения внешней сети, а напряжение, генерируемое ВИН, повторяет параметры напряжения внешней, по отношению к ВИН, сети [3]. С ростом числа ВИН в энергосистеме будут образовываться участки, в которых генерация электроэнергии осуществляется целиком ВИН. При возможных коротких замыканиях в энергосистеме, такой участок должен быть отключен от неё для исключения возможной подпитки места аварии. Соответственно, для СУ ВИН исчез-

нет внешний вектор напряжения, вследствие чего инвертор перестанет функционировать и будет отключен от сети своими защитами, а потребители, находящиеся внутри изолированного участка, потеряют питание.

В работе исследуется ИИН, работающий параллельно с внешней сетью. Цель работы заключается в разработке такой СУ ИИН, которая допускает работу ИИН как совместно с внешней сетью, так и изолированно от неё.

Существует концепция, в соответствии с которой СУ ИИН проектируют таким образом, чтобы ИИН работал по аналогии с классической синхронной машиной [4]. Иными словами, ИИН должен функционировать как управляемый источник напряжения, в отличие от ВИН, который функционирует как частично управляемый источник тока. Известно три способа реализации этой концепции: способ статических характеристик, способ виртуальной синхронной машины, способ виртуального генератора колебаний (осциллятор).

Стоит отметить, что нет единого подхода к построению СУ этими способами. Тем не менее, в результате реализации любого этого способа ИИН должен сохранять синхронизм при его совместной работе с энергосистемой, а в случае отключения от энергосистемы, должен продолжать работать как управляемый источник напряжения. В данной работе разрабатывается и исследуется СУ, реализованная по принципу заданного статизма (способ статических характеристик).

Рассмотрим, как сохраняется синхронизм между синхронными генераторами в составе энергосистемы. Известно, что системы регулирования генераторов поддерживают частоту их вращения в соответствии с заданной статической характеристикой [5]. Это необходимо для явного распределения мощности между генераторами. При возможных возмущениях в энергосистеме изменится баланс генерируемой и потребляемой мощностей, что приведёт к работе первичных регуляторов частоты вращения турбин генераторов. В результате их воздействия новому установившемуся режиму будут соответствовать новые значения генерируемой мощности и частоты вращения генераторов. Далее работают регуляторы вторичного регулирования частоты для того, чтобы вернуть её к номинальному значению. Благодаря такому подходу генераторы в системе работают синхронно. Таким же образом можно выполнить СУ ИИН, структурная схема которой показана на рисунке 1.

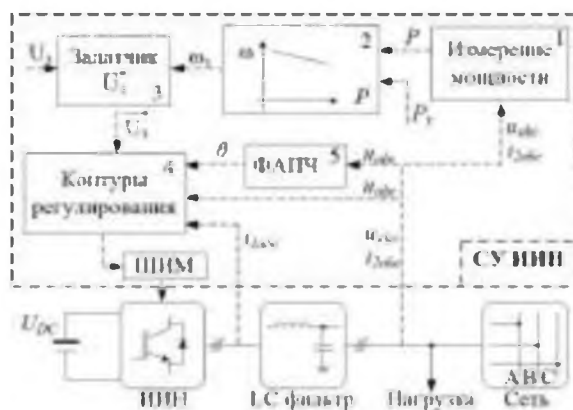


Рис. 1. Структурная схема СУ ИИН

В блоке 1 вычисляется мощность, генерируемая ИИН. Блоком 2 задаётся статическая характеристика ИИН. В результате сравнения генерируемой мощности ИИН с уставкой, задающей мощность, формируется сигнал задания частоты. В блоке 3 формируется вектор напряжения, который должен генерировать ИИН. Блоком 4 совместно с блоком ШИМ формируется закон управления силовыми ключами ИИН. Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) необходим для определения угла напряжения ИИН, по которому ориентированы контуры регулирования тока и напряжения инвертора. Предложенная схема СУ позволяет работать ИИН совместно с сетью выдавая мощность в нагрузку и во внешнюю сеть. При отключении внешней сети ИИН продолжить работать с новым значением частоты, которое зависит от предыдущего режима работы, а также от наклона статической характеристики. На рисунке 2 показаны

графики частоты напряжения ИИН при различных сценариях, полученные в среде моделирования Matlab/Simulink.

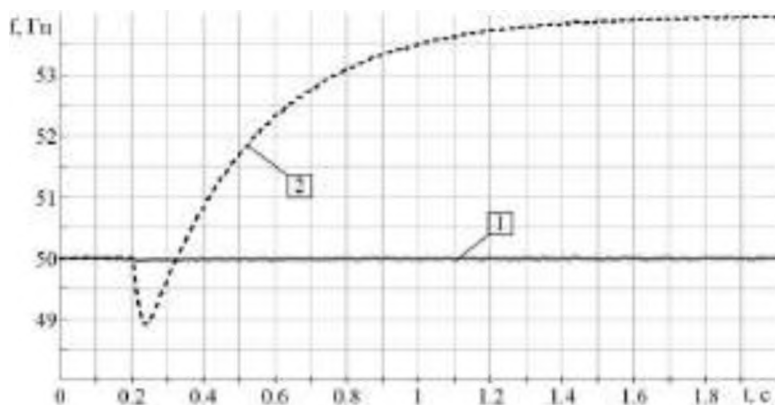


Рис. 2. Частота напряжения ИИН при отключении сети

На рисунке 2 в момент времени  $t=0,2$  с происходит отключение ИИН от внешней сети. Кривая 1 соответствует сценарию, при котором отключение происходит, когда вся мощность, генерируемая ИИН, отдаётся в нагрузку. Кривая 2 соответствует сценарию, когда предыдущий режим работы ИИН предполагал выдачу во внешнюю сеть части генерируемой мощности. Как видно из полученных зависимостей, ИИН продолжает генерировать мощность при исчезновении внешнего напряжения. Когда отсутствует обмен мощностью с внешней сетью, отключение от неё ИИН не приводит к изменению режима работы последнего. Однако, если обмен мощностью ИИН с сетью предшествовал моменту их разделению, то ИИН будет работать при новой частоте генерируемого напряжения. Очевидно, что такое изменение частоты напряжения недопустимо по условиям качества генерируемой электроэнергии, тем не менее ИИН продолжает работать.

Таким образом была получена система управления инверторным источником напряжения, которая сохраняет его работоспособность при исчезновении внешней сети. Показано, что предложенная СУ не обеспечивает стабилизации частоты генерируемого ИИН напряжения при его выходе на изолированную работу с избытком или дефицитом генерируемой мощности. Для стабилизации частоты в пределах допустимых значений следует реализовать вторичное регулирование частоты в предложенной СУ ИИН, что является задачей дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Приказ Минэнерго России от 28.02.2022 №146 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2022 – 2028 годы».
2. Ниткин Д. А. Проблемы синхронизации инвертора с сетью / Д. А. Ниткин, С. В. Дякин, С. И. Вольский // Практическая силовая электроника. – 2015. – Т. 60. – No 60. – С. 17- 21.
3. Калачев Ю. Н. Преобразователи автономных источников электроэнергии / Ю. Н. Калачев, А. Г. Александров. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 80 с. – ISBN 978-5-97060-925-5
4. Lin, Yashen, Joseph H. Eto, Brian B. Johnson, Jack D. Flicker, Robert H. Lasseter, Hugo N. Villegas Pico, Gab-Su Seo, Brian J. Pierre, and Abraham Ellis. 2020. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters [Electronic resource] // National Renewable Energy Laboratory – 2020 – URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf> (accessed 27.10.2022)
5. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость / П. Андерсон, А. Фуад. – Москва : Энергия, 1980. – 568 с.

Научный руководитель: д.т.н. В.В. Сушков, профессор НВГУ.



Для исследования работы дистанционной защиты выбрана полигональная характеристика срабатывания, реализованная в шкафу ШЭ2607 021 «ЭКРА» [2]. Расчет параметров характеристик срабатывания выполняется по следующим формулам [1].

$$z_{л5}^I = k_n z_{уд} l_{л} = k_n z_{л5}; z_{л5}^{II} = 0,85 z_{л5} + \frac{0,66}{k_T} z_{л4}^I; z_{л5}^{III} = 0,85 z_{л5} + \frac{0,66}{k_T} z_{л4}^{II}; \quad (1)$$

$$t_{ср}^I = 0; t_{ср}^{II} = t_{ср}^I + \Delta t; t_{ср}^{III} = t_{ср}^{II} + \Delta t. \quad (2)$$

Таблица 1. Результаты расчета характеристик срабатывания и выдержек времени комплекта ДЗ10 Л5

№ Ступени	Z, Ом	$t_{ср}, c$	$k_{ч}$
1 ступень	2,04+j9,116	0	-
2 ступень	5,508+j24,613	0,3	2,295 $\geq$ 1,2
3 ступень	6,722+j30,037	0,6	2,801 $\geq$ 1,2

В ходе исследования в целях четкого отображения и визуального представления на рисунках приведены совмещенные характеристики срабатывания комплекта защиты и годографа сопротивления при двухфазном замыкании (фаза А и В). Моделирование коротких замыканий в прикладном программном комплексе *MATLAB Simulink* производится в начале, на расстоянии 66 % линии, в конце и на смежной линии Л4. При этом рассматривается четыре случая: УПК выведено из эксплуатации; УПК в начале ЛЭП; УПК в середине ЛЭП; УПК в конце ЛЭП (на ПС 1 220 кВ).

**Отсутствие устройства продольной компенсации на линии.** Результат, представленный ниже (рисунок 2), позволяет убедиться в правильности работы моделируемой сети. Срабатывание первой ступени защиты происходит при междуфазном КЗ в начале и середине линии, что соответствует требованиям селективности. Срабатывание второй ступени защиты происходит при междуфазном КЗ в конце линии Л5 и КЗ в начале и середине смежной линии Л4, охватывая шины ПС 1 220 кВ, что также соответствует требованиям селективности. Срабатывание третьей ступени защиты происходит при междуфазном КЗ в конце смежной линии Л4, что также соответствует требованиям селективности.

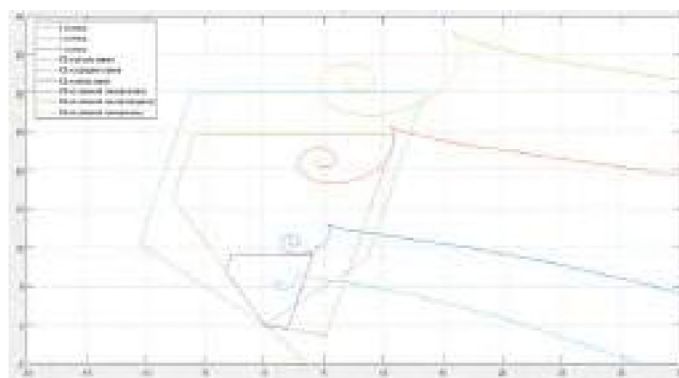


Рис. 2. Совмещенная характеристика срабатывания при двухфазном КЗ

**Устройство продольной компенсации в начале линии.** Полученный результат, представленный ниже (рисунок 3), демонстрирует, при установке УПК уровня компенсации 30% в начало исследуемой линии срабатывание первой ступени защиты происходит при КЗ в начале, в середине и в конце линии Л5. Срабатывание второй ступени защиты происходит при коротком замыкании в начале, в середине линии Л4. Срабатывание третьей ступени происходит при КЗ в конце линии Л4. Такое поведение защиты связано с тем, что сопротивление УПК при междуфазном КЗ до устройства не входит в контур КЗ, а при междуфазном КЗ за ним входит. При увеличении уровня компенсации до 60 % включительно наблюдается почти аналогичная картина, но за исключением того, что при КЗ на середине линии Л5 годограф не попадает в зону действия первой ступени. При сравнении графиков, представленных на рисунке 3, увеличение степени компенсации приводит к смещению годографа вниз.



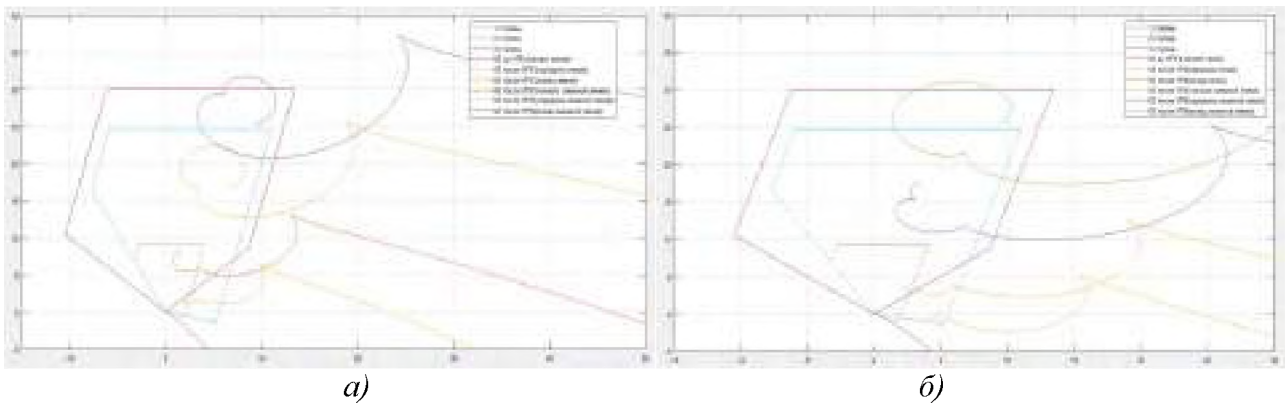


Рис. 3. Совмещенная характеристика срабатывания при двухфазном КЗ:  
 а) степень компенсации 30 %; б) степень компенсации 60 %

**Устройство продольной компенсации в середине линии.** Полученный результат, представленный ниже (рисунок 4), показывает при установке УПК уровня компенсации 30 % в середину исследуемой линии срабатывание первой ступени дистанционной защиты происходит при КЗ в начале, в середине вблизи до и после УПК и в конце исследуемой линии электропередачи Л5. КЗ в начале смежной линии Л4 также приводит к срабатыванию первой ступени дистанционной защиты линии Л5. Срабатывание второй ступени дистанционной защиты линии электропередачи происходит при КЗ в середине смежной линии Л4. Срабатывание третьей ступени дистанционной защиты линии происходит при КЗ в конце смежной линии электропередачи Л4. При увеличении уровня компенсации срабатывание первой ступени защиты происходит при КЗ в начале, середине, в конце исследуемой линии Л5 и при КЗ в начале смежной линии Л4. Срабатывание второй ступени защиты происходит при КЗ в середине смежной линии Л4. Срабатывание третьей ступени защиты происходит при КЗ в конце смежной линии Л4. При сравнении графиков, представленных на рисунке 4, увеличение степени компенсации приводит к смещению годографа вниз.

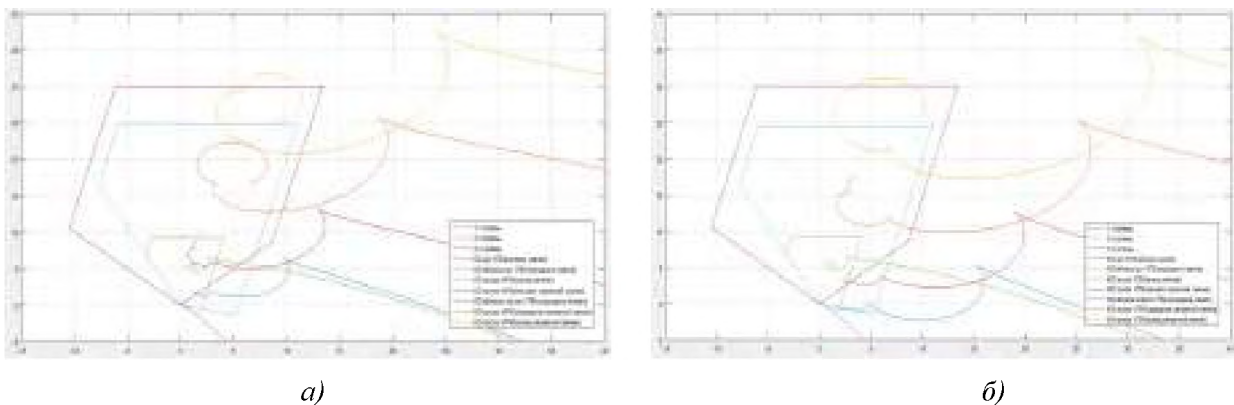


Рис. 4. Совмещенная характеристика срабатывания при двухфазном КЗ:  
 а) степень компенсации 30 %; б) степень компенсации 60 %

**Устройство продольной компенсации в конце линии.** Полученный результат, представленный ниже (рисунок 5), показывает при установке УПК в конце линии электропередачи Л5 уровня компенсации 30 % срабатывание первой ступени дистанционной защиты линии при КЗ в начале, в середине, в конце исследуемой линии Л5, при КЗ в начале смежной линии Л4 также приводит к срабатыванию первой ступени защиты. Срабатывание второй ступени дистанционной защиты происходит при КЗ в конце линии Л5, в начале и в середине смежной линии Л4. Срабатывание третьей ступени дистанционной защиты происходит при КЗ в конце смежной линии Л4. При увеличении уровня компенсации наблюдается аналогичная ситуация. При сравнении графиков, представленных на рисунке 5, увеличение степени компенсации приводит к смещению годографа вниз.

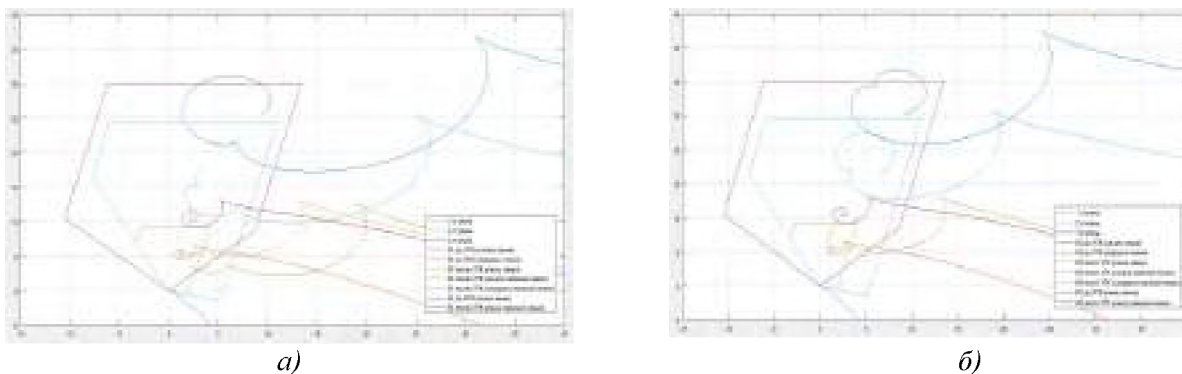


Рис. 5. Совмещенная характеристика срабатывания при двухфазном КЗ:  
 а) степень компенсации 30 %; б) степень компенсации 60 %

Поведение защиты обусловлено явлением инверсии напряжения – изменении фазового угла на  $180^\circ$ . Инверсия напряжения происходит при повреждении вблизи конденсаторов, то есть если сопротивление от места установки ДЗ до места повреждения является емкостным, при этом ток имеет индуктивный характер, а значит сопротивление от источника питания до места КЗ положительное. Поэтому происходит изменение направленности вектора сопротивления, что приводит к неселективному срабатыванию защиты.

Таким образом, результат исследования показывает, что установка УПК оказывает влияние на функционирование дистанционной защиты линии. Все зависит от места установки конденсаторных батарей в линию и сопротивление будет либо включено в контур КЗ, либо нет. Поэтому проявляется неоднозначность срабатывания первой и второй ступеней дистанционной защиты. В целом на работу третьей ступени дистанционной защиты наличие УПК на линии не оказывает, так как сопротивление конденсаторов находятся в пределах зоны ее действия. Сопротивление УПК, установленного в начале линии, будет входить в контур КЗ, а значит в зону срабатывания первой ступени дистанционной защиты, что требует ограничения зоны действия. Короткие замыкания между защитой и конденсаторной установкой сопротивление УПК будет находится вне зоны действия первой ступени дистанционной защиты линии, а при коротких замыканиях за УПК сопротивление входит в зону срабатывания первой ступени. То есть также необходимо производить ограничение зоны действия первой ступени дистанционной защиты. Если УПК установлено в конце линии сопротивление его находится вне зоны действия первой ступени, но при коротком замыкании за пределами зоны действия первой ступени защиты неверно может определить место короткого замыкания и сработать. Решением данной проблемы является ограничение зоны срабатывания первой ступени дистанционной защиты. Но такой подход не позволяет использовать дистанционную защиту при установке УПК на линии как основную защиту, так как первая ступень будет эффективна будет только при очень близких КЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35- 330 кВ. М.: издательство «Энергия», 1966 г. – 172 с. с черт.
2. СТО 56947007- 29.120.70.200-2015 Методические указания по расчете и выбору параметров настройки(уставок) микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики производства ООО НПП «ЭКРА», «ABB», «GE Multilin» и «ALSTOM Grid»/«AREVA» для воздушных и кабельных линий с односторонним питанием напряжением 110-330 кВ: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»: дата введения 27.04.2015 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: 2015. – 356 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.С. Васильев, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А.А.-В. Садулаев, М.С. Садыков

Грозненский государственный нефтяной технический университет  
ИЭ, АТПП, УИТС-20п

Механизм управления спросом в электроэнергетике активно развивается в России и ряде зарубежных стран. По состоянию на 2022 год в России успешно реализуется пилотный проект по внедрению механизма в электросетевую систему. Системным оператором Единой энергетической системы реализуется отбор агрегаторов управления спросом на электрическую энергию. Согласно последним отчетам Системного оператора [1], в механизме управления спросом на данный момент участвует более 250 субъектов электроэнергетики, включая крупные энергосбытовые компании. Основные агрегируемые объекты – коммерческие потребители электроэнергии промышленного сектора. Агрегируемые объемы – десятки МВт в месяц. Например, за июнь 2021 года каждый агрегатор оказал услуги в объеме от 0,1 МВт до 19 МВт. По сравнению с началом 2020 годом количество агрегаторов растет с каждым месяцем. В бытовом сегменте механизм управления спросом на данный момент не функционирует. Согласно статистическим исследованиям, на бытовых потребителей и сферу услуг приходится только 23,1 % энергопотребления, когда промышленность потребляет 46,7 % [8].

Анализ литературы в данной сфере показывает, что в этой теме существует ряд научных и технических проблем, требующих решения. В работах [2, 3] уделено внимание вопросам повышения достоверности данных об объеме разгрузки. Предложена интеллектуальная система аналитики и управления спросом на электроэнергию в смарт-сетях, основанная на блокчейн технологии. Также, в работах [4, 5] описаны общие проблемы реализации механизма управления спросом на электроэнергию в условиях промышленных и бытовых объектов. Механизм управления спросом часто используется как элемент системы распределенной генерации для повышения эффективности [6]. Аналитический материал о результатах пилотного внедрения механизма управления спросом в России представлен в работе [7]. Из приведенных выше публикаций видно, что рынок управления спросом на электроэнергию в России находится на стадии пилотного внедрения механизма и выбора оптимальных технических решений и алгоритмов. Особое внимание в научных работах уделяется методам прогнозирования энергопотребления, а также алгоритмам автоматической разгрузки и передачи отчетных данных агрегатору и системному оператору.

Основная проблема, решению которой посвящена данная работа – отсутствие эффективных технических решений для интеллектуального анализа данных об энергопотреблении бытовых объектов с автоматизированной разгрузкой и выводом отчетности. Цель работы – создание условий для внедрения механизма управления спросом на электроэнергию в сектор бытовых потребителей.

Для реализации механизма управления спросом на электроэнергию в бытовом секторе необходимо определить методы прогнозирования энергопотребления, а также метод нахождения объема разгрузки. Одним из методов прогнозирования энергопотребления является регрессионный анализ. Модель множественной регрессии записывается для линейного случая в следующем виде [9, 10, 11]:

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_i x_{ij} + \varepsilon_j, \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты линейной регрессии;  $y_j, x_{ij}$  – значения  $j$  – й функции и  $i$  – й независимой переменной;  $\varepsilon_j$  – случайная ошибка;  $n$  – число независимых переменных в модели. В некоторых случаях полагается, что  $a_i$  – свободный член, и  $x_{0j} = 1$ .

Для прогнозирования энергопотребления, также, используют такие технологии, как искусственные нейронные сети [12]. Свойство самообучения нейронных сетей безусловно является большим преимуществом для прогнозирования энергопотребления. Математически, модель искусственного нейрона можно описать следующими уравнениями [10–13]:

$$u_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j; \quad (2)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k), \quad (3)$$

где  $x_1, x_2 \dots x_m$  – входные сигналы;  $\omega_{k1}, \omega_{k2} \dots \omega_{kь}$  – синоптические веса нейрона  $k$ ;  $u_k$  – линейная комбинация входных воздействий;  $b_k$  – порог;  $\varphi(u_k + b_k)$  – функция активации;  $y_k$  – выходной сигнал нейрона.

Наиболее часто используемые на практике методы прогнозирования энергопотребления, согласно литературе: прогнозная экстраполяция, регрессивный анализ (в том числе с использованием искусственных нейронных сетей), адаптивные методы, прогнозирование с использованием гибридных систем, техноценоз.

Важным элементом в механизме управления спросом является методика нахождения объема разгрузки. Существует несколько методов нахождения объема разгрузки с использованием Графика базовой нагрузки (baseline): метод «X/Y» (10 из десяти, 5 из десяти и 4 из пяти); метод взвешенного среднеарифметического; метод похожего дня. Оценка точности построения графика базовой нагрузки определяется по формуле:

$$T = \frac{\sqrt{\sum(\text{Измерение}_{\text{час}} - \text{График нагрузки}_{\text{час}})^2}}{\sum \text{Измерение}_{\text{час}}} \cdot 100 \% . \quad (4)$$

Для выбора оптимального метода прогнозирования бытовых потребителей был проведен анализ характера потребления в данном сегменте, а также сравнительный анализ наиболее часто используемых методов. По итогам анализа оптимальным был принят метод линейной регрессии с использованием элементов искусственного интеллекта.

Архитектура программной части системы включает в себя облачный сервер с СУБД PostgreSQL и протоколом взаимодействия с клиентами через MQTT. Обмен данными между аппаратной частью и сервером осуществляется по нескольким каналам. Основной канал – беспроводная связь стандарта IEEE 802.11 (WiFi). Вторичный канал связи – GPRS через модуль связи SIM300C от SIMCOM Technology GROUP Ltd. Клиентская часть системы – это ВЕБ приложение с отображением основных устройств мониторинга и управления с возможностью взаимодействия с ними в режиме реального времени.

Аппаратная часть системы разработана на базе чипа ESP8266 и энергосчетчика PZEM004. На рисунке 3 представлены элементы аппаратной части системы. Схема включает в себя электромеханическое реле (1), Arduino совместимая платформа с чипом ESP8266, обеспечивающим доступ системы к сети Wi-Fi и Интернет, модуль питания (3), реализованный в виде AC-DC конвертора и модуль энергосчетчика (4), обеспечивающий измерение параметров нагрузки. Точность измерения – 5 %.

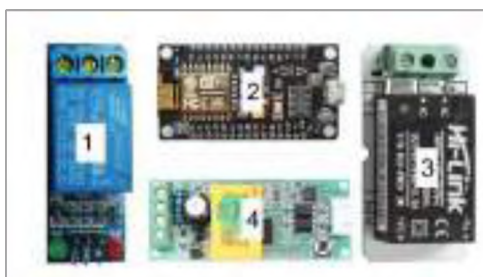


Рис. 1. Структура аппаратной части системы

Анализ результатов пилотного внедрения показал, что используемые в программно-аппаратном комплексе аналитические и исполнительные инструменты сработали штатно и эффективно. В ходе реализации данного проекта был проведен мониторинг энергопотребления 10 бытовых потребителей электроэнергии. Мониторинг проводился с использованием собственной системы измерения и анализа энергопотребления. Данные об энергопотреблении

объектов передавались в облачную систему thinger.io. Средняя мощность одного объекта – 5 кВт. Максимальная мощность – 12 кВт. Максимальное суточное энергопотребление – около 20 кВт\*ч/сут. Регистрируемые параметры: энергопотребление, напряжение, ток, частота. Период регистрации – от 1 до 5 раз в секунду.

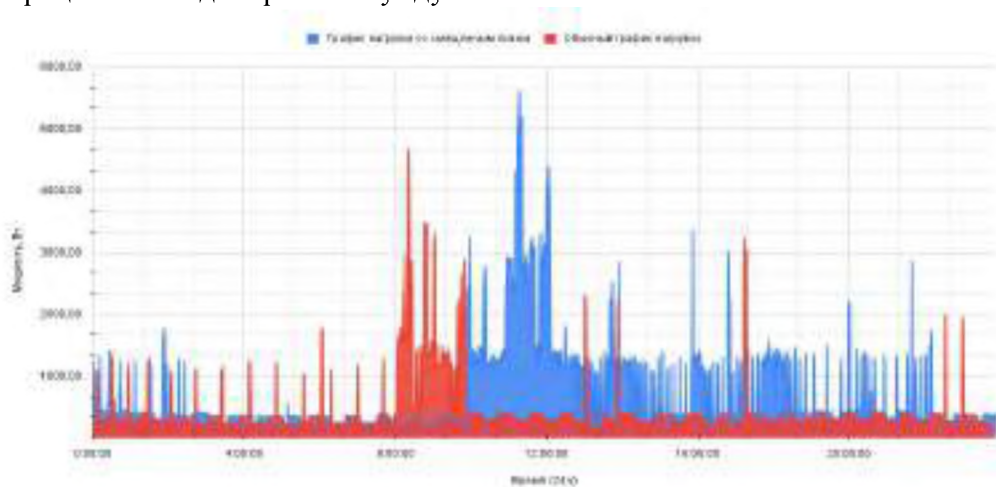


Рис. 4. График нагрузки бытового потребителя электроэнергии

На рисунке 4 представлено сравнение графиков нагрузки: красный график – обычная работа, синий график – разгрузка в пиковый период и смещение нагрузки. Пиковая мощность объекта составляет около 6 кВт. Пиковые периоды приходятся на утреннее время, когда включаются наиболее мощные потребители, такие как водонагреватели, климатические системы и т. д. При тестовом снижении потребления подключенных к системе объектов достигнута разгрузка в пиковый период в объеме 30 % от общего энергопотребления со смещением пика потребления в менее загруженные часы. Точность прогноза оказалась на уровне 70 %. Были опробованы алгоритмы параллельной и последовательной разгрузки потребителей, в зависимости от необходимого объема разгрузки.

Таким образом, представленная интеллектуальная система управления спросом показала свою эффективность. Система использует передовой алгоритм прогнозирования энергопотребления, основанный на регрессионном анализе данных. Данная система выполняет несколько важных функций для различных игроков рынка электроэнергетики. Для бытовых потребителей электроэнергетики – это снижение расходов на электроэнергию за счет оптимизации графика нагрузки и распределение пиковых часов на другие периоды. Для электросетевых организаций – это повышение гибкости и надежности сетей за счет снижения нагрузки в пиковые часы. Однако, для внедрения подобных решений необходимо комплексное развитие нормативно-правовой базы в сфере электроэнергетики.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Протокол о составе субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по управлению спросом на электрическую энергию в период с мая по июнь 2022 года. <https://www.so-ups.ru/>. Accessed 15 May 2022
2. Pop C, Cioara T, Antal M, Anghel I, Salomie I, Bertocini M. Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids. *Sensors*. 2018; 18(1):162.
3. Mashima, D., Herberg, U. & Chen, W.-. 2014, "Enhancing Demand Response signal verification in automated Demand Response systems", 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014.
4. K. Sakurama and M. Miura, "Communication-Based Decentralized Demand Response for Smart Microgrids," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 5192-5202, June 2017

5. Баев И. А., Дзюба А. П., Актуальные требования к системе управления спросом на электропотребление в России // *The Newman in Foreign policy*. 2018. №44 (88).
6. Ханаев В. В. Управление спросом на электроэнергию как дополнение к распределённой генерации // *ЭП*. 2020. №4 (146).
7. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Управление спросом на электропотребление в России // *СРРМ*. 2018. №1 (106).
8. Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/>
9. Paterakis, N.G., Erdinc, O. & Catalao, J.P.S. 2017, "An overview of Demand Response: Key-elements and international experience", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 871-891.
10. Wang, J., Zhong, H., Ma, Z., Xia, Q. & Kang, C. 2017, "Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system", *Applied Energy*, vol. 202, pp. 772-782.
11. Vazquez-Canteli, J.R. & Nagy, Z. 2019, "Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques", *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1072-1089.
12. Liu, N., Yu, X., Wang, C. & Wang, J. 2017, "Energy Sharing Management for Microgrids with PV Prosumers: A Stackelberg Game Approach", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1088-1098.
13. Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C. & Kay, M. 2018, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 109-125.

Научный руководитель: Б.Б. Юсупов, зав. лаб. «Солнечные энергосистемы» ГГНТУ.

## **ЦИФРОВОЕ ОТОПЛЕНИЕ**

В.Д. Юровская, В.В. Кижин  
Братский государственный университет  
ФЭиА, КЭ

В настоящее время интенсивного развития инновационных технологий и внедрения их в финансовые системы стран, всё большую популярность набирает криптовалюта. Криптовалюта – это зашифрованная децентрализованная денежная единица, которая может свободно передаваться между участниками распределенной сети, использоваться для оплаты различных товаров и услуг. Наиболее распространённой цифровой валютой является Bitcoin, который представляет собой новое поколение децентрализованной криптовалюты, созданной и работающей на базе Blockchain [1]. Добывают криптовалюту посредством майнинга – процесса, подразумевающего использование аппаратных ресурсов электронно-вычислительных машин с целью выполнения математических вычислений для подтверждения транзакций и обеспечения безопасности распределенной сети.

В данный момент основным оборудованием для добычи Bitcoin является – ASIC (application specific integrated circuit), что в переводе на русский язык означает «интегральная схема специального назначения». В процессе добычи криптовалюты происходит нагрев оборудования – хешплат, на которых и расположены процессоры, выполняющие вычислительные функции и работающие по заданным алгоритмам майнинга. В связи с этим одним из важнейших условий стабильной работы, в том числе предотвращения выхода из строя элементов ASIC, является постоянный отвод тепла. На сегодняшний день для упрощения процесса охлаждения получаемое от майнингового оборудования тепло, имеющее высокий температурный потенциал, сбрасывается в атмосферу, теряя перспективу к дальнейшей реализации.

В данной работе проведено исследование температурного потенциала майнингового оборудования, расположенного в Иркутской области, а также рассмотрены различные варианты по полезному использованию полученного тепла.

Актуальность данной темы обусловлена следующими факторами:

1. Необходимость утилизации тепла, полученного от системы охлаждения оборудования;
2. Скачущая стоимость криптовалюты, приводящая к тому, что в определённые промежутки времени доход от майнинговой системы сводится к нулю.
3. Низкая стоимость электроэнергии в рассматриваемой области, обусловленная наличием большого количества крупных гидроэлектростанций.

Разное оборудование для майнинга может иметь различные температурные пределы, на примере статистики, приведенной в [2], один из самых популярных ASIC – Antminer линейки S9, T9, имеет максимальную температуру платы 90 °С, температуру кристалла – 135 °С. Antminer S9 Hydro, на водяном охлаждении, имеет максимальную температуру на плате 95 °С.

Для оценки действительного количества тепловыделений, реального теплового потенциала от работы майнинговой системы и выполнения расчетной части были определены необходимые параметры оборудования. Температуры плат и характеристики ASIC Whatsminer M21S с установленным на нем вентиляторами DC BRUSHLESS PFC1412HE-00 (рисунок 1 и таблица 1) были установлены из его личного кабинета, внешнетемпературные параметры были определены в ходе тепловизионной съемки (рисунок 2). Тепловизионное обследование проводилось при помощи тепловизора FLIR Systems AB.

Устройство	Эффективный чипы	Температура
CM0	66	70.00
CM1	66	65.00
CM2	66	66.00

Рис. 1. Характеристики оборудования с личного кабинета исследуемого ASIC

Таблица 1. Измеренные параметры оборудования

Параметр	Значение
Электрическая мощность, потребляемая ASIC	3,438 кВт·ч
Расход воздуха вентилятором	0,052 кг/с
Температура воздуха на входе в ASIC	5 °С
Температура воздуха на выходе из ASIC	70 °С

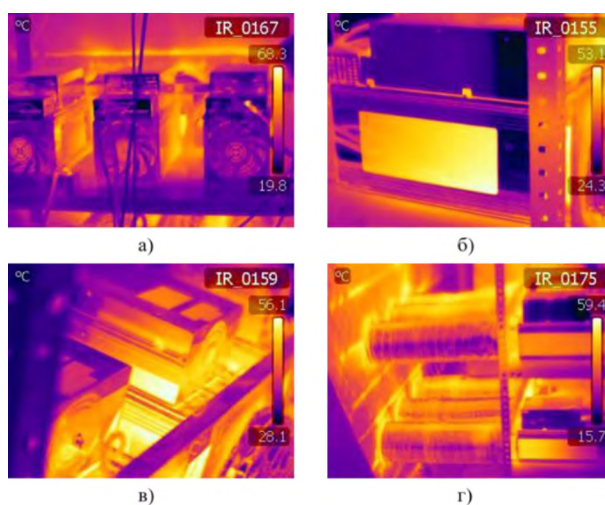


Рис. 2. Термограмма исследуемого оборудования:

а – фронтальная часть ASIC; б – вид справа; в – вид сзади; г – гофры, отводящие тепло с ASIC в виде воздушного потока в соседнее помещение

На основе полученных результатов по уравнению теплового баланса было рассчитано количество тепла, выделяемое ASIC, кВт·ч:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха вентилятором, кг/с;  $c$  – удельная теплоемкость воздуха, принимаемая равной 1,005 кДж/(кг·°С);  $t_{\text{вых}}$ ,  $t_{\text{вх}}$  – температуры воздуха на входе и выходе из ASIC, °С. Значения параметров  $G$ ,  $t_{\text{вых}}$ ,  $t_{\text{вх}}$  берём из таблицы 1.

$$Q = 0,052 \cdot 1,005 \cdot (70 - 5) = 3,419 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Далее был рассчитан коэффициент полезного действия (КПД) ASIC, %:

$$\eta = \frac{Q}{P} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $P$  – электрическая мощность, потребляемая оборудованием, кВт·ч (значение параметра указано в таблице 1).

$$\eta = \frac{3,419}{3,438} \cdot 100 = 99,46 \text{ \%}.$$

Рассматривая со стороны энергетики майнинговое оборудование и опираясь на рассчитанный КПД, можно сделать вывод что ASIC по принципу своей работы является электрокотельным агрегатом, при этом количество вырабатываемой тепловой энергии численно равно количеству потребляемой оборудованием электрической энергии. А при условии добычи криптовалюты ASIC может являться бесплатной системой отопления, поскольку финансовая прибыль от майнинга покрывает денежные расходы на электроэнергию, а тепло, вырабатываемое от оборудования, возможно использовать для системы отопления.

Системы отопления на основе тепла, получаемого от майнингового оборудования, уже успешно реализуются в северных странах с низкой стоимостью электроэнергии: Шотландия, Канада, страны Скандинавии, Россия [3]. На сегодняшний день имеется множество вариаций по реализации тепла майнингового оборудования в системах отопления, но самыми популярными и наиболее перспективными являются:

1. Иммерсионное – процесс отвода тепла от работающего оборудования путем его полного погружения в емкость с иммерсионной жидкостью с последующей передачей ей тепловой энергии.

2. Жидкостное – процесс передачи тепловой энергии от процессоров рабочего оборудования к хладагенту, находящемуся в водоблоке, который непосредственно прилегает ко всей поверхности хешплаты, и дальнейший отвод теплоносителя к радиаторам в системе отопления.

3. Воздушное – процесс отвода тепла от майнингового оборудования путем вынужденной конвекции воздушным потоком, создаваемым кулерами, и с дальнейшим использованием полученного теплового потока в системе топления.

На данный момент имеются, как абсолютно новые, так технологически улучшенные варианты реализации систем отопления на основе тепла, получаемого от майнингового оборудования.

Резюмируя вышесказанное и учитывая уже имеющийся успешный опыт реализации систем отопления на основе тепла, получаемого от майнингового оборудования, можно сделать вывод, что данная тема актуальна и представляет интерес для дальнейшего её изучения и последующего внедрения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. BITCOIN: состояние и перспективы развития криптовалюты / Е.Ю. Тригуб // Интеграция наук. – 2017. – № 10 (14). – С. 55-58.
2. Нормальные рабочие температуры майнера // Bitmain. 2018. URL: <https://support.bitmain.com/hc/ru/articles/360005088914-Нормальные-рабочие-температуры-майнера> (дата обращения 09.11.2022).
3. Отопление дома майнинг-фермой // Crypto.ru. 2022. URL: <https://crypto.ru/otoplenie-majningom> (дата обращения 09.11.2022).

Научный руководитель: В.В. Кижин, ассистент КЭ ФЭиА БрГУ.



# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ОТ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Г.Н. Ансабекова  
Казахский агротехнический университет

В настоящей работе рассматривается возможность построения защит не по достижению критических значений, а по характеру изменения величин, которые свидетельствуют о состоянии защищаемого объекта. В данном случае предлагается использовать элементы нечеткой логики (Fuzzy Logic) для идентификации состояния системы, в том числе вида ненормального режима работы. На основе изученных примеров использования нечеткой логики и нейронных сетей в разных отраслях, доказаны целесообразность и возможность применения элементов нечеткой логики в устройствах защиты и автоматики электроэнергетических сетей для идентификации однофазного короткого замыкания (КЗ) [1, 2].

В настоящее время нечеткая логика и нейронные сети широко применяются для решения реальных проблем. Нечеткая логика – это набор математических принципов, используемых для представления знаний, в отличие от классической бинарной логики. Это мощный инструмент для работы в условиях неопределенности, который первоначально был введен для обеспечения надежных и недорогих решений для реальных проблем. Системы нечеткой логики могут быть классифицированы по трем основным типам: 1) простые системы нечеткой логики (pure Fuzzy Logic Systems); 2) нечеткие системы Такаги и Суджено (Takagi and Sugeno); 3) системы нечеткой логики с фаззификатором и дефаззификатором. Как правило, системы нечеткой логики типа 1 (T1FLS) были реализованы в нескольких системах, таких как системы прогнозирования, системы управления, базы данных и клинические диагнозы в здравоохранении [3].

Одним из современных методов управления техническими системами является синтез интеллектуальных методов и классических систем управления объектами. Интеллектуальные системы управления, использующие аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) и (или) нечеткую логику, позволяют проводить идентификацию сложных нелинейных динамических объектов и формировать для них нелинейные законы управления, что дает возможность решать рассматриваемую задачу в условиях неопределенности на основе имеющихся экспериментальных данных [4, 5, 6]. Поэтому, рассматривая электрические системы, как сложную систему с быстроизменяющимися и взаимосвязанными параметрами, можно применить элементы нечеткой логики для идентификации ненормальных режимов, например, коротких замыканий. Как известно, для определения вида короткого замыкания и отключения поврежденного участка в электрической системе существуют специальные устройства, называемые релейная защита и автоматика. Избежать данного недостатка возможно путем применения структур нечеткой логики, позволяющей обеспечить формализацию качественных, размытых в смысловом отношении, понятий и связей [7].

На качество защиты воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) влияет много конструктивных факторов – чувствительность защиты, коэффициент отстройки, погрешности расчета тока КЗ, погрешности реле аperiodической составляющей тока КЗ.

Очевидно, то, что без выдержки времени для защиты ВЛЭП не используется в качестве единственной защиты. В некоторых случаях для радиальных распределительных линий, к которым подключаются трансформаторы, используется только одна защита в виде токовой отсечки (ТО). Тогда настройку производят с учетом тока КЗ за трансформатором, вводя его в защищаемую зону.

Вполне понятным имеется факт того, что зависимость от принципа действия токовых защит на электромеханической элементной базе обуславливает большое количество предварительных расчетов для определения параметров схемы, выбора оборудования и его

настройка. При этом необходима наладка и согласование с другими видами защит, работающих по различным принципам. Все это создает совокупность ряда факторов и критериев при защите электроустановок, учет которых необходим и сложность организации защит возрастает с удалением защиты от потребителя и приближением к источнику питания. При этом комплекс защит в целом или по отдельности должен отвечать ряду требований, и в первую очередь качеству и надежности функционирования. Таким образом, можно обобщить принцип действия токовых защит, который заключается в достижении величины силы тока заданного определенного значения.

На сегодняшний день актуальным является возможность использования нейро-нечетких технологий для защиты и автоматики силовых трансформаторов. В связи с этим для проведения опыта рассмотрим случай, когда  $z_T = \text{var}$ , при этом не учитываем магнитную связь в трансформаторах. Предполагаем, что  $E_G = \text{const}$ ,  $E_L = \text{const}$ ,  $z_G = \text{const}$ ,  $z_w = \text{const}$ ,  $z_L = \text{const}$ . В нашем случае входными данными является сопротивление трансформатора, выходными –  $|U_{A,B,C}|$ ,  $|I_{A,B,C}|$ ,  $\varphi_{A,B,C}$ . Опыт был проведен с помощью MatCad для силовых трансформаторов мощностью 10, 16, 25 и 40 МВА при однофазном коротком замыкании: КЗ – К<sup>(1)</sup>.

Места возникновения КЗ рассмотрим следующим образом: до трансформатора – точка 1, в трансформаторе – точка 2, за трансформатором – точка 3 (рисунок 1). Система, указанная в схеме 1 состоит из генератора, линий, двухобмоточного силового трансформатора напряжением 110/10 кВ и обобщенной нагрузки. По результатам проведенных опытов был сделан анализ на соответствие граничным условиям при различных видах кз в электрических сетях, описываемых в теории. Также была составлена динамика изменений токов и напряжений при однофазном кз и относительно нормального режима системы. После чего были составлены правила для создания математической модели с применением элементов нечеткой логики для идентификации однофазного короткого замыкания.

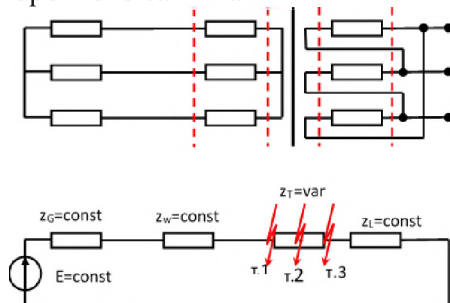


Рис. 1. Схема системы напряжением 110/10 кВ

Для проведения опыта были выбраны система программирования MATLAB, редактор системы нечеткого вывода Fuzzy Logic и алгоритм Mamdani, основанный на нечетком логическом выводе. Алгоритм Mamdani обеспечивает визуализацию процедуры нечеткого логического вывода и поверхностей «входы-выход», т. е. «input-output». В нечеткой логической системе правила используются для лингвистического описания сложных отношений между вводными и выходными нечеткими переменными в виде операторов IF–THEN. В качестве наименования термов были приняты: «imеn», «0», «uvel». Правила создаются отдельно для токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также по фазным значениям. В этом методе используется гистограмма предшествующего членства функции и каждый атрибут разбивается на несколько нечетких множеств. Мы использовали 9 функций членства  $fh(\cdot)$ ,  $h=1, 2, \dots, 9$  для каждого атрибута в компьютерном моделировании. Так как расчет в системе MatCad был произведен в системе относительных единиц, числовые интервалы по оси X были приняты  $[-1 \ 0 \ 1]$ , по оси Y –  $[0 \ 1]$ .

В результате введения входящих параметров мы должны получить на выходе следующие данные, которые показаны на рисунке 2.

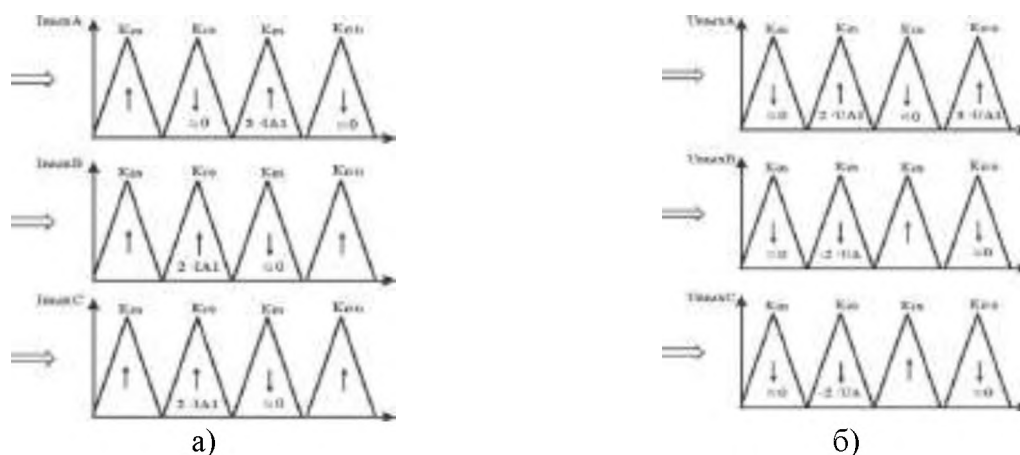


Рис. 2. Выходные параметры для идентификации видов короткого замыкания: а) по фазным токам, б) по фазным напряжениям

Предложенная логика идентификации видов короткого замыканий с применением элементов нечеткой логики дает возможность выявлять и распознавать неисправности в элементах сети. В сравнении с применяемыми устройствами РЗА данный метод может повысить быстродействие устройств защиты и автоматики.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ансобекова Г.Н. Анализ применения элементов нечеткой логики для идентификации видов коротких замыканий в электроэнергетических сетях. "Innovation Management and Technology in the Era of Globalization": Materials of the IX International Scientific-Practical Conference. In two volumes. Volume I – Edinburgh, UK: Regional Academy of Management, 2022. (178 стр.).
2. Ansabekova G. Possibilities of using fuzzy logic elements in protection and automation devices of electric power networks. The scientific heritage (Budapest, Hungary) The journal is registered and published in Hungary. The journal publishes scientific studies, reports and reports about achievements in different scientific fields. Journal is published in English, Hungarian, Polish, Russian, Ukrainian, German and French. Articles are accepted each month. Frequency: 24 issues per year. Format - A4 ISSN 9215 — 0365, VOL 1, No 80 (80) (2021) (8 стр.).
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTACH.-СПб.:БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Chanda D, Kishore NK, Sinha AK (2005) Применение вейвлет-анализа мультирезолюций для идентификации и классификации неисправностей на линиях электропередачи. Electr Power Syst Res 73:323–333.
5. Jamil M, Sharma SK, Singh R (2015) Обнаружение и классификация неисправностей в системе передачи электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети. Спрингерплюс 4(334). С. 1-13.
6. Nguyen T, Liao Y (2010) Классификация типов неисправностей линии передачи на основе новых особенностей и нейро-нечеткой системы. Электрик Пауэр Компон Сист 38(6):695–709.
7. Shuma Adhikari1\*, Nidul Sinha2 and Thingam Dorendrajit1. Fuzzy logic based on-line fault detection and classification in transmission line. Adhikari et al. SpringerPlus (2016) 5:1002 DOI 10.1186/s40064-016-2669-4.

Научный руководитель: доктор PhD Е.Ж.Сарсикеев, профессор КАУ.

# ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

А.А. Гранская, Г.А. Гранский  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, РЗА, АУСм-1-21

Цифровая подстанция – это подстанция электроэнергетической системы с высоким уровнем автоматизации, в которой процессы информационного обмена между элементами и управление работой осуществляется в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850 [1].

Стандарт МЭК характеризует три уровня управления и обмена информацией: первый уровень – уровень первичного оборудования, который включает в себя силовые трансформаторы, выключатели, разъединители и др., второй – уровень присоединения, состоящий из терминалов релейной защиты и стационарный уровень (АСУ ТП). Для каждого из этих уровней описан свой протокол: SV, MMS, GOOSE и сигналы передаются только в цифровом виде [2].

SV протокол (Sampled Value) по названию понятно, что он передает измеренные значения токов, напряжений, и т. д. Передает мгновенных значений от цифровых трансформаторов тока и напряжения, а также от преобразователей аналоговых сигналов, в случае традиционных трансформаторов. SV сигналы «ходят» только внутри подстанции. На них может быть подписано любое устройство, которое способно их использовать.

GOOSE протокол (Generic Object Oriented Substation Event; {"горизонтальная" коммуникация}). Предназначен для обмена сигналами между устройствами РЗА в цифровом виде при возникновении какого-либо события. Digital Merging Unit – полевые контроллеры ввода/вывода устанавливаются на ОРУ вблизи с коммутационными аппаратами подключаются к цепям сигнализации и управления коммутационными аппаратами передают данные сигнализации и получают команды управления по «шине процесса» от IED по протоколу: МЭК 61850-8-1 [3].

MMS (Manufacturing Message Specification; {"вертикальная" коммуникация}) протокол предназначен для передачи данных диспетчеру. Он работает по TCP/IP протоколу, работает по запросу, предварительно установив соединение.

Система синхронизированных векторных измерений (СВИ) – совокупность векторных и скалярных параметров электроэнергетического режима, которые измерены и рассчитаны с заданной дискретизацией в однозначно определенные моменты времени, синхронизированные с помощью глобальных навигационных спутниковых систем.

Технология СВИ обеспечивает: фиксацию характеристик электрического режима в местах установки устройств СВИ в однозначно определенные моменты времени; достаточно высокую точность измерений параметров; мониторинг взаимных углов напряжений; измерение параметров на периоде промышленной частоты 50 Гц (20 мс); непрерывную запись параметров в КСВД (до 180 суток); погрешность измерения векторов (TVE) – не более 1 %; величина абсолютной погрешности измерений частоты – не более 1 мГц; измерение и вычисление достаточно широкого набора параметров (фазные  $I$ ,  $U$ ,  $f$ ,  $dU/dt$ ,  $dI/dt$ ,  $df/dt$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  фазные/трехфазные  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  и т. д.); производит 50 измерений в секунду; синхронизация времени с глобальными навигационными системами (не хуже 1 мкс) обеспечивает измерений угла с точностью 0,1 градуса; технологию обработки и передачи данных в режимах online и offline.

В настоящее время в качестве нормативного документа, который регламентирует объемы и методы проверок программно-технических комплексов (ПТК) АСУТП и микроконтроллерных систем сбора и передачи информации на цифровых подстанциях в режиме повышенной информационной нагрузки («шторм»), применяется стандарт ФСК ЕЭС СТО56947007-25.40.40.112-2011 [2]. Информационный шторм, который создается реальными интеллектуальными электронными устройствами, создает большую информационную нагрузку. Следовательно, крайне высока потеря аварийных сигналов при возникновении крупной аварии или

любой другой нештатной ситуации. Протокол SV может создавать нагрузку более 15 Мб/с на каждое присоединение, очевидно, что он наиболее требователен к производительности сетевой инфраструктуры подстанции. Учитывая все вышесказанное, предлагается вариант использования системы синхронизированных векторных измерений на цифровой подстанции.

Измерительные трансформаторы тока (1) и трансформаторы напряжения (2) соединены с устройством синхронизированных векторных измерений (18), высоковольтное коммутационное оборудование (3) и (4), соединено со входами цифрового устройства сопряжения (5), которое в свою очередь соединено со входами коммутаторов А (13) и В (14). Первые выходы цифрового устройства сопряжения (6) и (7) соединены со входом высоковольтного коммутационного оборудования (3) и (4) соответственно, а сервера точного времени (8) и (9) – со входом коммутатора А и В соответственно, сервер связи (10) – с глобальной сетью Интернет (24), компьютер оператора подстанции (11) – со входом коммутатора А, а компьютер инженера подстанции (12) – со входом коммутатора В. Коммутаторы А и В создают цифровую шину подстанции (15). На схеме изображены 2 сервера РЗА (16) и (17). Таким образом, все цепи контроля и управления дважды дублированы. Сторожевое устройство (19), соединено со входами коммутатора А и коммутатора В. При отсутствии сигналов синхронизации времени с коммутатора А, сторожевое устройство транслирует сигналы синхронизации времени с коммутатора В на коммутатор А. Аналогично оно работает и при отсутствии сигналов синхронизации времени с коммутатора В. Таким образом, происходит резервирование при отказе одного из серверов точного времени 8 или 9 (рисунок 1).

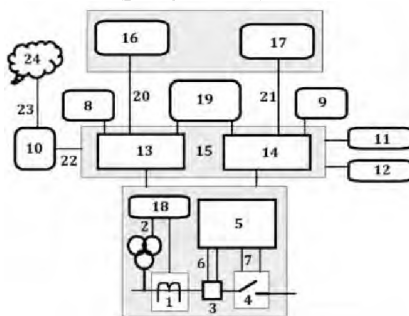


Рис. 1. Цифровое устройство защиты для электрической подстанции

#### Выводы:

1. Векторные измерения производятся не менее одного раза за период первой гармоники промышленной частоты 50 Гц, то есть за время 0,02 сек, в то же время как SV сигналы формируются 80 или 256 раз за то же время. Следовательно, происходит уменьшение потока данных на два порядка.

2. Система мониторинга переходных режимов ЕЭС России (СМНР ЕЭС) работает на базе СВИ, поэтому наличие сигналов векторных измерений на подстанции автоматически включает подстанцию в систему СМНР ЕЭС, и подстанция становится частью Smart Grid, единой сети контроля и управления энергосетями страны [4, 5].

3. Благодаря дублированию серверов точного времени происходит резервирование при отказе одного из них.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35- 750 кВ (НТП ПС), 2017.
2. СТО 56947007- 25.040.40.112-2011. Типовая программа и методика испытаний программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами (ПТК АСУ ТП) и микропроцессорного комплекса системы сбора и передачи информации (МПК ССПИ) подстанций в режиме повышенной информационной нагрузки «шторм» / Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.

3. ОАО «СО ЕЭС». СТО 59012820.29.020.011-2016. Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. Москва.2016. 37 с.
4. Ценовые характеристики источников электроэнергии мини и микрогрид / А. В. Паздерин, В. О. Самойленко, Н. Д. Мухлынин, П. А. Крючков // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 1(53). – С. 122-139. – EDN GFPVIZ.
5. Новобрицкий В.А., Федосов Д.С. Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 71-85. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85.

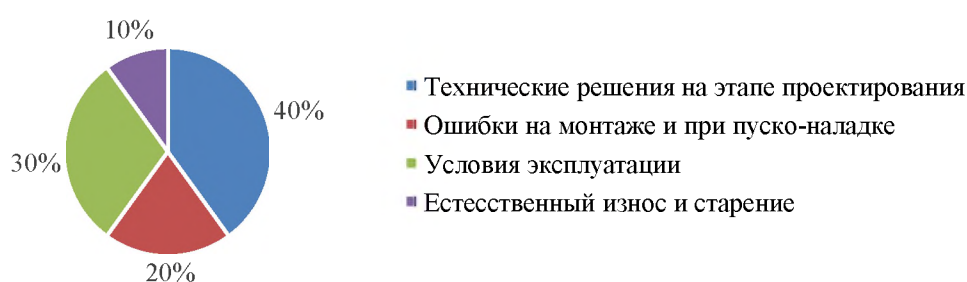
Научный руководитель: к.ф.-м.н. А.Н. Гавриленко, доцент РЗА ИЭЭ КГЭУ.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

К.Е. Азанов  
Сибирский федеральный университет  
ФЭ, ТЭС, группа ФЭ21-06М

Основное оборудование электрических станций представлено устоявшимся стандартным модельным рядом. Применение типовых решений позволяет существенно сократить трудозатраты на разработку проектной и рабочей документации для нового производства, однако в наше время значительную часть от общего объема проектных работ специализированных предприятий (заводов-изготовителей, проектных институтов) занимают реконструкции уже существующего оборудования, находящегося в эксплуатации.

Необходимость реконструкции вызвана, как правило, снижением экономичности и надёжности работы энергетического оборудования, которое может быть вызвано различными факторами (рисунок 1) [1].



*Рис. 1. Факторы, определяющие надёжность энергетического оборудования*

Большая часть реконструкций действующего оборудования связана с изменением параметров его работы или параметров рабочей среды, что ведёт к необходимости перепроектирования существующей установки на новые исходные данные. Даже при наличии стандартного ряда оборудования необходимо учитывать индивидуальные особенности каждой электростанции. На рисунке 2 представлены исходные данные и причины их изменения на примере паротурбинного оборудования.



Рис. 2. Влияние внешних факторов на исходные данные при расчёте паровых турбин

Автоматизация процессов проектирования позволит существенно снизить трудозатраты, повысить качество итогового проекта и надёжность разрабатываемого оборудования за счёт снижения влияния человеческого фактора.

Целью данной научно-исследовательской работы являлась разработка методики по автоматизации проектных работ на этапах от получения технического задания до выдачи рабочей документации на примере ротора высокого давления паровой турбины К-300-240.

В ходе работы были выполнены следующие поставленные задачи: разработан макет расчётной части (тепловой, детальный и прочностной расчёт ступеней паровой турбины) в Microsoft Excel, создана трёхмерная модель ротора высокого давления и произведён прочностной анализ лопатки регулирующей ступени в среде Siemens NX.

Автоматизированная информационная модель объединяет в себе этапы проектирования от получения ТЗ до построения симуляции и выдачи чертежей. На основании результатов функционального анализа (при необходимости) могут быть скорректированы отдельные элементы расчёта (рисунок 3).

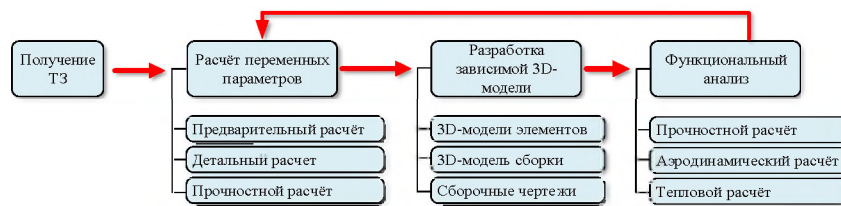


Рис. 3. Структура информационной модели

Расчётная часть исследования включает в себя расчёт конструктивных (геометрических) характеристик ступеней паровой турбины при изменении внешних факторов (исходных данных) [2]. Промежуточным результатом данного этапа являются геометрические характеристики проточной части. На рисунке 4 представлен фрагмент расчётного макета, лист вывода результатов.

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.	$\eta_{\text{ст}}^{\text{пр}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{д}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{ср}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{в}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{с}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{п}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{т}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{ср}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{в}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{с}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{п}}$	$\eta_{\text{ст}}^{\text{т}}$
<b>Регулирующая ступень. Рабочая решетка</b>															
Средний диаметр регулирующей ступени	$d_{\text{ср}}^{\text{р}}$	1230	мм	1	1,000	0,990	1,000	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
Средний диаметр регулирующей ступени	$d_{\text{ср}}^{\text{д}}$	810	мм	2	1,000,00	0,991,85	1,000,00	0,991,85	0,991,85	0,991,85	0,991,85	0,991,85	0,991,85	0,991,85	0,991,85
Корневой радиус	$r_{\text{к}}$	286,80	мм	4	1,000,00	0,991,14	1,000,00	0,991,14	0,991,14	0,991,14	0,991,14	0,991,14	0,991,14	0,991,14	0,991,14
Высота рабочей лопатки	$h_{\text{л}}$	26,41	мм	8	1,000,00	0,991,09	1,000,00	0,991,09	0,991,09	0,991,09	0,991,09	0,991,09	0,991,09	0,991,09	0,991,09
Высота рабочей лопатки	$h_{\text{л}}$	11,4	мм	8	1,119,47	0,991,23	1,119,47	0,991,23	0,991,23	0,991,23	0,991,23	0,991,23	0,991,23	0,991,23	0,991,23
Число рабочих лопаток	$z_{\text{л}}$	185	шт.	7	1,112,56	0,991,39	1,112,56	0,991,39	0,991,39	0,991,39	0,991,39	0,991,39	0,991,39	0,991,39	0,991,39
Угол вылета	$\alpha_{\text{в}}$	8,87	град.	8	1,119,65	0,991,31	1,119,65	0,991,31	0,991,31	0,991,31	0,991,31	0,991,31	0,991,31	0,991,31	0,991,31
Угол вылета в рабочей решетке	$\beta$	31,48	град.	8	1,116,75	0,991,37	1,116,75	0,991,37	0,991,37	0,991,37	0,991,37	0,991,37	0,991,37	0,991,37	0,991,37
Угол вылета из рабочей решетки	$\beta$	26,76	град.	16	1,116,94	0,991,42	1,116,94	0,991,42	0,991,42	0,991,42	0,991,42	0,991,42	0,991,42	0,991,42	0,991,42
Средняя относительная толщина лопатки	$\delta_{\text{л}}^{\text{ср}}$	1,8475,17	—	Число ступеней	8										

Рис. 4. Фрагмент макета расчёта

Следующим этапом идёт создание первоначальной трёхмерной модели ротора (рисунок 5). Основой графической части в данной работе является параметризация, то есть представление каждого элемента проектируемой детали (сборки) в виде набора геометрических параметров, взаимосвязанных между собой через выражения и ссылки на внешние источники данных. В нашем случае внешним источником будет являться макет расчёта элементов паровой турбины (файл Excel).

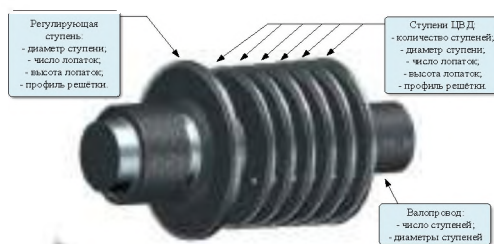


Рис. 5. Ротор ВД

Создание ссылочных размеров производится при помощи внутреннего инструментария Siemens NX. Для этого предусмотрено задание размера как функцию при построении эскиза. При выборе размера появляется окно, во всплывающем перечне выбираем «Функцию», категорию «spreadsheet» – «ug excel read». В открывшемся окне «Аргумент функции» задаём путь к файлу расчёта, откуда будут браться результаты расчёта, и ссылку на ячейку.

Описав таким образом построенную геометрию, получаем возможность перестраивать её посредством изменения исходных данных в документе расчёта. Для этого требуется изменить численное значение в ячейке, соответствующей необходимому параметру и, сохранив предварительно файл расчёта, зайти во вкладку «Инструменты» – «Выражения» – «Обновить выражения».

Таким образом мы получаем полностью автоматизированную 3D-модель ротора ВД, геометрия которого меняется при изменении исходных данных (ТЗ) без участия человека. Чтобы убедиться в работоспособности данной модели, изменим исходные данные: электрическую мощность повысим на 50 МВт (до 350 МВт) и увеличим температура пара (и, как следствие, теплоперепад) с 540 до 560 °С. Сравнительный анализ приведён на рисунках 6– 7.



Рис. 6. Ротор ВД до и после реконструкции

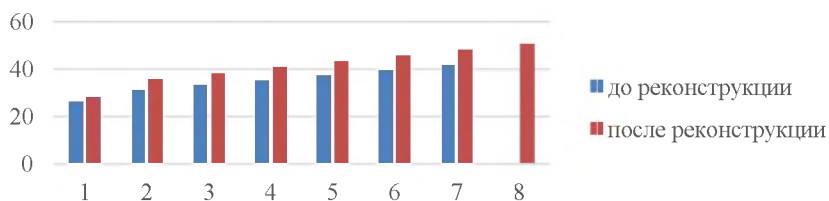


Рис. 7. Изменение высот рабочих лопаток и числа ступеней

Далее автоматизированная модель становится основой для функционального анализа. Функциональный анализ позволяет оценить работоспособность полученной в ходе расчётов и моделирования геометрии, определить слабые места конструкции. На основании полученных результатов корректируются геометрические характеристики элементов и разрабатываются технические решения по устранению недостатков конструкции. В данной работе были рассчитаны деформации под действием осевого усилия на профиль рабочей лопатки регулирующей ступени (рисунок 8).



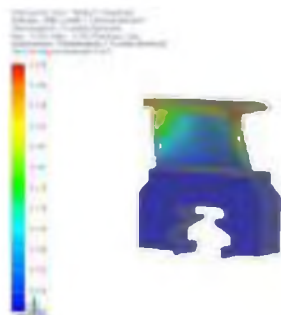


Рис. 8. Функциональный анализ (расчёт деформаций)

Таким образом, сведя к минимуму участие человека на каждой стадии проектирования, мы существенно снижаем трудозатраты на проектирование и выдачу РД (около 70 %) [3].

Итогом данной работы служит разработанная методика (в виде набора последовательных технических решений) по созданию цифровых прототипов элементов энергетического оборудования для автоматизации проектных работ по реконструкции и/или модернизации.

Результаты данной работы могут найти применение при решении практических задач, таких как перепроектирование реконструируемых агрегатов на изменившиеся режимные параметры с дальнейшим функциональным анализом характеристик отдельных элементов и подготовкой комплекта рабочей документации.

Также, помимо практических задач, данная работа может быть использована в образовательных целях для наглядной демонстрации влияния исходных данных на геометрические и функциональные характеристики вновь проектируемых ступеней паровой турбины.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Технология параллельного проектирования: основные принципы и проблемы внедрения / А.В. Смирнов, Р.М. Юсупов // Автоматизация проектирования. – 1997. – Т. 329. – № 2. – С. 50-55.
2. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д.: Турбины тепловых и атомных электрических станций: учебник для вузов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2001. – 488 с.
3. Лякишев А.Г., Смородинова Т. К., Маслов В.М., Аксёнов К.В.: Техническая подготовка производства изделий: методические указания. – Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2006. – 70 с.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.А. Бойко, зав. каф. ТЭС ПИ СФУ.

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

П.П. Радько

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

**Введение и постановка проблемы.** Низкочастотные колебания (НЧК) – это явление, наблюдаемое после различных возмущений при переходе системы к новому устроившемуся режиму. В отечественных и зарубежных работах, посвященных исследованиям этой темы, о причинах возникновения колебаний говорят весьма поверхностно, делая больший акцент на меры по улучшению их демпфирования [1, 2].

Первопричиной колебаний, как правило, являются появления небалансов, возникающих в результате изменения нагрузки и/или генерации в системе. Также колебания могут возникнуть вследствие отключения протяженных линий или нагруженных трансформаторов, так как изменяется топология и параметры системы. Однако человеку, который только начинает изучать проблему возникновения низкочастотных колебаний может быть сложно связать описанные возмущения с объектом исследования. Данная работа призвана заполнить эту брешь, выявив связи, которые могут оказаться не столь очевидными.

**Связь с динамической устойчивостью.** Как известно, при значительных возмущениях может произойти нарушение динамической устойчивости энергосистемы. Причины возникновения НЧК, связанные с динамической устойчивостью, лучше всего продемонстрировать на примере, которым будет выступать короткое замыкание на линии с успешной работой устройств автоматического повторного включения (рисунок 1а). Процесс, во время которого генераторы переходят на новый установившийся режим, сопровождается колебаниями угла электропередачи (рисунок 1в).

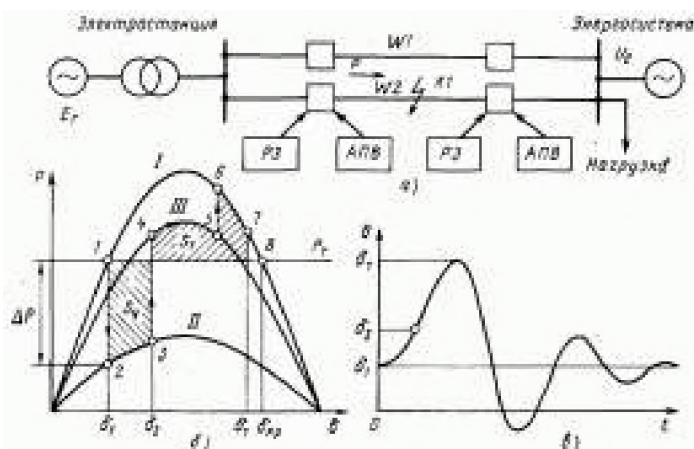


Рис. 1. Анализ динамической устойчивости при КЗ на линии электропередачи:  
 а – схема электропередачи; б – угловые характеристики электропередачи; в – изменение угла электропередачи во времени

Но также, под действием периодически изменяющейся разности моментов между турбиной и генератором, колеблется и активная вырабатываемая мощность, так как генератор то разгоняется под ускоряющим его моментом, то затормаживается под действием тормозящего (площадки ускорения и торможения приведены на рисунке 1б). Таким образом можно сделать вывод, что переходный процесс такого типа может являться прямой причиной возникновения низкочастотных колебаний, причем чем сильнее возмущение, тем дольше могут наблюдаться колебания.

**Связь с работой АРЧМ.** При возникновении небаланса по активной мощности в системе начинает изменяться частота. Автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ) после этого изменения частоты подает управляющий сигнал, изменяющий вырабатываемую генераторами активную мощность. В случае, если частота уменьшилась, объем генерации увеличивается, и наоборот. Однако вырабатываемая активная мощность не может измениться скачком из-за инертности генераторов и турбин, а также из-за совместной работы АРЧМ на разных машинах, которая обуславливает возникновение длительного переходного процесса. Таким образом, работа устройств АРЧМ, напрямую влияющих на вырабатываемую активную мощность, будет создавать низкочастотные колебания мощности на время между моментом возникновением небаланса и моментом достижения нового установившегося режима.

**Связь с работой АРВ.** В случае же появления небаланса по реактивной мощности в сети будет наблюдаться изменение напряжения на узлах. Это связано с изменением реактивного тока, из-за которого изменяется величина и/или знак потери напряжения. В любом случае, для регулирования вырабатываемой реактивной мощности и поддержания напряжения на выводах

генератора в необходимом диапазоне применяются устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Управляющим воздействием является изменение тока возбуждения генератора. Причиной возникновения полноценного переходного процесса, во время которого будут присутствовать низкочастотные колебания, является реакция нагрузки на изменение напряжения (статическая характеристика реактивной нагрузки по напряжению), из-за которой данная автоматика будет подавать сигналы на изменение тока возбуждения некоторый промежуток времени до достижения нового установившегося режима с балансом реактивной мощности. Также длительность процесса будет увеличиваться за счет комплексного действия множества средств автоматического регулирования возбуждения, установленных на ближайших к месту возмущения генераторах.

Также стоит отметить, что вышеописанные связи могут наблюдаться одновременно, так как возмущения в сети сопровождаются изменением многих режимных параметров. Например, при коротком замыкании на линии (рисунок 1а), в узлах сети изменится значение напряжения, что повлечет за собой начало работы устройств АРВ на электростанции. Более того, из-за изменения топологии сети может нарушиться баланс активной и реактивной мощностей, так как сопротивление ВЛ увеличится, вместе с потерями на ней. Из-за этого начнут работать устройства АРВ и АРЧМ. Подобная «комбинированная» работа устройств автоматического регулирования влияет на протекание колебательного процесса, а также делает затруднительным «вычленение» одной причины из совокупности всех причин.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. А.С. Бердин, А.С. Герасимов, Ю.П. Захаров, П.Ю. Коваленко, А.Н. Мойсейченков Оценка участия синхронного генератора в демпфировании низкочастотных колебаний по данным синхронизированных векторных измерений // Журнал «Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Том 13, № 2. 2013
2. Weijia Yang, Per Norrlund, Johan Bladh, Jiandong Yang, Urban Lundin Hydraulic damping mechanism of low frequency oscillations in power systems: Quantitative analysis using a nonlinear model of hydropower plants // Applied Energy Volume 212, 15 February 2018, Pages 1138-1152.

Научный руководитель: к.т.н. Рубан Н. Ю., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЗА**

Э.И. Галиев

Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, кафедра РЗА, группа АУСм-1-21

Трансформатор тока (ТТ) – один из наиболее распространенных видов трансформаторов, используемых для преобразования первичного тока силового электрооборудования во вторичный ток, который впоследствии измеряется устройствами учета, измерения электроэнергии, а также терминалами релейной защиты и автоматики (РЗА) для реализации функций защит, сетевой и противоаварийной автоматики. От исправности, точности работы ТТ зависит правильный учет электроэнергии и функционирование большинства устройств РЗА. На метрологические свойства ТТ влияют переходные режимы, сопровождающиеся насыщением электротехнической стали магнитопроводов ТТ, что, как следствие, приводит к ложной работе устройств РЗА.

Появление цифровых защит способствовало снижению времени срабатывания основных защит и первых ступеней резервных защит при коротких замыканиях на шинах и вблизи шин крупных электростанций и подстанций из-за насыщения ТТ [1].

В соответствии с пунктом 128 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем [2], технические характеристики трансформаторов тока должны обеспечить правильную работу устройств релейной защиты, в том числе при возникновении апериодической составляющей тока короткого замыкания (КЗ).

Известно, что ток КЗ содержит в себе две составляющие: периодическую и апериодическую. Поскольку скорость изменения апериодической составляющей мала, по сравнению с периодической слагающей, то она плохо трансформируется во вторичную обмотку, а большая ее часть уходит на насыщение стали магнитопровода ТТ. Это ухудшает трансформацию периодической составляющей и повышает долю этой слагающей тока КЗ в токе намагничивания. В магнитопроводе ТТ в течение долгого времени сохраняется остаточная магнитная индукция, которая в наихудшем случае может совпасть по направлению с магнитным потоком апериодической составляющей, что приводит к насыщению ТТ. В режиме насыщения форма тока во вторичной цепи искажается (рисунок 1), следствием чего возможна неверная работа основных быстродействующих защит, первых ступеней резервных защит (ТО, ТЗНП, ДЗ) [3].

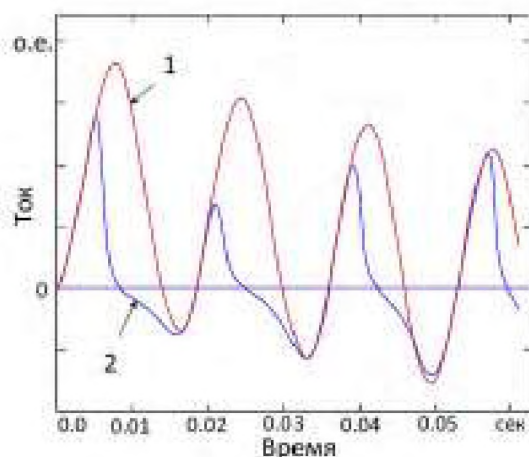


Рис. 1. Форма сигналов тока:  
1 – вторичный тока идеального ТТ, 2 – ток с учетом насыщения ТТ

Для оценки правильности работы устройств РЗА в результате измерений тока КЗ необходимо рассчитать время насыщения ТТ при наличии максимального значения остаточной намагниченности, которое должно превосходить время срабатывания защиты. В качестве примера в таблице 1 представлено минимальное необходимое время до насыщения ТТ по условиям правильной работы функций РЗА шкафов типа ШЭ2607, ШЭ2710, ШЭ111х, где ДЗШ – дифференциальная защита шин, ДЗО – дифференциальная защита ошиновки, КСЗ – комплект ступенчатых защит, ДЗТ (АТ) – дифференциальная защита трансформатора (автотрансформатора), ДФЗ – дифференциально-фазная высокочастотная защита линии, ДЗЛ – дифференциальная токовая продольная защита линии, ДЗГ – дифференциальная токовая защита генератора, ДЗТ – дифференциальная защита блочного трансформатора. В шкафах защит линий серии ШЭ2607, ШЭ2710 предусмотрена программная блокировка, исключающая срабатывание защит при внешних КЗ в условиях насыщения ТТ (время срабатывания не более 5 мс).

Таблица 1. Минимальное время насыщения ТТ для устройств РЗА НПП «ЭКРА»

Тип устройства	Серия	Версия ПО	Годы выпуска	$T_{\min}$ , мс
ДЗШ, ДЗО	ШЭ2607, ШЭ2710	Все версии	Все с начала производства	$\geq 5$
КСЗ, ДЗТ (АТ)				$\geq 25$
ДФЗ, ДЗЛ				$\geq 25$
ДЗГ, ДЗТ	ШЭ111х	ЭКРА 200	2012	$\geq 10$

Для определения технических параметров ТТ, влияющих на время насыщения, был произведен анализ методов расчета времени насыщения ТТ по стандарту [4]. В ходе расчета были выявлены следующие технические характеристики, влияющие на изменение времени насыщения ТТ:

- величина токов короткого замыкания (однофазного, междуфазного);
- постоянные затухания апериодической слагающей тока КЗ;
- параметры проверяемого ТТ (класс точности, коэффициент трансформации, предельная кратность и мощность вторичной обмотки);
- нагрузка проверяемого ТТ (длина и сечения контрольного кабеля, потребляемая мощность устройств РЗА).

В целях обеспечения правильного функционирования устройств РЗА рекомендуется:

1. при модернизации релейной защиты с заменой ТТ на объекте электроэнергетики рассматривать следующие варианты:
  - использование ТТ с классом точности 5P, 10 P со вторичным током 1 А;
  - использование ТТ с классом точности 5PR, 10 PR (имеют коэффициент остаточной намагниченности не более 10 %, в отличие от классов точности P, у которых данный параметр составляет 86 %);
  - использование ТТ с большей номинальной кратностью.
2. при модернизации релейной защиты без замены ТТ на объекте электроэнергетики рассматривать увеличение сечения контрольного кабеля, соединяющего ТТ и аналоговые входы терминалов РЗА.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1(34). – С. 28-36. – EDN FHNACO.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 года №947. Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации (с изменениями на 30 января 2021 года).
3. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу РЗА / П.Д. Шагимарданов, П.А. Звада, И.О. Таран [и др.] // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 76-80. – EDN DFXEQF.
4. ГОСТ Р 58669-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительный индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. – М.: Стандартинформ, 2020. – 57 с.
5. Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых токовых защит / В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев, Е.И. Фролова, А.А. Ледовских // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – № 2(42). – С. 83-90. – EDN SRJZIR.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Д.Ф. Губаев, зав. каф. РЗА ИЭЭ КГЭУ.

# УПРАВЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЯМИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАК СРЕДСТВО ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Н.А. Селезнев<sup>1,2</sup>, М.И. Куколев<sup>1</sup>, И.А. Лапалайнен<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет  
<sup>2</sup>Атомэнергопроект, СПБАЭП

Согласно НП-006-16 [1] для получения лицензии на размещение и сооружение атомной электростанции (АС) в надзорный орган должен быть представлен комплект документов в том числе и отчет по обоснованию безопасности АС (ООБ АС), подтверждающий соответствие блока АС требованиям федеральных норм и правил, а также установленным критериям и принципам обеспечения безопасности АС. Более того, ООБ АС должен разрабатываться на основе проекта АС и не допускаются расхождения информации, представленной в ООБ АС и в проекте АС по аспектам, оказывающим влияние на ядерную и радиационную безопасность АС (к таким расхождениям следует относить, например, сведения о составе систем и элементов, важных для безопасности, об их технических характеристиках, влияющих на работоспособность или надежность выполнения требуемых функций, сведения о назначаемых классах безопасности и их обосновании и другие).

Удовлетворение постоянно растущего числа и все более жестких нормативных требований является одной из самых сложных задач при строительстве АС, что регулярно приводит к значительным затратам при задержках. Основная цель, стоящая за введением такого чрезмерного количества требований, заключается в обеспечении безопасности окружающей среды и людей от любых рисков, которые могут сопровождать такой сложный проект, как строительство АС. Это поднимает актуальность вопроса управления требованиями в части безопасности АЭС на стадии проектирования. Таким образом критически важным становится создание документов и информационной модели предпроектной стадии, формирующих основные требования к проекту АЭС в части обеспечения ядерной безопасности.

В данной работе представлено краткое описание методики, объединяющей функциональный анализ, управление требованиями и управление изменениями. Целью является обеспечение лицензирование энергоблока АЭС на стадии проектирования с помощью управления требованиями и обеспечения прослеживаемости требований в части безопасности от исходных данных для проектирования (ИДП) до разработанного ООБ на стадии проектирования (ПООБ) с минимальными затратами на адаптацию типового проекта АЭС-2006 под конкретные требования надзорного органа.

При разработке методики решались основные задачи:

- 1) обеспечение прослеживаемости требований в части безопасности до ООБ;
- 2) формирование полного перечня исходных событий и определение всех функций безопасности;
- 3) трассировка функций и нефункциональных требований к конкретным системам АС;
- 4) получение полного перечня требований к системам, выполняющим функции безопасности.

Методика процесса разработки проекта систем представлена на рисунке 1. Прямоугольниками в первой (верхней) строке изображены исходные данные проекта – источники требований (нормативная документация, ЕРС-контракт (engineering, procurement and construction) или ТЗ на проектирование, а также исходные данные для генерального проектировщика) и референтный проект. Прочие прямоугольники с черной сплошной границей – конфигурационные документы (документы, описывающие значимую информацию о конфигурации проекта), прямоугольники с черной штриховой границей – документация референтного проекта. Прямоугольниками с фаской обозначены действия (процессы).

На этапе распределения и группировки требований в рамках описываемой методики требования разделяются по характеру влияния на безопасность на: требования по безопасности (ВБ, safety-related) и требования, не относящиеся к безопасности (НВБ, non-safety related). НВБ-требования и «прямые» ВБ-требования (требования, которые изначально привязаны к конкретным ССК АС – системам, структурам и компонентам) распределяются на технологические системы и сводятся в спецификации требований (СТ) систем на основе проведенного анализа требований. Данные действия указаны штриховыми стрелками.

При этом все ВБ-требования являются входной информацией для разработки функциональной архитектуры безопасности атомной станции. Проектирование архитектуры безопасности направлено на выполнение АЭС задач безопасности (защита персонала, окружающей среды и населения) и основано на общепринятых мировых принципах: концепция глубокоэшелонированной защиты и система физических барьеров [2]. Архитектура безопасности состоит из последовательной разработки документации на следующих уровнях.

1. Уровень станции. На данном этапе определяются основополагающие решения концепции глубокоэшелонированной защиты АЭС: определяется перечень исходных событий (ИС) и группы исходных событий, а также определяют параметры конечных состояний АЭС, категорий задач. Для каждой категории задач формируется перечень нефункциональных требований (например, по классификации, физическому разделению и т. д.).

2. Уровень архитектур. На данном этапе определяются необходимые и достаточные функции безопасности, требуемые для управления ННЭ, ПА, ЗПА и ТА. Функции группируются по категориям задач краткосрочной и долгосрочной архитектур, определяемых конечными состояниями АС на уровне станции. Функциям безопасности в пределах одной категории задач предъявляются одинаковые нефункциональные требования (например, по классификации, физическому разделению и т. д.) и различные требования функциональные [3]. Референтные решения при разработке ФБ играют роль основы, базы, на которую накладываются новые требования (при наличии), формируя таким образом новые функциональные решения. Подход к проектированию функций защиты от хазардов (угроз) аналогичен. Методика предполагает продолжение рассмотрения ФБ и набора трассированных на нее требований. ФБ представляется как алгоритм выполнения технологических задач, имеющий входную информацию – измерения, уставки по параметрам, и выходную – сигналы на приводы арматуры, оборудования.

3. Уровень технических архитектур. Основная задача, решаемая на данном этапе – распределение ФБ по системам, структурам и компонентам АС. Для этого распределенные на функцию требования транслируются на элементы АЭС (ССК, физические сущности, обеспечивающие инициацию и выполнение данной функции), сгруппированные в технологические и электрические системы. При этом определяются типы интерфейсов, принципы классификации ССК, функциональные требования к системам, выполняющим ФБ.

На следующем этапе (этап разработки технического проекта) выполняется разработка проекта систем на основе сформированной спецификаций требований. Полный набор ВБ-требований, пришедших на систему через все ее ССК, участвующие в ФБ в результате проведения функционального анализа, в совокупности с «прямыми» ВБ-требованиями и НВБ-требованиями формирует спецификацию требований к системе АЭС.

Техническое проектирование системы (разработка как технического проекта, так и отчета по обоснованию безопасности на стадии проектирования) производится синтезом референтного проекта и спецификации требований.

В процессе проектирования по представленной методике происходит последовательное наполнение информационной модели энергоблока. Разрабатывается иерархическая документация уровня функциональной архитектуры, содержащая перечни ИС, ФБ, категорий задач, группы нефункциональных требований и др., и содержащая так же иерархическую систему требований. Связующим документом между функциональной архитектурой и системной является спецификация требований – документ в составе технического проекта системы, являющийся по сути исходными данными для разработки технологической/электрической схемы,

пояснительной записки, спецификации оборудования. Каждое требование из СТ должно быть отражено в схеме либо пояснительной записке в месте, где описывается его выполнение либо приводится обоснование невыполнимости.

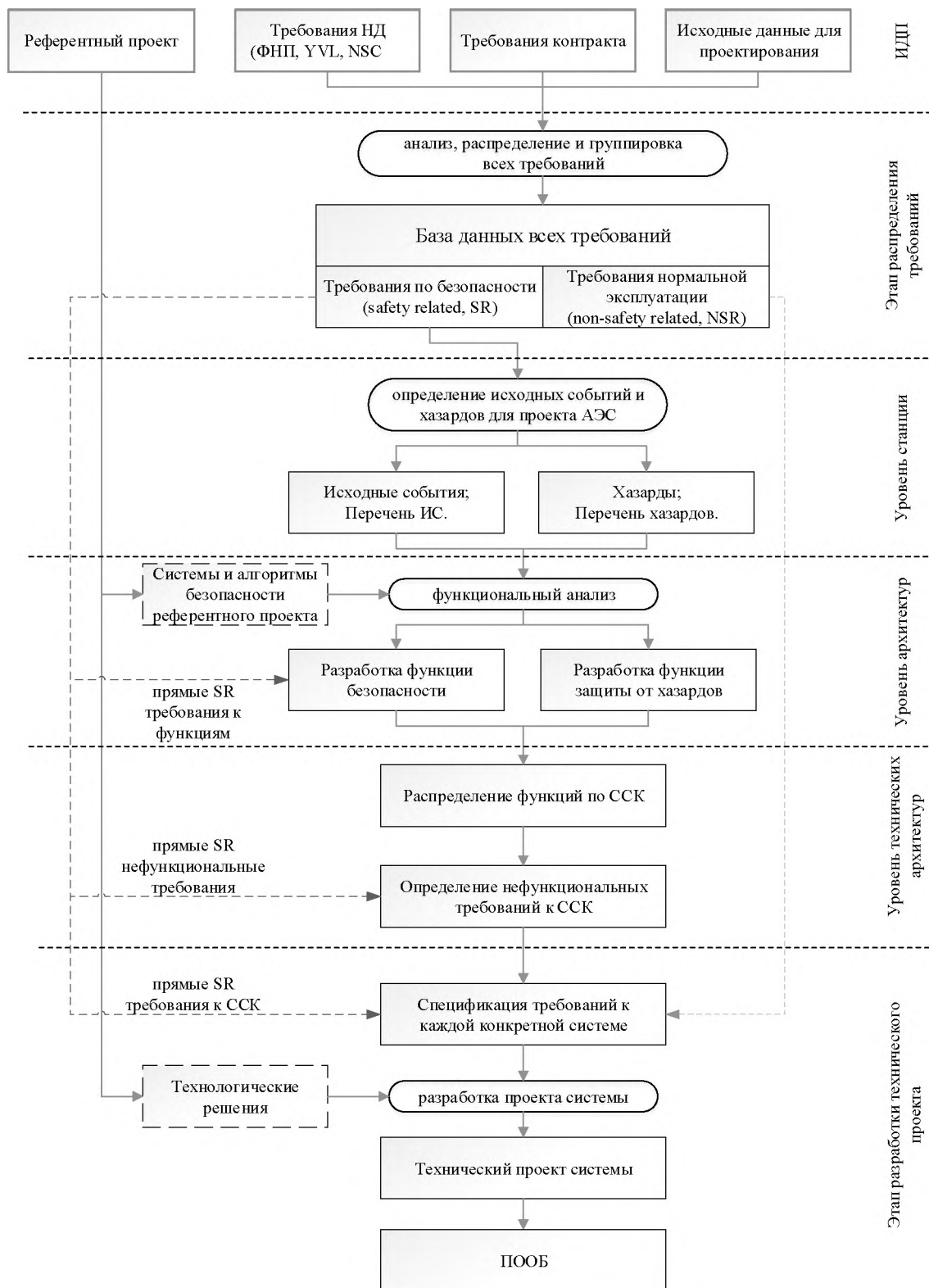


Рис. 6. Методика разработки проекта систем с использованием УТ и ФА

Таким образом, данная методика позволяет с помощью функционального анализа в части безопасности и последовательной трассировки предварительно распределенных требований разработать на основе референтных решений проект, удовлетворяющий конкретному,



определенному набору требований в части обеспечения безопасности. Четкая последовательность выполняемых действий «сверху-вниз» обеспечивает, с одной стороны, учет всех требований при проектировании, с другой стороны, позволяет выполнить верификацию проектных решений благодаря прослеживаемости требований «снизу-вверх». Введение системы кодирования требований с учетом стадии их трассировки позволит частично автоматизировать процесс верификации.

Распределение требований на основе функционального анализа, а не референтного проекта, позволяет избежать ошибок, связанных с отличиями систем текущего проекта от проекта референтного, а также требует менее глубоких знаний о конкретных инженерных решениях, меньше привязано к референтному проекту. Основным критерием распределения при функциональном анализе является функция, без привязки к тем системам, что ее выполняют. Следовательно, данное распределение в гораздо меньшей степени подвержено перечисленным ошибкам.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР : (НП-006-16) : официальное издание : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.02.17 : введены в действие 23.05.17. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2017. – 410 с.
2. Безопасность атомных электростанций: проектирование, Серия норм безопасности МАГАТЭ, No SSR-2/1. – Вена: МАГАТЭ, 2016. – 116 с.
3. ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Атомные станции. Пункты управления. Проектирование. Nuclear Power Plants. Control rooms. Design. – М.: Стандартинформ, 2014. –35 с.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. М.И. Куколев, с.н.с. ВШГиЭС ИСИ СПбПУ.

## **СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЧАСТОТЫ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЧЕРЕЗ СОЕДИНЕНИЕ VSC-HVDC**

М. Ибрагим  
Сибирский федеральный университет  
ПИ, А21-13\_051402

Благодаря высокой степени управляемости терминалы VSC-HVDC могут использоваться для обеспечения поддержки первичной частоты в сетях переменного тока [1].

Схема управления преобразователя источника напряжения VSC состоит из двух частей: а. внешний контур управления, рисунок 1а; б. внутренний контур управления током, рисунок 1б [2].

Внутренний контур управления током является наиболее важной частью управления VSC и всегда оснащен контуром фазовой автоподстройки (PLL) для определения фазового угла и частоты, как показана на рисунке 2.

Опорные сигналы на внутренний контур управления током поступают из внешнего контура управления. Внешний контур управления состоит из двух внешних контуров. Первый внешний контур состоит либо из регулятора напряжения постоянного тока, либо из регулятора активной мощности, а второй состоит либо из регулятора напряжения переменного тока, либо из регулятора реактивной мощности. Активный ток ( $i_d^*$ ) используется для управления контуром активной мощности или контуром уровня постоянного напряжения. Точно так же реактивный ток ( $i_q^*$ ) используется для управления контуром реактивной мощности или контуром переменного напряжения [3].

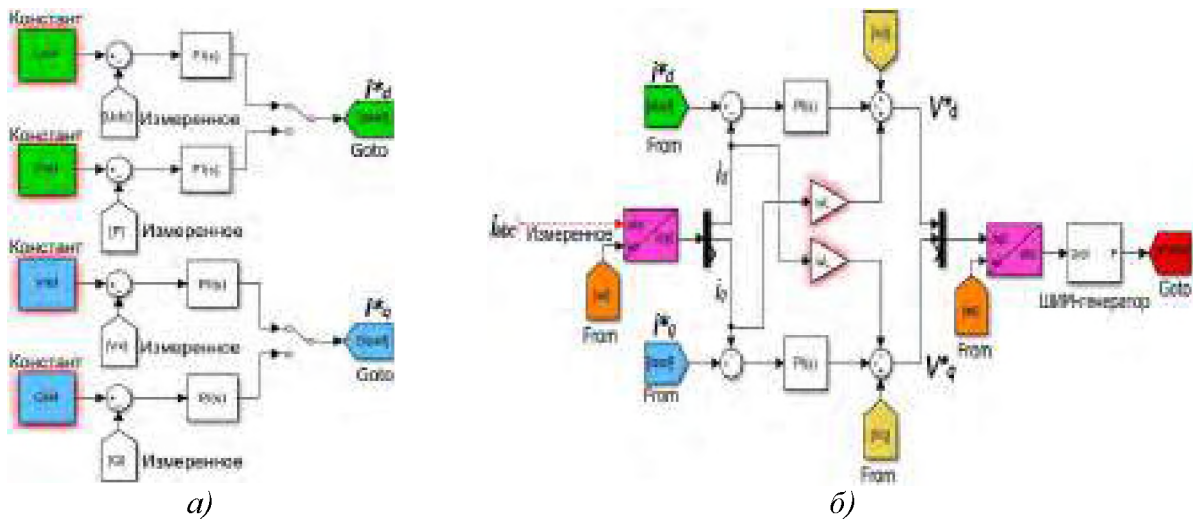


Рис. 1. Схема управления:

а) внешний контур управления; б) внутренний контур управления током

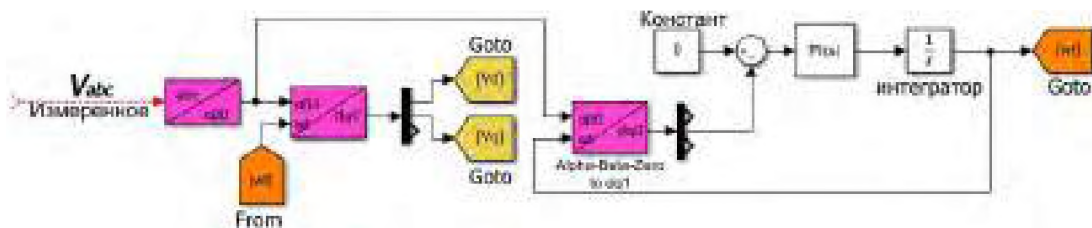


Рис. 2. Контур фазовой автоподстройки (PLL)

Приоритет часто отдается передаче активной мощности, а не реактивной мощности. Следовательно, активный опорный ток ( $i_d^*$ ) более важен, чем реактивный опорный ток ( $i_q^*$ ).

На рисунке 3, показана реализация стабилизация частоты на терминале VSC-HVDC, Предлагаемый здесь метод полностью зависит от локально измеренных сигналов и не требует связи между различными терминалами постоянного тока.

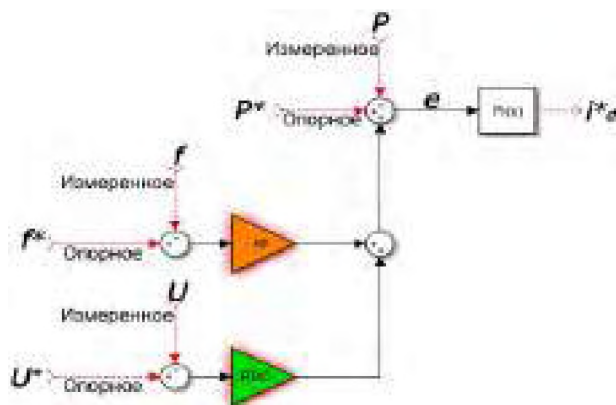


Рис. 3. Реализация стабилизации частоты на терминале VSC-HVDC

Постоянная  $RDC$  представляет собой коэффициент передачи, характеризующий увеличение мощности в МВт, подаваемой в цепь постоянного тока, в ответ на падение напряжения на шине постоянного тока 1 кВ.

Постоянная  $Rf$  на рисунок 3, представляет собой коэффициент передачи, характеризующий увеличение мощности в МВт, подаваемой в цепь переменного тока, в ответ на изменение частоты в сети переменного тока 1 Гц.

Следует обратить внимание на то, что два контура на рисунке 3, имеют противоположный знак ( $-Rf, RDC$ ), так как уменьшение частоты приводит к увеличению потока мощности от шины постоянного тока к сети переменного тока, в то время как уменьшение напряжения постоянного тока приводит к увеличению потока мощности в противоположном направлении.

Схема на рисунке 3 позволяет представлять установившиеся режимы при различных возможных конфигурациях управления: для режима управления активной мощностью характеристика напряжения постоянного тока и характеристика частоты ( $RDC = 0$  и  $Rf=0$ ); для режима управления напряжением постоянного тока ( $RDC = \infty$  и  $Rf=0$ ); для режима управления падением напряжения постоянного тока ( $Rf=0$ ); для режима управления стабилизацией частоты ( $RDC=0$ ).

Установившаяся ошибка управления на рисунке 3 равна нулю  $e = 0$ , математически это определяется выражением:

$$(P^* - P) - Rf(f^* - f) + (U^* - U). \quad (1)$$

Следовательно, подача мощности терминалом VSC-HVDC становится следующей:

$$P = P^* - Rf(f^* - f) + (U^* - U). \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что управление потоком мощности влияют три параметра  $P^*$ ,  $f^*$  и  $U^*$ . С другой стороны, устраняя ошибку управления частотой ( $f^* - f$ ) и ошибку управления постоянным напряжением ( $U^* - U$ ), можно добиться точного управления потоком активной мощности.

В этой работе анализируется поведение системы передачи HVDC на основе VSC с использованием стабилизации частоты. Система передачи VSC-HVDC, реализованная в MATLAB/Simulink показана на рисунке 4.

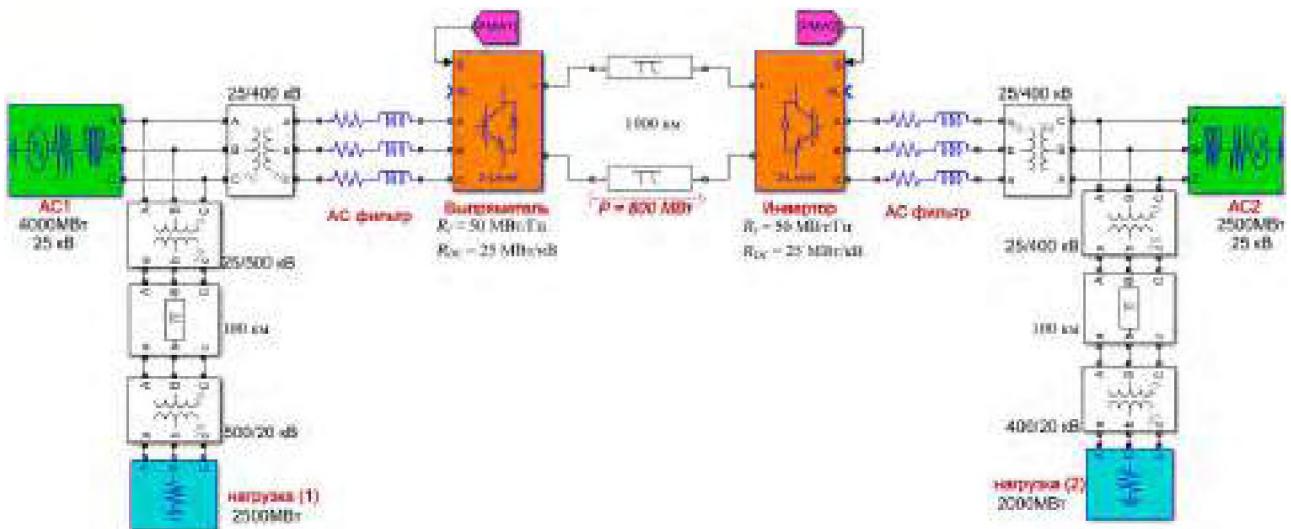


Рис. 4. Линия VSC-HVDC с поддержкой двунаправленной частоты сети

В первом случае моделирования два преобразователя реализуют управление напряжением постоянного тока, но не частотой. При  $t = 800$  с локальная нагрузка в сети переменного тока AC2 увеличивается с 2000 МВт до 2200 МВт. Затем следует уменьшение установившейся частоты. При  $t = 1400$  с локальная нагрузка в сети переменного тока AC1 увеличивается с 2500 МВт до 2900 МВт. На рисунках 5 и 6 показаны реакции двух сетей переменного тока на перегрузки.



Рис. 5. Реакция сети на изменения нагрузки при  $t = 800$  с и  $1400$  с при отсутствии стабилизации частоты по линии VSC-HVDC

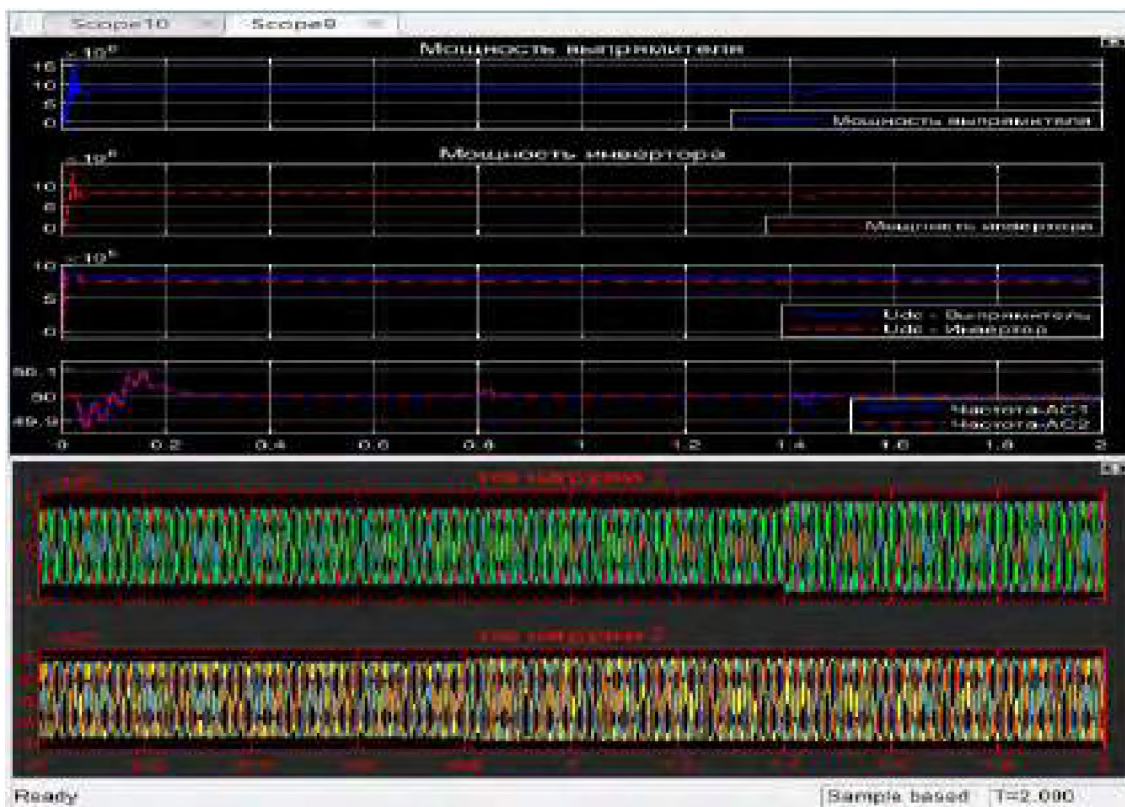


Рис. 6. Реакция сети на изменения нагрузки при  $t = 800$  с и  $1400$  с при наличии стабилизации частоты по линии VSC-HVDC

## **Вывод**

В первом случае моделирования на передачу мощности по звену постоянного тока не влияют изменяющиеся нагрузки в сетях переменного тока 1 и 2. Во втором случае моделирования, когда для двух терминалов VSC-HVDC используется стабилизация частоты, реакции обеих сетей переменного тока улучшаются. При увеличении нагрузки 2 ( $t = 800$  с) передача мощности по звену постоянного тока увеличивается для поддержки частоты сети 2, а при увеличении нагрузки 1 ( $t = 1400$  с) передача мощности по звену постоянного тока уменьшается для поддержки частоты сети 1.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Frequency Control Capability of VSC-HVDC for Large Power Systems, Zhiyong Yuan, Shutang You, Yong Liu, Yilu Liu, Dale Osborn, Jiuping Pan//IEEE Power & Energy Society. -2017.-V.10.-P.1-5.
2. Fast Frequency Response From Offshore Multiterminal VSC-HVDC Schemes, Oluwole Daniel Adeuyi, Marc Cheah-Mane, Jun Liang, Nick Jenkins//IEEE Transaction on power delivery. -2017. -V.32. -P. 2442-2452.
3. Inertia Emulation and Fast Frequency-Droop Control Strategy of a Point-to-Point VSC-HVdc Transmission System for Asynchronous Grid Interconnection, Jiebei Zhu, Xiaonan Wang, Junbo Zhao, Lujie Yu, Suxuan Li, Yunwei Li, Josep M. Guerrero, Chengshan Wang// IEEE Transaction on power electronics. -2022.-V.37.-P. 6530-6543.

Научный руководитель: д.т.н. В. И. Пантелеев, зав. каф. ЭЭСФУ.

## **ЭТАПЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

М.Н. Фазлеев

Казанский государственный энергетический университет  
ИЦТЭ, ИИУС, группа ТРП-2-19

### **Развертывание системы на площадке опытной эксплуатации**

Внедрение подразумевает уже спроектированную технологическую архитектуру информационной системы, отраженную в документации. Процесс внедрения начинается с закупки необходимого серверного, коммуникационного и прочего оборудования, а также необходимое программное обеспечение, такие как операционные системы и прочее. После закупки оборудования и программного обеспечения производится создание единого программно-аппаратного комплекса на базе предприятия, в который внедряется информационная система. В связи с тем, что в проектах подобного масштаба используется большое количество оборудования, на котором размещаются необходимые программные продукты, необходимо сопровождать внедрение информационной системы подробным документированием, в которую необходимо включать таблицы с адресами рабочих мест, серверов, способах доступа и т. д. Помимо таблиц необходимо добавить диаграммы компонентов, которые дают понимание где расположены узлы сети, и распределения компонентов и их взаимодействия. Документация является очень важной частью внедрения информационной системы, так как если недостаточно подробно описать взаимодействие всех компонентов, то при её масштабировании будут возникать неожиданные проблемы, на решения которых придётся потратить много ресурсов. Также документация должна поддерживаться в актуальном состоянии и меняться по мере внесения изменений в настройки или архитектуры системы.

Перед полноценным запуском информационной системы рекомендуется проводить её тестирование, приближенное к реальным условиям эксплуатации. Эта процедура позволит заранее исправить некоторые замечания, которые могут возникнуть в ходе эксплуатации информационной системы.

### **Обучение персонала заказчика работе с информационной системой**

Важной частью документации информационной системы являются инструкции пользователей системы. В основном такие инструкции разделяют на сегменты по видам деятельности или специализации. Подобное разделение позволяет акцентировать внимание на необходимые нюансы и не грузить лишней, для данных пользователей, информацией. Процесс подготовки персонала нужно организовать таким образом, чтобы не прерывать важные процессы на производстве. Это связано с тем, что в процессе обучения может быть задействована значительная часть сотрудников, при этом некоторые из них не могут обучаться одновременно. Для удобства можно разделить сотрудников на группы по категориям, требующими различные методы обучения и исходя из их первоначального уровня подготовки. План обучения необходимо согласовать со всеми заинтересованными лицами, и утверждён руководством фирмы-заказчика, как обязательный к исполнению.

### **Выявление недостатков и дефектов информационной системы**

В большинстве случаев, финальное тестирование не позволяет выявить все проблемные места в проекте. Это может быть связано с такими факторами, как наличие особенностей работы оборудования, некоторые компоненты системы могут не сочетаться с другими, наличие нюансов в процессах на предприятии и т. д. Внедрение информационной системы также усложняется проблемами, связанными с миграцией существующих данных в новую систему, при чём формат и структура таких данных может не подходить, например, недостаточно информации для заполнения обязательных реквизитов. В связи с этим приходится параллельно продолжать работать на старой системе, пока не будет решена данная проблема.

В интеграционных решениях, которые используют компоненты, разработанные разными командами разработчиков, могут происходить сбои, которые сложно отследить. В случае возникновения данной проблемы необходимо скоординировать разработчиков, принимавших участие в разработке данных компонентов, на поиск проблемы и её скорейшего решения. Этап опытной эксплуатации информационной системы почти всегда вызывает вышеперечисленные проблемы. На этом этапе внедрения архитекторы решений и системные аналитики должны минимизировать издержки за счёт локализации ошибок и быстрого согласования их исправления со всеми заинтересованными лицами.

### **Согласование изменений в процессе внедрения информационной системы**

В случае, если какие-то функциональные модули информационной системы критически не соответствуют потребностям и ожиданиям заказчиков, необходимо зафиксировать и согласовать пути их решений с заказчиком. Данный этап согласования новых решений важен по нескольким причинам:

Объем ресурсов, необходимый на изменения проекта, может превысить ранее заложенную на подобные риски сумму. В таком случае приходится работать в убыток, либо заключить дополнительное соглашение с заказчиком.

Изменение одного компонента может повлиять на остальные, взаимозависимые компоненты системы. Перед внесением любых изменений нужно тщательно проанализировать всю цепочку подсистем или даже перепроектировать её, чтобы минимизировать риски непредвиденных изменений.

### **Доработка информационной системы по итогам опытной эксплуатации**

В случае, если в процессе опытной эксплуатации заказчиком было решено внести изменения в разработанную информационную систему, необходимо поставить новые задачи по их реализации исполнителям. Начинается процесс, похожий на «реализацию проектного решения», но с некоторыми особенностями. На данном этапе внедрения, чаще всего используют гибкую методологию разработки «Scrum», хотя на этапе проектирования информационный системы использование гибкой методологии разработки несёт больше отрицательное влияние.

«Scrum» будет особенно эффективным, когда нужно вносить срочные изменения в уже переданный заказчику продукт, который его не устраивает по большому количеству параметров. Такой подход позволит быстро внести нужные изменения в программно-аппаратный комплекс, который находится в эксплуатации.

На данном этапе мы сталкиваемся со следующими условиями:

Информационная система начала эксплуатироваться заказчиком, благодаря чему был обновлён список требований и желаемый функционал. В связи с этим, заказчик готов более плотно взаимодействовать с командой разработчиков, чтобы ускорить процесс доработки;

Работа по созданию документации практически полностью выполнена, а описание различных изменений ведётся уже после их успешного внедрения. Изменения в документации происходят в подсистемах, за которые отвечают конкретные исполнители, поэтому взаимодействие пользователей с разработчиками локализовано, что улучшает качество обратной связи;

Доработки и новый функционал информационной системы поочередно предоставляются заказчику и, в случае одобрения, незамедлительно вводятся в эксплуатацию;

Проектная документация всегда должна быть в актуальном состоянии, чтобы разработчики быстро смогли найти актуальное состояние информационной системы для анализа и проектирования следующих изменений.

### **Передача информационной системы в промышленную эксплуатацию**

После успешного завершения этапа доработки информационной системы обе стороны подписывают акты о выполнении контракта. Обязательства по разработке и внедрению информационной системе считается выполненным. С этого момента информационная система официально находится в промышленной эксплуатации. Дальнейшая поддержка системы регулируется дополнительными соглашениями по сопровождению промышленной эксплуатационной системы. Подобное соглашение подразумевает проведение диагностики компонентов системы и устранение небольших сбоев.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Гаврилов М.В. Информатика и информационные технологии. 3-е издание / М.В. Гаврилов, В. А. Климов – М.: ЮРАЙТ, 2013. – 379 с.
2. Рудаков А.В. Технология разработки программных продуктов. Практикум: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / А.В. Рудаков, Г.Н. Федорова. – М.: Издательский центр «Академия»; 2010. – 192 с.
3. Семенов А. С. Информационные технологии: объективно – ориентированное моделирование: учеб. пособие для вузов. – М.: СТАНКИН, 2000. – 82 с.
4. Устинова Г.М. Информационные системы менеджмента/ Учебное пособие. – СПб: Издательство «ДиаСофт ЮП», 2000. – 368 с.
5. Степанов Д.Ю. Анализ, проектирование и разработка корпоративных информационных систем: аннотация / МГТУ МИРЭА. – М., 2015.
6. Гвоздева Т.В., Баллод Б.А. Проектирование информационных систем: учебное пособие. – Ростов н/Д.: Феникс, 2009. – 508 с.

Научный руководитель: Р.И. Эшлиоглу, ст. преп. ИИУС ИЦТЭ КГЭУ.

# АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ЗДАНИИ

В.О. Васильев

Новосибирский государственный технический университет  
ФМА, АЭТУ, группа 2.4.4-22

В представленной статье мы предлагаем архитектуру автоматизированной системы управления тепловой энергией – гибридную тепловую система энергоменеджмента здания. Система АСУ предназначена для контроля подачи нужного количества тепла в здание в зависимости от текущего спроса, исторических данных, прогнозируемого потребления.

Интеллектуальное здание должно предоставлять жильцам следующие четыре услуги:

- прием и отправка информации, поддержка эффективного управления;
- обеспечение удовлетворенности и комфорта жителей;
- рационализация управления зданием;
- адаптивность к изменениям социальной среды и потребностям жителей.

В настоящее время интеллектуальное здание неразрывно связана с системой, которая получает и обрабатывает информацию и переводит его в действия на благо жителей. Обычно эту роль выполняет АСУ, система, связанная с аппаратным уровнем, отвечающим за сбор сигналов и выполнение действия. Элементы системы интеллектуального здания должен улучшить свою работу заметным (измеримым) образом, например, снизить стоимость использования, повысить комфорт, повысить безопасность и т. д.

Обычно понятие интеллектуального здания не связывают с понятием система реального времени.

Системы реального времени можно разделить на две группы: системы жесткого и мягкого реального времени [1]. Первый тип систем реального времени – это когда система должна ответить через определенный, обычно не слишком длительный, период. Второй тип системы реального времени имеет мягкие временные ограничения. Возврат задержанного ответа не делает его бесполезным, но снижает его качество. Обычно чем больше задержка, тем больше потеря качества ответа и большая потеря (меньше пользы) для всей системы.

Неразделимые элементы искусственного интеллекта в иерархической модели управления исполнительные механизмы, датчики, сенсорная обработка, модель мира, ценностные суждения и генерация поведения (рисунок 1) [2]. Датчики и исполнительные механизмы эквивалентны входу и выходу к системе. Датчики предоставляют информацию о текущем состоянии мира (система окружающей среды), в то время как исполнительные механизмы могут изменить наблюдаемый мир. Сенсорная обработка обозначает системный модуль, который отвечает за преобразование сенсорных значений в ожидаемое состояние мира, выраженное в форме знания. Модель мира – это лучшее представление состояния внешнего мира интеллектуальной системы управления. Очень часто модуль, реализующий модель мира, может выполнять симуляции и будущие прогнозы состояния. Он может отвечать на вопросы о прошлых, текущих и будущих событиях, поэтому поддерживает базу данных фактов, которые произошли в прошлом. Модель мира поддерживается в актуальном состоянии соответствующим образом обработанной сенсорной информацией. Модуль оценочного суждения оценивает текущее состояние мира по сравнению с его будущими состояниями на основе знаний, хранящихся в мировой модели. Этот модуль формирует мнения, указывающие, что полезно, а что нет для системы. Эти мнения передаются в модуль, отвечающий за формирование поведение. Здесь выбирается и реализуется лучший план системы. Результатом решения о реализации плана является приведение в действие соответствующих исполнительных механизмов.

Эффективное управление отоплением в интеллектуальном здании невозможно без оборудования составные части. Они часто реализуются как программируемых контроллеров.



Мы можем использовать логические части для построения: микропроцессоры, схемы ввода-вывода и, прежде всего, блоки, предназначенные для проекта в стадии реализации. К существенным преимуществам относятся:

- простота добавления дополнительных ядер;
- структурная гибкость, например, система может содержать зависимые или независимые подсистемы;
- включая настраиваемые функциональные блоки.



Рис. 1. Интеллектуальные модули управления

Функциональные блоки FPGA называются IP-Core (Intellectual Property Core). Они в фактически вычислительные подразделения, выполняющие конкретно описанную функциональность, которая в сам по себе может представлять собой интеллектуальную собственность. Блоки IP-Core описываются с помощью аппаратных средств. языки описания, такие как Verilog или VHDL.

АСУ – это система управления тепловым пунктом. Он состоит из нескольких компонентов, в том числе контроллера реального времени, уровень связи и модуль облачных вычислений. Назначение компонентов заключается в обеспечении необходимого количества тепла в системе отопления здания, стандартам и минимизации энергопотребления.

Система АСУ предназначена для управления теплом в индивидуальных зданиях. В каждом здании есть как минимум один тепловой пункт. Входная и выходная температуры температура теплоносителя примерно 70 и 50 градусов Цельсия соответственно.

Назначение АСУ – управление одним или несколькими тепловыми пунктами, цель которых заключается в передаче тепла, подаваемого тепловой сетью, через котельную в отдельные квартиры, и далее, к радиаторам. Создание такой системы связано несколько задач для дизайнеров. В частности, он должен обеспечивать:

- отказоустойчивость и предотвращение вторжений;
- контроль доступа и предотвращение несанкционированного доступа;
- механизм обновления и настройки системы в процессе ее эксплуатации;
- контроль правильности выполняемых операций;
- доступ к историческим данным;
- конструкция системы открыта для дальнейшего развития;
- возможность управления в режиме реального времени;
- автономная работа в определенных границах.

Этим предположениям удовлетворяют различные части системы. Например, время отклика в реальном времени на поступающие управляющие сигналы обеспечивается аппаратной частью системы. В то же время безопасность обработки информации должна быть реализована надлежащим образом каждым компонентом созданного решения.

Все модули работают вместе для управления тепловым пунктом в многоквартирном жилом доме. Количество тепла, потребляемого в квартирах, определяет количество тепла, необходимое подстанции для обеспечения теплом. Предполагается, что каждая квартира имеет термостат, который позволяет жильцу установить желаемую температуру отопления средней. Интересно, что, хотя к возможности такого регулирования жители часто относятся термостаты как устройства включения/выключения [3], т. е. устанавливают их либо «полностью выключено», либо «полностью включено».

Следовательно, один из самых простых режимов работы системы – просто реагировать на переключение термостатов с «включено» на «выключено» или наоборот.

Система АСУ состоит из трех модулей (рисунок 2):

- CPU АСУ – аппаратная часть системы, отвечающая за фактическое управление теплого пункта;
- Модуль связи – коммуникационный модуль, отвечающий за безопасную передачу данных между аппаратным уровнем и облаком;
- Модуль дистанционной связи и вычислений – облачное приложение, отвечающее за долгосрочное планирование, настройку, сбор и анализ.

Конечно, для связи между этими модулями требуется промежуточное аппаратное и программное обеспечение, которое, хотя и необходимо на практике, в этой статье опущено.

Встроенный аппаратный контроллер является важным элементом системы. Следуя этим, был выбран Intel/Altera FPGA Family Max10. Процессорный модуль IPCore NIOS™ II [4] и процессор NIOS II использовались в качестве среды выполнения алгоритмов управления нагревом. Алгоритмы были реализованы на C++.

Встроенный контроллер работает в трех режимах: автономном, сетевом и прерывистый (смешанный режим). Автономный режим означает, что устройство работает автономно.

В этом режиме он не имеет доступа к интернету, без связи с облаком окружающей среде и без доступа к внешним данным, также определяемым искусственным интеллектом алгоритмы (облачная обработка AI).

Сетевой режим определяет работу системы с полным доступом к сети.

В этом режиме устройство может связываться с облачной средой и получать доступ к внешним данным, включая результаты интеллектуальной обработки в облаке.

Прерывистый режим поочередно определяет прерывистую работу. Такая ситуация может возникнуть при отсутствии связи. Например, это может произойти из-за системы выход из строя или модернизация строительной установки, с которой контроллер NOTOS сотрудничает. Повторно-кратковременный режим работы определяет чередующиеся и случайные нехватки сигналы внешней связи с облачной средой или в области сети интеллектуальных датчиков термостата, расположенных в комнатах.

В результате проведенных тестов, мы решили использовать 32-битный процессор NIOS II (поскольку реализован IPCore) с арифметическим сопроцессором и программной реализацией системы. (Хотя NIOS II требует почти в три раза больше логических элементов, чем прямой реализации алгоритма PID, он предлагает гибкость, необходимую для реализации функций связанных с взаимодействием с облачной средой.)

В настоящее время алгоритм PID реализован с использованием комплекта Intel™ MAX 10 Eval Kit. плата (рисунок 3).

Мы реализовали алгоритм, где смысл блоков следующий:

- блок AltPll0 (библиотека) преобразует входную частоту 50 МГц в 10 МГц;
- Блок счетчика (реализован) формирует частоту для ПИД-регулятора 100 Гц;
- Блок UnitDelay (реализован) фиксирует входные данные, используя частоту запуска (т. е. 100 Гц);
- ADD\_FP и SUB\_FP (библиотека) – это блоки с плавающей запятой, отвечающие за добавление и вычитание. Они работают в арифметике одинарной точности с задержкой в один такт, 10 МГц. частота (42 МГц – максимальная доступная частота), 938 LUT;

• МК\_FP (библиотека) представляет собой блок умножения одинарной точности с плавающей запятой с двумя задержками циклов, максимальная частота 46 МГц и LUT 288.

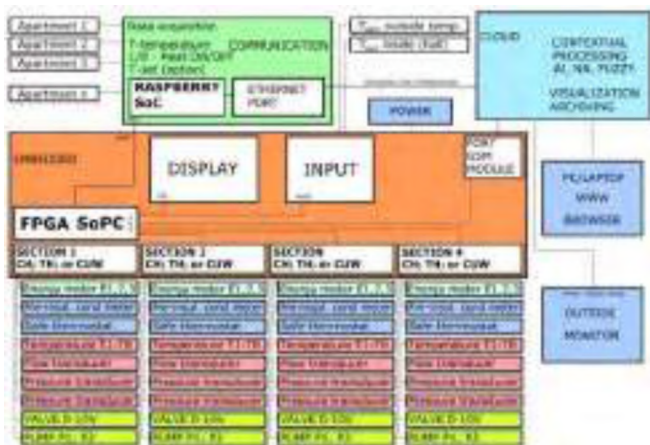


Рис. 2. Система ACU



Рис. 3. Плата Intel™ MAX 10 Eval Kit

Коммуникационный модуль призван служить посредником между аппаратным контроллером и уровнем интеллектуальной обработки в облаке. Конструкция модуля основана на компьютер Raspberry PI, работающий под управлением операционной системы Linux.

Облако является частью системы, размещенной в облачной среде. Главными целями этого модуля являются хранение данных измерений, анализ собранной информации, визуализация и изменение рабочих параметров аппаратного контроллера. Данные анализ будет использовать механизмы искусственного интеллекта, включая машинное обучение.

Облачная часть системы отвечает за долгосрочное интеллектуальное планирование, данные анализа и принятия стратегических решений. Алгоритм PID влияет на входящую информацию из облака. Есть два типа таких решений. В конце концов они могут помешать алгоритму ПИД (например, решение о включении или выключении нагрева) или улучшить его работу. Последнее может иметь место путем модификации параметров алгоритма.

Одной из особенностей интеллектуальных систем управления является далеко идущая способность адаптироваться алгоритмы управления изменяющимися условиями эксплуатации. Благодаря анализу данных облако может изменить операционные параметры теплового пункта и тем самым адаптировать систему для работы в изменяемую среду, образом, который невидим для пользователя. Исследование по проекту показывает, что энергия потери в результате неспособности адаптировать управление теплового пункта к изменившемуся режиму здания может достигать до 30 % потребляемой энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Gupta, A.; Chandra, A.K.; Luksch, P. Distributed Real-Time Systems; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020; pp. 46–63.
2. Albus, J.S. Outline for a Theory of Intelligence. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1991, 21, 473–509.
3. Meier, A.; Aragon, C.; Hurwitz, B.; Peffer, P.; Pritoni, M. How People Actually Use Thermostats. In Proceedings of the 2010
4. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, USA, 15–20 August 2010; pp. 193–206.
5. Intel. Nios® II Processor Reference Guide; Intel: Santa Clara, CA, USA, 2020.

Научный руководитель: д.т.н. А.И. Алиферов, профессор ФМА АЭТУ НГТУ.

# РАЗРАБОТКА РАДИОИНФОРМАТОРА ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

Р.Р. Мухаметзянов, Э.А. Мухамедзянов, И.В. Токтаров  
КГЭУ, ИЭЭ, каф. ЭТКС, группа ЭМК-1-19

**Аннотация:** Предотвращение чрезвычайных ситуаций, таких как пожар и взрыв природного газа, остаются актуальными задачами. Исходя из этого предлагается разработка новых систем сигнализации на основе современных датчиков, систем и модулей для обнаружения и сигнализации задымления, тления и утечки природного газа. В статье приведен разработанный прототип на основе программируемого контроллера Arduino и датчиков.

**Ключевые слова:** пожар, утечка газа, тление, сигнализация, контроллер Arduino.

Основываясь на данных Центра пожарной статистики Международной ассоциации пожарных служб число погибших и травмированных людей при пожарах в мире составляет 100–120 и 300–350 тыс. чел. в год соответственно. Важными составляющими решения вышеописанных проблем является детектирование наличия очагов возгорания в помещении, а именно молекул CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> так как они являются индикаторами возникновения пожара и утечки опасных для здоровья человека газов. За основу для разработки системы детектирования был выбран программируемый логический контроллер (ПЛК) на базе ATmega Arduino Uno (рисунок 1а), извещателем наличия в воздухе горючих веществ, а также продуктов горения и тления был выбран пьезоизлучатель (рисунок 1б), для передачи значений детектора используется беспроводной трансивер, работающий на частоте 2,4 ГГц, на базе NRF24 (рисунок 1в), в качестве реле, включающего систему вентиляции был выбран SONGLE SRD-05VDC (представлен на рисунок 1г), детектором использован датчик углеводородных газов и дыма MQ2 (рисунок 1д) [1]

Детектор газов широкого применения MQ-2, в течение 120 секунд после включения установки нагревается до необходимой температуры и переходит в рабочий режим. Находясь в рабочем режиме, детектор, с небольшой задержкой передает значения напряжения (задержка прописана в коде), прямо пропорциональные концентрации выявляемых газов, через разъемы A0 и D0 к трансиверу NRF-24, подключенному по схеме на рисунке 2 [4].

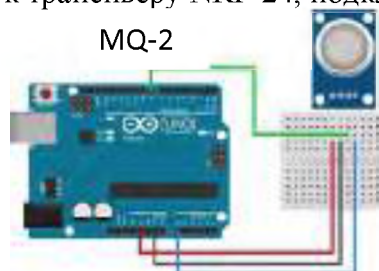


Рис. 1. Схема подключения датчика газов MQ-2 к плате Arduino Uno

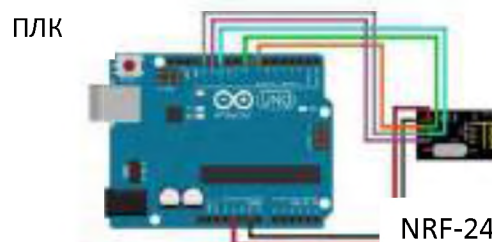


Рис. 2. Схема подключения трансивера NRF-24 к плате Arduino Uno

Для функционирования схемы разработана программа в среде Arduino IDE. Код программы представлен на рисунке 3.

Особенностями разработанной программы являются:

1. Способность детектирования широкого спектра газов.
2. Возможность регулировки точности.
3. Возможность подключения новых датчиков.

Приемник, расположенный в комнате оператора, представляет собой связку контроллера Arduino Uno и трансивера NRF-24, который обрабатывает полученный сигнал. При достижении в помещении предельно-допустимой концентрации газа, указанной в программном коде, подается напряжение на пьезоизлучатель. В случае наличия горючих газов в помещении, включается система принудительной вентиляции.



# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРАМИ, ПРЕОБРАЗУЮЩИМИ ЭНЕРГИЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В.Е. Кожемякин, А.А. Ачитаев

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета  
ГГЭЭС

## Введение

В современном мире все более широкое распространение получают электростанции, использующие возобновляемые источники энергии. Крайне широкое распространение получили сегодня электростанции, преобразующие энергию ветра. Такие электростанции отличаются большими площадями, занимаемыми большим количеством ветроэнергетических установок, называемых в совокупности ветропарком.

Распространение электростанций, преобразующих энергию из возобновляемых источников так же, привело к появлению большого числа электростанций малой мощности, распределенных на большой территории. Особенностью солнечных или ветряных электростанций при подключении их к энергетической системе является подключение через сетевой инвертор, позволяющий выдавать в энергосистему мощность на частоте 50 Гц.

Широкое распространение источников, подключаемых к энергосистеме через инвертор, оказывает значительное негативное влияние на динамическую устойчивость энергетической системы, а также на регулирование частоты и напряжения в энергосистеме. Это влияние обусловлено отсутствием инерции таких электростанций. При увеличении доли возобновляемых источников энергии в структуре выработки негативное влияние будет только усиливаться.

В последнее время было предложено моделировать виртуальную инерцию распределенных генераторов с целью повышения стабильности частоты напряжения в сети. Создание виртуальной инерции объектов распределенной генерации в последнее время привлекает много внимания в силу возможности обеспечения регулирования частоты, напряжения и сглаживания пиков потребления в электроэнергетической системе [1].

Данная тема является актуальной в силу необходимости обеспечить надежность функционирования Единой энергетической системы в условиях широкого внедрения объектов малой генерации на основе возобновляемых источников энергии. Создание виртуальной инерции позволит повысить стабильность и эффективность работы электроэнергетической системы с большой долей электростанций на основе возобновляемых источников энергии.

## Современные тенденции и перспективы развития

Современные исследовательские работы в области стабильности и управления сетевыми инверторами производится в режимах, близких к номинальным. При этом не учитываются переходные и аварийные режимы работы сети, что приводит к некорректной работе инвертора в таких режимах. Для улучшения динамических характеристик работы сетевых инверторов с целью повышения устойчивости их работы на ненормальных и в аварийных режимах, можно считать перспективным применение алгоритмов виртуальной инерции. Так же стоит учитывать и случайный характер нагрузки, особенно в электрических сетях, питающих электрический транспорт.

Таким образом, для обеспечения безопасной и надежной работы энергосистемы с высокой долей проникновения возобновляемых источников энергии необходимо применение интеллектуальных сетей, которые смогут производить использование имеющейся или высвобождающейся энергии для регулирования в энергосистеме. Высвобождение энергии происходит в силу отключения некоторых инверторов при их перегрузке и отключении от сети. Отключение происходит практически мгновенно, что позволяет выделить два современных подхода к созданию алгоритмов виртуальной инерции.

Первый подход заключается в расширении полосы пропускания анализируемых сетевых явлений. Данный подход обусловлен высоким быстродействием системы управления сетевым инвертором, время действия которой находится в диапазоне от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд. Так же необходимо учитывать влияние контура фазовой автоподстройки частоты на скорость работы инвертора. Контур фазовой автоподстройки не может быстро синхронизироваться с напряжением сети в силу больших значений коэффициентов усиления в контуре.

Второй подход заключается в повышении устойчивости энергетической системы с использованием виртуальной инерции. Эмуляция виртуальной инерции требует наличие у сетевого инвертора возможности накапливать и отдавать определенное количество энергии в зависимости от изменения частоты сети, аналогично синхронным генераторам. Подобный подход предполагает создание так называемого виртуального синхронного генератора, который позволяет имитировать инерцию и сглаживание колебаний частоты в энергосистеме путем изменения выдачи или потребления им активной и реактивной мощности.

Перспективным считается применение накопителей энергии с целью создания виртуальной инерции. Так же создание виртуальных синхронных генераторов возможно на базе первичных источников энергии, путем изменения вырабатываемой ими активной и реактивной мощностей.

### Конструкции сетевых инверторов

Наиболее современной конструкцией инверторов, обеспечивающих подключение электростанций на основе возобновляемых источников энергии к сети, является схема «спина к спине» с двумя преобразователями: первый для преобразования напряжения на стороне источника, второй для преобразования на стороне сети. Инверторы, применяемые для ветроэнергетических установок, как правило, настроены на слежение точки максимальной мощности ветрогенератора. Со стороны сети преобразователь позволяет получить трехфазное напряжение заданной частоты.

Пример реализации подключения ветроэнергетической установки к сети посредством такого инвертора представлена на рисунке 1. Помимо энергетической установки и инвертора необходим комплект измерительных приборов, позволяющих производить синхронизацию инвертора с сетью, а также выходной фильтр, обеспечивающий требуемое качество электроэнергии.

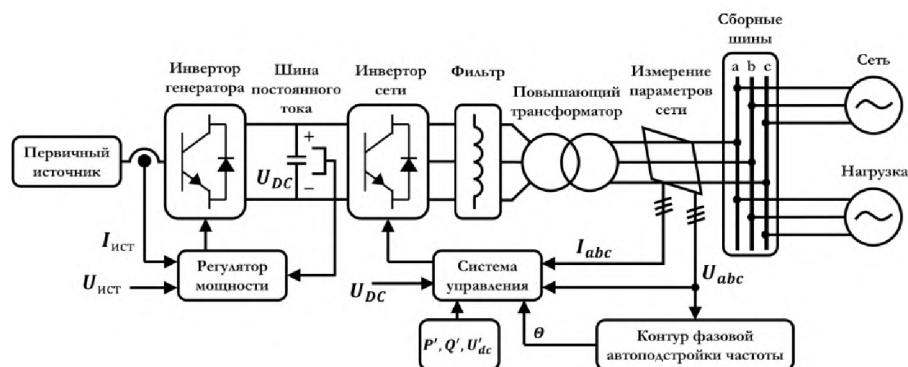


Рис. 1. Типовая схема подключения распределенного генератора с возобновляемым первичным источником посредством сетевого инвертора

Инверторы, подключаемые к системе, могут быть зависимыми, то есть ведомыми сетью и автономными. Автономные инверторы позволяют изменять выдаваемую в систему мощность и, тем самым, поддерживать частоту и напряжение сети. Зависимые инверторы могут вырабатывать только максимальную мощность и, в случае потери опорного напряжения, должны отключаться. Особенно остро данная особенность проявляется в аварийных режимах, когда происходит резкое снижение напряжения сети. В таком случае, подключенные к сети инверторы будут отключаться от действия их защит, что приведет к снижению выработки и, следовательно, к еще большей просадке напряжения и частоты в энергосистеме.

Инверторы, ведомые сетью, по существу, являются управляемыми источниками тока. Величины активной и реактивной мощности в них задаются независимо, в зависимости от напряжения и частоты сети.

Качественно от инверторов, ведомых сетью, отличаются автономные инверторы. В автономных инверторах система управления представлена двумя основными подсистемами: контроллером напряжения и блоком динамических характеристик. Блок динамических характеристик в свою очередь включает в себя механизм управления, позволяющий имитировать желаемую динамику изменения напряжения. Следовательно, данный блок управления позволяет имитировать сброс нагрузки на виртуальном синхронном генераторе или любой другой ненормальный/аварийный режим. В силу механизма действия, система управления автономного инвертора не нуждается в контуре фазовой автоподстройки частоты и может работать в режиме источника ЭДС, подключенного к электроэнергетической системе.

### **Контуры управления сетевых инверторов**

Благодаря алгоритмам управления, автономные инверторы могут в случае возникновения аварии в системе поддерживать уровень напряжения сети. Для этого характер реакций распределенных генераторов в системе с высоким уровнем интеграции возобновляемых источников на возмущения в электроэнергетической системе необходимо приблизить к таковым у традиционных синхронных генераторов. Управление инверторами осуществляется с использованием множества сложных функций управления, разработанных в последнее время [3]. Таким образом, современные системы управления позволяют организовать работу инвертора в режиме «P/Q» для задания величин мощностей.

Система управления ведомого инвертора позволяет работать энергетическим установкам с хаотической выработкой в энергосистеме, выдавая мощность с выполнением требований к качеству вырабатываемой электроэнергии. При этом система управления инвертора со стороны сети всегда стремится выдать наибольшую активную и реактивную мощность, в зависимости от мощности, вырабатываемой первичным источником.

Система управления автономного инвертора подразумевает изменение напряжения на конденсаторе постоянного тока путем изменения мощности первичного источника. Такой подход к управлению больше подходит для управляемых первичных источников, таких как генераторы микро-ГЭС и других, так как гарантируется наличие первичной энергии. В случае первичных источников с переменной стохастической выработкой возможно применение накопителей энергии, являющихся гарантированным источником энергии. При этом, имея более предсказуемый первичный источник можно зафиксировать напряжение на шинах постоянного тока и производить управление выдаваемой в систему мощностью по заранее заданным характеристикам генератора. Пример такой системы управления приведен на рисунке 2. Возможна и другая структура системы управления инвертором, которая включает в себя каскадные пропорционально-интегральные регуляторы, формирующие управляющие сигналы, предотвращая перегрузку преобразователя по току.

Для обеспечения резерва мощности, который можно использовать с целью реализации алгоритмов виртуальной инерции, предполагается работа преобразователей ниже максимальной, когда оставшаяся мощность рассматривается в качестве резерва регулировочной мощности для поддержания частоты в энергосистеме. В случае с синхронными генераторами, при возникновении повреждения в сети для поддержания требуемого уровня напряжения происходит увеличение величины реактивной составляющей тока генератора, обусловленное работой системы возбуждения. Для распределенных генераторов можно предположить аналогичную потребность в повышении реактивной составляющей тока промышленной частоты с целью поддержания напряжения на заданном уровне.

На сегодняшний день за рубежом все еще существуют неразрешенные проблемы связанные с расчетом величины реактивного тока, скоростью его нарастания. Так как вопрос управления инверторами распределенных генераторов в аварийных режимах на сегодняшний день





# AUTOMATIC CHANGE OF AUTOMATIC EQUIPMENT OVERLOAD LIMITATION SETTINGS DEPENDING ON THE AMBIENT TEMPERATURE

F.I. Davletyarov

Kazan state power engineering university

IEE, RPA, AUSm-1-21

In this article, we will consider the development of AEOL with automatic change of settings depending on the ambient temperature, and also analyze the advantages of this development.

Automatic equipment overload limitation (AEOL) is used to prevent unacceptable magnitude and duration of current load of power transmission lines (Power Line) and equipment. At the moment, two types of AEOL fixed setpoints are relevant, which are divided into 2 categories: for winter (- 5 °C) and summer (+25 °C) periods. This approach leads to excessive control actions due to the ambient temperature below the temperature for which the AEOL current settings were selected, so this development with automatic settings change is relevant, since the addition from the ambient temperature will be detected, which will allow us to avoid excessive or insufficient action of AEOL.

As we know, the allowable current load in time and magnitude will vary with the change in ambient temperature, therefore, the use of standard AEOL without automatic change of current load parameter settings depending on the ambient temperature can lead to the following consequences:

- excessive AEOL trips, when the ambient temperature becomes lower than the temperature for which the current settings are set;
- absence of AEOL operation when the air temperature is higher than the temperature for which the current settings are set.

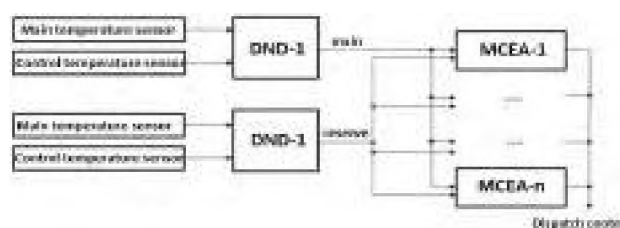
These consequences and factors are especially evident in the autumn and spring periods during the transition from summer to winter parameters, and from winter to summer.

It is possible to correct the setting of the current settings in correlation with the air temperature by issuing commands from the dispatcher, but the process of dispatching control becomes more complicated, which may affect the preservation of the quality of the equipment.

This development with automatic change of settings will eliminate the indicated disadvantages of the basic AEOL with seasonal settings (Winter/Summer).

## **Description and composition of AEOL-T:**

This emergency automatics is a software and hardware complex that includes two DND-1 devices (a digital normalization device designed to convert the incoming signal into digital form and transmit signal values to the Ethernet network), two pairs of temperature sensors (measuring transducers of the IPVT-206 type ) and a bunch of algorithms operating on the basis of MCEA cabinets (microprocessor complex for local emergency control).



*Fig. 1. Block diagram of AEOL-T*

The temperature sensors in the DND-1 receive analog signals, where they are converted into digital ones. Signals are sent from the main and control sensors to each DND-1. This is required to verify the authenticity of the temperature measurements. When measuring the ambient air temperature in the readings of the sensors, an error of no more than 3°C is possible. For measurement accuracy, it would be appropriate to exclude the installation of temperature sensors on the roofs and walls

of buildings, as they can give false results. Such measurements can be carried out using a specialized meteorological booth with sensors that are installed at substations (substation Taman 500 kV).

Information about the ambient temperature passes the reliability control in the MCEA cabinets, and the temperature is also noted to be in the operating range (from -40 to +50 °C).

When switching from the main DND-1 to the reserve, the following will occur:

- in case of failure of one of the thermal sensors;
- at a signal about the apocryphal nature of information about the ambient temperature;
- in case of failure of the main DND-1;
- when the temperature is outside the operating temperature range;
- in case of failures in data transmission from the main DND-1.

In the event of unpredictable circumstances in which both devices are inoperative, the last set current setting parameter for all AEOL stages will be automatically saved.

#### **Information for the dispatch center**

To control the operation of AEOL-T, the following information should be transmitted to the dispatch center:

- parameters of the ambient air temperature at a given point in time;
- set current setting values for all stages;
- signaling the failure of each MCEA cabinet;
- signaling in case of failure of the main and control DND-1;
- signaling when AEOL-T is triggered.

#### **Conclusion**

This development (AEOL-T) based on MCEA cabinets will help to avoid the shortcomings that were identified when working with a standard AEOL with fixed settings. This will help improve the health of the power system and avoid excessive or insufficient operation of AEOL when the ambient temperature changes in different seasons.

AEOL-T can be used in the development of project documentation for the creation or modernization of AEOL.

#### **LITERATURE:**

1. 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования.
2. Беркович М. А. А. Н. Комаров, В. А. Семенов. Основы автоматизации энергосистем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 стр.
3. Брухис Г.Л., Воронин В.А., Илюшин П.В., Горшкова Н.А. Разработка и внедрение устройств автоматического ограничения перегрузки линий// Электрические станции. 2012. – №6. – С. 36-42.
4. Бургсдорф В.В. Нагрев проводов воздушных линий электропередач и существующие нормы // Электричество. 1937. – №17-18. – С. 40-44.
5. 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

Scientific advisor: Y.V. Piskovatsky, PhD in Engineering, docent IEEE KGEU.

## СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИИ

В.В. Барулин, М.Е. Кашкаров  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А03

Одной из самых важных задач энергетики является передача электроэнергии от электростанции к потребителю. Чтобы описать максимальную мощность, которая может быть передана по линиям электропередач, было введено понятие пропускной способности. Однако передача электроэнергии ограничивается различными обстоятельствами. Примерами причин, по которым происходят потери электроэнергии в электрических сетях могут служить климатические условия, нагрузочные потери, расходы на поддержку работы подстанций. Мощность, которая может быть передана по ЛЭП, зависит от ее протяженности и напряжения следующим образом [1]:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_c \cdot \sin(\alpha \cdot l)} \sin(\delta), \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения на начальном и конечном участках ЛЭП;  $Z_c$  – волновое сопротивление линии;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние волнового характера распространения электромагнитного поля,  $l$  – длина линии, по которой передается мощность,  $\delta$  – угол сдвига между напряжениями в начале и конце линии.

Ниже указаны некоторые наиболее распространенные пути повышения пропускной способности:

1. Предельная мощность, которую способны передать ЛЭП, зависит от квадрата напряжения, поэтому при небольшом возрастании напряжения, мощность будет заметно увеличиваться. А значит, повышая номинальное напряжения линий электропередач, можно повысить их пропускную способность.

2. Расщепление фаз, за счет которого уменьшается индуктивное сопротивление ЛЭП. Данный способ наиболее актуален для линий большой длины.

3. Продольная компенсация реактивного сопротивления ЛЭП.

4. Использование управляемых источников реактивной мощности (ИРМ). Примерами ИРМ могут служить перевозбужденные синхронные машины или синхронные компенсаторы. Если выбрать нужную для поддержания заданного напряжения в промежуточных точках линий мощность ИРМ, то эта мощность распределится между несколькими независимыми участками, и итоговая пропускная способность линии, взятой целиком, будет характеризоваться участком линии, который обладает минимальной предельной мощностью.

Одним из нетрадиционных способов является использование управляемые самокомпенсирующихся высоковольтных линий или коротко УСВЛ. Фазорегуляторы решают проблему поддержания напряжения в пределах требуемой величины. Для осуществления задумки используются многоцепные ВЛ. Самыми часто используемыми ВЛ являются двухцепные. Электрическое и магнитное влияния улучшаются благодаря максимальному сближению проводов различных фаз. Угол сдвига между векторами напряжений выставляется в пределах от 0 до 180 градусов. Также производится установка шунтирующих реакторов и батарей конденсаторов между фазами. Описанным выше способом можно изменять величину волнового сопротивления в формуле (1), обеспечивая тем самым широкий диапазон значений максимальной мощности [2].

На сегодняшний день результатами проведения соответствующих опытов и теоретического анализа стал расчет и создание моделей, определенных двухцепных УСВЛ, которые обладают номинальными напряжениями 10–1150 кВ. На основании полученных данных были решены такие вопросы инженерного характера, как: нестандартные взаимоположения фаз, изоляция фазных проводников друг от друга, разработка схем для подключения к подстанциям, а также применение таких устройств, как: фазорегуляторы, компенсаторы реактивной мощности и устройства релейной защиты и автоматики.

На данный момент в эксплуатацию были введены двухцепные самокомпенсирующие линии с номинальными напряжениями, находящимися в диапазоне 10–110 кВ. Был проведен технический анализ опорных конструкций с двумя стойками для УСВЛ с номинальным напряжением 110 кВ, также было проведено проектирование и проверка механических параметров сближенных фаз управляемых линий с номинальными напряжениями 110 и 220 кВ соответственно; проведены технико-экономические обоснования для использования УСВЛ между следующими пунктами: Курейской гидроэлектростанцией – и станциями города Норильска длиной 380 километров; Богучанская гидроэлектростанция – город Канск протяженностью 450 км. Номинальные напряжения вышеприведенных линий равняются 220 и 500 кВ соответственно. Выполнен вступительный концепт двухцепной управляемой линии 1150 кВ между Туруханской гидроэлектростанцией – и Центром, имеющей протяженность свыше 3675 км. На базе технических испытаний, проведенных в Институте Энергетики Молдавской Академии Наук, был построен опытный образец самокомпенсирующих линий напряжением 500 кВ с двумя расщепленными фазами с проводами типа 5хАС-300/39 и проведены эксперименты по определению электрических параметров воздушных зазоров и изоляции между фазными проводниками. В данных проектированиях и технических анализах участвовали многие ведущие энергетические компании и факультеты престижных университетов. На основе УСВЛ с номинальными напряжениями 330–1150 кВ разработаны варианты магистральных сетей, входящих в состав ЕЭС для стран, являющихся партнерами России в области энергетики. Однако, исследования в области управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий еще не окончены и нуждаются в дальнейшем развитии. Рентабельность продолжения работ в данной сфере доказана на основании выполненных научно-исследовательских опытов. На основе полученных знаний и данных, в Молдавии были сооружены образцы ФРТ – 35 кВ, которые использовались для экспериментального испытания. Запорожский трансформаторный завод также произвел несколько образцов ФРТ с номинальным напряжением 110 кВ [3].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Проблемы передачи электроэнергии на дальние расстояния // Боровское исследовательское учреждение – Технологии XXI века. – Режим доступа: [http://bourabai.ru/toe/dist\\_problems.htm](http://bourabai.ru/toe/dist_problems.htm) (дата обращения 10.11.2022).
2. Агапов В.А., Копылов Д.А. Способы повышения пропускной способности линий электропередач // НАУКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ. – Кишинев: Оренбургский государственный университет, 2015. – С. 61–65.
3. Постолатий В.М., Быкова Е.В. Повышение пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока // Институт энергетики АНМ, г. Кишинев. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-propusknoy-sposobnosti-i-upravlyaemosti-elektroperedach-peremennogo-toka/viewer> (дата обращения 25.11.2022).

### АНАЛИЗ АВАРИЙ НА ГЭС

Л.А. Полуносик

Томский политехнический университет

ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А91

В наше время активно изучаются и применяются различные возобновляемые источники энергии, на момент 2021 года доля возобновляемых источников энергии в мире составляла 28,1 % [1]. И с каждым годом эта доля увеличивается, к примеру, в 2010 году эта доля составляла 16,7 %. И одну из значимых частей этой энергетики занимает гидроэнергетика, на момент 2021 года она составляла 56,9 % от возобновляемых источников энергии, или же 16 % от всей мировой энергетики.

Плюсы гидроэнергетики неоспоримы: бесплатный и практически безграничный энергоноситель, минимальные выбросы вредных веществ в окружающую среду. Но в то же время эта отрасль энергетики может повлечь за собой катастрофические последствия при авариях. В основном гидроэлектростанции (ГЭС) имеют большую установленную мощность, нежели другие электростанции, и в случае их отключения, могут произойти сильные сбои в энергосистеме. Так же и сама конструкция ГЭС представляет потенциальную опасность, в случае разрушения дамбы будет высвобождено огромное количество воды, что приведёт к затоплению близлежащих районов, что может навредить не только населению, но и экологии. В этом докладе были рассмотрены аварии на ГЭС по всему миру.

17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС произошла промышленная техногенная катастрофа. Причиной аварии по версии из документа «Итоговый доклад парламентской комиссии по расследованию обстоятельств, связанных с возникновением чрезвычайной ситуации техногенного характера на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года» такова:

«Авария на СШГЭС с многочисленными человеческими жертвами стала следствием целого ряда причин технического, организационного и нормативного правового характера. Большинство этих причин носит системный многофакторный характер, включая недопустимо низкую ответственность эксплуатационного персонала, недопустимо низкую ответственность и профессионализм руководства станции, а также злоупотребление служебным положением руководством станции.

Не был должным образом организован постоянный контроль технического состояния оборудования оперативно-ремонтным персоналом (что должно предусматриваться инструкцией по эксплуатации гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС, утверждённой главным инженером СШГЭС от 18.05.2009 г.).

Основной причиной аварии стало непринятие мер к оперативной остановке второго гидроагрегата и выяснения причин вибрации» [2].

На рисунке 1 приведены изменения показания датчика радиальных вибраций подшипника турбины гидроагрегата №2.

В результате этой аварии погибло 75 человек и был разрушен машинный зал, 45 м<sup>3</sup> масла было выброшено в реку Енисей, из-за чего погибло около 400 тонн промышленной форели в близлежащих к СШГЭС рыбоводческих хозяйствах. Также из-за загрязнения воды нефтепродуктами вышли из строя фильтры отчистки воды, что привело к остановке водозабора из Енисея. В следствии этого было нарушено централизованное водоснабжение посёлка Майна. Затраты на восстановление СШГЭС в 2009-2010 годах составили 21,6 миллиарда рублей.

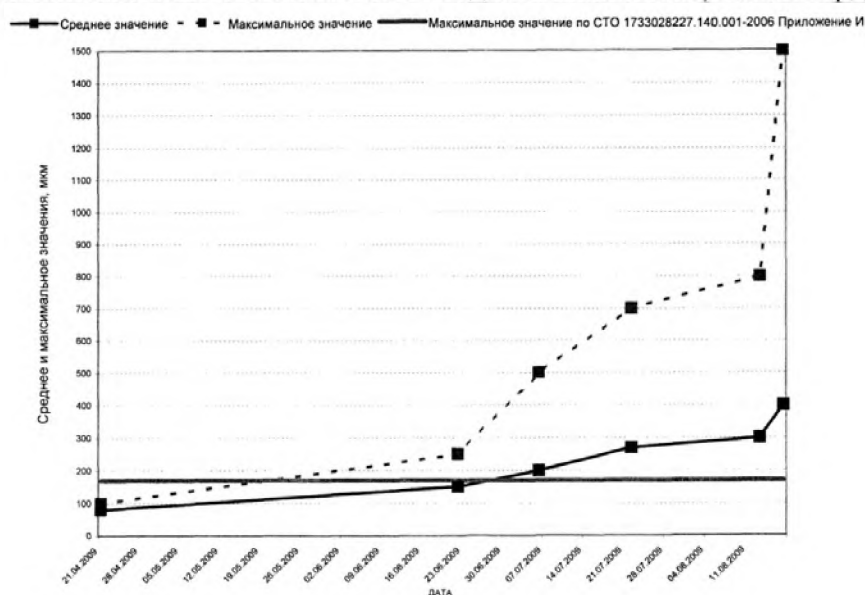


Рис. 1. Изменения показания датчика радиальных вибраций подшипника турбины гидроагрегата № 2

7 февраля 2017 года произошла авария на Оровиллской плотине в штате Калифорния, США. Причиной аварии стало наводнение, вызванное самой влажной зимой за последние сто лет. Началом аварии послужило частично разрушение бетонного жёлоба основного водосброса и размывания осадочных пород вокруг него. Остановили пропуск воды через повреждённый водосброс для его осмотра, в ходе которого были выявлены разрушения в месте, где ранее наблюдались трещины. Сброс воды возобновился для испытания дальнейшего использования повреждённого жёлоба. Но после возникла вероятность введения в действие аварийного водосброса, что и случилось утром 11 февраля. Вода, проходящая через гребень аварийного водосброса, создала крупные промоины, которые приближались к основанию переливной стены. Это создавало опасность разрушения этой стены, что привело бы к огромному сливу резервуара водохранилища. В это же время был риск и разрушения и основного водосброса, что привело бы к таким же катастрофическим последствиям. Исходя из всего этого 12 февраля было принято решение об эвакуации населения, которая затронула около 200 тысяч человек.

Выброс воды через повреждённый водосброс продолжался, но распространение его повреждений вверх не произошло. 14 февраля ситуация стабилизировалась и, эвакуация населения отменилась, но предупреждение о готовности к эвакуации оставалось в силе. 17 февраля уровень воды в водохранилище снизился, что позволило прекратить спуск воды через аварийный основной водосброс. После испытаний по эксплуатации аварийного водосброса 22 февраля была отменена готовность эвакуации [3].

Ремонтные работы последствий этой аварии обошлись в 1,1 миллиарда долларов, эти работы закончились только 19 января 2019 года. Из-за этой аварии пришлось остановить работу станции на небольшой срок. Так же в следствии остановки сброса воды из аварийного водосброса уровень реки Фетер сильно упал, из-за чего образовалось огромное количество оползней. Из-за этих оползней образовались изолированные водоёмы, из которых пришлось спасать редкие виды рыб.

10 ноября 2009 года в Бразилии и Прагвае произошло отключение электроэнергии из-за аварии на ГЭС Итайпу. Из-за этого отключения произошло и отключение плотины Ясирета. Произошло это из-за сильных дождей и ветра, которые вызвали короткое замыкание трёх трансформаторов на ключевой высоковольтной линии электропередачи.

В результате этого инцидента были отключены 18 из 26 штатов Бразилии и всю территорию Парагвая. Без электроэнергии осталось 87 миллионов жителей на 10 дней, что привело к массовым беспорядкам в таких городах как Сан-Паулу, Рио-де-Жанейро, Витория и других [4, 5]. Была полностью парализована инфраструктура движения. Без электричества остались светофоры, что привело к дорожному коллапсу в этих городах. Так же без электричества остался метрополитен, где людям пришлось самостоятельно эвакуироваться из метро по железнодорожным путям. Парагвай был полностью обесточен в следствии веерного отключения плотины Ясирета, после чего в стране также начались массовые беспорядки.

23 июля 2018 года произошла катастрофа на ГЭС Saddle Dam D в Лаосе. Из-за высокого уровня воды вспомогательная плотина ГЭС не выдержала и обрушилась, высвободив около 5 миллиардов м<sup>3</sup> воды [6]. В следствии этого были затоплены 6 близлежащих деревень, по данным на 23 сентября 2018 года было подтверждено, что 40 человек погибли и 98 пропали без вести, 6600 человек были эвакуированы.

На ликвидацию последствий этой аварии страны со всего мира пожертвовали на гуманитарную помощь около 11 миллионов долларов и предоставили спасательную технику с квалифицированным персоналом. А именно: международный комитет красного креста организовал пункты очистки воды в разрушенных зонах и предоставила комплекты медпомощи, Южная Корея так же отправила группу помощи и более 10 миллионов долларов США, Сингапур направил офицеров сил гражданской обороны и гуманитарную помощь в размере 150000 долларов США, Китай направил медицинский контингент из Народно-освободительной армии Китая, Вьетнам предоставил медиков из вьетнамской народной армии и спасательные машины, для оказания помощи, также огромное количество частных компаний, связанные со

строительством и эксплуатацией дамбы предоставили финансовую и гуманитарную помощь, так же активно участвовали в ремонте повреждённой дымбы [7, 8].

Как видно из вышеперечисленных примеров, аварии на ГЭС могут привести к катастрофическим последствиям, на решение которых потребуются года и существенные капитальные вложения. Причинами таких крупных аварий могут послужить не только аномальные наводнения, но и плохая погода. Также необходим должный контроль и выполнение всех норм эксплуатации, чтобы избежать случаев как на Саяно-Шушенской ГЭС и Оровиллской плотине.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Renewables 2021 Global Status Report/ Murdock, Hannah E.; Gibb, Duncan; Andre, Thomas; Sawin, Janet L.; Brown, Adam; Ranalder, Lea; Andre, Thomas; Brown, Adam; Collier, Ute and others// REN21. – 2021. – P. 371.
2. Итоговый доклад парламентской комиссии по расследованию обстоятельств, связанных с возникновением чрезвычайной ситуации техногенного характера на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года.
3. Слива И. В., Лапин Г. Г. Авария на водосбросных сооружениях гидроузла Оровилл // Гидротехническое строительство: журнал. – 2017. – № 11. – С. 44-51.
4. ANALYSIS-Brazil blackout a glitch, but shows investment need// Reuters. URL: <https://www.reuters.com/article/latestCrisis/idUSN11339425> (дата обращения 12.11.2009)
5. Power restored in Brazil after blackouts// CNN. URL: <http://edition.cnn.com/2009/WORLD/americas/11/11/brazil.blackout/index.html> (дата обращения 11.11.2009)
6. Precursory motion and deformation mechanism of the 2018 Xe Pian-Xe Namnoy dam Collapse, Laos: Insights from satellite radar interferometry// International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – V. 109.
7. Several dead, hundreds missing after Lao dam collapses: report// Kyodo News. – 24.07.2018
8. After Laos Dam's Failure, Rescuers Scramble to Save the Stranded// The New York Times – 25.07.2018.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РАЗНОГО ТИПА

А.А. Змиевский

Томский политехнический университет

ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) – это устройство для преобразования движущей энергии ветра в механическую энергию вращения ротора с последующим ее преобразованием в электроэнергию.

Ветроэнергетические установки представляют собой целую совокупность оборудования, предназначенного для выработки, подготовки и снабжения потребителей электрическим током. Поскольку ветер является бесплатным источником энергии, все затраты на выработку тока сводятся к начальным вложениям на покупку (или создание) ветрогенератора и прилежащего оборудования, а также последующее обслуживание.

В настоящий момент существует четыре основных типа ветроэнергетических установок, которые широко используются или использовались в электроэнергетических системах.



ВЭУ первого типа (рисунок 1) реализована с помощью асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором (АГ с КЗ) который напрямую подключен к повышающему трансформатору. Преимуществами являются экономическая эффективность, хорошая надежность, несложное применение и его надежность. Несмотря на некоторую изменчивость производительности в зависимости от скольжения машины, ВЭУ первого типа обычно работают на номинальной частоте вращения или очень близко к ней. Основным недостатком асинхронной машины является реактивная мощность, которую она потребляет для формирования магнитного поля и большие токи, которые машина может потреблять при прямом пуске. Для уменьшения этих эффектов в турбине обычно используется плавный пуск и дискретность при подключении конденсаторных батарей в рамках установки.

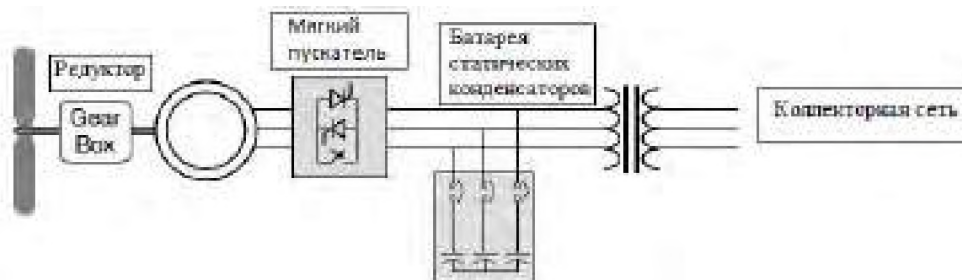


Рис. 1. Типовая структура ВЭУ первого типа

ВЭУ второго типа (рисунок 2) реализована за счет применения асинхронного генератора с фазным ротором (АГ с ФР). ВЭУ подключаются непосредственно к повышающему трансформатору способом, аналогичным для ВЭУ первого типа в отношении схемы статора электрической машины, но также подразумевается включение переменного резистора в цепь ротора. Это может быть достигнуто с помощью применения резисторов и силовой электроники, установленных отдельно по отношению к ротору генератора с токами, протекающими между резисторами и ротором, через контактные кольца. В качестве альтернативы, резисторы и силовые ключи могут быть установлены непосредственно на роторе без применения контактных колец. Переменные резисторы подключены к ротору и могут довольно быстро регулировать токи ротора, чтобы поддерживать постоянную мощность даже при порывах ветра, а также могут влиять на динамическую реакцию машины во время сбоев в электросети.

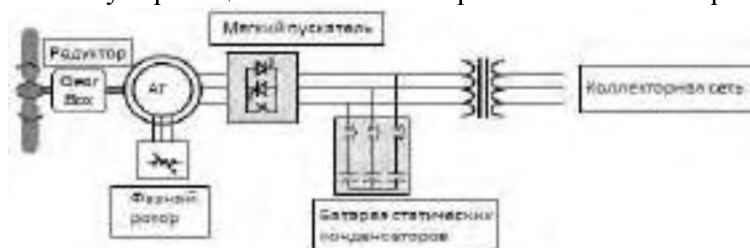


Рис. 2. Типовая структура ВЭУ второго типа

ВЭУ третьего типа реализована за счет асинхронного генератора двойного питания (АГДП), структурная схема которой приведена на рисунке 3. Этот генератор по конструкции аналогичен асинхронному генератору с фазным ротором. На роторе, как и на статоре, имеется трехфазная обмотка, концы которой выведены на кольца, расположенные на валу генератора. Таким образом, обмотка ротора подразумевает возможность внешнего подключения. В результате становится возможным использование отдельного независимого питания обмоток ротора и статора, что определяет «двойное питание» электрической машины. Ротор подключен к сети не напрямую, а через силовой преобразователь. При использовании преобразователя можно гибко управлять питанием ротора. Подобные свойства АГДП позволяют работать ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра, тем самым ВЭУ третьего типа классифицируются как установки с переменной скоростью вращения в отличие от ВЭУ первого и второго типов, которые являются установками с постоянной скоростью вращения.

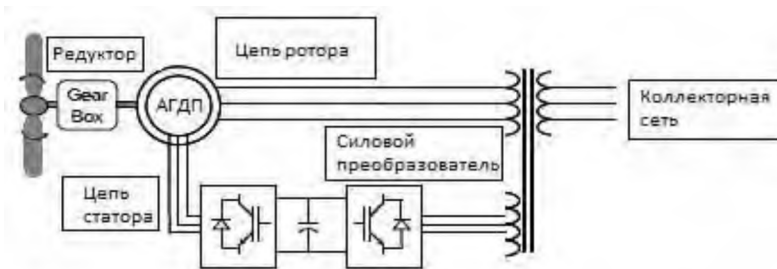


Рис. 3. Типовая структура ВЭУ третьего типа

ВЭУ четвертого типа (рисунок 4) реализована за счет применения синхронного генератора с постоянными магнитами (СППМ). Синхронный генератор с постоянными магнитами создает поле возбуждения с помощью постоянного магнита. Установка четвертого типа очень эффективна при работе с частичной нагрузкой от энергии ветра по сравнению с установкой второго типа. Кроме того, СППМ более мощный и требует меньшего технического обслуживания, так как имеет меньше движущихся частей. Кроме того, СППМ с полным преобразователем является одним из лучших вариантов для ВЭУ с переменной скоростью вращения из-за более высокой эффективности преобразования энергии и более длительного срока службы, несмотря на высокие капитальные затраты.

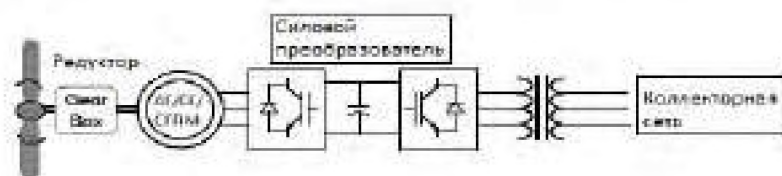


Рис. 4. Типовая структура ВЭУ четвертого типа

В настоящее время широкую популярность набирают ВЭУ третьего и четвертого типа. Рассматривая ВЭУ третьего типа, небольшое количество энергии, вводимой в цепь ротора, может значительно расширить диапазон регулирования мощности в цепи статора. Это главное преимущество АГДП – благодаря наличию силового преобразователя в цепи ротора, который обычно рассчитывается всего на 30% от номинальной мощности машины можно гибко контролировать выходную мощность. ВЭУ четвертого типа обладает большой гибкостью в конструкции и эксплуатации, поскольку вся мощность от генератора передается в сеть через силовой преобразователь.

С растущей потребностью в надежности системы и генератора с возможностью устранения неисправностей, система прямого привода с полномасштабным преобразователем и СППМ привлекает больше внимания в качестве ветрогенератора. Для надежной работы системы преобразования энергии ветра (СПЭВ) необходима эффективная система накопления энергии (СНЭ) и, следовательно, разработка простой и экономичной процедуры для нее. Перед установкой СНЭ следует провести надлежащую оценку коммерческой целесообразности технологии хранения. Прерывистый характер ветра ставит сложную задачу перед методами управления в СПЭВ для получения надежного и стабильного энергоснабжения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Справочное и методическое пособие. – Москва, ИД «Энергия», 2010. – 315 с.
2. Ефимцева Т.В., Дьяконова А.А., Михайлова Е.С., Рахматуллина О.В., Салиева Р.Н. Возобновляемая энергетика в России и в других государствах ЕАЭС и СНГ: проблемы и перспективы правового регулирования // Вопросы российского и международного

- права. 2019. – Том 9. – № 12А. – С. 90-110. URL: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-law-2019-12/11-efimtseva.pdf> (дата обращения 06.10.2022).
3. Ланьшина Т. Ветроэнергетический рынок России: потенциал развития новой экономики, 2021. URL: [http://library.fes.de/pdf\\_files/bueros/moskau/17579-20210408.pdf](http://library.fes.de/pdf_files/bueros/moskau/17579-20210408.pdf) (дата обращения 20.10.2022).
  4. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
  5. Обзор главных энергетических вызовов и приоритетов. / Опубликовано Мировым энергетическим советом, январь 2022. URL: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEIM2022\\_\\_Global\\_%28Russian%29.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEIM2022__Global_%28Russian%29.pdf) (дата обращения 30.10.2022).
  6. Развитие возобновляемой энергетики на фоне энергетических кризисов // Энергетические тренды. Выпуск № 104, январь 2022. URL: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo\\_104.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo_104.pdf) (дата обращения 16.10.2022).
  7. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития / Информационный бюллетень, АРВЭ, июль 2022. URL: [https://novawind.ru/bitrix/images/Vyulleten\\_Interaktivny\\_2022\\_1.pdf](https://novawind.ru/bitrix/images/Vyulleten_Interaktivny_2022_1.pdf) (дата обращения 26.10.2022).
  8. Янсон Р.А. Ветроустановки: учебное пособие / под. ред. М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 36 с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственное задание "Наука" № FSWW-2020-0017.

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## Вторая секция. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ ОКИСЛИТЕЛЯ

А.Э. Новиков

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б95

Твердое топливо имеет широкое применение, в частности, оно используется для получения из него горючего газа, а сам процесс называется газификацией. Процессы газификации топлива и горения являются весьма схожими между собой. Схожесть заключается в том, что оба процесса несут в себе окисление твёрдого топлива, посредством химических реакций и продуктов, образовавших во время пиролиза. В первом процессе – газификации, окисляющей средой является водяной пар с добавлением кислорода, а во втором процессе – горении, окислителем является только кислород. Но всё же, разница между процессами есть, она заключается в том, что во время горения топливо окисляется полностью, процесс протекает в условиях избытка кислорода, а процесс газификации происходит в условиях дефицита кислорода, при этом не происходит полного окисления топлива [1].

Физическая постановка задачи газификации заключается в том, что через цилиндрическую капсулу, которая заполнена коксом, происходит дутьё высокотемпературным паровым или парокислородным окислителем [2].

Основываясь на математическую модель, производилось моделирование нестационарного режима теплопереноса при конверсии кокса в среде парокислородного окислителя [3].

Исследуемый процесс конверсии кокса описывается следующими уравнениями:

- уравнение сохранения массы золы и кокса

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = -R_C, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_S R_C, \quad R_C = R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} + R_{C4}; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_5 \varphi_5)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 v)}{\partial z} = R_C; \quad (2)$$

- уравнение неразрывности  $\alpha$  – компоненты газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha)}{\partial \tau} + v \frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}) + R_{S\alpha} + R_{5\alpha}, \quad \alpha = \overline{1,4}; \quad (3)$$

- уравнение сохранения энергии газовой фазы

$$\rho_5 \varphi_5 c_{P5} \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( (\lambda_5 + \lambda_R) \varphi_5 \frac{\partial T}{\partial z} \right) - A_S (T - T_S) + q_{CO}^1 R_{CO}^1 + q_{CO}^2 R_{CO}^2 + q_{H_2} R_{H_2} - \frac{2}{r_0} \alpha_1 \varphi_5 (T - T_S); \quad (4)$$

- уравнение сохранения энергии твердой фазы (золы и кокса)

$$\sum_{i=3}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_S}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z}) + q_{C1} R_{C1} + q_{C2} R_{C2} - q_{C3} R_{C3} - q_{C4} R_{C4} + A_S (T - T_S) + \frac{2 \cdot r_1}{r_0^2} \alpha_2 (T_S - T_E) + q_R; \quad (5)$$

- уравнение движения газа в порах (квадратичный закона фильтрации) и уравнения состояния

$$v = -\frac{k}{\mu + k \cdot \beta \cdot \rho_5 |V|} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \quad p = \frac{\rho_5 \cdot R \cdot T}{M_5}. \quad (6)$$

Система уравнений (1) – (6) решалась при краевых условиях:

$$\tau = 0: \quad \varphi_i = \varphi_{iH}, \quad i = \overline{3,4}; \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,4}, \quad T = T_S = T_H, \quad p = p_H; \quad (7)$$

$$z = 0: \quad T = T_G, \quad (p\nu)_w = const, \quad \lambda_S \cdot \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 \cdot (T_S - T_G), \quad c_\alpha = c_{\alpha G}, \quad (8)$$

$$z = h: \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad p = p_H, \quad \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = 0.$$

При проведении численных расчетов использовались теплофизические и кинетические параметры [3]. Некоторые результаты численных расчетов приведены ниже.

На рисунке 1 приведен профиль температуры газообразных продуктов по длине капсулы, в которой проводилась газификация кокса.

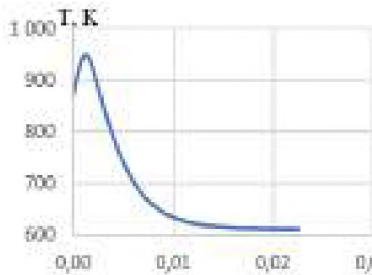


Рис. 7. Профиль температуры в газовой фазе по длине газификатора

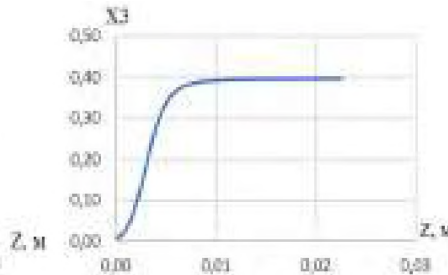


Рис. 2. Профиль объёмной доли кокса

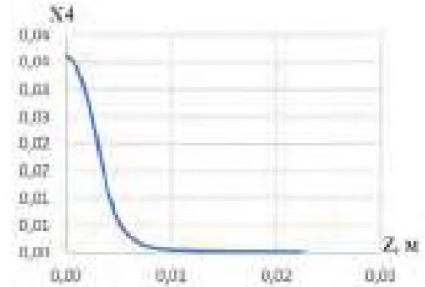


Рис. 3. Профиль объёмной доли золы

Из рисунка 1 следует, что температура по длине газификатора уменьшается и имеет максимум на некотором расстоянии от нижнего основания газификатора, через которое осуществляется подача окислителя. В области высоких температур объёмная доля кокса минимальная (рисунок 2), а золы максимальная (рисунок 3).

Кроме исследования физики процесса при газификации кокса были произведены расчеты для установления состава газообразных продуктов на выходе из газификатора, называемым верхней границе капсулы при развитом процессе газификации (полном прогреве образца). Состав продуктов газификации (синтез газа) определяется при различном содержании кислорода в парокислородном окислителе. Состав продуктов газификации при разном содержании кислорода в окислителе приведён в таблице 1.

Таблица 1. Объёмный состав газообразных продуктов на выходе из образца, при температуре окислителя 873 К и разном содержании кислорода в окислителе

Максимальная температура окислителя, К	Максимальная температура кокса, К	O <sub>2</sub> , %	CO, %	CO <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> O, %
Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0						
856,44	839,54,54	0	0,1	0,138	0,443	99,319
Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,05						
881,47	924,82	0,6	0,54	3,05	2,09	93,72
Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,1						
906,75	1134,6	0,21	2,09	12,67	18,4	66,63
Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,15						
918,65	1332,1	0,16	6,22	22,03	39,02	32,57
Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,2						
927,05	1617,2	0,12	21,74	20,01	51,83	6,3

В ходе анализа таблице 1 можно сделать вывод о том, что при увеличении концентрации кислорода в окислителе температура процесса газификации увеличивается, что приводит к увеличению концентрации CO и H<sub>2</sub> в продуктах газификации, концентрация диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) вначале растет, а при больших температурах газификации начинает уменьшаться.

Доля водяного пара в продуктах газификации с увеличением концентрации кислорода в окислителе (увеличением температуры процесса) резко уменьшается. Кислород в получаемом газе присутствует, но его доля мала.

Следовательно, при газификации твердого топлива, при сравнительно невысоких температурах, получается горючий газ с весомой примесью диоксида углерода, а не чистый синтез газ. В работе [4] было показано, что можно получать, при высоких температурах, чистый синтез газ (без примесей), при газификации угольного кокса в среде высокотемпературного парового окислителя. При газификации древесных отходов наличие примеси в синтез газе [5] объясняется сравнительно низкой температурой процесса. При газификации кокса при высоких температурах начинается более интенсивное его окисление диоксидом углерода ( $C + CO_2 = 2CO$ ) в результате чего при высоких температурах процесса диоксид углерода может полностью расходоваться и отсутствовать в синтез газе.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. В.В. Померанцев. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов; 2-е издание переработанное и дополненное / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Еркинов Д.Е., Еркинов М.Е., Субботин А.Н. Моделирование газификации твердого топлива в высокотемпературной среде окислителя / Энергетика и энергосбережение: теория и практика // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, 13 – 15 декабря 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017. статья № 125.
3. Р.Н. Кулеш. Математическое моделирование тепломассопереноса при подземной газификации угля / Р.Н. Кулеш, А.С. Мазаник, А.Н. Субботин // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 25–32.
4. R.N. Aryukov. Physical Model and Bases of Mathematical Modelling of Above-Surface Gasification of Coal. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016) / R.N. Aryukov and A.N. Subbotin // MATEC Web Conf. Volume 72, 2016, Article Number 01003, Number of page(s) 5. Свободный доступ из сети Интернет.
5. Е. Данильченко. Моделирование тепломассопереноса при газификации отходов древесины сосны в высокотемпературной среде окислителя / Е. Данильченко, М.И. Лушников, А.Н. Субботин. Инновационные исследования: теоретические основы и практическое применение: сборник статей Международной научно – практической конференции (24 мая 2020г., г. Саратов). В 3-х ч., Ч. 3 – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2020. – С. 5–11.

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.Н. Субботин, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ГРУППЫ КАПЕЛЬ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ УГОЛЬНОГО ШЛАМА

Д.С. Романов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

**Введение.** Суспензии на основе отходов могут эффективно сжигаться как в кипящем слое, так и при распылении в топке котла. Возможны условия, при которых поток разогретого воздуха препятствует быстрому и стабильному зажиганию капель, особенно при их низкой плотности в облаке и невысокой температуре окислительной среды (близкой к критической температуре зажигания). В [1] рассмотрено зажигание в потоке воздуха нескольких соседних капель композиционного суспензионного топлива на основе высоковлажного угольного отхода, отработанного турбинного масла и пластификатора. В исследовании рассматриваются случаи с двумя, тремя, четырьмя и пятью каплями. Взаимное расположение капель значительно влияло на зажигание топлива. Результаты показали [1], что время задержки зажигания может различаться примерно на 70 % для капель в группе.

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование взаимного влияния группы капель и частиц низкосортных топлив при их зажигании и горении в потоке нагретого воздуха. Были рассмотрены топливные суспензии на основе воды и угольного шлама. Исследование имеет следующие оригинальные особенности: проанализировано влияние функциональной добавки (отработанное турбинное масло с долей 5 % масс.) на зажигание группы капель суспензии; определен масштаб взаимного влияния капель при их зажигании и горении в потоке низкотемпературного воздуха. Результаты актуальны для развития технологий сжигания отходов в составе топливных суспензий. Основной областью приложения полученных данных является стадия пуска котла, конструирование форсунок и горелок, выбор габаритов котла и разработка мероприятий, направленных на обеспечение стабильного воспламенения и качественного выгорания низкосортного топлива.

**Экспериментальное исследование.** Рисунок 1а иллюстрирует схему стенда, используемого для изучения зажигания и горения группы капель/частиц топлива. Система нагрева состояла из вентилятора-нагревателя и муфельной печи. Поток воздуха с помощью гофротрубы подавался в разогретую до 980 °С муфельную трубчатую печь и дополнительно прогревался. Температура потока воздуха на выходе трубки муфельной печи составляла около 600–620 °С. Скорость потока воздуха варьировалась путем изменения производительности вентилятора. Измерение скорости движения потока воздуха на выходе муфельной печи ( $V$ , м/с) осуществлялся анемометром ИСП-МГ4 (AtlasInvest). Анемометр имеет диапазон измерения 0,1–30 м/с; основную погрешность измерения скорости потока 0,05 м/с. В настоящей работе величина  $V$  варьировалась в диапазоне 0,1–1,2 м/с, характерном для предтопочных устройств, камер сгорания энергетических установок и реакторов.

Для размещения капель топлива использовалась конструкция на основе нихромовых проволок. Каждая капля и частица топлива фиксировалась двумя проволоками толщиной 0,2 мм. Проволоки крепились на металлический каркас, позволяющий передвигать их и тем самым варьировать расстояние между каплями/частицами топлива. Все эксперименты проводились с тремя каплями, расположенными соосно (рисунок 1б). В процессе экспериментов температура в окрестности капель или частиц топлива измерялась с помощью термопар (хромель-копель) в точках, указанных на рисунок 1б. Средний размер капель/частиц составлял около 2 мм. Расстояние от выхода муфельной печи до первой капли составляло около 30 мм.

Под ВУТ в работе подразумевается топливная смесь, состоящая из частиц угольного шлама и воды. Под ОВУТ подразумевается топливная смесь, состоящая из угольного шлама, воды и отработанного турбинного масла.

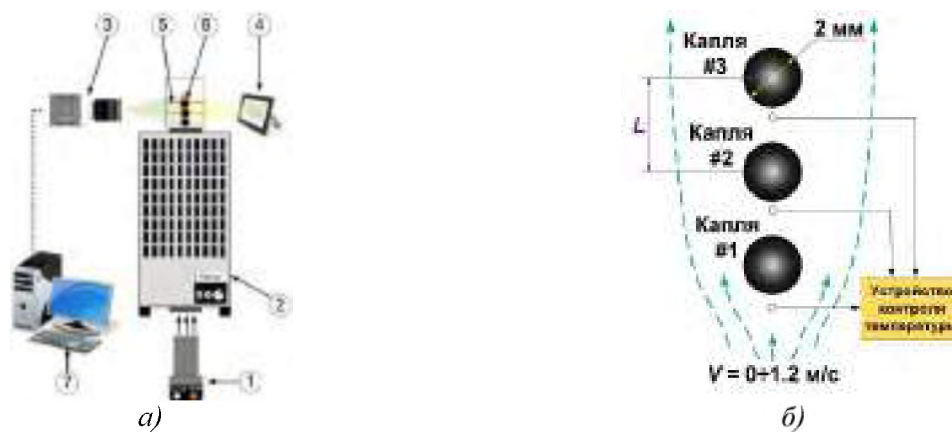


Рис. 1. Схема проведения экспериментальных исследований:

а) схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор-нагреватель; 2 – муфельная печь; 3 – видеочкамера; 4 – прожектор; 5 – нихромовая проволока; б – капля суспензии / частица угольного шлама; 7 – компьютер; б) схема расположения капель/частиц топлива с указанием точек измерения температуры

**Результаты и обсуждение.** На рисунках 2 и 3 представлены установленные зависимости времени задержки газофазного и гетерогенного зажигания капель суспензий от скорости движения потока нагретого воздуха. Поскольку капли в группе располагались на разном расстоянии от источника тепла, то температура в окрестности капель отличалась. Рисунок 3 снабжен температурными метками, которые указывают температуру, измеренную термопарой под каждой из капель (рисунок 1б), до ее зажигания. Как показали измерения, температуры в окрестности первой и третьей капли отличались, в среднем, на 25–30 °С. Эксперименты показали, что длительность предпламенной стадии неодинакова для капель в группе. Но это различие можно считать достаточно ограниченным. Выявленная разница значений  $\tau_{d1}$  составила 10–15 % для капель суспензии на основе угольного шлама и 7–10 % для капель суспензии с добавкой отработанного масла. Несмотря на это, однозначно имела место тенденция более быстрого зажигания капли №1. Первая капля находилась в более высокотемпературной среде и именно это являлось доминирующим фактором для ее ускоренного зажигания. Длительность предпламенной стадии во многом также определяется содержанием летучих в топливе и скоростью формирования газо-воздушной смеси с концентрацией горючего, достаточной для воспламенения. При расположении капель, как в настоящих экспериментах (рисунок 1б), имел место отток продуктов термического разложения от капель/частиц топлива по направлению от первой к третьей. Проведенные эксперименты показали, что падение температуры, которое происходит в том же направлении, имеет большее значение для выполнения условий газофазного зажигания.

Для капель ВУТ зарегистрирован значительный рост (в 1,4–1,6 раза) времени задержки газофазного зажигания при увеличении скорости движения нагретого воздуха (рисунок 4а). Рост скорости потока от 0,1 м/с до 1,2 м/с приводил к снижению температуры в окрестности капель на 15–20 °С. Падение температуры происходило из-за недогрева воздуха в нагревательном элементе из-за большей скорости потока. На основе результатов ранних исследований (например, [1, 2]), можно сделать вывод о том, что указанное снижение температуры не могло быть главной причиной существенного изменения времени задержки зажигания. Очевидно, что влияние скорости движения потока воздуха в этих условиях доминирует.

Увеличение скорости потока усиливает эффект уноса выделившихся продуктов термического разложения.



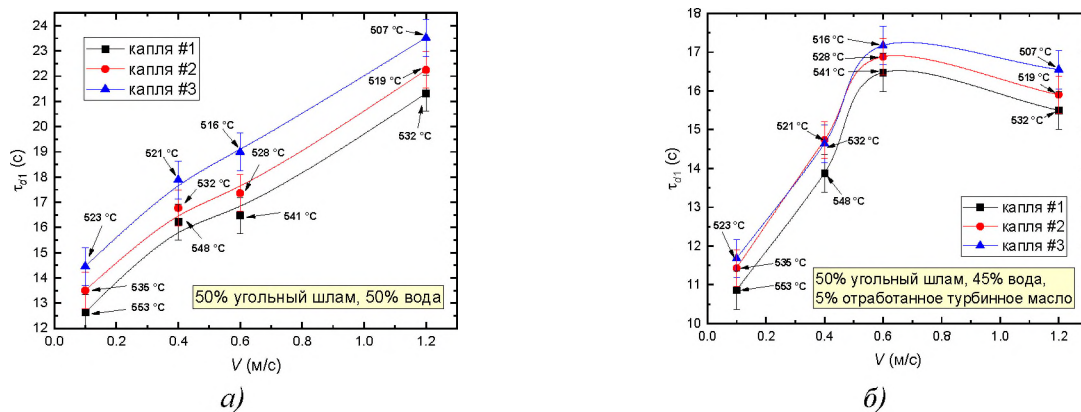


Рис. 2. Влияние скорости потока воздуха на времена задержки газофазного зажигания капель топливных смесей при  $L \approx 5$  мм:  
(а) ВУТ; (б) ОВУТ

Отток газов от топливного образца приводит к тому, что требуется больше времени для достижения условий зажигания в газовой фазе. Этот фактор особенно важен при невысокой температуре нагрева и недостатке летучих в топливе (например, когда используется смесь высокозольных отходов или даже каменный уголь или антрацит). Поэтому при распылении каплевоздушной смеси возможен сценарий, когда поток нагретого воздуха будет препятствовать быстрому зажиганию капель суспензионного топлива, особенно при низкой плотности капель в облаке и низкой температуре окислительной среды (близкой к температуре зажигания).

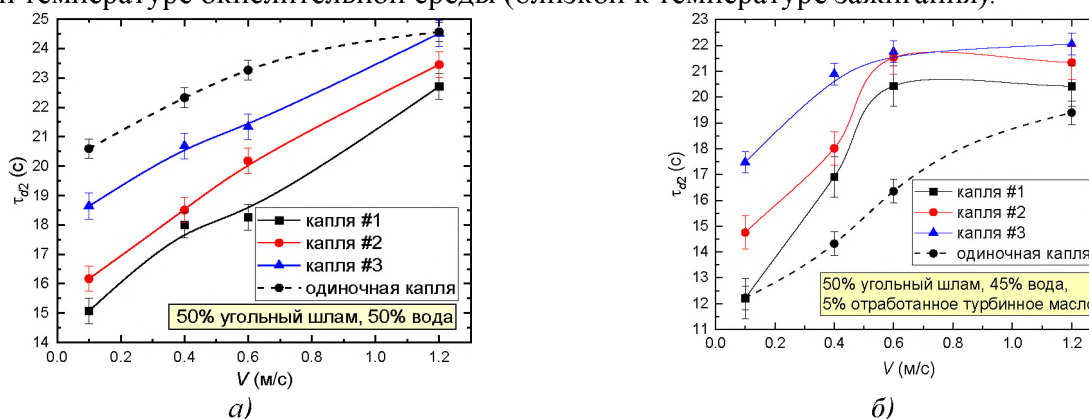


Рис. 3. Влияние скорости потока воздуха на время задержки гетерогенного зажигания капель топливных смесей при  $L \approx 5$  мм:  
(а) ВУТ; (б) ОВУТ

Несмотря на малое отличие длительности предпламенной стадии для капель в группе (при  $L \approx 5$  мм), между ними определенно возникало взаимодействие. Это подтверждается тем, что в аналогичных условиях нагрева газофазное зажигание одиночной капли не происходило. Одиночная капля зажигалась в гетерогенном режиме. Времена задержки гетерогенного зажигания группы капель при разных скоростях потока воздуха показаны на рисунке 4. Приведены также данные для одиночной капли, положение которой соответствовало капле #1 на рисунке 1б. Группа капель ВУТ зажигались гетерогенно быстрее, чем одиночная. При этом группа капель суспензии с добавкой турбинного масла (ОВУТ) зажигалась гетерогенно позже, чем одиночная (рисунок 4б) из-за достаточно длительной стадии пламенного горения. В течение этого времени (около 3–5 с) коксовый остаток недостаточно снабжается окислителем для устойчивого гетерогенного зажигания.

**Закключение.** Рост скорости потока активизировал пламенное горение и также способствовал появлению объединенной пламенной зоны. Одновременно с этим увеличение скорости низкотемпературного потока приводило к значительному увеличению задержек воспламенения капель суспензии (в 1,2–1,6 раза) за счет уменьшения температуры в зоне теплообмена

и уноса из нее горючих продуктов. В отличие от ВУТ, эффект уноса продуктов сгорания и конвективного охлаждения потоком воздуха менее значительно влияет на время задержки зажигания группы капель ОБУТ. Отличия между каплями сильнее проявлены на стадии гетерогенного горения. Изменение времени горения для капель в группе было нелинейным и немонотонным вследствие неравномерности диффузионных и теплообменных процессов, усиливающихся из-за действия потока воздуха. При увеличении расстояния между центрами капель от 3 до 15 мм отличия времени задержки газофазного зажигания двух максимально удаленных друг от друга капель возрастали до 3,5 раз. Среди внешних факторов скорость потока воздуха имеет доминирующее влияние на зажигание топлива в условиях относительно низкой температуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Glushkov D.O., Kuznetsov G. V. and Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // Fuel Process. Technol. Elsevier, 2016. Vol. 152. P. 22–33.
2. Valiullin T.R., Vershinina K.Y., Kuznetsov G. V., et al. An experimental investigation into ignition and combustion of groups of slurry fuel droplets containing high concentrations of water // Fuel Process. Technol. Elsevier B.V., 2020. Vol. 210. P. 106553.

Научный руководитель: д. ф-м. н. П.А. Стрижак, профессор НОЦ И.Н. Бутакова.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ КАМЕННОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА

М.В. Пурин<sup>1</sup>, Ж.А. Косторева<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова <sup>1</sup>группа А0-44, <sup>2</sup>к.т.н., ассистент

**Введение.** Известно, что в последнее время фокус внимания мировой энергетики сместился от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) к традиционным источникам, в первую очередь – к углю. Обусловлено это целым рядом факторов. Тенденция обширного внедрения ВИЭ в энергетику, отмечавшаяся в США и Европе в последние десятилетия, столкнулась с серьезной проблемой – существенной нестабильностью генерации, обусловленной природными явлениями, на которые человек повлиять не в силах (например, длительной безветренной погодой, значительной облачностью, резким похолоданием). В таких условиях высокую актуальность имеет традиционная энергетика, и в первую очередь – угольная. Связано это с относительной дешевизной производства тепло- и электроэнергии на тепловых электростанциях (в сравнении с атомными и гидроэлектростанциями ввиду высокой дороговизны их строительства и эксплуатации).

**Проблематика работы.** Основной проблемой использования угля в качестве энергетического топлива является экологический аспект. Известно, что при сжигании угля образуется значительное количество вредных веществ: оксиды азота и серы, оксиды тяжелых металлов, бенз(а)пирен, зольные частицы. Решением в данном случае может выступить сжигание угля в виде водоугольных суспензий или водоугольного топлива (ВУТ) – смеси измельченного угля, воды и пластификатора. Известно, что при таком способе организации сжигания угля снижается число образующихся оксидов азота и серы [1]. Однако при этом в продуктах сгорания достаточно высоко содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$ , что обусловлено окислением синильной кислоты. Исходя из этого целесообразным является предварительный пиролиз угля, в ходе которого удаляются наиболее антропогенные продукты пиролиза.

Стоит отметить, что к настоящему времени практически не изучены энергетические аспекты сжигания каменноугольного кокса в составе водоугольных топлив, также существует мало работ, посвященных сравнительному анализу сжигания ВУТ на основе природного угля и полукокса тех же марок. Среди таких можно отметить работу [2].

Математические модели, описывающие горение ВУТ на основе полукокса, весьма сложны. Они основываются на системах дифференциальных уравнений в частных производных. Использование же полукокса, воспламеняющегося в гетерогенном режиме (или в газофазном режиме на поверхности частицы), позволяет значительно упростить задачу.

**Методика проведения эксперимента.** В работе рассматривались тощие и бурые угли угля марок Т и БЗ, подготовка которых проводилась согласно методике [3], а также каменноугольный кокс углей этих же марок. Твердые продукты разложения углей (кокс) получались методом торрефикации в условиях недостатка окислителя.

Экспериментальный стенд, использованный в работе, аналогичен описанному в [4]. Температура в экспериментах варьировалась от 873 до 1273 К. Для определения временных характеристик процесса воспламенения проводились серии экспериментов, состоящие не менее чем из 15 опытов, для каждого из значений температур окружающей среды. В результате получен ряд экспериментальных зависимостей (рисунок 1), подробно описанных в работе [5].

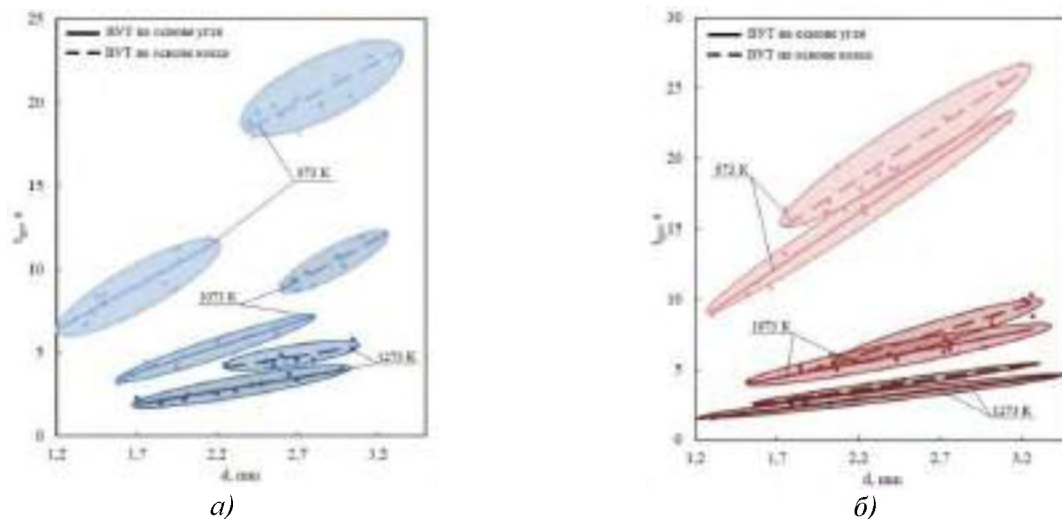


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания каплей водоугольных топлив от начального размера капли:

а) суспензии на основе угля 2Б и его производных; б) суспензии на основе угля Т и его производных

**Аналитическое решение задачи воспламенения каплей топлива на основе угля и полукокса.** Исследования показали [5], что воспламенение каплей водоугольного топлива на основе полукокса происходит, как правило, на поверхности каплей. Это обусловлено относительно малым содержанием летучих в полукоксе при высоком содержании углерода. Исходя из этого, можно существенно упростить математическую модель зажигания каплей ВУТ за счет рассмотрения только гетерогенного зажигания без учета процессов тепло- и массопереноса в пристенной области частицы в её малой окрестности.

Предполагалось, что в начальный момент времени частица ВУТ попадала в высокотемпературную среду и нагревалась за счет конвективно-радиационного нагрева. Фронт испарения с течением времени двигался вглубь частицы, в результате чего формировался сухой углеродный каркас. Водяные пары, фильтрующиеся через него наружу частицы, вступали в термохимическое взаимодействие с углеродом с образованием горючих газов  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . При этом предполагалось, что эти реакции протекали в малом по толщине приповерхностном слое частицы.

По результатам исследований получен ряд теоретических зависимостей, представленный на рисунке 2 и подробно описанный в [5].

Сравнительный анализ полученных экспериментальных и теоретических значений показывает их хорошее соответствие друг другу. Можно отметить линейный характер зависимостей времени задержки зажигания частиц ВУТ от их размеров в заданном диапазоне значений их размеров.

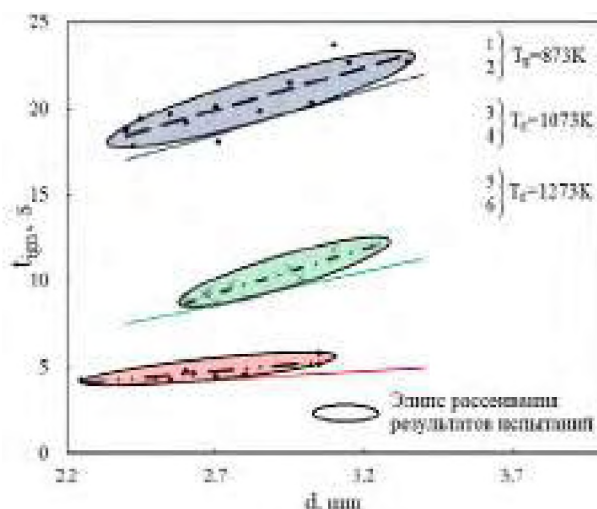


Рис. 2. Зависимости теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения частиц водугольного топлива, выполненной на основе полукокса бурого угля:

1, 3, 5 – экспериментальные значения; 2, 4, 6 – расчетные значения времен задержки зажигания

**Заключение.** В работе показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований, их хорошее соответствие.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels, A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak // Science of The Total Environment. – 2021. – V. 772.
2. Experimental study of ignition sources of pre-coal fuels based on coke and semi-coke, K.Y. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Koks I Chemistry. – 2017, V. 1. – pp. 29-38.
3. Flame Propagation Characteristics in the Boundary Layer of the Bio-Water-Coal Fuel Particle During its Ignition, S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, D.Yu Malyshev, Zh.A. Kostoreva, M.V. Purin // Combustion Science and Technology. – 2022.
4. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism, G.V. Kuznetsov, D. Yu Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva // Energy. – 2020. – V. 201.
5. Ignition and combustion characteristics of coal – water fuels based on coal & semi-coke, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame/ – 2022. – V. 246.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 2.0047.РНФ.2022 (РНФ 22-79-00223).

Научный руководитель: к.т.н. Д.Ю. Малышев, ассистент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКИХ И СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ НАГРЕВА ЛАЗЕРНЫМИ СПОСОБАМИ ОБРАБОТКИ

А. Абедтазехабади

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А9-44

Водоугольные (ВУТ) и органоводоугольные (ОВУТ) топлива на практике предполагаются сжигать в условиях распыления форсунками или различного типа инжекторами в топках энергогенерирующих установок. В таких условиях на характеристики процессов зажигания и горения значительное влияние будут оказывать не только режим распыления, от которого зависит размер образующихся капель и струй, но характеристики поверхностей нагрева с которыми часть капель будет взаимодействовать. В настоящее время не только для перспективных новых видов топлив, таких как ВУТ и ОВУТ, но и для традиционных жидких топлив не изучено влияние характеристик поверхностей нагрева, в частности конфигурации текстуры, на характеристики зажигания и горения на уровне, позволяющим сформулировать практические рекомендации к текстуре поверхностей теплообмена энергогенерирующих установок. Настоящая работа направлена на изучение влияния конфигурации текстуры в виде микроканалов на характеристики зажигания и горения капель новых видов топлива ОВУТ, эмульсии и масла в обычном жидком состоянии в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме запуска (смешанный подвод теплоты к капле (конвекцией, излучением и кондукцией)) и в режиме номинальной работы оборудования (преимущественно кондуктивный прогрев капли топлива при ее взаимодействии с поверхностью).

В проведенных экспериментах использовалось два состава композиционного топлива и отработанное машинное масло, входящее в состав этих композиционных топлив. Состав топливной эмульсии: отработанное моторное масло (48 % масс.), вода (48 % масс.), эмульгатор TWIN 80 (4 % масс.) приготовлено по методике [1]. Состав топливной суспензии: отработанное моторное масло (35 % масс.), вода (35 % масс.), отход (фильтр-кек) обогащения каменного угля марки К (30 % масс.) приготовлено по методике [2]. На поверхностях X16CrNi25-20 сформировано четыре различных вида текстуры. Одна серия поверхностей с условным обозначением Р обработана механическим способом путем полировки. На поверхностях с условным обозначением АВ, А2В, 2АВ сформирована конфигурация текстур в виде параллельных микроканалов, лазерной обработкой. На поверхностях АВ запроектировано, что ширина текстурированной локальной области поверхности (т. е. ширина микроканала 65 мкм) равна ширине не текстурированной части. На поверхностях А2В ширина текстурированной локальной области поверхности (130 мкм) запроектирована в два раза больше ширины нетекстурированной части поверхности (65 мкм). На поверхностях 2АВ запроектировано, что ширина микроканала равна 65 мкм, а ширина не текстурированной части равна 130 мкм. На рисунках 1 и 2 приведены модели экспериментальных стенов, используемых в проведенных исследованиях.

Температура воздушной среды  $T_e=950$  °С в полости керамической трубки печи 2 (рисунок 1) соответствовала температуре в топке современного энергогенерирующего оборудования. Капля топлива 3 (эмульсии, суспензии или масла) объемом 10 мкл дозировалась на поверхность стали 4 (рисунок 1).



Рис. 1. Модель экспериментального стенда смешанного подвода теплоты к капле топлива:  
 1 – трубчатая муфельная печь; 2 – керамическая трубка; 3 – капля топлива; 4 – поверхность стали;  
 5 – штатив; 6 – координатный механизм; 7 – блок управления координатным механизмом;  
 8 – высокоскоростная камера; 9 – прожектор; 10 – персональный компьютер

Поверхность стали 1 (рисунок 2) помещалась в рабочую область нагрева электромагнитного индуктора 2. Температура поверхности стали контролировалась на уровне 950 °С. Капля топлива 7 (эмульсии, суспензии или масла в обычном жидком состоянии) объемом 5 мкл размещалась на специальном держателе 8. Капля топлива на специальном держателе помещалась на нагретую поверхность стали.

В экспериментах определялись основные характеристики зажигания и выгорания капели топлив: время задержки зажигания ( $\tau_d$ ), максимальный размер области выгорания топлива ( $D_{\max}$ ), число инициаций паффинга ( $N$ ), время выгорания. В экспериментальных исследованиях при смешанном подводе теплоты дополнительно определялся контактный диаметр растекания капель топлив ( $d_s$ ).

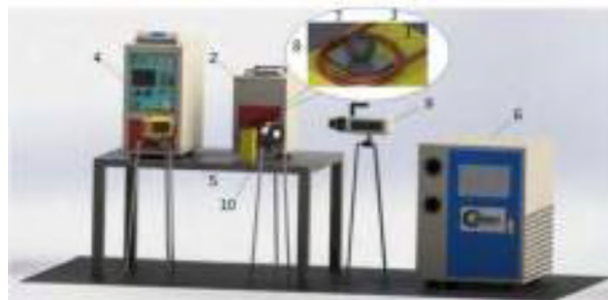


Рис. 2. Модель экспериментального стенда кондуктивного подвода теплоты к капле топлива:  
 1 – модифицированная поверхность стали; 2 – электромагнитный индуктор; 3 – индукционная спираль; 4 – блок управления индуктором; 5 – тепловизионная видеокамера; 6 – чиллер; 7 – капля топлива; 8 – держатель; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – прожектор

Из трех используемых в экспериментах топлив (масла в обычном жидком состоянии, эмульсии и суспензии) при идентичном объеме капли, масло растекается по поверхностям стали с наибольшим контактным диаметром, а суспензия с наименьшим. Последнее обусловлено агрегатным состоянием дисперсионной среды и дисперсной фазы топлив. Контактный диаметр топлив в продольном направлении растекания в 1,5–2,5 раза больше аналогичной характеристики при поперечном растекании. Последнее связано с тем, что при поперечном растекании микроканалы выступают в качестве энергетических барьеров, препятствуют движению контактной линии по поверхности в результате чего капля принимает вытянутую в направлении микроканалов форму. По этой же причине диаметр растекания в продольном направлении больше на поверхностях АВ, А2В, 2АВ, чем на полированной поверхности Р. Но по поперечному направлению диаметр растекания топлив на поверхностях АВ, А2В, 2АВ меньше, чем на полированной поверхности Р несмотря на то, что модифицированные лазерным излучением поверхности стали характеризуются супергидрофильными и суперолиофильными свойствами.

Из зависимостей  $\tau_d = f(S)$  (рисунок 3) видно, что чем больше площадь проекции межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева”, тем меньше время задержки за-

жигания каплей топлив (масла в обычном жидком состоянии, эмульсии и суспензии). Последнее обусловлено тем, что чем больше  $S$ , тем больше площадь контакта капли с поверхностью нагрева.

Сделан вывод о том, что из используемых в экспериментах конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов наибольший положительный эффект на сокращение времени задержки зажигания (рисунок 3) оказывает текстура поверхности 2AB не только по причине лучшего растекания каплей топлива по ней, но и за счет наибольшего прироста площади поверхности, обусловленной развитой шероховатостью.

Из рисунка 4 видно, что, как и в случае смешанного подвода теплоты, при кондуктивном подводе теплоты лазерная обработка поверхностей стали способствует уменьшению времени задержки зажигания.

Сделан вывод о том, что в условиях работы энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме для уменьшения времен зажигания каплей масла в жидком состоянии, эмульсии и суспензии необходимо на поверхностях нагрева создавать развитую многомодальную шероховатость, характеризующуюся наибольшим проростом площади поверхности. Лазерная технология обработки поверхностей нагрева из стали марки X16CrNi25-20 позволяет создавать текстуру из элементов в виде микроканалов с заданными геометрическими размерами и контролировать шероховатость достаточно в широких диапазонах изменения ее 3D-параметров. При этом можно увеличить площадь поверхностей нагрева более чем в два раза за счет создания микроканалов и развитой многомодальной шероховатости из элементов закристаллизовавшегося расплава металла. Рост площади поверхности за счет шероховатости позволяет до 40 % уменьшить время задержки зажигания каплей новых композиционных видов топлива (ОВУТ и эмульсии), а также жидких в условиях работы энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме.

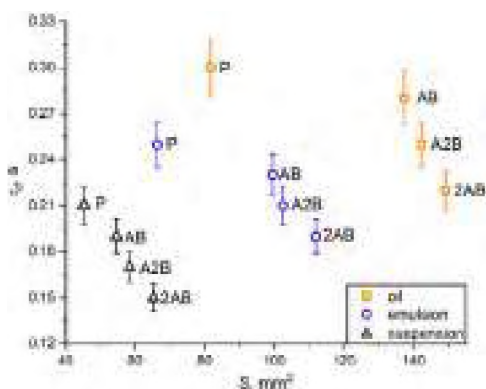


Рис. 3. Зависимости времен задержки зажигания каплей топлив от площади проекции межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева” в условиях смешанного подвода теплоты

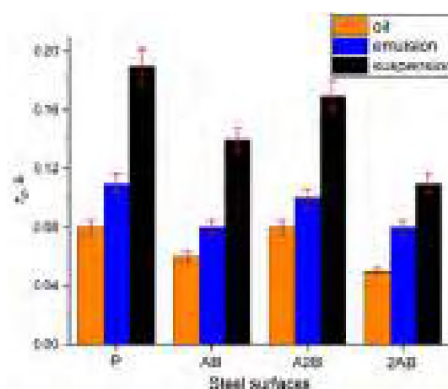


Рис. 4. Времена задержки зажигания каплей топлива (масла в жидком состоянии, эмульсии и суспензии) в условиях кондуктивного подвода теплоты

Из используемых текстур в экспериментах, воспроизводящих номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, наименьшее время выгорания каплей топлив масла, эмульсии и суспензии зарегистрировано на поверхностях с текстурой 2AB при всех прочих равных условиях. Полученный результат объясняется более развитой поверхностью за счет выбранной конфигурации текстуры. Для интенсификации процесса выгорания каплей топлив в условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, предпочтительно использовать на практике поверхности нагрева с более развитой текстурой. Из используемых конфигураций текстур, наилучшие результаты продемонстрировала текстура 2AB. Последняя характеризуется параллельными микроканалами шириной около 65 мкм с расстоянием между осями микроканалов равным 195 мкм, развитой текстурой на необработанной части поверхности лазерным излучением, сформированной закристаллизовавшимся расплавом.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Verшинина, K.Y.; Glushkov, D.O.; Nigay, A.G.; Yanovsky, V.A.; Yashutina, O.S. Oil-Filled Cryogels: New Approach for Storage and Utilization of Liquid Combustible Wastes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, 58, 6830–6840, doi:10.1021/acs.iecr.9b00580.
2. Feoktistov, D. V.; Glushkov, D.O.; Kuznetsov, G. V.; Orlova, E.G.; Paushkina, K.K. Ignition and Combustion Enhancement of Composite Fuel in Conditions of Droplets Dispersion during Conductive Heating on Steel Surfaces with Different Roughness Parameters. *Fuel* 2022, 314, 122745, doi:10.1016/J.FUEL.2021.122745

Научный руководитель: к.т.н. Д.В. Феоктистов, доцент ИШФВП ТПУ; профессор, д.ф.-м.н. Г.В. Кузнецов, профессор ИШЭ ТПУ.

## НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРОЙ ЛЕЙДЕНФРОСТА

А.В. Дорожкин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ24

Испарение и кипение встречаются повсеместно в различных технологических установках и аппаратах, например, в электронике, авиа и космических технологиях при разработке компактных и легких теплообменных устройств, на ТЭЦ при генерации пара. Однако, в условиях нагрева поверхности, контактирующей с каплями теплоносителя, до температуры, превышающей температуру насыщения теплоносителя ( $T_{\text{wall}} > T_{\text{sat}}$ ), между каплей и поверхностью формируется паровой слой, который изолирует поверхность нагрева [1]. В этом случае реализуется эффект Лейденфроста, а тепловой поток равен или близок к критическому значению.

Возникновение эффекта Лейденфроста крайне нежелательно в различных технологических процессах, например, спрейное охлаждение нагретых поверхностей. Поскольку в таких условиях возможен значительный перегрев поверхностей, приводящий к их термическому разрушению. В этой связи, наиболее актуальным является поиск решения проблемы, заключающейся в управлении эффектом Лейденфроста на поверхностях нагрева технологического оборудования. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований эффекта Лейденфроста на поверхностях твердых материалов. Также представлены результаты по разработке способа создания конструкционных материалов для теплопередающих устройств с заданными целевыми свойствами.

В экспериментах по исследованию возможности сдвига эффекта Лейденфроста в область более высоких температур использовались образцы, изготовленные из широко используемых конструкционных металлов (алюминиевый сплав АМГ3, нержавеющая сталь). Поверхности первой группы образцов полировались, поверхности второй группы образцов после полировки подвергались лазерной обработке. Последняя осуществлялась с помощью иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера IPG-Photonics (IPG-Photonics, Russia) с длиной волны 1064 нм. Варьированием энергетических параметров лазерного излучения (мощности, частоты и длительности импульса), а также параметров, отвечающих за перемещение луча лазера в двух направлениях, создавались различные виды текстур на поверхности металлов (рисунок 1).

Эффект Лейденфроста исследовался на установке [2], состоящей из нагревательного элемента (керамическая плита) и системы для реализации теневого оптического метода. Капля дистиллированной воды объемом 10 мкл помещалась дозатором на разогретую поверхность образца. Температуры под поверхностью образца и на поверхности регистрировались термо-



парами хромель-алюмель (погрешность  $\pm 0,1$  °С). Полученные теневые изображения обрабатывались в программном обеспечении: определялись основные геометрические характеристики капли, полное время испарения (время жизни капли).

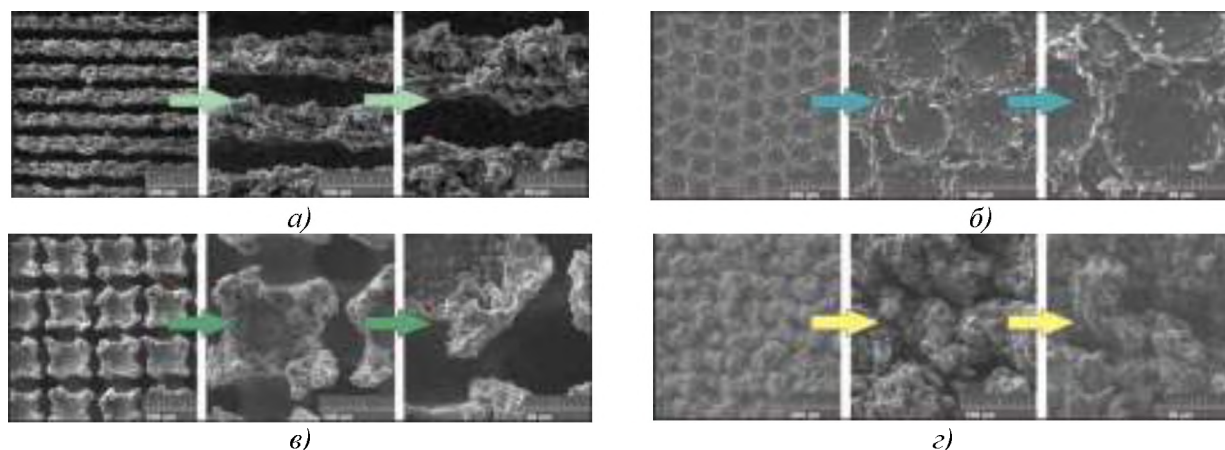


Рис. 1. СЭМ изображения поверхностей алюминиевого сплава после лазерной обработки. Текстуры в виде: а) канавок; б) кратеров; в) микростолбиков; г) «цветной капусты»

В результате экспериментальных исследований процесса испарения капля определена температура возникновения эффекта Лейденфроста для полированных и текстурированных поверхностей алюминия и нержавеющей стали (таблица 1).

Таблица 1. Температуры Лейденфроста на поверхностях алюминиевого сплава и стали, °С

Материал \ Текстура	Полированный	Канавки	Кратеры	Микростолбики	«Цветная капуста»
Алюминиевый сплав	161	258	197	240	280
Нержавеющая сталь	243	265	243	285	290

Установлено, что наибольший сдвиг возникновения эффекта Лейденфроста в область более высоких температур характерен для текстуры в виде «цветной капусты». На стали сдвиг составил более 40 °С, на алюминиевом сплаве – более 110 °С. Текстура с соприкосновением абляционных кратеров на поверхности нержавеющей стали не оказала заметного влияния. По результатам полученных данных, установлено, что лазерная обработка материалов является перспективным способом управления возникновением эффекта Лейденфроста.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1984. – 301 с.
2. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A.A. Sivkov, A.A. Ivashutenko, D.S. Nikitin, I.I. Shanenkov, A.M. Abdelmagid, and E.G. Orlova // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 435. – P. 128263.

Работа выполнена в рамках РНФ (грант № 21-73-10245).

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Е.Г. Орлова, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЛЕСНОМ ГОРЮЧЕМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФРОНТА НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

В.А. Вяткина

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-13

Число пожаров и затрагиваемые ими площади увеличиваются с каждым годом. Так, в России за 2021 год лесными пожарами была поражена площадь 18,16 миллион гектаров леса, что является максимальным значением с начала XXI века [1]. Возгорания в лесных массивах несут за собой огромные потери различного плана [2]. В связи с этим большое количество стран по всему миру заинтересованы в борьбе с лесными пожарами с целью сохранения своих лесных массивов. Следует отметить, что основа эффективной технологии предупреждения лесных пожаров являются методы прогнозирования возникновения возгораний. Знания закономерностей физико-химических процессов, протекающих в лесном горючем материале при воздействии высокотемпературной среды позволит улучшить качество прогноза.

Цель исследования – математическое моделирование процессов теплопереноса в лесном горючем материале (березовый лист) при воздействии высокотемпературной среды от фронта лесного пожара.

При разработке математической модели предполагалось, что лист берёзы, попадая в высокотемпературную среду (фронт лесного пожара), далее следует стадия инертного прогрева образца и начинается процесс пиролиза с выделением газообразных продуктов. Не учитывался процесс испарения влаги и зависимость теплофизических параметров от температуры. При моделировании область решения представляла собой трехслойную пластину, в которой первый и третий слой представляли собой сухое органическое вещество, а второй слой являлся смесью сухого органического вещества и воды. Моделирование осуществлялось в рамках двумерной постановки. Рассматривался теплоперенос вдоль осей  $x$  и  $z$ . Геометрия области решения задачи приведена на рисунке 1.

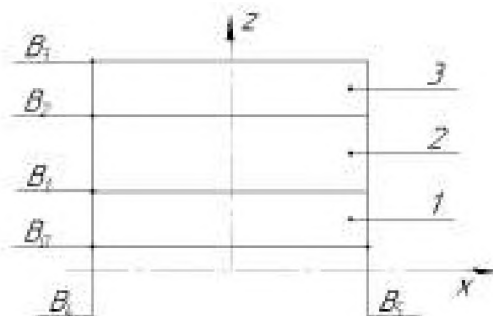


Рис. 1. Геометрическая постановка двумерной задачи теплопереноса в элементе лесного горючего материала: 1 – сухое органическое вещество 2 – смесь сухого органического вещества и воды; 3 – сухое органическое вещество

В ходе математического моделирования осуществлялось решение двумерного уравнения теплопроводности и кинетического уравнения реакции пиролиза:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right) - q_p k_1 \rho_4 \phi_4 \exp \left( -\frac{E_1}{RT_i} \right), \quad (1)$$

$$\rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = -k_1 \rho_4 \phi_4 \exp \left( -\frac{E_1}{RT_i} \right), \quad (2)$$

Начальные и граничные условия записывались следующим образом:

$$T_i \Big|_{t=0} = T_{i0}, \quad (3)$$

$$\varphi_4|_{t=0} = \varphi_{40}, \quad (4)$$

$$\varphi_5|_{t=0} = \varphi_{50}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=4}^6 \phi_i = 1 \quad (6)$$

$$B_0: -\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \alpha(T_1 - T_f), \quad (7)$$

$$B_1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}; T_1 = T_2, \quad (8)$$

$$B_2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}; T_2 = T_3, \quad (9)$$

$$B_3: \lambda_3 \left( \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \alpha(T_3 - T_f), \quad (10)$$

$$B_4: -\lambda_1 \frac{\partial T_i}{\partial x} = \alpha(T_i - T_f), \quad (11)$$

$$B_5: \lambda_1 \frac{\partial T_i}{\partial x} = \alpha(T_i - T_f), \quad (12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  – удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность лесного горючего материала соответственно,  $E$  – энергия активации пиролиза лесного топлива,  $\varphi_4$ ,  $\varphi_5$ ,  $\varphi_6$  – доля сухого органического вещества, влаги и газовой фазы соответственно,  $k$  – предэкспонента пиролиза лесного горючего материала,  $q_p$  – тепловой эффект реакции пиролиза лесного горючего материала,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_i$  – температура  $i$ -го слоя,  $T_f$  – температура пламени,  $x, z$  – пространственные координаты,  $t$  – временная координата.

Реализация расчетов проводилась в программе RAD Studio, для решения дифференциальных уравнений использовался метод конечных разностей [3].

На рисунке 2 представлены типичные распределения температур и фаз компонентов в плоскости  $xz$  образца при времени экспозиции 3 секунды и температуре пожара 1000 К. Данные условия характерны для низового лесного пожара высокой интенсивности.

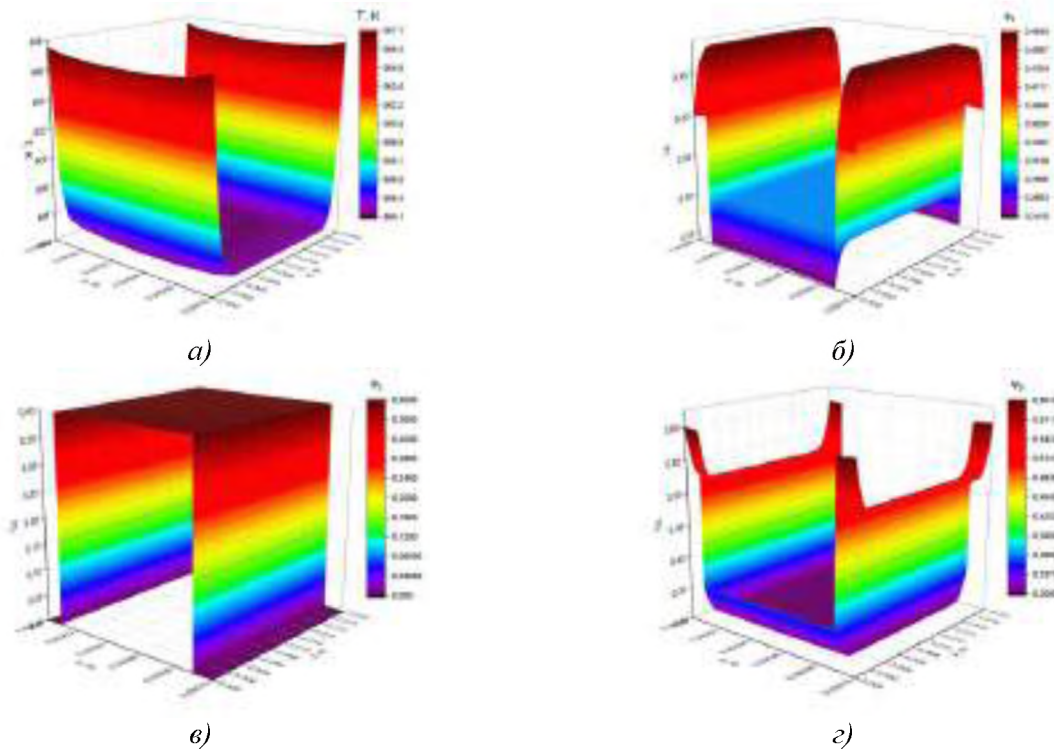


Рис. 2. Температура (а) и объемные доли сухого органического вещества (б), влаги (в) и газа (г) в листовой пластине березового листа ( $T_f=1000$  К,  $t=3$ с)

На рисунке 2а видно, что температурное распределение имеет области роста. Эти области расположены по бокам листа. Именно здесь, согласно экспериментам, происходит воспламенение листа при воздействии высокотемпературной среды верхового лесного пожара. Анализ распределений температуры показывает, что температура по вертикальному сечению в середине листа соответствует зависимостям, полученным по одномерной постановке. Таким образом, работа вычислительной процедуры проверена на менее сложной математической постановке.

На рисунке 2б представлено распределение объемной доли сухого органического вещества по толщине и длине березового листа. Центральная область, окрашенная в синий цвет, соответствует области листа, насыщенного влагой. В этой области изначально содержание сухого органического вещества меньше, чем в лицевой и тыльной части листа. За период воздействия 3 секунды высокой температуры в лицевой и тыльной части листа объемная доля сухого органического вещества падает с 1 до примерно 0,46–0,47, однако, более значительные уменьшения объемной доли сухого органического вещества наблюдаются вблизи краев листа. Это также подтверждается результатами экспериментов. Именно в этой области образуется достаточное количество газообразных продуктов пиролиза, которые в условиях высокой температуры окисляются кислородом воздуха.

На рисунке 2в представлено распределение объемной доли влаги, которая содержится в структуре березового листа. Эта величина согласно математической модели неизменна в течение высокотемпературного воздействия лесного пожара поскольку испарением влаги в данной модели пренебрегается.

На рисунке 2г представлено распределение объемной доли газовой фазы. Видно, что в углах березового листа образуется максимальное количество газообразных продуктов пиролиза. Теоретические следствия подтверждаются результатами экспериментов, в которых было установлено, что именно здесь происходит воспламенение листа, а, следовательно, и максимальный приток газообразных продуктов пиролиза.

Таким образом, в рамках исследования была разработана двухмерная математическая модель тепломассопереноса в типичном лесном горючем материале (листе березы) с учетом процессов инертного прогрева и пиролиза сухого органического вещества. Полученные двумерные распределения по различным плоскостям образца позволяют получить общее представление о тепломассопереносе в структуре березового листа при высокотемпературном воздействии. Предложенная математическая модель может использоваться для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Официальный сайт ФБУ «Авиалесоохрана» URL: <https://aviales.ru/> (accessed: 24.10.2022).
2. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world/ S.H. Doerr, C. Santín //Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2016. – Vol. 371, No. 1696, P. 20150345.
3. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – 2007.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Н.В. Барановский, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ТПУ.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ, ОБОГРЕВАЕМОГО ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

А.В. Вяткин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

На обогрев промышленного помещения традиционными конвективными системами отопления тратится большое количество энергии. С целью повышения энергетической эффективности существует возможность создавать оптимальный тепловой режим в локальной рабочей зоне с использованием газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) [1, 2].

К настоящему времени проведен ряд исследований, показывающих что на тепловой режим помещения влияют не только параметры воздухообмена помещения и расположенное оборудование [3–6], но и степень черноты ограждающих конструкций [7, 8]. Однако на данный момент ощущается недостаток работ, посвященных подробному исследованию влияния материала оборудования на тепловой режим в локальной рабочей зоне.

Анализ влияния свойств материала оборудования проводится путем математического моделирования в двумерном приближении. Рассмотрена прямоугольная область размерами 5×4,4 м, ограниченная полом, потолком и стенами. В области расположены газовый инфракрасный излучатели и горизонтальная панель. Месторасположение источника лучистой энергии (ГИИ) и горизонтальной панели соответствуют наиболее типичному варианту их размещения в производственном помещении. Основные характеристики материалов ограждающих конструкций и горизонтальной панели приведены в таблице 1. Схема расположения оборудования представлена на рисунке 1.

Для математического моделирования заданы условия: начальная температура воздуха в помещении +7 °С, температура нагретой поверхности ГИИ – 800 °С, температура на входе приточной вентиляции + 7 °С, расход воздуха на входе приточной вентиляции –  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>).

Численный анализ выполнен согласно модели теплопереноса, описанной в [3-6].

При проведении математического моделирования тепломассопереноса использовались стандартные модули «The Heat Transfer in Fluids Interface» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface» программной среды COMSOL Multiphysics. Расчет радиационного теплового потока проведен с использованием модуля «Surface-to-Surface Radiation» для серых поверхностей с соответствующими степенями черноты в рамках зонной модели с учетом средних угловых коэффициентов. Расчет математической модели проводился методом конечных элементов.

Таблица 1. Теплофизические свойства используемых материалов

Объект	Толщина, м	Материал	Плотность, кг м <sup>-3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность Вт/(К·м)	Степень черноты
Пол, потолок, стены	0,1	Бетон	2500	2400	1,55	0,95 (0,3)
Горизонтальная панель	0,02	Сосна	520	2300	0,2	0,3
		Сталь	7850	462	52	(0,95)

Уравнение движения воздуха на границе «воздух-ограждающая конструкция» принималось с учетом условия прилипания. На участке ввода воздуха задавались расход и температура, на выходе – постоянное давление равное атмосферному.

Перед проведением математического моделирования тепломассопереноса проведена верификация модели с результатами физического эксперимента [6].

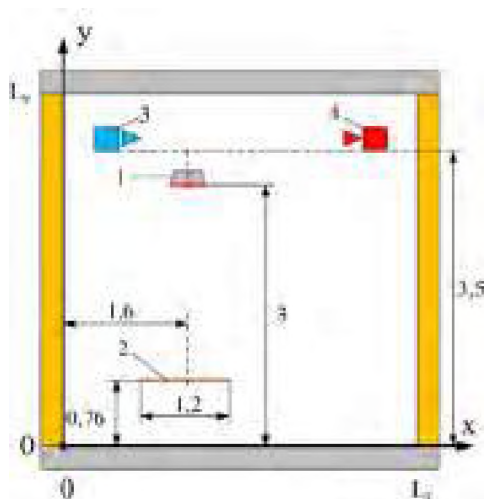


Рис. 1. Схема области моделирования (размеры представлены в метрах):  
 1 – ГИИ; 2 – горизонтальная панель; 3 – область приточного воздуха; 4 – область вытяжного воздуха

На рисунках 2 и 3 приведены результаты численного моделирования в условиях смешанной конвекции для разных материалов горизонтальной панели.

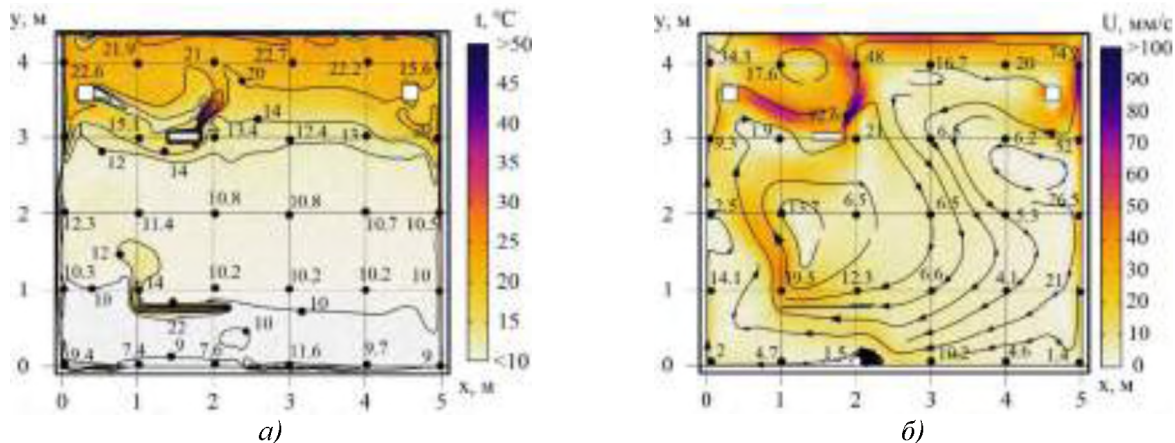


Рис. 2. Поле температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ в условиях смешанной конвекции при степени черноты ограждающих конструкций  $\epsilon_{ок} = 0,95$  и панели  $\epsilon_n = 0,3$ , теплопроводность материала панели  $\lambda_n = 0,2 \text{ Вт/(К·м)}$

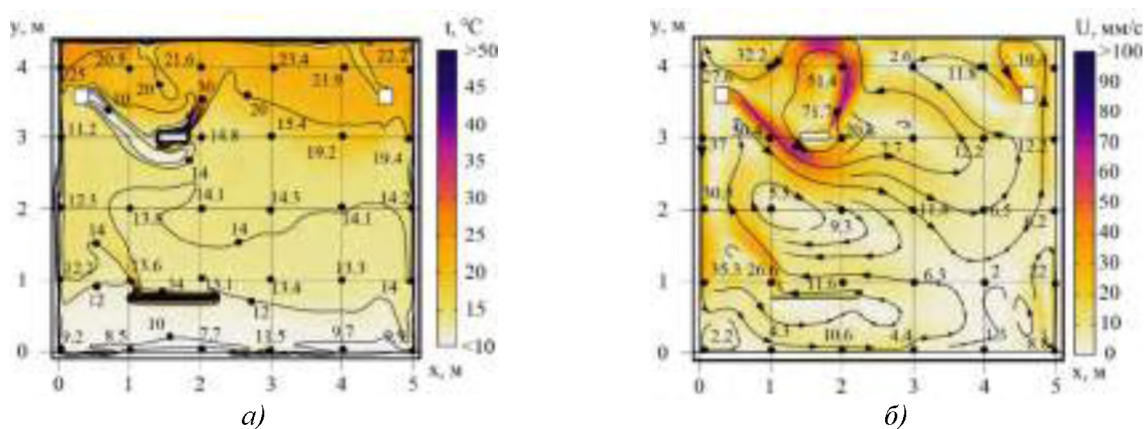


Рис. 3. Поле температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ в условиях смешанной конвекции при степени черноты ограждающих конструкций  $\epsilon_{ок} = 0,95$  и панели  $\epsilon_n = 0,3$ , теплопроводность материала панели  $\lambda_n = 52 \text{ Вт/(К·м)}$

Анализ полученных результатов показывает, что наличие в обогреваемой области оборудования, изготовленного из материалов с высоким коэффициентом теплопередачи, значительно повышает температуру в локальной рабочей зоне и перераспределяет движения потоков воздуха.

На рисунке 4 приведены графики изменения температуры воздуха по высоте в локальных рабочих зонах около горизонтальной панели для различных условий.

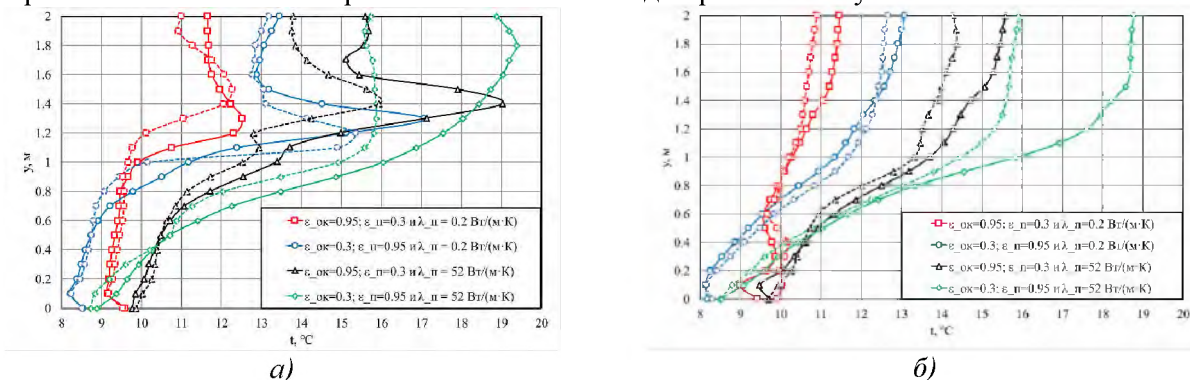


Рис. 4. Изменение температуры воздуха по высоте через 1 час работы ГИИ в условиях естественной (сплошная линия) и смешанной конвекции (пунктирная линия) на расстоянии 0,2 м слева (а) и справа (б) от горизонтальной панели при различных параметрах ограждающих конструкций и панели

Представленные графики показывают, что в условиях естественной и смешанной конвекции, и при разных значениях степени черноты ограждающих конструкций и горизонтальной панели, наибольшая температура достигается при наличии в рассматриваемой области горизонтальной панели из материала с высоким коэффициентом теплопроводности. При чем наибольшая разница наблюдается в высших точках рассматриваемого сечения, и достигает 2–3°C. При этом повышение температуры в области, примыкающей к полу, во всех вариантах расчета незначительно, что не соответствует условиям теплового комфорта из-за существенного перепада температуры воздуха по высоте. Низкие температуры данной области объясняются высокими тепловыми потерями через пол. Данное обстоятельство может быть исправлено применением напольного теплоизолирующего покрытия с высокой степенью черноты, например, локально в области создания теплового комфорта жизнедеятельности человека.

Таким образом, в данной работе показано, что, выбирая материалы поверхностей ограждающих конструкций и оборудования можно повысить энергоэффективность использования газовых инфракрасных излучателей при создании регламентных тепловых режимов в помещениях.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Dudkiewicz E. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls / E. Dudkiewicz, P. Szałański // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – V. 18. – P. 1-15.
2. Sarbu I. Numerical modeling of high-temperature radiant panel heating system for an industrial hall / I. Sarbu, A. Tokar // International Journal of Advanced and Applied Sciences. – 2018. – V. 5. – P. 1-9.
3. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system / B.V. Borisov, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov and oth.// Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2057. – P. 1-6.
4. The heat supply object thermal regime under conditions of gas infrared emitter and air exchange system joint operation / G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2119. – P. 1-5.

5. Numerical analysis of the equipment position influence on the premises thermal regime under gas infrared emitter operation and mixed convection conditions / B.V. Borisov, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov and oth.// Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2119. – P. 1-6.
6. Analysis of the Influence of the Gas Infrared Heater and Equipment Element Relative Positions on Industrial Premises Thermal Conditions / B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov and oth.// Energies. – 2022. – V. 15. – P. 1-19.
7. A simple method for building materials thermophysical properties estimation / R. Derbal, D. Defer, A. Chauchois, E. Antczak // Construction and Building Materials. – 2014. – V. 63. – P. 197-205.
8. Experimental investigation of heat transfer coefficients between hydronic radiant heated wall and room / A. Koca, Z. Gemici, Y. Topacoglu and oth.// Energy and Buildings. – 2014. – V. 82. – P. 211-221.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Б.В. Борисов, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЛЯХ

Р.Ю. Кужин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б93

Водо-дизельные эмульсии представляют собой типичный пример двухжидкостных капель, их применение позволяет как повысить эффективность двигателей, так и сократить концентрации антропогенных выбросов [1]. Различают два основных режима фрагментации: паффинг и микро-взрыв [2]. Наиболее комплексные модели паффинга/микро-взрыва описаны в [3–5]. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования тепломассопереноса в двухжидкостных каплях с целью выяснения особенностей формирования конвективных течений.

Численное моделирование выполнялось в программе COMSOL Multiphysics 5.6. При разработке математической модели использованы физические модули: Phase Field, Heat Transfer in Solids and Fluids и Laminar Flow. При решении задачи используется метод конечных элементов. Расчетная сетка содержит 4068 элементов. Процессы теплообмена и испарения изучаются в воздухе при атмосферном давлении (101325 Па). Температура газовой среды принималась равной 700 К, а начальная температура двухжидкостной капли 300 К.

Схема области решения представляла собой каплю воды радиуса  $R_w$  и оболочку топлива радиуса  $R_d$  ( $R_d > R_w$ ) (рисунок 1).

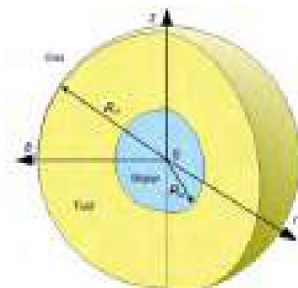


Рис. 1. Схематическое изображение области решения



С использованием разработанной модели получены типичные поля скоростей и температур внутри двухжидкостной капли (рисунок 2). В поле скоростей наблюдается формирование множества вихревых течений как в топливной оболочке, так и в водяном ядре.

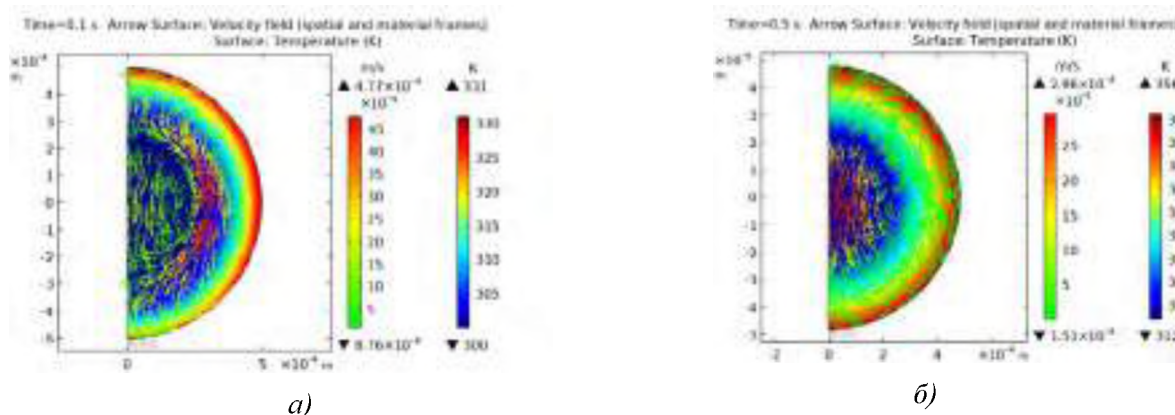


Рис. 2. Типичные поля температур и скоростей:  
а) при  $t = 0.1$  с; б) при  $t = 0.5$  с

Получены также численные результаты по следующим характеристикам: температура в приповерхностном слое топливной оболочки  $T_s$  (рисунок 3а), температура в приповерхностном слое водяного ядра  $T_w$  (рисунок 3б) и средняя скорость конвективных течений (рисунок 4). Окончанием расчета считается достижение температуры в приповерхностном слое водяного ядра  $T_w = 373$  К.

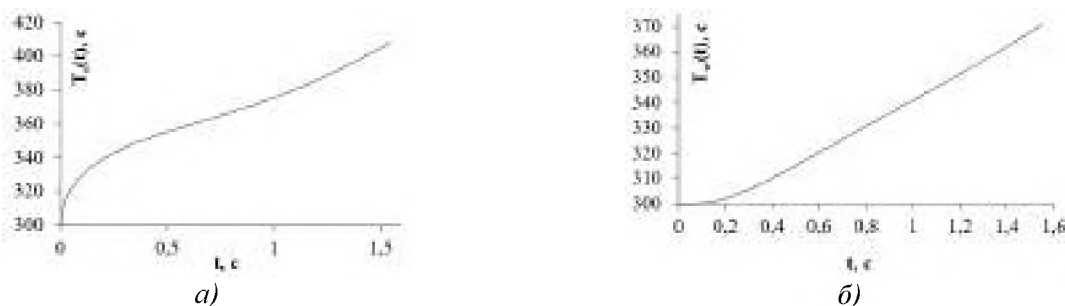


Рис. 3. Зависимость температуры в приповерхностном слое капли:  
а) и температуры в приповерхностном слое водяного ядра; б) времени

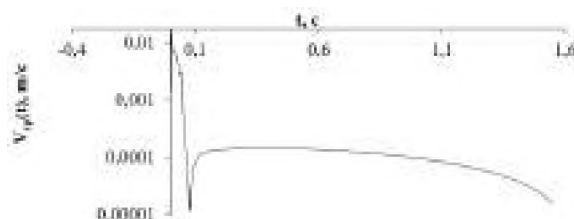


Рис. 4. Зависимость средней скорости конвективных течений от времени

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. S.S. Sazhin, O. Rybdylova, C. Crua, M. Heikal, M.A. Ismael, Z. Nissar, A.R.B.A. Aziz, A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets, International J of Heat and Mass Transfer 131 (2019) 815–821.
2. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, O. Rybdylova, S.S. Sazhin, Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets, Combust Flame 210 (2019) 479–489.

3. S. Fostiropoulos, G. Strotos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, Numerical investigation of heavy fuel oil droplet breakup enhancement with water emulsions, *Fuel* 278 (2020) 118381.
4. J. Shinjo, J. Xia, A. Megaritis, L.C. Ganippa, R.F. Cracknell, Modeling temperature distribution inside a emulsion fuel droplet under convective heating: a key to predicting microexplosion and puffing, *Atomization Sprays* 26 (2016) 551–583.
5. J. Shinjo, J. Xia, Combustion characteristics of a single decane/ethanol emulsion droplet and a droplet group under puffing conditions, *Proc. Combust. Inst.* 36 (2017) 2513–2521.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Д.В. Антонов, доцент ИШФВП ТПУ.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В.В. Долгих

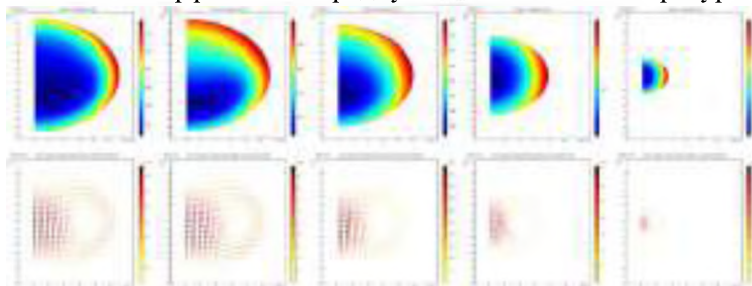
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ23

**Введение.** Большинство моделей нагрева и испарения капель разработаны для случаев, когда капля имеет сферическую форму [1–3]. Наблюдаемые в большинстве практических приложений капли являются несферическими [1]. Соответствующие особенности необходимо учитывать при математическом моделировании, поскольку это оказывает значительное влияние на скорость формирования топливовоздушной смеси в камерах сгорания наземных и авиационных двигателей [4–6].

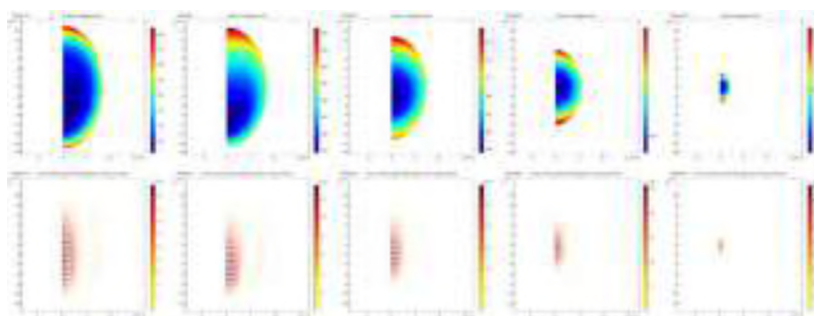
Целью данной работы является определение характеристик нагрева и испарения несферических капель сложной формы (на примере n-додекана) по результатам численного моделирования с учетом возникающих внутренних конвективных течений.

### Основные результаты.

На рисунках 1 и 2 представлены типичные поля температур и скоростей в сплюснутой и вытянутой капле при начальном эффективном радиусе  $R_d = 1$  мм и температуре газа  $T_{gas} = 700$  К.



*Рис. 1. Поля температур и скоростей в сплюснутой капле при начальном эффективном радиусе  $R_d = 1$  мм и температуре газа  $T_{gas} = 700$  К*



*Рис. 2. Поля температур и скоростей в вытянутой капле при начальном эффективном радиусе  $R_d = 1$  мм и температуре газа  $T_{gas} = 700$  К*

В ходе численного моделирования сравнивались характеристики нагрева и испарения капле сложной формы с использованием двух моделей: с учетом и без учета внутренних конвективных течений при идентичных начальных и граничных условиях с соотношением  $\varepsilon = 1,5$  (вытянутый эллипсоид);  $\varepsilon = 2/3$  (сплюснутый эллипсоид), где 1 – вытянутый эллипсоид с учетом конвекции; 2 – сплюснутый эллипсоид с учетом конвекции; 3 – вытянутый эллипсоид; 4 – сплюснутый эллипсоид.

Результаты расчетов при эффективном радиусе  $R_d = 1$  мм и температуре газа  $T_{gas} = 700$  К представлены на рисунке 3.

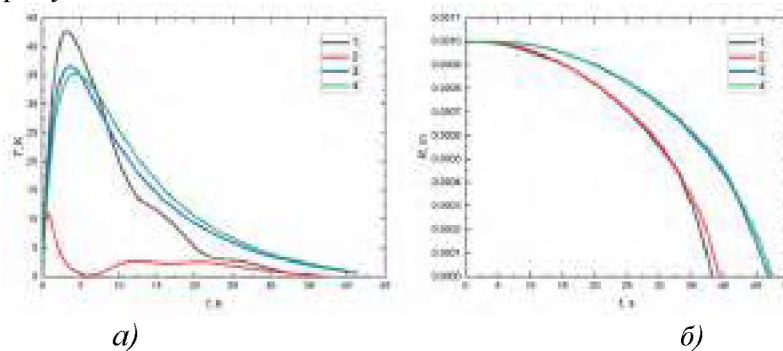


Рис. 3. Результаты расчетов при начальном эффективном радиусе  $R_d = 1$  мм и температуре газа  $T_{gas} = 700$  К;

а) разница температур в характерных точках; б) зависимость эффективного радиуса от времени

**Заключение.** В данной работе смоделированы процессы нагрева и испарения монокомпонентного топлива (на примере н-додекана) в форме несферических капле с учетом и без учета внутренних конвективных течений. Представлены результаты расчета зависимостей разницы температур на полюсах капле от времени и эффективного радиуса от времени при  $\varepsilon = 1,5$  (вытянутый эллипсоид) и  $\varepsilon = 2/3$  (сплюснутый эллипсоид) для моделей с учетом и без учета внутренних конвективных течений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Michaelides E.E. Particles, bubbles & drops: Their motion, heat and mass transfer / E.E. Michaelides. – San Antonio, USA: World Scientific, 2006. – ISBN 978-981-256-647-8.
2. Sazhin, S.S. Models for fuel droplet heating and evaporation: Comparative analysis / S.S. Sazhin, T. Kristyadi, W.A. Abdelghaffar, M.R. Heikal // Fuel. – 2006. – № 85.
3. Burger, M. Droplet evaporation modeling by the distillation curve model: accounting for kerosene fuel and elevated pressures / M. Burger, R. Schmehl, K. Prommersberger, O. Schäfer, R. Koch, S. Wittig // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – № 46.
4. Tonini S. An analytical model for the evaporation of multi-component spheroidal drops based on Stefan–Maxwell equations / S. Tonini, G.E. Cossali // International Journal of Thermal Sciences. – 2022. – № 171.
5. Jafari Kang S. Conduction heat transfer from oblate spheroids and bispheres / S. Jafari Kang, E. Dehdashti, H. Masoud // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – № 139.
6. Jog M.A. Transient heat transfer to a spheroidal liquid drop suspended in an electric field / M.A. Jog, M.A. Hader // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 1997. – № 18.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Д.В. Антонов, инженер-исследователь лаборатории тепломассопереноса ИШЭ ТПУ.

# ВЛИЯНИЕ БОРА И АЛЮМИНИЯ НА ГОРЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПХА/СКДМ

А.Г. Коротких<sup>1</sup>, И.В. Сорокин<sup>2</sup>, Д.В. Теплов<sup>3</sup>

Томский политехнический университет<sup>1,3</sup>

ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова<sup>1,3</sup>, группа А2-11<sup>3</sup>

Институт химической кинетики и горения СО РАН<sup>2</sup>

Микро- и ультрадисперсные металлы являются высокоэнергетическими компонентами жидких и смесевых твердых топлив, существенно повышающие их стабильность горения, удельную теплоту сгорания и температуру в камере, скорость истечения газообразных продуктов в сопле и удельный импульс двигательных установок [1–2]. Горение металлосодержащих топливных композиций включает ряд физико-химических процессов, состоящих из экзотермических процессов фазового перехода и окисления газообразных продуктов, воспламенения и гетерогенного горения конденсированных частиц металла, формирования оксидных частиц в газовой фазе и частиц-агломератов на поверхности топлива, двухфазного истечения продуктов сгорания [3], что усложняет полное сжигание и расширение продуктов сгорания.

Для повышения удельной теплоты и полноты сгорания металлов в камере сгорания могут быть рассмотрены борсодержащие металлические горючие, в которых влияние оксидного покрытия частиц мало. Анализ результатов проводимых исследований [2, 4] показал, что разрабатываются новые методы получения и изучаются характеристики воспламенения и горения дисперсных энергоемких систем, состоящих из частиц бора покрытых слоем Al, Ni или Mg, механосмесей Al-B, Ti-B или Mg-B, боридов  $AlB_n$ ,  $TiB_n$  или  $MgB_n$ , как в окислительных средах, так и при горении топливных композиций. В связи с этим, возникает интерес к изучению особенностей и характеристик горения, указанных борметаллических систем в высокоэнергетических материалах (ВЭМ), содержащих окислитель и горючесвязующее вещество (ГСВ), установлению их влияния на зависимость скорости горения от давления, температуру горения в газовой фазе, содержание конденсированных продуктов сгорания и т. д.

Стационарная скорость горения ВЭМ является важной характеристикой топлив, оказывающая влияние на скорость потока газообразных продуктов сгорания из сопла и удельный импульс двигателя. Горение ВЭМ, содержащих алюминий и борметаллические дисперсные горючие, осуществлялось в бомбе постоянного давления (БПД) при избыточных давлениях среды с применением общепринятой методики измерения скорости горения топлива.

Целью данной работы является установление влияния содержания борсодержащих горючих (аморфного бора,  $AlB_2$  и  $AlB_{12}$ ) на характеристики горения ВЭМ, содержащего окислитель и полимерное горючесвязующее вещество, при варьировании давления в камере от 0,7 до 4 МПа.

В изучении характеристик горения ВЭМ использовалась базовая смесевая композиция, состоящая из перхлората аммония (ПХА) двух фракций с размером частиц менее 50 мкм (60 %) и 160–315 мкм (40 %), ГСВ – бутадиенового каучука марки СКДМ-80 и динитрилоксидного отвердителя ТОН-2.

В качестве металлического горючего выбраны микроразмерные порошки (МП) алюминия  $\mu Al$  (среднемассовый диаметр  $d_{43} = 10,6$  мкм), боридов алюминия  $AlB_2$  ( $d_{43} = 6,2$  мкм) и  $AlB_{12}$  ( $d_{43} = 2,3$  мкм), а также ультрадисперсные порошки (УДП) алюминия Alex (среднесчетный диаметр  $d_{10} = 0,1$  мкм) и аморфного бора ( $d_{10} = 0,2$  мкм).

Порошки боридов алюминия  $AlB_2$  и  $AlB_{12}$  изготавливались СВС-методом с последующим измельчением спеченных образцов в шаровой барабанной мельнице, поэтому все частицы имели форму многогранников. Реакционная способность к окислению и характеристики воспламенения используемых дисперсных металлических горючих детально изучены в работе [5].

Измерение скорости горения  $u$  топлива осуществлялось при избыточных давлениях  $p$  в камере БПД. На каждую экспериментальную точку проводилось по 3–4 опыта и рассчитывалось среднее значение скорости горения топлива. В эксперименте относительная погрешность измерения скорости горения не превышала 10 %. Аппроксимация опытных данных осуществлялась с применением степенного закона скорости горения в виде:

$$u = B \cdot p^{\nu},$$

где  $u$  – скорость горения топлива, мм/с;  $p$  – давление, МПа;  $B$  и  $\nu$  – константы аппроксимации.

На основе проведенного экспериментального исследования и термодинамического расчета горения ВЭМ на основе ПХА/СКДМ-80, содержащего дисперсные добавки алюминия, аморфного бора и боридов алюминия, определены степенные зависимости скорости горения от давления, влияние дисперсности алюминия и природы металлического горючего (массовой концентрации бора) на характеристики горения топлива.

Максимальная скорость горения ВЭМ зафиксирована при использовании УДП Alex, значение которой находится в диапазоне 6,1–23,7 мм/с при давлениях от 0,7 до 4,0 МПа. Высокая реакционная способность Alex и каталитическое взаимодействие оксидного покрытия  $Al_2O_3$  наноразмерных частиц с кристаллами ПХА способствуют повышению выделению тепла при его окислении, температуры на поверхности реакционного слоя и скорости горения топлива.

Применение порошка аморфного бора в ВЭМ повышает скорость горения топлива на 51–109 % в зависимости от давления, относительно базового ВЭМ с  $\mu Al$ , благодаря быстрому воспламенению мелких частиц бора и дополнительному тепловыделению на поверхности горения топлива.

При использовании  $AlB_2$  или  $AlB_{12}$  в ВЭМ влияние образующегося при нагреве оксидного покрытия (состоящего из  $B_2O_3$  и  $Al_2O_3$ ) на металлических частицах снижается, что приводит к повышению выделения тепла и температуры на поверхности топлива, а также увеличению скорости горения до 2 раз в зависимости от давления.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Sundaram D., Yang V., Yetter R. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – V. 61. – P. 293–365.
2. Pang W.-Q., Yetter R. A., DeLuca L. T., Zarko V. E., Gany A., Zhang X.-H. Boron-based composite energetic materials (B-CEMs): Preparation, combustion and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2022. – V. 93. – Article N 101038.
3. McClain M. S., Gunduz I. E., Son S. F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – V. 37, N 3. – P. 3135–3142.
4. DeLuca L. T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion // *Defence Technology*. – 2018. – V. 14. – P. 357–365.
5. Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А. Лазерное зажигание порошковых систем на основе Al и B // *Физика горения и взрыва*. – 2022. – Т. 58, № 4. – P. 32–40.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.Г. Коротких, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО СУРРОГАТНОГО ТОПЛИВА

В.Я. Фрицлер

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ23

Процессы нагрева и испарения капель играют важную роль в камерах сгорания авиационных двигателей на жидком топливе [1]. Наиболее широко используемыми видами топлива во всем мире являются бензин [2], дизельное топливо [3] и керосин [4], содержащие большое количество углеводородных компонентов. Подробное численное моделирование процессов нагрева и испарения многокомпонентных топлив до сих пор вычислительно затратно. Наиболее распространенным подходом для решения данной проблемы является использование суррогатного топлива взамен многокомпонентному. Суррогат представляет собой редуцированную версию многокомпонентного топлива и позволяет значительно сократить время расчета [5]. Целью данной работы является численное моделирование нагрева и испарения капель двухкомпонентного суррогатного топлива в программном комплексе COMSOL Multiphysics и MATLAB. Схема области решений задачи нагрева и испарения капли двухкомпонентного суррогатного топлива SU12 в 3D постановке представлена на рисунке 1.

В данной работе получены результаты по характеристикам нагрева и испарения двухкомпонентного топлива (температуре в приповерхностном слое, размеру (радиусу) от времени и времени существования). Варьируемыми параметрами системы капля/высокотемпературная газовая среда были начальная температура топлива от 300 К до 350 К, давление газа от 101325 Па до 5066250 Па, начальный радиус от 0,01 мм до 1 мм, температура газа от 500 К до 1000К. На рисунке 2 представлены зависимости температуры поверхности  $T_s$  от  $\frac{t}{(D_0)^2}$  (а) и  $Rd$  от  $t$  (б) при разной начальной температуре топлива ( $T_0 = 300$  К;  $T_0 = 310$  К;  $T_0 = 320$  К;  $T_0 = 330$  К;  $T_0 = 340$  К;  $T_0 = 350$  К). На рисунке 3 представлена зависимость времени испарения от начальной температуры топлива.



Рис. 1. Схема области решений задачи нагрева и испарения капли двухкомпонентного суррогатного топлива SU12 в 3D постановке

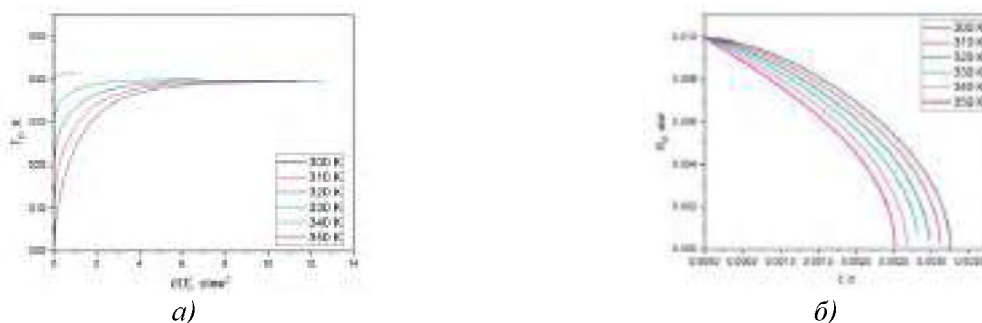


Рис. 2. Зависимость  $T_s$  от  $\frac{t}{(D_0)^2}$  (а) и  $Rd$  от  $t$  (б) при разной начальной температуре топлива ( $T_0=300$  К;  $T_0=310$  К;  $T_0=320$  К;  $T_0=330$  К;  $T_0=340$  К;  $T_0=350$  К)

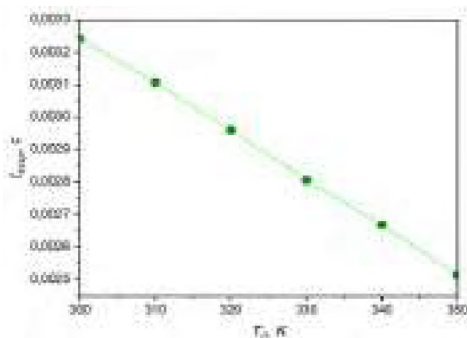


Рис. 3. Зависимость времени испарения капли двухкомпонентного топлива от начальной температуры

### Заключение

Полученные результаты, представленные на рисунке 2 позволяют сделать вывод о том, что изменение начальной температуры топлива от 300 К до 350 К снижает время существования капли на 22,5 %. Полученные результаты важны для развития технологий по сжиганию жидких топлив в камерах сгорания авиационных двигателей.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Eckel G. LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry / G. Eckel, J. Grohmann, L. Cantu [et al.] // Combustion and Flame. – 2019. – V. 207. – P. 134–152. – ISSN 00102180.
2. Elwardany A. Modeling of Heating and Evaporation of FACE i Gasoline Fuel and its Surrogates / A. Elwardany, J. Badra, J. Sim [et al.] // SAE Technical Papers. – 2016. – ISSN 01487191.
3. Wang Q. Simulated Kinetics and Chemical and Physical Properties of a Four-Component Diesel Surrogate Fuel / Q. Wang, C.P. Chen // Energy and Fuels. – 2017. – V. 31. – № 12. – P. 13190–13197. – ISSN 08870624.
4. Yan Y. A simplified chemical reaction mechanism for two-component RP-3 kerosene surrogate fuel and its verification / Y. Yan, Y. Liu, W. Fang [et al.] // Fuel. – V. 227. – P. 127–134. – ISSN 00162361.
5. Poulton L. Modelling of multi-component kerosene and surrogate fuel droplet heating and evaporation characteristics: A comparative analysis / L. Poulton, O. Rybdylova, I.A. Zubrilin [et al.] // Fuel. – 2020. – V. 269. – ISSN 00162361.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Д.В. Антонов, инженер-исследователь лаборатории тепломассопереноса ИШЭ ТПУ.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ПРИ ГОРЕНИИ

Н.А. Землянский  
Сибирский федеральный университет  
ФЭ, ТТиГД, группа ФЭ22-01М

Одним из самых дешевых видов твердых ископаемых топлив, используемых при выработке тепловой и электрической энергии, являются угли разной степени метаморфизма. Газообразные и твердые продукты сгорания углей могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. В связи с этим, одним из основных направлений по совершенствованию топливно-энергетического комплекса является переход к ресурсосберегающей и экологически безопасной энергетике.

Сжигание биомассы может сократить выбросы вредных газообразных веществ и мелко-дисперсной золы. Полный переход на сжигание биомассы взамен угля затрудняется из-за необходимости существенной реконструкции объектов теплоэнергетики, отсутствия больших запасов и проблем с доставкой. Поэтому рядом исследователей, как в России, так и за рубежом было предложено частичное смешивание биомассы с углями в разных пропорциях по массе, либо по теплоте сгорания [1].

При одновременном горении топлив с разными теплоэнергетическими и химическими характеристиками помимо определения основных характеристик горения, необходимо учитывать их влияние друг на друга. Для исследования процесса пиролиза и горения в лабораторных условиях широко применяется термогравиметрический анализ (ТГА) учитывающий изменение массы топлива и тепловые эффекты. С помощью ТГА возможно определять типичные температурные характеристики, скорость убыли массы и др. параметры [2].

Целью работы – анализ взаимосвязи углей разной степени метаморфизма и биомассы при их совместном горении.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие топлива:

№ 1 бородинский бурый уголь (далее 2Б);

№ 2 балахтинский бурый уголь (далее 3Б);

№ 3 каа-хемский каменный уголь (далее КХ);

№ 4 сосновые опилки (далее ОП).

Основные теплотехнические характеристики и элементный состав приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики твердых топлив

№	Технический анализ			Элементный состав					$Q_f$ , МДж/кг
	$W^a$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$C^{daf}$ , %	$H^{daf}$ , %	$N^{daf}$ , %	$S^{daf}$ , %	$O^{daf}$ , %	
1	9,5	9,2	47,3	73,5	5,1	1,0	0,3	20,1	16,09
2	2,8	6,2	44,6	74,1	5,0	0,9	0,3	19,7	21,16
3	1,7	6,8	47,5	82,0	5,8	1,5	0,3	10,4	29,54
4	3,3	–	80,2	55,6	5,5	0,3	–	38,6	19,57

Теплотехнические характеристики и элементный состав топлив (таблица 1) определялись в соответствии ГОСТами. Для проведения термогравиметрического анализа использовалась навеска топлива массой около 6 мг с дисперсностью топливных частиц 50–250 мкм. Данный размер частиц является наиболее подходящим для таких видов экспериментов [2]. ТГА проводился в окислительной среде с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20°С/мин. Для экспериментов были подготовлены твердотопливные смеси со следующими массовыми пропорциями: 2Б 50 %+ 3Б 50 %; 3Б 50 % + КХ 50 %; 2Б 50 % + ОП 50 %.

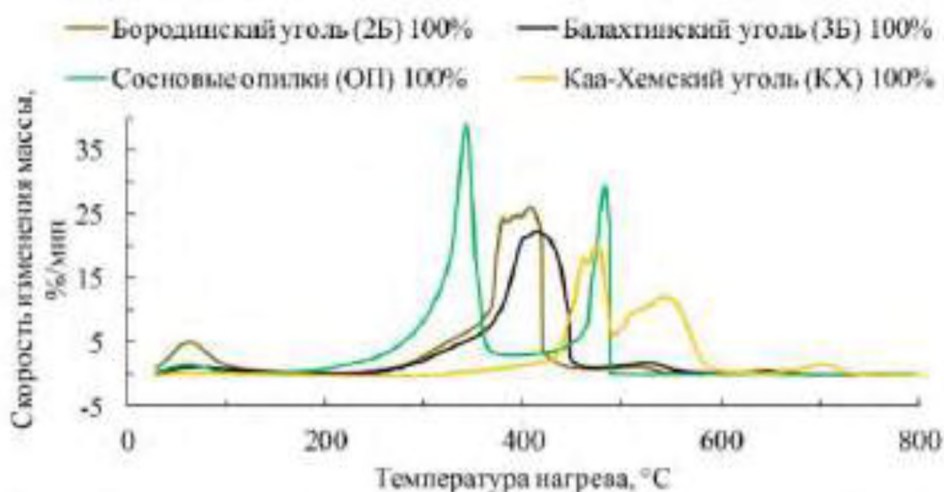


Рис. 1. Профили кривых скорости изменения массы при горении бородинского угля; балахтинского угля; каа-хемского угля и сосновых опилок



На рисунке 1 представлены профили кривых скорости изменения массы (СИМ) при горении топлив. Профили кривых СИМ демонстрируют все основные стадии процесса горения топлив. В данной работе рассмотрим только стадию горения летучих веществ и стадию горения коксового остатка топлив. На термограмме (рисунок 1) эти стадии выражены резким увеличением СИМ в виде максимумов. Горение 2Б выражено одним максимумом с  $C_{\max} = 26$  %/мин,  $T_{\max} = 408$  °С (рисунок 1); горение балахтинского угля так же выражено одним максимумом  $C_{\max} = 22$  %/мин,  $T_{\max} = 414$  °С (рисунок 1); горение каа-хемского угля выражено двумя максимумами, первый максимум СИМ демонстрирует горение летучих веществ и части коксового остатка  $C_{\max1} = 19$  %/мин,  $T_{\max1} = 473$  °С, второй максимум соответствует горению коксового остатка  $C_{\max2} = 12$  %/мин,  $T_{\max2} = 544$  °С (рисунок 1); горение опилок выражено двумя максимумами, первый максимум соответствует горению целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина  $C_{\max1} = 39$  %/мин,  $T_{\max1} = 343$  °С, второй максимум соответствует горению лигнина  $C_{\max2} = 29$  %/мин,  $T_{\max2} = 484$  °С (рисунок 1).

На рисунке 2 изображены профили экспериментальных и расчетных кривых скорости изменения массы при горении топливных смесей. Расчетные данные получали по следующей формуле:

$$СИМ_{расч} = СИМ_1 \cdot \alpha_1 + СИМ_2 \cdot \alpha_2, \quad (1)$$

где  $СИМ_{расч}$  – это расчетное значение скорости изменения массы, %/мин;  $СИМ_1$  и  $СИМ_2$  – это значения скорости изменения массы соответствующее каждому компоненту в смеси, %/мин;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – это массовая доля компонентов в смеси,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

Горение двух бурых углей подчиняются принципам аддитивности, профили расчетных и экспериментальных кривых с учетом погрешности почти совпадают (рисунок 2а). Максимальное значение СИМ в расчетных данных достигает 24 %/мин, при температуре 409 °С; в экспериментальных данных максимальное значение СЭМ равно 24 %/мин, при температуре 413 °С.

Горение коксового остатка смеси на основе каменного и бурого угля по расчетным данным имеет три максимума, а по экспериментальным – два (рисунок 2б). Это свидетельствует о том, что их совместное влияние не подчиняется принципам аддитивности, как при горении двух разных бурых углей. Первый максимум по экспериментальным данным соответствует горению летучих и коксового остатка бурого угля и составляет 12 %/мин при температуре 426 °С, расчетный максимум имеет то же значение СИМ, но при температуре 416 °С. Профиль кривой расчетных данных (рисунок 2б) имеет второй максимум при температуре 478 °С с максимумом 10 %/мин, при экспериментальном исследовании этого максимума нет. Третий максимум по расчётным значениям на 30 % ниже, чем максимум при эксперименте и составляет 7 %/мин при температуре 545 °С.

Горение топливной смеси на основе угля и биомассы по расчетным значениям и экспериментальным данным представлено тремя максимумами (рисунок 2в). Первые максимумы, соответствующие горению летучих веществ, совпадают, что говорит о действии принципа аддитивности. Второй максимум по экспериментальным данным составил 26 %/мин при температуре 392 °С, выше экспериментального на 85%.

Увеличение второго максимума произошло за счет совместного горения коксового остатка угля и лигнина, об этом свидетельствует третий максимум, соответствующий горению коксовой части биомассы, который по расчетным значениям должен быть выше в 5 раз. Добавление биомассы к углю положительно влияет на процесс горения, так как основные стадии процесса смещаются в область более низких температур (рисунок 2в).

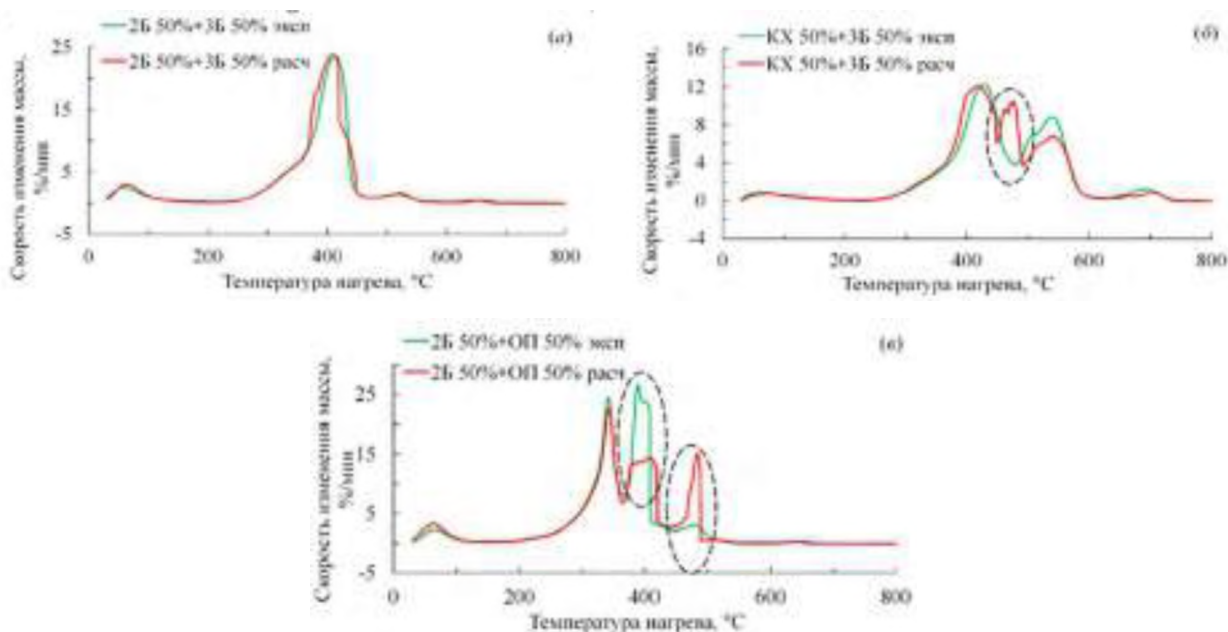


Рис. 2. Профили экспериментальных и расчетных кривых скорости изменения массы при горении топливных смесей:

а) 2Б 50 %+3Б 50 %; б) 3Б 50 %+КХ 50 %; в) 2Б 50 %+ОП 50 %

Проведенное исследование показало, что при совместном горении углей одной стадии метаморфизма все основные стадии этого процесса подчиняются принципам аддитивности. При совместном горении углей разной степени метаморфизма происходит увеличение скорости изменения массы коксового остатка для каменного угля на 30 %, принципам аддитивности подчиняется только стадии бурого угля, которые происходят в области более низких температур по сравнению с каменным углем. При горении биомассы и угля принципам аддитивности подчиняется только стадия горения летучих веществ биомассы. Стадия горения коксового остатка угля совмещается со стадией горения лигнина, и это влияет на увеличение максимальной скорости изменения массы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace / A.A. Bhuiyan, A.S. Blicblau, A.K.M.S. Islam, J. Naser // J. Energy Inst., 2018. – V. 91. – P. 1–18.
2. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.E. Nurpeiis, E.G. Orlova, A.S. Samoilo, A.M. Zhizhaev, A.V. Zhuikov // Fuel Process. Technol. – 2022. – V.236. – P. 1–2.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Жуйков, заведующий учебно-научной лабораторией ТИГТД ФЭСФУ.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА ЭЛЕМЕНТЫ ДЕРЕВЯННОГО СТРОЕНИЯ

С.А. Мязина

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова, группа 5БМ14

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию теплопередачи в ограждающих конструкциях деревянного строения, подвергнувшегося воздействию фронта лесного пожара. В этой статье рассматривается воздействие теплового потока от фронта лесного пожара только на ограждающие конструкции деревянного строения в сельской местности.

Ключевые слова: математическое моделирование; лесной пожар; древесина; строение; воздействие.

Лесные пожары – это катастрофическое явление, наносящее экологический, экономический и социальный ущерб [1].

В качестве физической модели был взят однокомнатный деревянный дом, расположенный недалеко от лесного пожара. Фронт огня распространяется с небольшой скоростью при отсутствии ветра. Ограждающие конструкции этого здания представлены в виде двухслойной плиты. Первый слой – облицовка, второй – дерево.

Основной параметр безопасности деревянной конструкции – факт возгорания (или воспламенения) ограждающей конструкции деревянного здания при достижении достаточной температуры поверхности.

Были сделаны следующие предположения:

- Механизм теплопроводности в ограждающих конструкциях существует;
- Теплофизические свойства строительных материалов не зависят от температуры;
- Предполагается катастрофический сценарий пожарной погоды, когда в поверхностном слое стены нет влаги;
- Пиролиз древесины игнорируется;
- Основным механизмом передачи тепла от линии огня к зданию является конвекция.

В целях математического моделирования стены деревянного строения можно упрощенно представить, как слоистую структуру, на которую оказывают воздействия тепловой поток от фронта лесного пожара. Так как стена деревянного дома состоит из двух основных слоев – древесины и теплоизоляционный/облицовочный материал, то в качестве идеальной модели была рассмотрена одномерная двухслойная модель деревянного строения (рисунок 1), в которой тепло передается посредством теплопроводности.

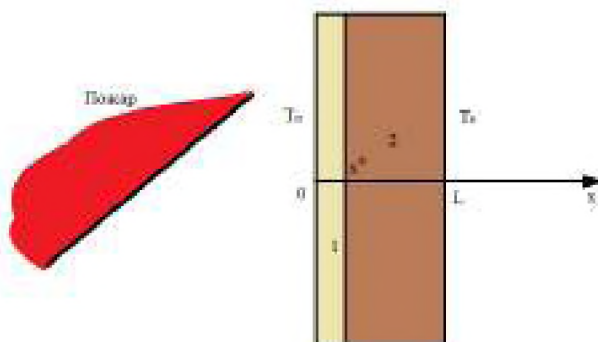


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи [2]

Теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов [1]

Материал	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Сосна	1670	500	0,12
Береза	2200	650	0,28
Облицовочный картон	2300	100	0,18
Асбестовый картон [3]	1500	1600	0,4
Сайдинг блок-хаус хвоя [4]	2700	500	0,14
Базальтовый утеплитель ПТЭ-100 [5]	840	100	0,038

Теплофизические характеристики различных видов пожаров представлены в таблице 2.

Таблица 2. Теплофизические характеристики различных видов пожаров [1]

Вид пожара	T, К	$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Огненный смерч	1200	200
Верховой	1100	150
Низовой пожар высокой интенсивности	1000	
Низовой пожар низкой интенсивности	900	80

На рисунке 2а представлены результаты моделирования воздействия низового лесного пожара высокой интенсивности на слоистую структуру деревянного строения, выполненных из сосны и различных видов облицовочных материалов. Сравнительный анализ показывает, что слой – асбестовый картон, наименее восприимчив к нагреву. Кроме того, разница в температуре поверхности составляет около 120 К между различными слоями облицовочных материалов.

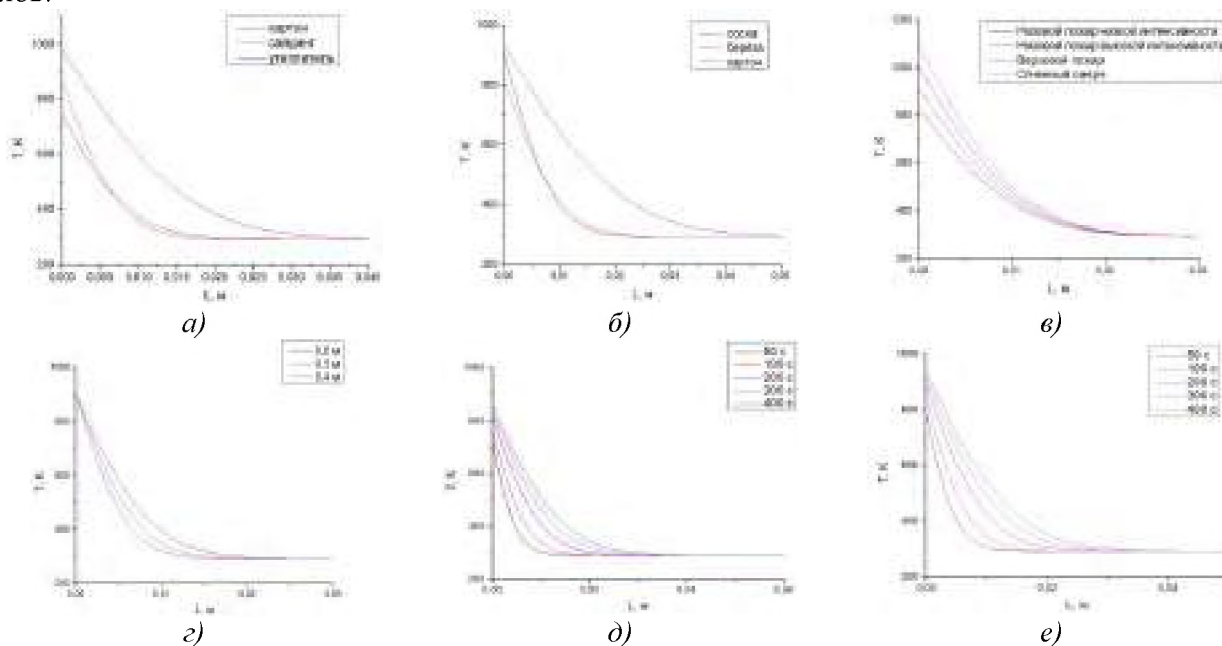


Рис. 2. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения:

а) выполненных из сосны и различных видов облицовочных материалов при условии низового пожара высокой интенсивности и времени воздействия 200 сек; б) выполненных из различных видов облицовочных материалов и сайдинга «блок-хаус хвоя» для при условии низового пожара высокой интенсивности и времени воздействия 200 сек; в) выполненных из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии различных видов пожаров и времени воздействия 300 сек; г) выполненных из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии различной толщины материалов и времени воздействия 200 сек; д) выполненных из берёзы и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии низового пожара высокой интенсивности и различной времени воздействия; е) выполненных из берёзы и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии верхового пожара и различной времени воздействия

На рисунке 2б представлены результаты моделирования воздействия низового лесного пожара высокой интенсивности на слоистую структуру деревянного строения, выполненных из различных видов облицовочных материалов и сайдинга «блок-хаус хвоя». Как показывает анализ результатов, приведенных на рисунке 2б, температура поверхностного слоя выше критической для любого типа облицовочного материала. Кроме того, облицовочный слой нагревается на глубину 1 см. Разница в температуре поверхности и поверхностного слоя 40–80 К не имеет значения. Все виды облицовки опасны. Следует предположить, что в этом случае владелец здания может использовать только предварительные меры для минимизации ущерба, а именно удаление кустарников и прокладку минерализованных полос на определенном расстоянии от здания. В качестве альтернативы, человек должен покинуть здание, чтобы избежать травм, ожогов и смерти.

Представлены результаты моделирования воздействия на слоистую структуру деревянного строения, выполненных из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя»: на рисунке 2в различных видов лесного пожара, на рисунке 2г низового лесного пожара высокой интенсивности. Как было установлено в результате моделирования, стена нагревается в основном на стадии, предшествующей воспламенению, и нагрев происходит в поверхностных слоях облицовки толщиной около 2 см. Сравнительный анализ показывает, что более тонкие слои материалов, наименее восприимчивы к нагреву.

Представлены результаты моделирования воздействия на слоистую структуру деревянного строения, выполненных из берёзы и сайдинга «блок-хаус хвоя»: на рисунке 2д низового лесного пожара высокой интенсивности, на рисунке 2е верхового лесного пожара. Сравнительный анализ показывает, что с увеличением длительности воздействия лесного пожара на деревянное строение, увеличивается температура нагрева.

В данном исследовании была решена важная научная и прикладная задача, а именно создание инженерного подхода к мониторингу устойчивого функционирования и развития сельских поселений, промышленных объектов и зон отдыха на основе сценарного моделирования воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания с использованием упрощенной физически обоснованной математической модели теплопередачи. Были рассмотрены сценарии воздействия лесных пожаров низкой и высокой интенсивности. В результате математического моделирования были получены распределения температуры по материалу, а также определены условия воспламенения на основе экспериментальных данных. Предлагаемый упрощенный математический модель и полученные результаты могут быть использованы в практике защиты промышленных объектов или сельских населенных пунктов от лесных пожаров.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Baranovskiy N., Malinin A., *Mathematical Simulation of Forest Fire Impact on Industrial Facilities and Wood-Based Buildings* – Tomsk. 2020.
2. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ. 2007. С. 8-73.
3. Термоизол.com URL: <https://termoizol.com/polnaya-tablitsa-teploprovodnosti-razlitchnhstroitelnyh-materialov.html> (дата обращения 12.05.2021).
4. Леруа Мерлен в Новосибирске – URL: <https://novosibirsk.leroymerlin.ru/product/blok-haus-hvoya-28h146h3000-mm-sort-optima-3-sht-1-31-m-81947969/#nav-characteristics> URL: (дата обращения 12.05.2021).
5. Утепли ВСЕ. URL: <https://утепливсе.рф/stat/1428075110.html#:~:text=Характеристика%20ПТЭ-100%3A%20Плотность%3A%2084%20-,–120%20до%20%2B700°C.%20Упаковка%20ПТЭ-100%3A> (дата обращения 12.05.2021).
6. N.V. Baranovskiy, A.O. Malinin. *Mathematical Simulation of Heat Transfer in the Structures of a Passenger Carriage Under the Influence of Forest Fires // International Review on Modelling and Simulation* this. 2021. – Vol. 14(4), P. 231–241.

7. Vitaly Sergeev, Igor Ilin, Alexey Fadeev Transport and Logistics Infrastructure of the Arctic Zone of Russia // Transportation research procedia – Vol. 54 – 2021. – P. 936-944.
8. Kai Liu, Ming Wang, Tianjun Zhou Increasing costs to Chinese railway infrastructure by extreme precipitation in a warmer world // Transportation Research Part D – Vol. 93 – 2021. – P. 1-13.
9. Zhujun Chen, Mingkun Jiang, Lingfei Qi, Wu Wei, Ziyi Yu, Wendong Wei, Xinhai Yu, Jinyue Yan Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation // Resources, Conservation & Recycling – Vol. 178 – 2021. – P. 1-12.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Н.В. Барановский, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ ДОБАВОК К ГЕЛЕОБРАЗНЫМ ТОПЛИВАМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВЗРЫВНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ**

А.О. Плешко<sup>1</sup>, К.К. Паушкина<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШФВП, группа А2-13<sup>1</sup>, группа А1-13<sup>2</sup>

В настоящее время актуальным направлением развития теории горения конденсированных веществ является исследование процессов зажигания и горения гелеобразных топлив, которые по агрегатному состоянию занимают промежуточное положение между жидкими и твердыми топливами и сочетают их преимущества, как в плане относительно высоких энергетических и экологических характеристик, так и показателей безопасности при хранении [1]. Одним из широко известных способов повышения энергетических характеристик таких топлив является добавление в их состав мелкодисперсных частиц [2]. Наличие таких частиц в составе гелеобразного топлива может оказывать положительное влияние на характеристики микровзрывного диспергирования при зажигании и горении частиц топлива [3]. Топлива с добавлением мелкодисперсных металлических порошков представляют большой интерес для ракетно-космической отрасли из-за их повышенных энергетических характеристик процесса горения [4]. Металлы в качестве топливной добавки оказывают положительный эффект на повышение скорости и стабильности горения, снижение чувствительности топливного заряда к детонации, упрощение транспортировки и распыления и другие характеристики. В связи с этим перевод жидких топлив в гелеобразное состояние для модификации состава мелкодисперсными частицами металлов с целью улучшения их характеристик является достаточно перспективной задачей.

До настоящего времени не предпринимались попытки систематического изучения процессов зажигания и горения гелеобразных топлив на основе криогелей (характеризующихся трехмерной упруго-деформируемой структурой) с добавлением различных мелкодисперсных частиц (металлических и неметаллических). Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование с использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации процессов зажигания и горения одиночных частиц групп составов гелеобразных топлив, содержащих твердые мелкодисперсные металлические и неметаллические включения, в высокотемпературной неподвижной воздушной среде в условиях диспергирования капель расплава при интенсивном нагреве.

Исследования характеристик микровзрывного диспергирования выполнены с использованием экспериментального стенда [5] для одиночных частиц маслonaполненных криогелей на основе 10 %-го водного раствора поливинилового спирта как без твердых включений (состав No. 1), так и с добавлением 30 % мас. мелкодисперсных твердых компонентов: углеродистых микрочастиц (состав No. 2), а также наночастиц алюминия (состав No. 3), железа (состав No. 4) и меди

(состав No. 5). В ходе проведения экспериментов были зарегистрированы времена задержки зажигания частиц топлива ( $t_d$ ), средние значения скоростей движения мелкодисперсных фрагментов ( $V_p$ ), образующихся при диспергировании капли расплава топлива.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены отличия механизмов зажигания и горения одиночных частиц разных топливных составов. Вследствие многокомпонентной структуры гелеобразных топлив механизм их горения достаточно существенно отличается от механизма горения широко распространенных жидких топлив. На рисунках 1–3 приведены кадры видеogramм зажигания и горения частиц рассматриваемых типичных составов гелеобразных топлив (без добавления твердых частиц, с добавлением углеродистых и металлических частиц) в высокотемпературной неподвижной воздушной среде при  $T_g = 900$  °С.

На примере типичного гелеобразного топлива (рисунок 1) установлена следующая совокупность взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при нагреве одиночной частицы гелеобразного топлива в высокотемпературной неподвижной среде окислителя. В процессе лучистого нагрева частица топлива начинает плавиться, а образующаяся на поверхности частицы жидкость – испаряться. В окрестности частицы формируется горючая парогазовая смесь. Жидкие компоненты топлива (горючее и загуститель) после его плавления разделяются. Из-за отличия поверхностного натяжения загуститель образует оболочку на поверхности капли расплава, горючая жидкость располагается внутри капли под слоем загустителя. Благодаря образовавшейся структуре дальнейший нагрев капли приводит к образованию многочисленных центров свободных границ раздела (гетерогенных центров зародышеобразования) именно на границе раздела жидкостей [6]. Это проявляется в виде формирования и роста единичных пузырьков, перемещающихся вдоль границы раздела *горючая жидкость / загуститель*. Установлено [7], что скорость зарождения пузырьков существенно зависит от взаимной растворимости компонентов топливной смеси. Скорость зародышеобразования для нерастворимых жидких компонентов выше, чем для растворимых [7]. На процесс образования пузырьков влияет отличие в характеристиках летучести компонентов топлива [8], а также степень перегрева [9].

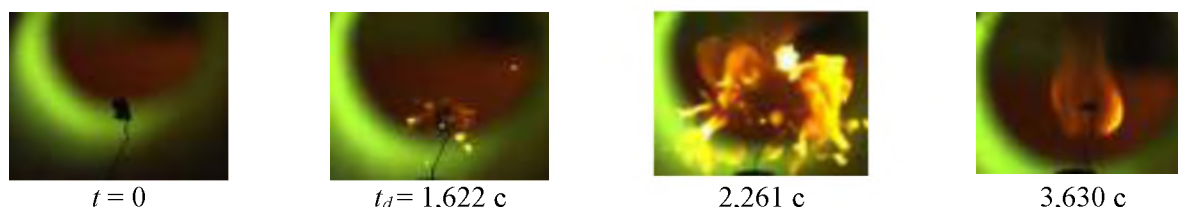


Рис. 1. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 1 – маслонеполненный криогель без добавления твердых частиц)

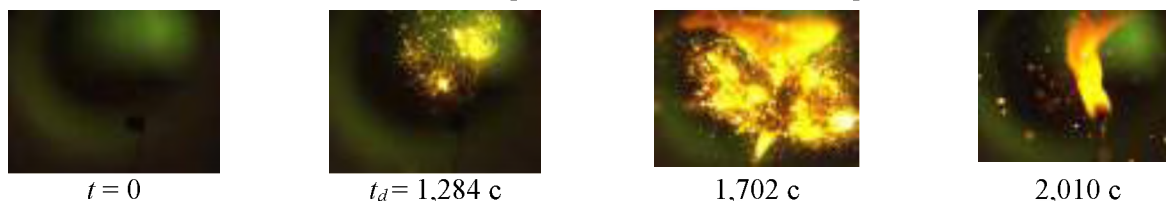


Рис. 2. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 2 – маслонеполненный криогель, содержащий 30 % мас. углеродистых частиц)

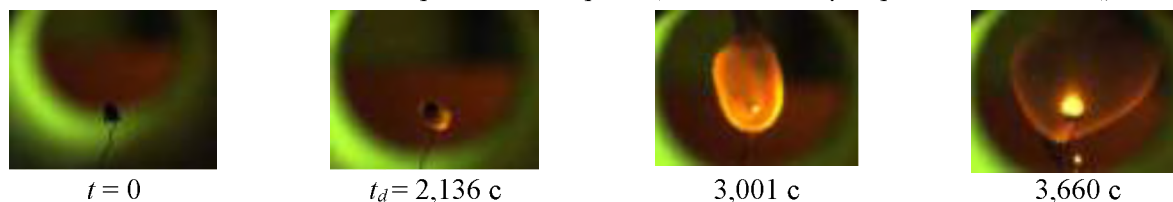


Рис. 3. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 3 – маслонеполненный криогель, содержащий 30 % мас. частиц Al)

Для двухкомпонентных капель несмешивающихся жидкостей такой локальный перегрев происходит потому [10], что оболочка состоит из загустителя, обладающего значительно большей теплоемкостью и теплопроводностью, чем горючая жидкость. Оболочка загустителя (менее летучий компонент) на поверхности горючей жидкости (более летучий компонент) препятствует монотонному испарению горючей жидкости со свободной поверхности в окружающую среду. Поэтому горючая жидкость может быть нагрета до температур, достаточных для зарождения центров парообразования. С ростом размеров пузырей, они достигают границы *горючая жидкость / загуститель*. Пузыри передвигаются преимущественно вдоль поверхности раздела жидкостей. Совокупность пузырьков на границе *горючая жидкость / загуститель* создает термическое сопротивление для процесса прогрева горючей жидкости при теплоподводе от внешнего источника. Когда количество пузырьков и их размеры превышают критические значения, толщина оболочки загустителя уменьшается, происходит схлопывание пузырька, который разрушает слой загустителя. Пары горючего вдуваются в газовую среду нагретого окислителя вместе с микрокаплями топлива на достаточно большое расстояние от поверхности исходной капли, где температура окислителя выше, чем в окрестности поверхности капли (за счет эндотермического испарения и поступления холодных паров в газовую среду). Мелкодисперсные фрагменты, двигаясь в высокотемпературной среде, интенсивно испаряются, увеличивая концентрацию летучих, которые воспламеняются в достаточно большом по размерам объеме.

Стоит отметить, что добавление мелкодисперсных твердых металлических частиц в состав гелеобразного топлива снижает интенсивность протекания процесса диспергирования капли расплава топлива (рисунок 3) при прочих идентичных условиях. Исключение составляет топливный состав No. 2 с добавлением углеродистых частиц (рисунок 2), которые в отличие от металлических наночастиц обладают существенно более пористой структурой поверхности и содержат в микропорах пузырьки воздуха, которые могут служить центрами гетерогенной нуклеации [11].

Для рассматриваемых составов гелеобразных топлив (частиц с начальной массой 5 мг и диаметром 2,8 мм) были определены зависимости времен задержки зажигания от температуры разогретого воздуха. Более существенное отличие характеристик зажигания для топлив с разным компонентным составом характерно для относительно низких температур источника энергии ( $T_g = 600$  °С). При температурах в муфельной печи, соответствующих предельным условиям зажигания гелеобразных топлив ( $T_g = 600$  °С), времена задержки зажигания могут различаться более, чем в 2 раза (от 4 до 10 с). Времена задержки зажигания маслonaполненного криогеля без твердых включений (состав No. 1) выше на 25 % по сравнению с составом No. 2 во всем диапазоне варьирования температур. Для всех металлизированных составов гелеобразного топлива времена задержки зажигания на 30 % и более выше по сравнению с безметалльным составом No. 1. С одной стороны, это обусловлено уменьшением доли горючей жидкости, с другой стороны, увеличением теплоаккумулирующей способности металлических компонентов топлива.

Определены зависимости скоростей движения мелкодисперсных фрагментов, отделившихся от капель расплавов топлив (при их диспергировании) и движущихся в среде окислителя. При повышении температуры в камере сгорания скорости движения фрагментов ( $V_p$ ) возрастают, так как процессы теплопереноса протекают интенсивнее при больших значениях  $T_g$ . Важно отметить, что при определении скоростей учитывались движущиеся фрагменты, отделившиеся от основной капли, как до зажигания (если это имело место), так и после. Таким образом, усредненные значения скоростей  $V_p$  для некоторых составов могут быть ниже прогнозируемых из-за учета движения фрагментов с низкой кинетической энергией, характерной для индукционного периода. Скорости отлетающих фрагментов при диспергировании состава No. 2 имеют наибольшее значение во всем диапазоне температур в муфельной печи. Полученный результат объясняется тем, что на границе *топливо / воздух* при зажигании гелеоб-



разного топлива с добавлением мелкодисперсных углеродистых частиц образуется наибольший градиент температур. Скорости отлетающих фрагментов для всех составов при  $T_g$  от 600 до 1000 °С варьируются в пределах от 0,3 до 1,4 с.

Для всех исследованных составов гелеобразного топлива были установлены зависимости средних размеров (диаметров) области выгорания от температуры окружающей среды. Составы No. 3 и No. 5 мало подвержены диспергированию в процессе зажигания и выгорания. Данные составы в условиях лучистого нагрева после плавления монотонно испаряются. В окрестности частицы формируется сферическая горючая парогазовая смесь, которая воспламеняется при достижении температуры зажигания. Соответственно, чем выше температура окружающей среды, тем быстрее будут достигаться необходимые условия воспламенения парогазовой смеси, тем меньше успеет испариться горючей жидкости, и тем меньше будет область газофазного зажигания и выгорания. При горении составов No. 1, No. 2 и No. 4 преобладает диспергирование. Соответственно, область выгорания зависит от дальности разлета мелкодисперсных фрагментов исходной капли топлива. Следовательно, размеры области выгорания напрямую зависят от скорости движения мелкодисперсных фрагментов после диспергирования капли расплава. Увеличение температуры окружающей среды влечет за собой как возрастание скорости движения мелкодисперсных фрагментов, так и увеличение размеров областей выгорания. Средние диаметры области выгорания изменяются от 7 до 15 мм для разных топливных составов.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что составы с добавлением мелкодисперсных металлических/неметаллических частиц могут обеспечивать стабильное диспергирование. При этом от их концентрации, как и от их теплофизических характеристик, зависят характеристики зажигания и выгорания конкретного топлива. Результаты выполненной работы являются основой для будущих исследований по поиску оптимальных концентраций порошков твердых включений и размеров их частиц в составе гелеобразных топлив для обеспечения наилучших энергетических показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Some aspects on safety and environmental impact of the German green gel propulsion technology / H.K. Ciezki, K.W. Naumann // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2016. – V. 41, № 3. – P. 539–547.
2. Gel propellants / M.B. Padwal, B. Natan, D.P. Mishra // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2021. – V. 83. – P. 100885.
3. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications / D. Sundaram, V. Yang, R.A. Yetter // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – V. 61. – P. 293–365.
4. Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen / J.P. Gómez Montoya et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43, № 46. – P. 21592–21602.
5. Ignition mechanism and characteristics of gel fuels based on oil-free and oil-filled cryogels with fine coal particles / D.O. Glushkov et al. // *Powder Technology*. – 2020. – V. 360. – P. 65–79.
6. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets / J. Shinjo et al. // *Physics of Fluids*. – 2014. – V. 26, № 10. – P. 103302.
7. Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging / A.M.D. Faik, Y. Zhang // *Fuel*. – 2018. – V. 221. – P. 89–109.
8. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets / C.H. Wang, X.Q. Liu, C.K. Law // *Combustion Flame*. – 1984. – V. 56, № 2. – P. 175–197.
9. Experimental understanding on the dynamics of microexplosion and puffing in ternary emulsion droplets / M.M. Avulapati et al. // *Fuel*. – 2019. – V. 239. – P. 1284–1292.

10. Modeling the micro-explosion of miscible and immiscible liquid droplets / D.V. Antonov et al. // Acta Astronautica – 2020. – V. 171. – P. 69–82.
11. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets / J. Shinjo et al. // Physics of Fluids. – 2014. – V. 26, № 10. – P. 103302.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда [№ 18-13-00031, <https://rscf.ru/project/21-13-28043/>].

Научный руководитель: д.т.н. Д.О. Глушков, доцент ИШФВП ТПУ.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ГЕЛЯ С ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ**

А.Е. Пискунова, Н.А. Хомутов  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группы А2-11, А1-11

В последнее время одним из наиболее активных направлений, развивающихся в области полимеров, являются микрогели. Состав, размеры и морфологию микрочастиц возможно варьировать в широких пределах в зависимости от области применения. В то же время довольно мало известно о механизмах, характеристиках и режимах гидродинамики и тепломассообмена для микрочастиц геля, взаимодействующих с твердой нагретой и не нагретой поверхностью. Данные результаты важны для развития технологий трехмерной печати и биопечати отверждаемыми полимерами, использовании микрогеля в качестве топлива в энергетике, производстве гидрогелей и микрогелей, тканевой инженерии и транспортировке лекарств и биологических клеток [1, 2]. Целью настоящих экспериментов является изучение взаимодействия первой частицы микрогеля с твердой гладкой поверхностью и мембранным покрытием, а также взаимодействия второй частицы микрогеля с первой.

Гелеобразование основано на взаимодействии сшиваемого полимера с кросслинкером (сшивающим агентом), предназначенным для создания химических связей между полимерными цепями. В настоящей работе в качестве полимера используется водный раствор альгината натрия (ALG), в качестве кросслинкера – водный раствор хлорида кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) с добавлением этилового спирта (EtOH). Для формирования частиц микрогеля необходимо, чтобы коэффициент поверхностного натяжения двух взаимодействующих жидкостей отличался более, чем на 10 мН/м. В связи с этим, подобраны концентрации растворов альгината натрия и хлорида кальция. Для того, чтобы увеличить разницу коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей, в раствор хлорида кальция добавлен этиловый спирт, снижающий поверхностное натяжение раствора. Свойства растворов полимера и кросслинкера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства исходных растворов полимера и кросслинкера

Раствор	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, мПа·с	К-нт поверхностного натяжения, мН/м
2 mg/ml ALG	892	47,08	52,95±0,22
4 mg/ml ALG	926	161,08	56,37±0,13
6 mg/ml ALG	968	266,63	58,60±0,17
8 mg/ml ALG	973	397,85	65,76±0,53
15 mg/ml $\text{CaCl}_2$ + 10%EtOH	1010	2,22	42,91±0,148

В таблице 2 приведен состав образцов микрогеля, полученных в результате взаимодействия полимера с кросслинкером. Концентрация кросслинкера во всех случаях оставалась неизменной, а концентрация альгината натрия в растворах полимера варьировалась (2, 4, 6, 8 мг/мл) для того, чтобы получить частицы микрогеля с разной степенью гелеобразования.

Таблица 2. Состав исследуемых образцов микрогелей

Маркировка образца микрогеля	Раствор полимера	Раствор кросслинкера
G1	2 mg/ml ALG	15 mg/ml CaCl <sub>2</sub> + 10%EtOH
G2	4 mg/ml ALG	15 mg/ml CaCl <sub>2</sub> + 10%EtOH
G3	6 mg/ml ALG	15 mg/ml CaCl <sub>2</sub> + 10%EtOH
G4	8 mg/ml ALG	15 mg/ml CaCl <sub>2</sub> + 10%EtOH

Для формирования микрочастиц геля разработана система генерирования сдвоенного потока жидкостей. Результирующий поток микрогелевых частиц формируется в результате взаимодействия в воздухе микрокапельного потока полимера с микроструйным потоком кросслинкера. Подача растворов полимера и кросслинкера осуществляется шприцевыми насосами с установленными расходами 9 и 8 мл/мин, соответственно, с помощью шприцевых игл с тупым наконечником (внутренний диаметр 0,21 мм). Для крепления игл разработаны и напечатаны на 3D принтере специальные каркасы с необходимыми технологическими отверстиями. Дробление потока раствора альгината проводится с использованием многослойного пьезоэлектрического привода. Для подачи сигнала управляющего воздействия на пьезоэлемент и его усиления использовалась система, состоящая из модуля АЦП, усилителя напряжения и буферного усилителя напряжения. Видеорегистрация процесса взаимодействия проведена сбоку под углом 90° относительно осей струй с использованием высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310 (скорость съемки 28000 кадров/с, разрешение 320×304 пикселей). Сформированный поток частиц микрогеля взаимодействует с твердой стенкой, в качестве которой используется сапфировое стекло с гладкой (на молекулярном уровне) поверхностью и мембранное покрытие с гидрофобными свойствами, изготовленное методом электроспиннинга из 5% раствора сополимера метилэтилкетона и диметилформамида [3].

Между микрочастицами геля формируются тонкие жидкостные мосты, показанные на рисунке 1 (структура «бусины-на-нити» [4]). Начальный диаметр частиц  $D_0$  определялся как  $D_0 = (D_{hor} + D_{vert}) / 2$ , где  $D_{hor}$  – измеренное значение диаметра капли в горизонтальной плоскости, м,  $D_{vert}$  – измеренное значение диаметра капли в вертикальной плоскости, м (рисунок 1).

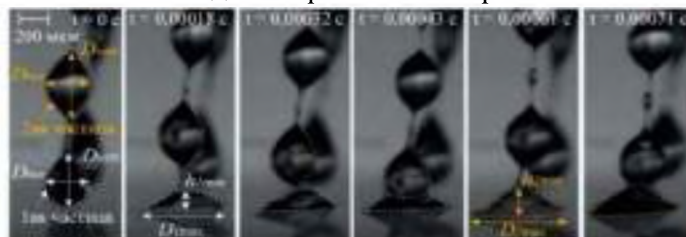


Рис. 1. Визуализация процесса взаимодействия гелеобразных микрочастиц G1 с мембранным покрытием

С увеличением концентрации альгината натрия с 2 до 8 мг/мл происходит пропорциональный рост значений  $D_0$  с 340 до 480 мкм (увеличение  $D_0$  до 41 %). Скорость движения микрочастиц  $U_0$  до взаимодействия для всех образцов микрогеля составляет 0,78 м/с. В исследовании определялись следующие характеристики (схемы измерений на рисунке 1): безразмерное время взаимодействия  $t^*$  ( $t^* = tU_0 / D_0$ , где  $t$  – время взаимодействия, с); диаметр растекания (деформации) частиц  $D$ , м, в том числе максимальный диаметр растекания (деформации) 1-ой и 2-ой частиц микрогеля:  $D_{1max}$ ,  $D_{2max}$ , м; коэффициент растекания (деформации)  $\beta$  ( $\beta = D / D_0$ ), коэффициент максимального растекания (деформации) 1-ой и 2-ой частиц микрогеля  $\beta_{1max}$ ,  $\beta_{2max}$  ( $\beta_{max} = D_{max} / D_0$ ); средняя скорость оседания частиц микрогеля  $U'$  (изменение контактного угла со временем), °/мин. Для анализа результатов экспериментального исследования рассчитывался безразмерный критерий гидродинамического подобия – число Рейнольдса ( $Re = \rho U_0 D_0 / \mu$ , где  $\mu$  – динамическая вязкость растворов полимера, Па·с), представляющее отношение сил инерции к силам вязкости.

В результате анализа видеоданных получены первичные результаты исследования взаимодействия частицы микрогеля с двумя видами гидрофобной поверхности: сапфировым стеклом с гладкой поверхностью и мембранным покрытием. На рисунке 2а показано, как изменяется коэффициент растекания  $\beta$  при взаимодействии первой частицы микрогеля с поверхностью, а затем при взаимодействии второй частицы микрогеля с первой.

На рисунке 2б продемонстрированы фазы (этапы) последовательных взаимодействий «частица микрогеля-твердая стенка» и «частица микрогеля-частица микрогеля», которые происходят по мере взаимодействия структуры «бусины-на-нити» с целевой поверхностью. Установлена разница в поведении частиц при растекании в зависимости от поверхности взаимодействия. При взаимодействии частицы микрогеля с мембранным покрытием наблюдалась фаза растекания до достижения максимального диаметра растекания  $D_{max}$ , а затем фаза стекания с уменьшением диаметра  $D$  (рисунок 2). В случае с гладкой поверхностью вместо фазы стекания наблюдалась фаза релаксации, когда после достижения  $D_{max}$  диаметр частицы не изменяется (рисунок 2). Также установлено, что коэффициент растекания на сапфировом стекле больше, чем коэффициент растекания на мембранном покрытии. Это связано с гидрофобными свойствами мембранного покрытия, а именно со средней скоростью оседания частиц микрогеля  $U'$  которая в случае мембранного покрытия практически в 3 раза меньше.

С увеличением концентрации альгината натрия (таблица 1) коэффициент максимального растекания  $\beta_{max}$  снижается. Это может быть связано с тем, что при увеличении концентрации альгината натрия в растворе растет поверхностное натяжение полимера, что способствует усилению градиента поверхностного натяжения между полимером и кросслинкером. Это, в свою очередь, способствует увеличению степени гелеобразования и формированию более твердых частиц микрогеля, которые меньше деформируются при взаимодействии с поверхностью.

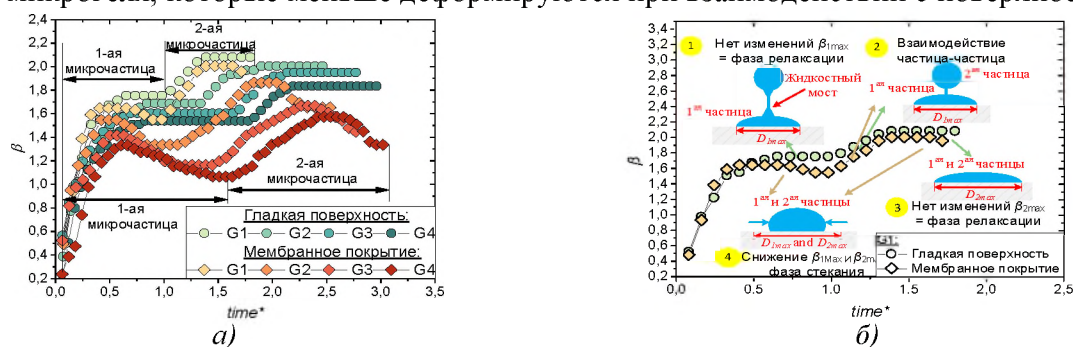


Рис. 2. Коэффициент растекания  $\beta$  при взаимодействии 1-ой микрочастицы с гладкой поверхностью сапфирового стекла и мембранным покрытием:

- а) при взаимодействии 2-ой микрочастицы с 1-ой в зависимости от безразмерного времени  $time^*$ ;
- б) визуализация фаз (этапов) последовательных взаимодействий «частица микрогеля-стенка» и «частица микрогеля – частица микрогеля»

На рисунке 3 приведены значения коэффициента максимального растекания (деформации)  $\beta_{1max}$  первой микрочастицы, взаимодействующей с гладкой поверхностью и мембранным покрытием, и коэффициента максимального растекания  $\beta_{2max}$  второй микрочастицы, взаимодействующей с первой, в зависимости от безразмерного числа  $Re$ . Показано, что увеличение коэффициентов максимального растекания (деформации) связано с уменьшением вязкости частиц микрогеля (уменьшение концентрации альгината натрия, таблица 1). Данные наблюдения справедливы для обеих исследуемых поверхностей. Получены эмпирические выражения, описывающие взаимодействие микрочастиц геля с гладкой поверхностью и мембранным покрытием.

Поведение  $\beta_{1max}$  и  $\beta_{2max}$  в зависимости от изменения числа  $Re$  в случае гладкой поверхности описывается экспоненциальными функциями в виде выражений (1) и (2), соответственно.

$$\beta_{max}^1 = 1,76 - 0,68 \cdot 0,29^{Re}, \quad (1)$$

$$\beta_{\max}^2 = 2,08 - 0,97 \cdot 0,22^{\text{Re}}. \quad (2)$$

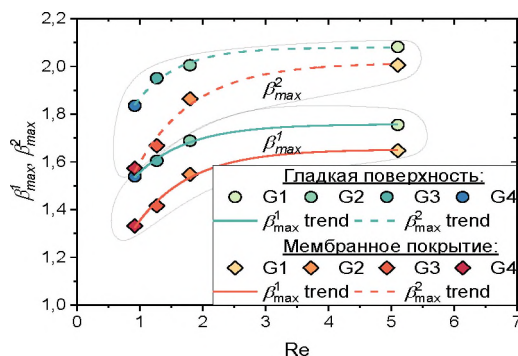


Рис. 3.  $\beta_{1\max}$  1-ой микрочастицы, взаимодействующей с гладкой поверхностью и мембранным покрытием, и  $\beta_{2\max}$  2-ой микрочастицы, взаимодействующей с 1-ой, в зависимости от числа  $Re$

Поведение  $\beta_{1\max}$  и  $\beta_{2\max}$  в зависимости от изменения числа  $Re$  в случае мембранного покрытия описывается экспоненциальными функциями в виде выражений (3) и (4), соответственно.

$$\beta_{\max}^1 = 1,65 - 0,95 \cdot 0,22^{\text{Re}}, \quad (3)$$

$$\beta_{\max}^2 = 2,02 - 1,23 \cdot 0,34^{\text{Re}}. \quad (4)$$

Полученные результаты позволяют обеспечить оптимальные условия взаимодействия сложных по внутренней структуре и компонентному составу микрочастиц геля с гладкими и мембранными поверхностями в целях потенциального использования полученных результатов в промышленных и биомедицинских технологиях: использование микрогеля в качестве топлива в энергетике, биопечать и транспортировка лекарств и биологических клеток.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. From Nano to Macro: Multiscale Materials for Improved Stem Cell Culturing and Analysis / J. Leijten, A. Khademhosseini // Cell Stem Cell.– 2016.– V. 18.– № 1.– P. 20–24.
2. Towards the design of 3D multiscale instructive tissue engineering constructs: Current approaches and trends / S.M. Oliveira, R.L. Reis, J.F. Mano // Biotechnol. Adv.– 2015.– V. 33.– № 6, Part 1.– P. 842–855.
3. The investigation of the production method influence on the structure and properties of the ferroelectric nonwoven materials based on vinylidene fluoride – tetrafluoroethylene copolymer / E.N. Bolbasov, K.S. Stankevich, E.A. Sudarev, V.M. Bouznic, V.L. Kudryavtseva, L. V. Antonova, V.G. Matveeva, Y.G. Anissimov, S.I. Tverdokhlebov // Mater. Chem. Phys.– 2016.– V. 182.– P. 338–346.
4. Effect of fluid relaxation time of dilute polymer solutions on jet breakup due to a forced disturbance / Y. Christanti, L.M. Walker // J. Rheol. (N. Y. N. Y).– 2002.– Vol. 46.– № 3.– P. 733–748.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. М.В. Пискунов, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ПОДАВЛЕНИЕ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО ЛЕСНОГО И ТОРФЯНОГО ПОЖАРА СОСТАВАМИ НА ОСНОВЕ ВОДЫ

Р.М. Курапов  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова, группа 5БМ13

Лесные пожары каждый год возникают на территории России, унося множество людских жизней и нанося огромный материальный ущерб [1–3]. Впоследствии это приводит и к торфяным пожарам, которые могут продолжаться в любое время года. На практике для тушения лесоторфяных пожаров используют воду в качестве огнетушащего состава. Однако такой способ требует доступ к большим объемам воды. С целью уменьшения расходов воды и ускорения тушения к воде добавляют различные химические составы. Широкое применение получили следующие химические добавки: пенообразователь, бишофит, ФР-Лес, ОС-5, антипирен, бентонит. Целью работы являлось определение оптимальных условий прекращения пламенного горения и термического разложения при воздействии на лесной и торфяной пожар огнетушащих составов на основе воды.

Воду смешивали с типичными огнетушащими химическими составами. В исследовании рассмотрены: эмульсия пенообразователя (5 % масс.), раствор ФР-Лес (20 % масс.), раствор антипирена (5 % об.), раствор огнетушащего состава ОС-5 (15 % масс.), суспензия бентонита (5 % масс.), раствор бишофит (10 % масс.). В качестве горючих материалов использовались: смесь лесного горючего материала (ЛГМ), торф. В данной работе масса очага составляла 30 г, размеры навесок горючего материала для торфа и смеси ЛГМ соответствовали площадям 25 см<sup>2</sup> и 324 см<sup>2</sup>. Плотность торфа  $\rho_T = 300\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ , смеси лесного горючего материала  $\rho_L = 30\text{--}87 \text{ кг/м}^3$ .

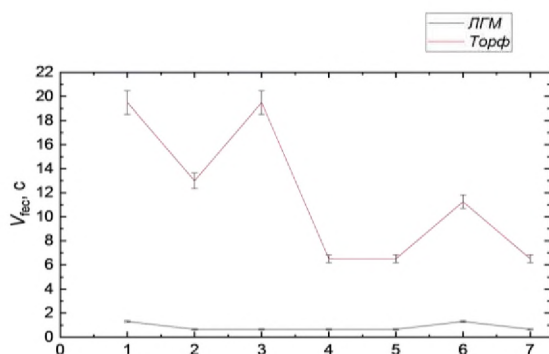


Рис. 1. Необходимый объем огнетушащего состава для тушения очага ЛГМ и торфа (массой 30 г):

1 – вода; 2 – пенообразователь;  
3 – раствор бишофита; 4 – раствор ФР-Лес;  
5 – раствор антипирена; 6 – раствор огнетушащего состава ОС-5; 7 – суспензия бентонита

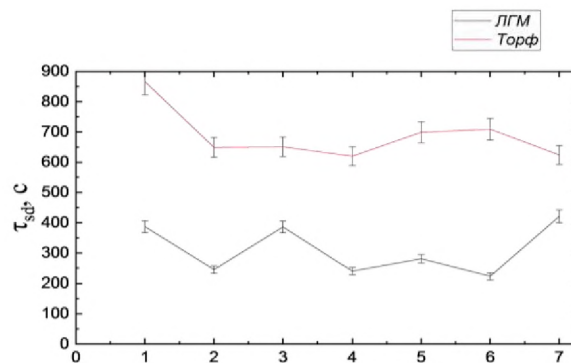


Рис. 2. Времена подавления термического разложения модельных очагов ЛГМ и торфа (массой 30 г):

1 – вода; 2 – пенообразователь; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ФР-Лес;  
5 – раствор антипирена; 6 – раствор огнетушащего состава ОС-5; 7 – суспензия бентонита

В ходе экспериментального исследования установлены необходимые объемы огнетушащих составов для подавления реакции термического разложения модельных очагов (рисунок 1). При тушении смеси ЛГМ наиболее эффективными оказались следующие вариации распыления: воды и раствор бишофита необходимо минимум 2 впрыска ( $V_{огт}=1,3 \text{ мл}$ ), раствора пенообразователя (5 %), ФР-Леса (20 %), антипирена (5 %), ОС-5 (15 %), суспензии бентонита

(5 %) потребовалось 1 впрыск ( $V_{\text{fec}}=0,65$  мл). Для тушения торфяного пожара самыми эффективными растворами были ФР-Лес, антипирен, бентонит. Для полного подавления фронта тления было достаточно 10 впрысков ( $V_{\text{fec}}=6,5$  мл). Так же определено среднее время тушения очага для каждого состава (рисунок 2).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году»// МЧС России. 2021. URL: <https://www.mchs.gov.ru/uploads/document/2021-05-07/2f6a02740e1048c96604666552d7c80a.pdf>.
2. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires extinguish using aviation / N.P. Kopylov, E.A. Moskvilin, D. V. Fedotkin, P.A. Strizhak // Lesotekhnicheskii Zhurnal / Forestry Engineering Journal. – 2016. – V. 6. – P. 62-67.
3. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires extinguish using aviation / N. Kopylov, E. Moskvilin, D. Fedotkin, P. Strizhak // Forestry Engineering Journal. – 2016. – 2017. – V. 6. – P. 62-67.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-79-00030, <https://rscf.ru/project/21-79-00030/>).

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А.О. Жданова, доцент ИШФВП ТПУ.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Н.В. Абрамов  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, группа А2-46

Камера сгорания ГТД является ключевой деталью, обеспечивающей высокие экологические, эксплуатационные и надёжностные показатели энергетических установок, понимание и прогнозирование физико-химических процессов в них необходимо для обеспечения заданных характеристик, а также для удовлетворения норм вредных выбросов.

Широкое внедрение численного моделирования позволяеткратно сократить затраты на проектирование и испытания перспективных конструкций камер сгорания ГТД, а также позволяет исследовать влияние различных факторов на целевые параметры работы установки. Что в свою очередь уменьшает трудовые и материальные затраты на разработку.

Сокращение выбросов оксидов азота и углеродосодержащих соединений само по себе является сложной инженерной задачей поскольку мероприятия направленные на снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  противоположны мероприятиям по снижению выбросов  $\text{CO}$  и  $\text{C}_x\text{H}_y$ , что в свою очередь приводит к тому, что любая конструкция камеры сгорания представляет собой компромиссное решение.

Одной из основных проблем при проектировании малоэмиссионных камер сгорания (МКС) является отсутствие завершённой теории сжигания топлива и аналитического расчёта процесса, в результате, в отличие от теории расчёта работы лопаточных машин, зачастую применяется опытный «интуитивный» подход, что в последствии приводит к неточностям и ошибкам, приводящим к удорожанию и усложнению работ по испытаниям. В результате многие ведущие производители газотурбинных двигателей развивают свои подходы к созданию и испытанию МКС [1].

Решение проблемы прогнозирования параметров МКС в первую очередь связано с наличием актуальной базы по исследованиям рабочего процесса, а также организации горения топлива в рабочих условиях, наличием современного измерительного и обрабатывающего оборудования, а значит связано с большими финансовыми затратами.

Для удовлетворения требований к разработке численных моделей выбран программный комплекс ANSYS Fluent, как широкодоступный и универсальный инструмент для проведения численных расчётов связанных с выделением энергии.

Целью данного исследования является создание методологии расчёта малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей на основе применения программных комплексов математического моделирования физико-химических процессов.

Объект исследования – камера сгорания ГТД 16 МВт.

На основании разработанной модели построены зависимости распределения температур по длине камеры сгорания (рисунок 1), а также зависимость концентрации  $NO_x$  от длины жаровой трубы (рисунок 2). Данные зависимости в купе с визуализацией результатов исследования позволяют с достаточной точностью судить об эффективности и качестве работы камеры сгорания ГТД, выявлять проблемные зоны, а также прогнозировать рабочие и эксплуатационные характеристики.



Рис. 1. Распределение концентрации  $NO_x$  по длине камеры сгорания

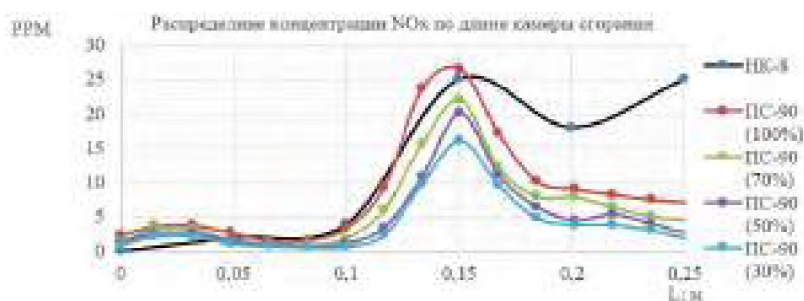


Рис. 2. Распределение концентрации  $NO_x$  по длине камеры сгорания

Согласно заявленной цели работы выполнена разработка численного исследования физико-химических процессов в камере сгорания газотурбинной установки мощностью 16 МВт основе методик конечно-элементного анализа. В результате разработки физико-математической модели выявлены основные законы и зависимости, по которым производится моделирование, особое внимание уделено описанию уравнений энергии и течения газа, так как они наиболее важны при решении поставленной задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Цыбизов Ю.И. Технология малоэмиссионного сжигания топлива и конструктивный облик камеры сгорания газотурбинной установки / Д.Д. Тюлькин, И.Е. Воротынцев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – № 8. – С. 107-120.



2. Bulysova L.A. Computational Studies of the Operating Conditions of a Combustor with Staged Combustion of Fuel-Air Mixture / L.A. Bulysova // Power Technol. Eng. – 2020. – № 5. – С. 574-580.
3. Aleksandrov Y.B. Optimal design of a combustion chamber of gas turbine engine by a Combustion chamber 1D-2D computer program / Y.B. Aleksandrov // Materials Science and Engineering. – 2017. – № 1. – P. 220-241.
4. Зубрилин И.А. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки / И.А. Зубрилин // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – № 3 – С. 124-136.

Научный руководитель: к.т.н. Гиль А.В., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕЙ И ШЛАМОВ В ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

В.В. Дорохов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

**Введение.** В связи с ежегодно увеличивающимся антропогенным давлением на окружающую среду, актуальным направлением исследований в области энергетики является разработка экологически эффективных технологий сжигания угольных топлив. Одним из способов решения данной задачи является замена традиционных схем подачи угольной пыли в топочные камеры энергетических установок на впрыск водосодержащих суспензионных топлив. Присутствие воды в камерах сгорания позволяет существенно снизить концентрации газовых выбросов. Однако возможно несколько технологических решений по концентрациям компонентов и схемам подачи воды в топочные камеры энергетических установок. Представляет интерес изучение влияния схемы подачи воды в камеру сгорания на характеристики процессов зажигания и горения угольных топлив. В рамках настоящего исследования реализованы три наиболее перспективные схемы сжигания топлива: (i) отдельный ввод частиц угля и капель воды в камеру сгорания; (ii) впрыск водяного пара в зону горения частиц угля; (iii) подача в топку ввод в топку водоугольных суспензий.

Целью данной работы является изучение влияния способа подачи воды в камеру сгорания на характеристики горения угольных топлив. Выполнена сравнительная оценка трех способов подачи воды (вода в составе суспензии, параллельная подача воды и угольного компонента, создание паровоздушной среды) в камеру сгорания с использованием методики многофакторного анализа (MCDM). В качестве критериев сравнения были выбраны времена задержки газофазного ( $\tau_{d1}$ ) и гетерогенного ( $\tau_{d2}$ ) зажигания, максимальные ( $T_g^{\max}$ ) и минимальные ( $T_g^{\min}$ ) температуры горения, полнота выгорания, концентрации основных антропогенных выбросов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ).

### **Экспериментальное исследование.**

В качестве угольных компонентов выбирались каменный уголь марки «К» (коксуемый) Березовского месторождения Кемеровской области и угольный шлак, полученный при обогащении угля аналогичной марки.

На рисунке 1 представлена схема стенда, используемого для определения состава дымовых газов при варьировании способа подачи воды и угольного компонента в камеру сгорания. Сжигание исследуемых топлив проводилось в электрической трубчатой муфельной печи Nabertherm R 50/250/13 (внутренний диаметр керамической трубки 0,04 м, длина 0,45 м; диапазон варьирования температуры 20–1200 °С; температура регулируется по сигналу встроенной термопары типа S). Для анализа состава газа применялся газоанализатор Test 1, в который установлены электрохимические сенсоры  $\text{O}_2$  (диапазон 0–25 %, абсолютная погрешность  $\pm 0,2$  %),

CO (диапазон 0–40000 ppm, относительная погрешность  $\pm 5\%$ ), SO<sub>2</sub> (диапазон 0–1000 ppm, относительная погрешность  $\pm 5\%$ ), NO (диапазон 0–2000 ppm, относительная погрешность  $\pm 5\%$ ), NO<sub>2</sub> (диапазон 0–500 ppm, относительная погрешность  $\pm 7\%$ ), H<sub>2</sub>S (диапазон 0–500 ppm, относительная погрешность  $\pm 5\%$ ), HCl (диапазон 0–2000 ppm, относительная погрешность  $\pm 5\%$ ). Дополнительно газоанализатор оснащен оптическими сенсорами CO<sub>2</sub> (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность  $\pm 2\%$ ), CH<sub>4</sub> (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность  $\pm 5\%$ ), CO (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность  $\pm 5\%$ ) и полярографическим сенсором H<sub>2</sub> (диапазон 0–5 %, абсолютная погрешность  $\pm 5\%$ ). В состав прибора входят модульный зонд, конденсатосборник и система фильтрации для осушения и очищения газовой пробы. Для подачи топлива в камеру сгорания использовался координатный механизм, управление которым осуществлялось через компьютер. На него устанавливалось программное обеспечение Test 1, которое позволяло в режиме реального времени отслеживать изменение концентраций антропогенных газов в процессе горения.

При проведении экспериментов на панели управления муфельной печью устанавливалась требуемая температура в рабочей зоне камеры сгорания: 700, 800 или 900 °C. После нагрева печи до заданной температуры топливо при помощи координатного механизма подавалось в камеру сгорания. Для реализации разных способов подачи топлива использовались несколько типов держателей (выносные элементы на рисунке 1). Одновременная подача воды и угольного компонента осуществлялась на горизонтальных подложках. Для создания паровой среды применялся специализированный генератор пара. Впрыск пара осуществлялся через отверстие, которое использовалось для ввода топлива в печь. Суспензия подавалась на держателе, выполненном в виде совокупности тонких стержней, на которые подвешивались капли. Масса топлива для каждого из перечисленных вариантов подачи поддерживалась на постоянном уровне и составляла 0,2 грамма (следовательно, масса угольного компонента – 0,1 грамма, масса воды/пара также 0,1 грамма). Таким образом, количество капель суспензий и их масса выбирались из условий равенства общей массы топлива, сжигаемого в печи. После ввода топлива в печь отверстие закрывалось плотным слоем теплоизолирующего материала. С обратной стороны в аналогичное по размерам отверстие встраивался модульный зонд газоанализатора, и также закрывалось материалом. В ходе зажигания и горения дымовые газы через модульный зонд поступали в корпус газоанализатора (проходя стадии осушения и фильтрации), где происходило измерение концентраций компонентов газовой смеси. После окончания каждого эксперимента газовые каналы и пространство муфельной печи продувались свежим воздухом для удаления остатков пробы. В рамках одной серии выполнялись от 5 до 10 экспериментов, после чего данные анализировались, исключались грубые ошибки, оценивались погрешности. Определение средних по времени концентраций газов осуществлялось с помощью метода трапеций.

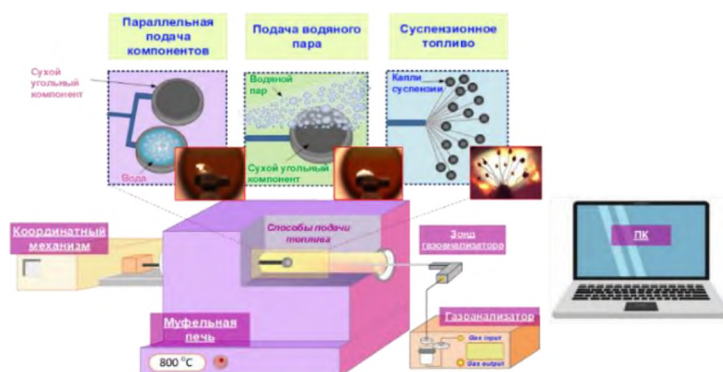


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Характеристики процессов зажигания и горения регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro C110 (запись велась со скоростью 1000 кадров в секунду и разрешением 800x600 пикселей), а также тепловизора (Testo 885-2). Данное оборудование устанавливалось на месте газоанализатора. При обработке полученных видеозаписей

определялись следующие характеристики горения: времена задержки газофазного и гетерогенного зажиганий, а также длительности горения топлива. Тепловизионная съемка использовалась для определения максимальных температур горения твердого коксового остатка топлива. Подробное описание данной методики представлено в [1].

**Результаты и обсуждение.** Для определения наиболее эффективного топлива с учетом полученных энергетических и экологических характеристик вычислены значения относительных показателей эффективности. Использовался метод взвешенных сумм, состоящий из нескольких этапов [2]. Выбралось наилучшее значение по каждому из регистрируемых параметров. Затем значения всех параметров нормировались относительно наилучшего значения, показатель эффективности которого в результате равнялся 1. Для задержки газофазного и гетерогенного зажигания, температуры зажигания и концентраций антропогенных выбросов наилучшим значением являлось минимальное в серии. Для коэффициента выгорания и максимальной температуры горения в качестве наилучшего выбиралась максимальная величина в серии. На заключительном этапе относительный показатель эффективности рассчитывался с применением выражения:

$$A_n = \sum w_j \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

где  $w_j$  – весовой коэффициент каждого параметра,  $x_{ij}$  – нормализованное значение параметра.

Сумма всех весовых коэффициентов составляла 1. В рамках настоящего исследования все весовые коэффициенты принимались равными. Наилучшим при таком подходе является топливо, показатель эффективности которого ( $A_n$ ) максимален. Результаты вычислений представлены на рисунке 2. Показано изменение комплексного показателя эффективности для трех исследуемых способов сжигания угольных компонентов и воды при варьировании температуры в камере сгорания. Во всем исследованном диапазоне температуры в печи значения полученных коэффициентов для суспензии превышали аналогичные значения для топлив, сжигаемых в паровой и воздушной среде, на 7–35 % и 34–47 %, соответственно. Данный результат обосновывает высокую перспективность сжигания топливных суспензий, особенно на основе угольных шламов, вследствие возможности существенного снижения времени газофазного и гетерогенного зажигания, минимальных температур зажигания, концентраций антропогенных газов, а также потерь из-за неполного выгорания.

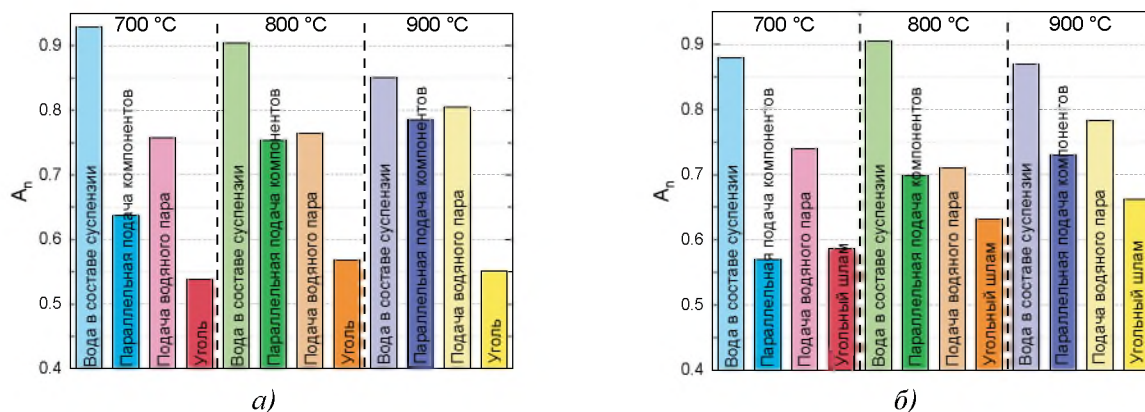


Рис. 2. Показатели эффективности исследуемых топлив:  
а) на основе угля; б) угольного шлама

С целью иллюстрации вклада каждой составляющей в коэффициент  $A_n$  на рисунке 3 приведена векторная диаграмма для топлив на основе шлама, так как при сравнении двух угольных компонентов (рисунок 2) при температуре 800 °C и 900 °C именно суспензии на основе шлама характеризовались наибольшими показателями эффективности. Согласно полученным данным (рисунок 2) видно, что шесть из восьми рассмотренных относительных показателей для суспензии характеризуются максимальными значениями. Площадь поверхности на векторной диаграмме для суспензии больше, чем для двух других рассмотренных способов сжи-

гания шлама и воды. Наибольший вклад в отмеченное увеличение вносят показатели по задержкам гетерогенного зажигания ( $\tau_{d2}$ ), показатель выгорания ( $\bar{m}$ ) и выбросам оксидов углерода.

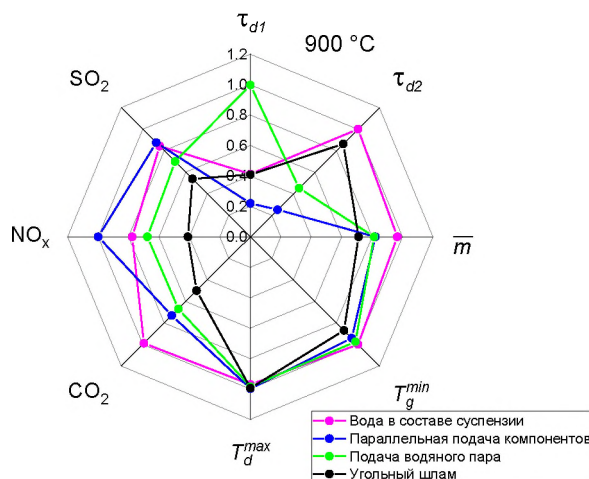


Рис. 3. Показатели эффективности исследуемых способов сжигания угольного шлама и воды (при температуре в камере сгорания 900 °С)

**Заключение.** Вычисленные значения комплексных показателей эффективности показали, что наиболее предпочтительной схемой сжигания угольных топлив является создание водосодержащих суспензий на их основе. Совокупный показатель, объединяющий энергетические и экологические характеристики сжигания для суспензии на 7–47 % выше, чем для других рассмотренных вариантов. Наибольшая эффективность зафиксирована для суспензий на основе шлама в диапазоне температуры от 800 до 900 °С. Поэтому использование низкосортных угольных отходов для распыления водных суспензий может быть очень перспективной технологией. Парогазовая среда в камере сгорания, содержащая высокие концентрации  $H_2O$ , улучшает характеристики процесса инициирования горения, общую реакционную способность и снижает антропогенные выбросы при горении угольных топлив. Имеются достаточно большие основания для развития технологий сжигания спреев из топливных суспензий на основе углей и угольных шламов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Akhmetshin M.R., Nyashina G.S. and Strizhak P.A. Normalizing anthropogenic gas emissions from the combustion of industrial waste as part of fuel slurries // Fuel. Elsevier, 2021. P. 122653.
2. Vershinina K., Dorokhov V., Romanov D., et al. Multi-Criteria Efficiency Analysis of Using Waste-Based Fuel Mixtures in the Power Industries of China, Japan, and Russia // Appl. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, No. 7. P. 2460.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. П.А. Стрижак, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ СМЕСЕЙ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ И ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

А.А. Гусев

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б93

Одной из основных причин нынешнего экономического кризиса в мире является резкое подорожание и снижение доступности базовых энергетических ресурсов. В связи с этим, все большую актуальность набирают исследования по использованию промышленных и сельскохозяйственных отходов в качестве топлива [1, 2]. Отходы лесной и деревообрабатывающей промышленности являются доступным топливом, обладающим привлекательными экологическими показателями в отличие от каменного угля и прочих ископаемых видов топлива. Количество диоксида углерода, производимого при сгорании древесины, не превышает того, что поглощалось деревом из биосферы в процессе роста, т. е. реализуется замкнутый углеродный обмен. С другой стороны, для наиболее эффективного использования опилок необходимо провести их предварительную переработку (производство пеллет, топливных брикетов или древесного угля). Такое топливо уступает по своим параметрам каменным углям низких марок, однако, вполне пригодно для использования в домашних хозяйствах.

Применение смесевых топлив позволяет существенно повысить их показатели в сравнении с параметрами чистых исходных компонентов [3]. Смешение опилок с отходами нефтепереработки или отработанными маслами позволяет резко повысить энергетику полученной смеси, утилизировать отходы и получить топливо, мало уступающее топочному мазуту.

В данной работе рассмотрен процесс термохимической конверсии смесей опилок с отработанным моторным маслом, определены оптимальные соотношения компонентов, позволяющие получить генераторный газ с максимальным содержанием горючих метана и монооксида углерода. Преобразование топлива производилось за счет нагрева, осуществляемого с помощью сфокусированного видимого света [4, 5]. Схема установки показана на рисунке 1.

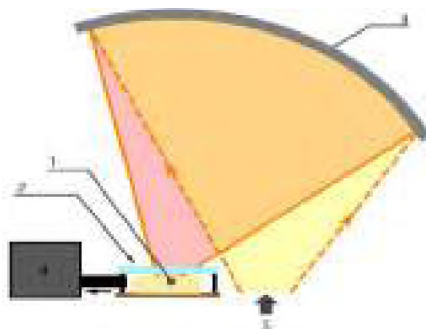


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – топливная смесь, 2 – стекло, 3 – параболическое зеркало, 4 – газоанализатор, 5 – лучи света

Галогеновая лампа мощностью 500 Вт позволяет получить световой поток мощностью до 15 Вт, который фокусировался с помощью параболического зеркала в пятно диаметром полтора миллиметра. В данном случае использовались интенсивности до  $900 \text{ Вт/см}^2$ , что регулировалось током лампы. Сфокусированный свет подавался на поверхность слоя топлива, размещенного внутри камеры-реактора через окно в ее верхней грани. Генераторный газ отводился из камеры через патрубок для дальнейшего анализа. Температуры на поверхности слоя топлива измерялись с помощью тепловизора предварительно откалиброванного с помощью термомпар.

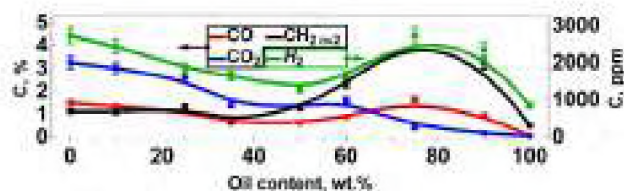


Рис. 2. Зависимость концентраций компонентов генераторного газа от массовой доли отработанного моторного масла

На рисунке 2 представлены зависимости объемных концентраций компонентов генераторного газа от массовой доли масла в составе смеси. Из графика видно, что с ростом доли масла происходит некоторое сокращение газогенерации в целом. Однако, при доле масла порядка 80 вес. % наблюдается заметный рост производства водорода, метана, и оксида углерода при одновременном снижении выработки CO<sub>2</sub>.

Данный факт объясняется, тем, что отмеченное соотношение опилок и нефтепродукта обладает оптимальной композицией теплофизических и термо-кинетических параметров, позволяющей максимально задействовать теплоту реакций окисления углерода. Данный факт также подтверждается измеренными зависимостями характерных температур топлива в процессе термохимической конверсии.

В результате проведенных исследований был определен оптимальный состав квази-возобновляемой топливной смеси (опилки + отработанное моторное масло), позволяющий ее эффективную конверсию в генераторный газ. После 20 минут нагрева, порядка четверти начальной массы топлива было сконвертировано в смесь газов, которая содержала порядка 11% диоксида углерода.

Таким образом, была показана возможность получения горючего газа из смеси отходов деревообрабатывающей промышленности и отработанных нефтепродуктов. Использование мощного светового потока для поддержания процесса конверсии позволяет заключить, что утилизация данных отходов возможна за счет сфокусированного солнечного света. Т. е. экологические показатели предложенного подхода позволяют считать его экологически чистым.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Gasification and Co-gasification of paper-rich, high-ash refuse-derived fuel in downdraft gasifier./ Fazil, A., Kumar, S., Mahajani, S.M./ Energy-2023
2. Enhanced stability of iron-nickel oxygen carriers in biomass chemical looping gasification by core-shell structure/ Liang, S., Liao, Y., Li, W., Li, C., Ma, X./ Chemical Engineering Journal-2023
3. Biomass and cardboard waste-based briquettes for heating and cooking: Thermal efficiency and emissions analysis/ Ferronato, N., Calle Mendoza, I.J., Ruiz Mayta, J.G., Conti, F., Torretta, V./ Journal of Cleaner Production-2022
4. Belonogov, Maxim Vladimirovich. Conversion of the Fuel Compositions of Peat and Rapeseed Oil into Producer Gas / M. V. Belonogov, A. S. Zaitsev, R. I. Egorov // Solid Fuel Chemistry . – 2021. – Vol. 55, No. 6 . – [P. 367-373]
5. Зайцев, Александр Сергеевич. Конверсия отходов углеобогащения, бурых углей и торфа в синтез-газ под действием сфокусированного светового излучения. А.С. Зайцев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет; науч. рук. Р. И. Егоров. – Томск: [Б. и.], 2020. – 22 с.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Р.И. Егоров, н.с. ИШФВП ТПУ.

## HEAT TRANSFER OF FUEL ASSEMBLIES WITH FOUR RODS

А.Г. Коротких, Паримала Ранган Фидел Кастро  
Томский политехнический университет  
ИЯТШ, группа А9-43и

Heat transfer regimes are observed with water at supercritical conditions flowing in vertical channels such as rod bundles are analyzed. The test section consists of two channels separated by a square steel assembly box with rounded corners. Water flows downward in the first channel and then turns upward in the second channel to cool the  $2 \times 2$  rod bundle installed inside the assembly box. The bundle consists of four heated rods. Effects of various parameters on heat transfer behavior inside the  $2 \times 2$  rod bundle are similar to those observed through Ansys. In this paper, we will study the thermohydraulic processes of rod bundles in the region of near-critical and supercritical parameters. The purpose of the work is to compare our calculated results with the experimental data and the results obtained at Ansys, to provide recommendations on the choice of criterion equations Nu for calculating the coefficients of heat transfer and heat transfer from the rod to water at supercritical pressure.

Currently, there is an international GIF IV program (Generation IV International Forum), which formulates the basic concepts for the development of six new types of IV generation reactors (mainly fast neutron reactors with the possibility of implementing a closed fuel cycle). Of greatest interest are fast reactors cooled by liquid sodium or lead, and water-cooled reactors at supercritical pressure of 25 MPa (SCWR), which allow combining the design of a reactor with pressurized water (VVER) and a boiling reactor (RBMK) in a single concept and increase the efficiency (44 % and more). Developments of this type of reactor are underway in 15 countries, including Russia. Development of a reliable method for prediction of heat transfer to fluids with highly variable properties is among the critical engineering problems to be solved in designing promising nuclear power installations with supercritical pressure water [1]. An examination [2] of distributed exploratory information and the specifics of conveyances of the wall temperature and the Heat transfer coefficient along a Heated tube enabled an solution to be made that the flow and heat transfer regimes appeared in tries different things with liquids at close basic circumstances could be separated into typical, deteriorated, and further developed heat transfer regimes. Kurganov et al. [3] thought about that the distinctive feature of heat transfer regimes was that conditions of the heat transfer coefficient on the administering boundaries. [3, 4] of numerous publication on heat transfer regimes to the critical point exhibit that, as of now, the typical Heat transfer systems are concentrated on best of all. Taking into account the previously mentioned conduct of Heat transfer in fluids under supercritical circumstances correlations for anticipating heat transfer in these systems are typically gotten from experimental information utilizing the strategy used in [5–7]. The summed up correlations are created in view of the demonstrated heat transfer coefficient for turbulent flow a fluid with consistent properties. The utilization of supercritical liquids in various cycles isn't new, and is really not a human development. (Stringently talking, a supercritical fluid is a fluid at pressure and temperatures that are higher than the thermodynamic critical values. The SCWR is a once-through type water cooled reactor working over the critical pressure of water (22,1 MPa) and providing supercritical pressure steam at a high temperature to the turbine framework. The plant framework is supposed to accomplish higher thermal efficiency and an easier framework than the current nuclear power stations. Research exercises are progressing overall to foster high level nuclear power stations with SCWR (Oka and Koshizuka2000 [8]; Yoo et al., 2005 [9]; Kamei et al., 2006 [10]; Oka et al., 2007 [11]. One of the primary elements of supercritical water is areas of strength of its thermal physical properties nearby the pseudo-critical line. This enormous variety of thermal physical properties brings about a not usual flow and heat transfer conduct. So the dependable information on the thermal hydraulic conduct at reactor pertinent circumstances is vital for the plan of the SCWR core. Investigations of thermal hydraulic driven conduct of supercritical liquids have been performed since the 1950s. The exploratory and hypothetical investigations on heat transfer at supercritical pressure circumstances were inspected by a few authors.

The test segment comprises of two channels isolated by a square steel gathering box with adjusted corners. Water flows downward in the first channel and then turns upward in the second channel to cool the  $2 \times 2$  rod bundle introduced inside the assembly box. Impacts of different boundaries on heat transfer behavior inside the  $2 \times 2$  rod bundle are alike to those observed in tube or annuli.

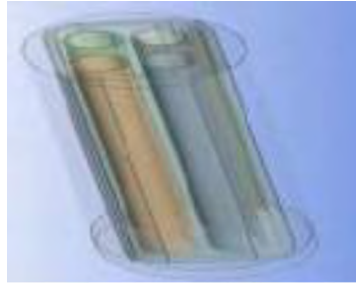


Fig. 1. 3D Model of test section

A stainless tube with 38 mm in inner diameter fills as pressure vessel. There are two channels in the test segment, isolated by a square assembly box with round corners. Water flows downward in the first channel between the pressure vessel and the assembly box, and then flows upward in the second channel inside the assembly box after mixed at the bottom of the test section as shown in figure 1. In many cases it's comfortable to have basic equations for assessment of heat transfer coefficients. Below is a assortment of suggested condition equations for our geometries as well as a few equations for heat transfer processes with change of phase [12, 13]. To decide attributes and conditions of existence of different heat transfer regimes in supercritical pressure water, we analyzed the experimental data for rod bundles. In view of the information estimated in the experiments at various sections along the length of heated channels, we preliminary predicted local Nusselt numbers  $Nu$  which has been utilized below. The following data ought to be prepared as a result of the calculation.

Heat transfer along the length of the rod

$$Q = m c_p (t_f' - t_f), \quad (1)$$

where,  $m$  is the mass flow rate (kg/s),  $c_p$  is specific heat, (J/kg·K),  $t_f$  is the fluid temperature, (°C),  $t_f'$  is the fluid temperature after a certain interval (°C).

$$Q = q \cdot S, \quad (2)$$

where,  $q$  is the heat flux, W/m<sup>2</sup>,  $S$  is the size of the rod, mm<sup>2</sup>.

$$t_f' = t_f + \frac{Q}{m \cdot c_p}. \quad (3)$$

Average temperature

$$t_{avg} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (4)$$

The following are treated and there is equivalent diameters used for estimating the Nusselt and the Reynolds number, beside  $D_h$ . Here is one taken.

Hydraulic diameter

$$D_h = \sqrt{\frac{4 \cdot F_a}{\pi}}, \quad (5)$$

where,  $F_a$  is Flow area, (m<sup>2</sup>)

Flow area (cross sectional area)

$$F_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (6)$$

where,  $D$  is the diameter of the pipe in meters, (m)

Reynolds number is given by

$$Re = \frac{V D_h}{\nu}, \quad (7)$$

where,  $Re$  is the Reynolds number, which is unitless,  $V$  is the velocity in meters-per-second, (m/s),  $D_h$  is the hydraulic diameter of the pipe in meters, (m),  $\nu$  is kinematic viscosity, (m<sup>2</sup>/s).

Mass flow rate

$$m = m_f \cdot F_a, \quad (8)$$



where,  $m_f$  is the mass flux rate ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )

Velocity

$$V = \frac{m_f}{\rho}, \quad (9)$$

where,  $\rho$  is the fluid density, ( $\text{kg/m}^3$ )

Prandtl number

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \quad (10)$$

where,  $\mu$  is dynamic viscosity, ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ),  $\lambda$  is the thermal conductivity, ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).

Nusselt number Correlations

The final expression recommended for predicting heat transfer has the form

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr_{t_f}^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_{t_f}}{\mu_{t_w}} \right)^{0.14}, \quad (11)$$

where,  $\mu_{t_f}$  is dynamic viscosity at  $t_f$ , ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ),  $\mu_{t_w}$  is dynamic viscosity at  $t_w$ , ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

The Nusselt number is calculated as

$$Nu_D = \frac{\alpha \cdot D_h}{\lambda}, \quad (12)$$

where,  $\alpha$  is the heat transfer coefficient, ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

Heat transfer coefficient is calculated by using equation

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu_D}{D_h}. \quad (13)$$

The range of parameters for the calculation of efficiency was taken as pressure  $P= 25$  MPa, heat flux of  $q = 600$   $\text{kW/m}^2$  and mass flux of  $800$   $\text{kg/m}^2\text{s}$ . The determined efficiency fits well with the experimental data. The level of absorbed heat by the water in the primary channel is shown in figure 2. The heat transfer between the two channels decreases with the increment of inlet temperature. This is brought by the little temperature difference between the two channels when the fluid temperature at the inlet. The determined results shows close outcomes with published data [14].

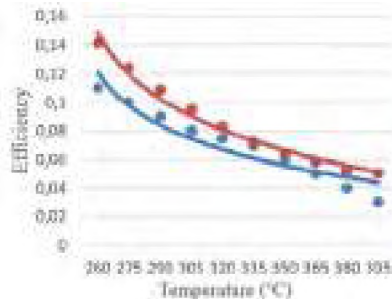


Fig. 2 Comparison of Heat transfer through the channel (Published ● and ● calculated)



Fig. 3. Variation of wall temperatures (●, ●) and fluid temperature(●) along the length

Figure 3 shows wall temperature in the two channels along the length with fluid temperatures. The functioning pressure is 25 MPa. The mass flux is  $800$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  and the heat flux is  $600$  ( $\text{kW/m}^2$ ). The water entering the test area goes downward in the first channel. It is blended in the mixing chamber at the lower part of the test section. Then, it turns and goes upward on the subsequent channel. The wall temperatures in the top and lower part of the channel shows close understanding in the inner

channel while in external channel shows a slight deviation. The wall temperature ranges from 286 °C to 368 °C and the fluid temperature ranges from 300 °C to 340 °C



Fig. 4. Variation of HTC (●, ●) along the length of the rod

The variations of heat transfer coefficient along the length is displayed in figure 4. The heat transfer coefficient shows a ordinary way of behavior. The heat transfer coefficient increases steadily in the inner channel and decreases in the outer channel. The ascent of HTC in inner channel is exceptionally mild contrasted with the HTC in outer channel. The HTC ranges from 9,8 (kW/m<sup>2</sup>K) to 12,46 (kW/m<sup>2</sup>K).



Fig. 5. Comparison of ANSYS Fluid temperature (●) and calculated (●)

Table 1. Results

Z	$t_{f1avg}$	$t_{f1}$ ansys	$t_{f1}$ Error%	$t_{f2avg}$	$t_{f2}$ ansys	$t_{f2}$ Error %
800	300,5258	300	0,00175	340,5931	361,2	0,057051
720	301,519	302,63	0,003671	336,6651	349,09	0,035592
640	302,4018	303,96	0,005126	333,2253	344,08	0,031547
560	303,1807	305,88	0,008825	330,1901	340,92	0,031473
480	303,8558	306,6	0,00895	327,5596	339,88	0,036249
400	304,4271	308,99	0,014767	325,3338	334,92	0,028622
320	304,8944	310,44	0,017864	323,5128	332,96	0,028374
240	305,258	311,88	0,021233	322,0963	325,72	0,011125
160	305,5176	312,48	0,022281	321,0846	320,18	-0,00283
80	305,6734	312,44	0,021657	320,4776	316,21	-0,0135
0	305,7833	312,57	0,020345	319,7342	315,42	-0,0120

### Conclusion

In this work we have compared our calculated results with the experimental data and the results received with Ansys, to provide give suggestions on the model involving criterion equations  $Nu$  for calculating the coefficients of heat transfer and heat transfer from the rod to water at supercritical pressure. The results received through calculation estimation show close relations with the ones acquired through ANSYS.

In comparison with the fraction of heat transfer from the second channel to the first channel with the test conditons, there is a slight deviation. But, it decreases with the inlet water temperature. The impacts of system parameters including heat flux, mass flux and pressure on the heat transfer of supercritical water in the bundle are close and very like to those observed.

## LITERATURE:

1. S.G. Kalyakin, P.L. Kirillov, Yu.D. Baranaev, A.P. Glebov, G.P. Bogoslovskaya, M. P. Nikitenko, V.M. Makhin, and A.N. Churkin. "Prospects for development of an innovative water-cooled nuclear reactor for supercritical parameters of coolant," *Therm. Eng.* 61, 551–557 (2014). doi 10.1134/S0040601514080084/
2. B.S.Petukhov. "Heat transfer in single-phase medium at near-critical parameters," *Teplofiz. Vys. Temp.* 6, 732–745 (1968).
3. V.A. Kurganov, Yu.A. Zeigarnik and I.V. Maslakova, "Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical-pressure coolants. Part I: Specifics of thermophysical properties of supercritical pressure fluids and turbulent heat transfer under heating conditions in round tubes (state of the art)," *Int. J. Heat Mass Transfer* 55, 3061–3075 (2012).
4. I.L. Pioro and R.B. Duffey, *Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications* (ASME, New York, 2007).
5. V.S. Protopopov, "Generalizing dependencies for local heat transfer coefficients with turbulent water flow and carbon dioxide supercritical pressure in uniformly heated round tubes," *Teplofiz. Vys. Temp.* 15, 815–821 (1977).
6. V.A. Kurganov, Yu.A. Zeigarnik, and I.V. Maslakova, "Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants. Part III: Generalized description of SCP fluids normal heat transfer, empirical calculating correlations, integral method of theoretical calculations," *Int. J. Heat Mass Transfer* 67, 535–547 (2013).
7. V. I. Deev, V. I. Rachkov, V. S. Kharitonov, and A. N. Churkin, "Analysis of the correlations for prediction of normal heat transfer to supercritical water flow in vertical tubes," *At. Energ.* 119, 138–144 (2015).
8. Oka, Y., Koshizuka, S., 2000. Design concept of once-through cycle supercritical pressure light water cooled reactors. In: *Proceeding of the SCR, Tokyo, Japan, November 6–8, 2000*, pp. 1–22.
9. Yoo, J., Ishiwatari, Y., Oka, Y., Liu, J., 2005. Composite core design of high power density supercritical water cooled fast reactor. In: *Proceeding of the GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, October 9–13, 2005* (Paper No.246).
10. Kamei, K., Yamaji, A., Ishiwatari, Y., Oka, Y., Liu, J., 2006. Fuel and core design of super light water reactor with low leakage fuel loading pattern. *J. Nucl. Sci. Technol.* 43, 129–219 Oka, Y., Ishiwatari, Y., Koshizuka, S., 2007. Research and development of super LWR and super fast reactor. In: *Proceeding of SCWR-2007, Shanghai, China, March 12–15*, pp. 9–18.
12. Development of supercritical water heat-transfer correlation for vertical bare tubes Sarah Mokrya,\*, Igor Pioro, Amjad Faraha, Krysten Kinga, Sahil Guptaa, Wargha Peimana, Pavel Kirillov b.
13. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels—empirical correlations (survey) Igor L. Pioro\*, Hussam F. Khartabil, Romney B. Duffey<sup>2</sup> Chalk River Laboratories, AECL, Chalk River, Ont., Canada K0J 1J0.
14. Experimental studies on heat transfer to supercritical water in 2 × 2 rod bundle with two channels H.Y. Gu, Z.X. Hu, D. Liu, Y. Xiao, X. Cheng.

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. А.Г. Коротких, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# МЕТОД РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В НЕСУЩЕМ ПОТОКЕ

К.Ю. Арефьев, М.А. Абрамов  
Московский физико-технический институт,  
кафедра ФМ

Гетерогенные потоки применяются в энергетической промышленности и технологическом оборудовании в качестве рабочего тела. В частности, без двухфазных потоков невозможна работа технологических установок для напыления покрытий, резки материалов и пескоструйной обработки поверхностей. Актуальным является решение научно-технических проблем повышения эффективности формирования качественных гетерогенных потоков. Одним из методов решения указанной проблемы является проведение предварительного численного моделирования с целью определения структуры гетерогенных течений с учетом прогнозируемых и вероятностно-случайных факторов, влияющих на пространственное распределение дисперсной фазы.

Ранее, в работах [1–3], авторами был предложен метод дискретно-непрерывного преобразования локализации траекторий частиц на этапе постобработки результатов расчета гетерогенного течения с использованием подхода Лагранжа-Эйлера, что, в итоге, обеспечивает возможность получения локально-непрерывного распределения расходонапряженности конденсированной фазы. Алгоритм обработки результатов расчета основан на вероятностном представлении отклонения возможного движения частиц от базовых траекторий (рисунок 1).

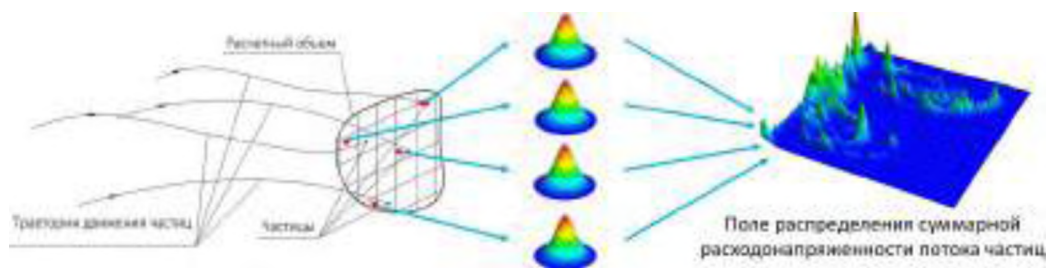


Рис. 1. Схема дискретно-непрерывного преобразования на основе вероятностного подхода

Вместе с тем, дискретно-непрерывное преобразование траекторий кластеров сопряжено с необходимостью получения новых статистических расчетно-экспериментальных данных об отклонении частиц от базовых траекторий кластеров. Следует отметить, что большое влияние на результат анализа оказывают используемые в постобработке функции плотности распределения вероятности отклонения координаты индивидуальных частиц от траекторий кластеров. При использовании в предложенном методе функции плотности двумерного нормального распределения Гаусса отклонение частиц от базовой траектории определяется дисперсией ее координаты (среднеквадратичным отклонением случайной величины координаты пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения  $\sigma$ ).

В рамках настоящей работы предложена методика экспериментального определения  $\sigma$ . Для исследования пространственной локализации частиц предложено использовать экспериментальную сверхзвуковую технологическую установку для газодинамического напыления покрытий [4]. Суть предлагаемой методики основана на предположении о том, что конденсированная фаза при напылении на образец является индикатором структуры распределения частиц в поперечном сечении высокоскоростного двухфазного потока. Основным допущением является то, что форма поверхности соответствует расходонапряженности потока частиц.

Эксперимент проводился при постоянных режимных параметрах работы сверхзвуковой горелки: полное давление газа на входе в сопло горелки  $p^* = 0,7$  МПа; соотношение компонентов, соответствует коэффициенту избытка окислителя  $\alpha = 1$ ; суммарный расход продуктов сгорания  $G = 12,2$  г/с; скоростной напор газа в выходном сечении сопла горелки  $q = 200$  кПа.

Определение характерной величины параметра  $\sigma$  проводится на основе сравнения экспериментальных данных, полученных в результате проведенного исследования на экспериментальной установке, с результатами выполненного математического моделирования данного эксперимента в параметрической постановке. В расчетах проводилось варьирование  $\sigma$ , на основании чего определялось расчетное распределение толщины напыления и проводилось сравнение с распределением экспериментальным. Принято, что эмпирическое значение  $\sigma$  соответствует тому случаю, когда расчетные и экспериментальные значения толщины напыления будут иметь минимальное расхождение.

На рисунке 2 представлены графики распределения относительной толщины напыления в плоскости симметрии, полученные на основе экспериментальных данных и расчетным путем, при различных значениях параметра  $\sigma$ .

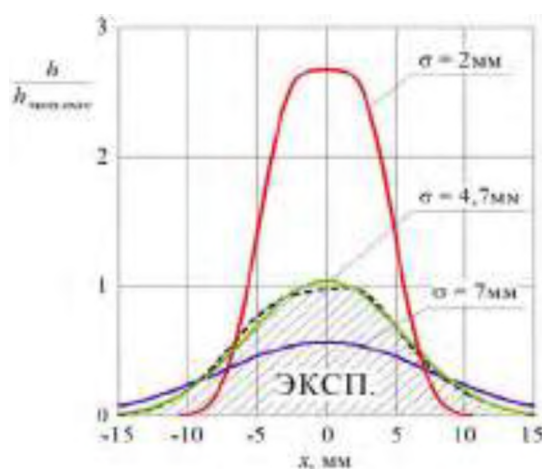


Рис. 2. Графики распределения относительной толщины напыления в плоскости симметрии для экспериментального и расчетных случаев

В результате проведенного следования установлено, что минимальные отклонения формы и толщины пятна напыления для расчетного и экспериментального случаев достигаются при значении среднеквадратичного отклонения пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения  $\sigma$  в диапазоне 4,7...5,5 мм. При этом различие расчетных и экспериментальных данных составляет не более 2 %.

Экспериментально подтверждено, что предложенный алгоритм обработки расчетных данных посредством введения вероятностного подхода при траекторной оценке распределения частиц позволяет с достаточной точностью описывать процессы распределения конденсированной фазы размером 15...40 мкм и плотностью 8190 кг/м<sup>3</sup> в сверхзвуковом (при скоростях  $V > 1500$  м/с) несущем потоке.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Расчетное исследование эффективности инъекции двухфазного потока горючего в цилиндрическую камеру дожигания с несимметричным подводом воздуха / Воронежский А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27. – № 6. – С. 833-851.
2. Параметрическое расчетное исследование влияния вероятностного характера отклонений траекторий частиц на неравномерность их локализации в модельном тракте / Воронежский А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 8. – С. 1-18. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-8-2107.

3. Оптимизация инъекции двухфазных продуктов газификации энергетических конденсированных составов в модельную камеру сгорания малого удлинения / Воронежский А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А., Сон Э.Е. // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – №1. – С. 94-102.
4. Development and Trends in HVOF Spraying Technology / Wielage B., Wank A., Pokhmurska H. // Surface and Coatings Technology. – 2006. – V. 201. – №5. – P. 2032- 2037.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МД-1814.2022.4.

Научный руководитель: д.т.н. К.Ю. Арефьев, в.н.с. кафедры ФМ МФТИ.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПЕЛЕНА ОХЛАДИТЕЛЯ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ PIV**

А.А. Колесова

Рыбинский государственный авиационно технический университет  
группа ТФМ-21

Развитие газотурбинных двигателей связано с ростом температуры газов за камерой сгорания, которая может превышать 2000 К. В связи с этим возникает необходимость в совершенствовании схем охлаждения сопловых и рабочих лопаток турбины как наиболее теплонапряженных деталей двигателя. Однако развитие различных конвективных схем охлаждения не может обеспечить их потребную температуру, в связи с чем, возникает необходимость использования заградительного (пленочного) охлаждения.

Эффективность пленочного охлаждения лопаток турбин зависит от параметров основного и вторичного потока (турбулентности течения, параметра вдува и др.), а также от геометрических параметров отверстий (формы, угла наклона отверстия к стенке) [1]. Основным способом повышения эффективности пленочного охлаждения, является использование профилированных отверстий для вдува газовой завесы. Применение отверстий сложной геометрической формы возможно только на спинке или корыте лопатки, в области входной кромки возможно применение только цилиндрических отверстий.

В научно-технической литературе, представлено большое количество работ по экспериментальному и численному исследованию пленочного охлаждения, которые проводятся, как в упрощенной постановке (модельный эксперимент на плоской или криволинейной поверхности с рядами отверстий для вдува охладителя), так и в натуральных условиях (на реальной лопатке или ее аналоге с отверстиями перфорациями, выполненными в исследуемой области). Численное моделирование пленочного охлаждения в подавляющем большинстве работ выполняется с использованием RANS-моделирования, так как данный метод не требует больших вычислительных затрат и достаточно хорошо предсказывает параметры течения как в ядре потока, так и вблизи стенки. При этом экспериментальные исследования по цели исследования можно разделить на 2 группы:

1. По определению адиабатной эффективности охлаждения проводятся [2].
2. По определению коэффициента теплоотдачи в зоне выдува охлаждающей пелены данные эксперименты проводятся, как правило, на основе метода регулярного теплового режима в нестационарной постановке.

В качестве средства измерения температуры стенки в экспериментах первого и второго типа в последнее время, все чаще, используется компьютерный термограф.

Данные способы экспериментального исследования, дают понимание только о тепловом

состоянии лопатки и не показывают формирования и течения струи охладителя, хотя именно данная информация позволяет выполнить настройку расчетных моделей. Поэтому в последнее время, стали выполнять работы по визуализации структуры течения пелены охладителя методами цифровой трассерной визуализации.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование по визуализации структуры течения пелены охладителя за одиночным отверстием различной геометрической формы (цилиндрической, веерной с длинной расширяющегося участка 1 и 3 калибра, отверстие типа laidback с длинной расширяющегося участка 1 калибр и комбинированное отверстие (веерное – 2d и laidback – 1d) методом PIV. Принцип работы данного метода, заключается что в поток вводятся трассеры (частицы малого размера), лазерным лучем создается плоскость в которой будет выполняться исследование, затем образы частиц регистрируются на высокоскоростную камеру и полученные изображения обрабатываются в программном комплексе с использованием кросскорреляционных алгоритмов [3]. Экспериментальные исследования проводились при варьировании параметра вдува от 0,5 до 2 (1).

$$m = \frac{\rho_{\text{охл}} * V_{\text{охл}}}{\rho_{\text{г}} * V_{\text{г}}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{охл}}$ ,  $\rho_{\text{г}}$  – плотности холодного и охлаждающего воздуха;  $V_{\text{охл}}$ ,  $V_{\text{г}}$  – скорости холодного и горячего воздуха.

Для проведения экспериментального исследования был разработан экспериментальный стенд, состоящий из рабочего участка, вихревой воздуходувки, двухимпульсного лазера, высокоскоростной камеры и синхронизирующего устройства, и компьютера с программным обеспечением. С целью определения особенностей формирования защитной пелены в ходе эксперимента засеивался вторичный поток. Пластины с отверстиями перфорации изготавливались методом 3D-прототипирования из PLA пластика.

В обеспечении экспериментального исследования выполнялась серия расчетов на SST модели турбулентности. По результатам численного исследования получено, что при параметре вдува  $m > 1,5$  происходит отрыв пелены, формируемой отверстиями цилиндрической формы. За цилиндрическим отверстием и веерными отверстиями с коротким диффузорным участком на расстоянии 5 калибров за отверстием происходит подмешивание основного потока к защищаемой поверхности, что приводит к снижению эффективности пленочного охлаждения (рисунок 1).

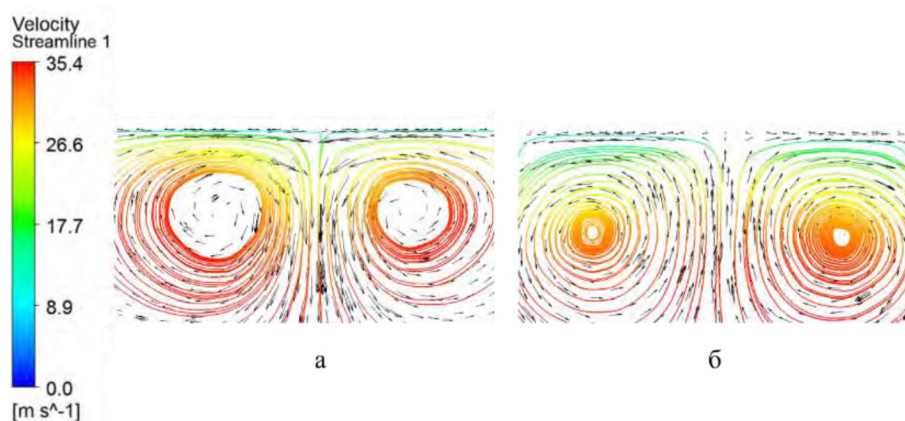


Рис. 1. Распределение скорости на расстоянии 5 калибров за отверстиями: а) цилиндрической формы; б) комбинированной формы

По результатам PIV эксперимента отрыв пелены охладителя за отверстием цилиндрической формы происходит при параметре вдува  $m > 1$ . За отверстием цилиндрической формы и веерными с коротким диффузорным участком наблюдалась зона обратных токов при параметре вдува от 0,5 до 2, за отверстиями с длинным диффузорным участком данного явления не наблюдается.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Нестеренко, В.Г. Конструктивные методы совершенствования системы пленочного охлаждения рабочих лопаток ВРД/ В.Г. Нестеренко, А.А. Матушкин// Электронный журнал «Труды МАИ», №39. – С. 1-19.
2. Dhungel, A. Film cooling from a row of holes supplemented with anti vortex holes/ A. Dhungel, Y. Lu, W. Phillips, V. Srinath, R. Ekkad, J. Heidmann// Proceedings of ASME Turbo Expo 2007 – Power for Land, Sea and Air.-GT2007-27419.
3. Scarano F., Riethmuller M.L. (1999) Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete offset. Exp. Fluids, Vol. 26, pp. 513-523

Научный руководитель: к.т.н. С.В. Веретенников, доцент кафедры ОиТФ РГАТУ.

## ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОКСОЗОЛЬНОГО ОСТАТКА И КАРБОНИЗИРОВАННЫХ ОПИЛОК ЛИСТВЕННИЦЫ

Д.В. Фалейчик

Сибирский федеральный университет  
ИСИ, кафедра СКиУС, группа СС21-12

Основным топливом для работы котлов и печей малой мощности, используемых для обогрева частного домостроения, применяется уголь. Уголь является доступным и относительно дешевым топливом с известными теплотехническими характеристиками. Во многих областях частный сектор, не подключенный к централизованной системе теплоснабжения, занимает целые кварталы как на окраинах, так и в центре городов. Основной проблемой при сжигании угля в котлах и печах малой мощности является угроза нанесения вреда окружающей среде в том числе и человеку, так как эти устройства не оснащены газоочистным оборудованием, а низкая высота дымовых труб предотвращает необходимое рассеивание не только вредных газообразных веществ, но и мелкодисперсных золовых частиц.

На промышленных предприятиях, применяющих в своем технологическом процессе водяной пар, как правило используют котлы, работающие на мазуте или угле [1]. Такие котлы можно перевести на сжигание генераторного газа путем замены форсунок и установки за котельным корпусом от двух и более газогенераторов периодического действия, производящих генераторный газ, в зависимости от мощности котлов. В качестве топлива для газогенераторов можно использовать уголь, либо отходы от лесоперерабатывающей промышленности. Получившийся в процессе термохимической деструкции твердого топлива генераторный газ будет сжигаться в котлах, оборудованных газовыми форсунками, вырабатывая водяной пар для технологических нужд. Твердый остаток в виде карбонизата или биотоплива можно использовать как основное топливо для АИТ. Основными преимуществами карбонизированных остатков перед типичными топливами для АИТ является низкое содержание летучих веществ, что делает его бездымным. Для расширения теоретической и экспериментальной базы новых альтернативных топлив для АИТ необходимо провести теплотехнический и элементный анализ, а также установить характеристики их горения.

Цель данной работы заключалась в комплексном анализе карбонизатов полученных из балахтинского угля и древесины лиственницы, включающих в себя проведение теплотехнического и элементного анализа, а также установление характеристик горения с помощью термогравиметрического анализа для расширения теоретической и экспериментальной базы новых топлив.

В качестве объектов исследования выбраны следующие топлива (рисунок 1):

1. Карбонизат полученный путем полной газификации балахтинского угля (далее КЗО);



## 2. Биотопливо, полученное путем газификации древесины лиственницы (далее БИО).

Исследуемые топлива были получены в экспериментальном реакторе периодического действия, работающего по принципу обратной тепловой волны, в качестве окислителя использовался воздух.

Характеристики топлив исследованы после достижения ими воздушно-сухого состояния. Для получения дисперсности 100–200 мкм, топлива вначале измельчались в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Германия), а затем просеивались на установке RETSCH AS 200 BASIC (Германия). Теплотехнический и элементный анализ определялись по следующим ГОСТ: ГОСТ 8.649-2015, ГОСТ 55661-2013, ГОСТ 55660-2013, ГОСТ 32979-2014, ГОСТ 147-2013, ГОСТ 32979-2014, ГОСТ 27313-2015. Основные теплотехнические характеристики и элементный состав приведены в таблице 1.



Рис. 1. Объекты исследования:  
а) карбонизат; б) биотопливо

Термогравиметрический анализ образцов проводился с применением термоанализатора SDT Q600 (США). Термограммы снимали для навесок массой 6 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20 °С/мин. Основные характеристики горения определяли при помощи программы Universal Analysis 2000 (США). Температуры воспламенения и выгорания были определены с помощью метода пересечения кривых [2]. Результаты термогравиметрического анализа представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

Теплота сгорания биотоплива выше, чем у карбонизата почти в два раза за счет высокой теплоты сгорания лиственничной смолы, которая выделилась в процессе термохимической деструкции в реакторе, содержание летучих веществ ниже, чем у карбонизата в 2,5 раза. Содержание летучих веществ в карбонизате почти в 4 раза ниже, чем у балахтинского угля. Зольность карбонизата выше, чем биотоплива более чем в 2 раза (таблица 1).

Убыль массы у карбонизата (КЗО) начинается в области более низких температур (330–340 °С) и демонстрирует начало разложения топлива в процессе выхода и горения летучих веществ, убыль массы у биотоплива (рисунок 2а) за счет более низкого содержания летучих веществ (таблица 1) начинается в области более высоких температур (400–410 °С). Температура зажигания топлив находится примерно в одном температурном интервале (таблица 2), температура выгорания биотоплива на 142 °С ниже, чем у карбонизата (таблица 2). Максимальная скорость убыли массы у биотоплива выше, чем у карбонизата на 31 % выше, чем у карбонизата и находится в области более низких температур, что свидетельствует о высокой реакционной способности биотоплива, так как реакционная способность топлива прямо пропорциональна температуре ( $T_{\max}$ ) соответствующей максимальной скорости убыли массы ( $DTG_{\max}$ ).  $T_{\max}$  биотоплива на 35 °С ниже, чем у карбонизата.

Таблица 1. Характеристики твердых топлив

Топлива	$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$	$Q_i^r$ , МДж/кг
	%								
КЗО	2,5	14,6	11,8	92,8	0,74	1,14	0,6	4,7	15,10
БИО	1,3	6,0	4,7	97,1	1,8	0,2	0,1	0,9	32,64

Таблица 2. Характеристики горения топлив

Топлива	Температура воспламенения, °С	Температура выгорания, °С	$DTG_{\max}$ , %/мин	$T_{\max}$ , °С
КЗО	477	688	15,8	563
БИО	469	546	20,8	528

\*  $T_{\max}$  – это температура, соответствующая максимальной скорости, убыли массы, °С.

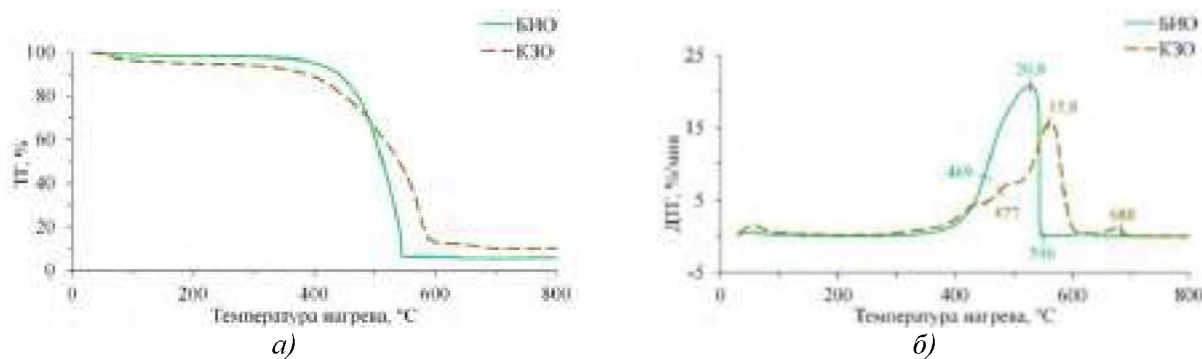


Рис. 2. Горение топлив:  
а) убыль массы; б) скорость убыли массы

### Закключение

Проведенный комплексный анализ термически обработанных промышленных отходов показал, что температура выгорания у биотоплива и карбонизата примерно одинакова, но при этом содержание летучих веществ у биотоплива в 2,5 раза меньше, что делает его более бездымным по сравнению с карбонатом. Зольность карбонизата в 2,4 раза выше зольности биотоплива, это означает, что при сжигании карбонизата будет оставаться больше зольного остатка, который нужно будет утилизировать на специализированных полигонах. Еще одним достоинством биотоплива, полученного из древесины лиственницы является его высокая теплота сгорания.

Для работы автономных источников теплоснабжения целесообразно применять биотоплива, полученные путем карбонизации взамен типичных твердых топлив.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Experience of Using Synthetic Gas as the Main Fuel in an Industrial Heating Boiler House / A.V. Zhuikov, A.I. Matyushenko, V.I. Panfilov, O.E. Nastevich // Power Technology and Engineering. – 2021. – V. 55. – P. 92–95.
2. The effect of cellulose on the combustion characteristics of coal slime: TG-FTIR, principal component analysis, and 2D-COS / Z. Ni, Z. Song, H. Bi, C. Jiang, H. Sun, Z. Qiu, L. He, Q. Lin // Fuel. – 2023. – V. 333. – 126310.
3. Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products / E. Garcia, I.F. Ejim, H. Liu // Thermochemica Acta. – 2022. – V. 715. – 179296.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Жуйков, доцент ИСИ СФУ.

# ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ НА ЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Л.М. Хайнак, А.В. Астафьев, А.А. Слоновская  
Тюменский государственный университет  
ИЭСБ (X-BIO), ГИКР

## Введение

В настоящее время одной из главных проблем человечества является большое количество отходов в различных секторах промышленности и экономики. Только в 2021 году в России было образовано 50 615,3 тыс. т отходов от сельского, лесного хозяйств, охоты, рыболовства и рыбоводства [1]. Столь большие объемы требуют утилизации по ряду причин. Хранение органических отходов на полигонах приводит к их гниению и образованию токсических веществ, оказывающих негативный эффект на окружающую среду. Помимо этого, происходит выделение огромного количества парниковых газов.

Одним из видов утилизации органических отходов является термическая переработка, в частности пиролиз. Во время этого процесса происходит нагрев сырья при высоких температурах в бескислородной среде с получением горючих газов, смол и твёрдого углеродистого остатка (полукокса) [2]. Последний имеет широкий спектр применений: в энергетической отрасли – в качестве топлива; в химической промышленности – получение активированного угля и сорбентов, улавливающих загрязняющие вещества; в области сельского хозяйства – внесение в почву для удержания влаги и использование в качестве удобрения [3, 4, 5]. Последнее направление актуально еще и тем, что позволяет депонировать углерод, что особенно важно в связи с глобальным потеплением.

Процесс пиролиза сопровождается затратами энергии. Чтобы рассчитать количество теплоты, необходимое для его проведения, нужно знать теплофизические характеристики (ТФХ) сырья, в частности теплоёмкость. В связи с этим целью работы является определение теплофизических характеристик различных видов органического сырья и углеродистого остатка их пиролиза и расчет тепловых затрат процесса на основании этих данных.

## Методика исследований

Объектом исследования являются несколько видов биомассы (отруби, опилки, солома, скорлупа кедрового ореха, навоз), а также для сравнения торф и бурый уголь. Согласно ГОСТ Р 56881-2016 определена зольность биомассы, согласно ГОСТ Р 55661-2013 – зольность торфа и бурого угля. Согласно полученным результатам по степени минерализации исследуемое сырьё можно разделить на три группы – низко-, средне- и высокозольное (таблица 1).

Таблица 1. Зольность исследуемого сырья

Сырьё	Низкозольное				Среднезольное	Высокозольное	
	Скорлупа	Опилки	Солома	Отруби	Навоз	Бурый уголь	Торф
Зольность, А <sup>d</sup> , %	0,69	0,9	3,94	5,68	15,64	22,59	25,65

Для определения теплофизических характеристик органического сырья использовали успешно применяемый для этих целей метод лазерной вспышки на анализаторе температуропроводности DLF-1200 (TA Instruments, США). Схема эксперимента представлена на рисунке 1. Исследуемое сырьё измельчали, просеивали, после чего из полученной мелкой фракции (0,2– 1,0 мм) путем прессования при давлении 640 МПа изготавливали образцы. Также данную фракцию сырья подвергали пиролизу при температуре 520 °С. Образовавшийся полукокс смешивали с 10 % раствором декстрина для склеивания углеродистого остатка и дальнейшего прессования. Для воспроизводимости результатов в анализатор помещали по три полученных образца, а также стандартный образец ругех 7740 (Netzsch), теплофизические характеристики которого известны. Для исключения влияния влажности окружающей среды на теплофизические характеристики анализ проводили при температуре 100 °С.

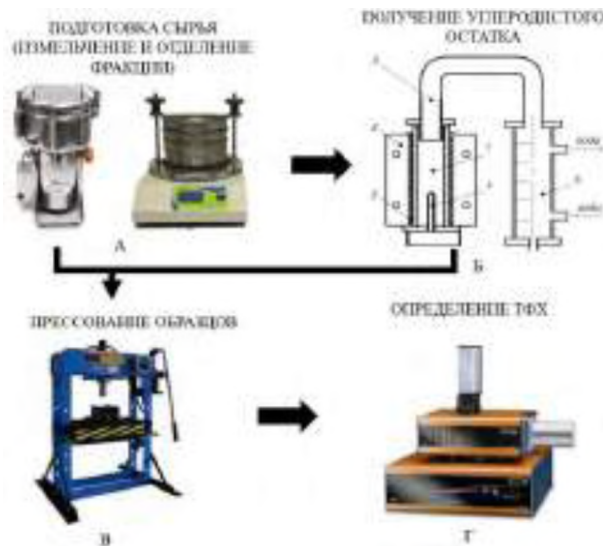


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по определению теплофизических характеристик: А – мельница VLM-25 и ситовый грохот; Б – лабораторная установка для получения углеродистого остатка: 1 – реактор, 2 – нагревательный элемент, 3 – защитный кожух, 4 – терморара, 5 – силиконовый шланг, 6 – холодильник; В – гидравлический пресс Т61220F; Г – анализатор температуропроводности DLF-1200

Расчёт тепловых затрат проводили согласно формулам (1)-(2). С целью возможности сравнения результатов для различных видов сырья в расчете не учтены затраты на испарение содержащейся в сырье влаги. Это связано с тем, что данный параметр изменяется в зависимости от происхождения сырья, способов хранения, транспортировки и др. факторов.

$$Q_{cr} = 0,5 \cdot (t_p - t_0) \cdot (C_{pb} \cdot \omega_{cr1} + C_{p_{cr}} \cdot \omega_{cr2}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (1)$$

где  $Q_{cr}$  – расход тепла на термическое преобразование исходного сырья в углеродистый остаток;  $t_p$  – температура окончания процесса пиролиза,  $520^\circ\text{C}$ ;  $C_{pb}$  – удельная теплоемкость исходного сырья, определенная экспериментально,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $C_{p_{cr}}$  – удельная теплоемкость углеродистого остатка, определенная экспериментально,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\omega_{cr1} = 1$ ,  $\omega_{cr2}$  – доли углеродистого остатка при температурах  $t_0$  и  $t_p$  соответственно, определяемые из материального баланса пиролиза [6].

$$Q_{vol} = 0,5 \cdot (t_p - t_0) \cdot C_{p_{vol}} \cdot (\omega_{vol1} + \omega_{vol2}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (2)$$

где  $Q_{vol}$  – теплота с выделяющимися летучими продуктами;  $\omega_{vol1} = 0$ ,  $\omega_{vol2} = \omega_{cr1} - \omega_{cr2}$  – доли летучих продуктов при температурах  $t_0$  и  $t_p$  соответственно, определяемые из материального баланса пиролиза [6];  $C_{p_{vol}}$  – средняя теплоемкость летучих продуктов, определяемая по формуле:

$$C_{p_{vol}} = \omega_{cond} \cdot C_{p_{cond}} + \omega_{non-cond} \cdot C_{p_{non-cond}}, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}), \quad (3)$$

где  $C_{p_{cond}} = -0,10 + 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{cp} + 273) - 1,57 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{cp} + 273)^2$  – средняя массовая теплоемкость конденсируемых продуктов,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $C_{p_{non-cond}} = 0,77 + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{cp} + 273) - 1,91 \cdot 10^{-7} \cdot (t_{cp} + 273)^2$  – средняя массовая теплоемкость неконденсируемых продуктов,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $t_{cp}$  – средняя температура в процессе выхода летучих продуктов ( $t_0 \div t_p$ ),  $^\circ\text{C}$ .

### Результаты исследований

По результатам определения ТФХ следует отметить, что по значениям теплоемкости исходное сырье можно разделить на две группы (рисунок 2а): для топлив с низкой зольностью характерны высокие значения ( $> 2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ) по сравнению со средне- и высокзольными топливами ( $< 1,6 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ). Также следует отметить, что полученные результаты согласуются с литературными данными. Например, в работе [7] представлена теплоемкость древесных опилок в диапазоне  $1,8-2,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  в зависимости от давления прессования. По результатам определения теплопроводности (рисунок 2б) наблюдается иная зависимость:

наибольшие значения характерны для высокозольных топлив, наименьшие – у средnezольного топлива (навоза), а низкозольные топлива обладают средними значениями теплопроводности. Зависимостей изменения теплоемкости и теплопроводности углеродистого остатка, образующегося в процессе пиролиза, от степени минерализации исследуемых топлив не выявлено (рисунок 3).



Рис. 2. Теплоёмкость (а) и теплопроводность (б) исследуемого сырья



Рис. 3. Теплоёмкость (а) и теплопроводность (б) углеродистого остатка пиролиза исследуемого сырья

После экспериментального определения ТФХ рассчитаны тепловые затраты, необходимые для получения углеродистого остатка из исследуемого сырья (рисунок 4). Наибольшие тепловые затраты характерны для пиролиза соломы, а наименьшие – для торфа.

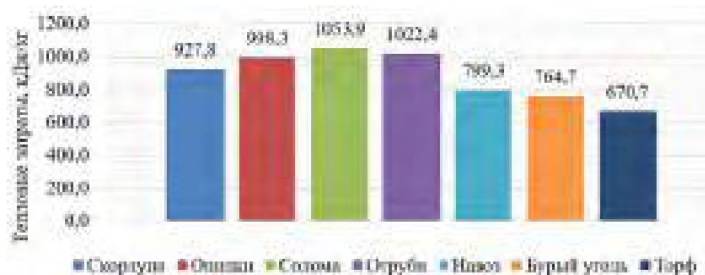


Рис. 4. Тепловые затраты пиролиза

### Заключение

По результатам исследований теплоёмкость исходного сырья составила: для группы низкозольного сырья – 2,09–2,34 кДж/(кг·°С), средnezольного – 1,58 кДж/(кг·°С), высокозольного – 1,27–1,45 кДж/(кг·°С). Тепловые затраты для получения углеродистого остатка из низкозольного сырья составили 927,8–1053,9 кДж/кг, из средnezольного и высокозольного – 670,7–799,3 кДж/кг. Таким образом тепловые затраты на получение углеродистого остатка из низкозольных топлив в 1,3 раза больше по сравнению с аналогичными затратами для средnezольного топлива, в 1,4 раза – для высокозольных топлив.

Бóльшие тепловые затраты процесса пиролиза низкозольных топлив связаны с бóльшими значениями удельной теплоёмкости исходного сырья и углеродистого остатка.

Также на данный фактор влияет выход летучих продуктов пиролиза. Для низкотемпературных и среднетемпературных топлив это значение выше в 1,74 раза, чем для высокотемпературных, в следствие чего тепловые потери с летучими продуктами в среднем в 1,85 раз больше.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. — 685 с.
2. Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий / Массеров Д. А., Кустов М. В. // Отходы и ресурсы. — 2021. — Т. 8. — №. 2. — С. 1-11.
3. Иванкова А.И., Костин Д.В., Хан А.Э., Брикманс А.В., Семаль В.А. Динамика изменения гранулометрического состава агропочв при внесении биоугля (юг Приморского края) // V Национальная (Всероссийская) научно-практическая конференция. — Уссурийск: Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. — С. 17-23.
4. Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А. Комплексная химическая переработка древесины. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. — 74 с.
5. Влияние модификаторов на структурные особенности углеродсодержащих композиционных материалов при карбонизации древесины сосны / С.И. Цыганова, Е.В. Мазурова, Г.Н. Бондаренко, О.Ю. Фетисова // Химия растительного сырья. — 2016. — № 4. — С. 143–150.
6. Thermal enrichment of different types of biomass by low temperature pyrolysis / R.V. Tabakaev, K.T. Ibraeva, A.V. Astafev, Yu.V. Dubinin, N.A. Yazykov, A.S. Zavorin, V.A. Yakovlev // Fuel. — 2019. — V. 245. — P. 29-38.
7. Стенин В.А., Ершова И.В., Светлов А.С. Метод эквивалентных материалов в исследовании деформаций футеровки котла // Международный научный форум. — Москва: Инфинити, 2020. — С. 105-111.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии).

Научный руководитель: к.т.н. И.И. Шаненков, зав.лаб. РЭТТПБ ТюмГУ.

### **ВЛИЯНИЕ ДИСТАНЦИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦЕЛЕВОМ КАНАЛЕ МАЛОЙ ШИРИНЫ НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В НЁМ**

А.В. Костюков, Л.А. Косач  
Московский политехнический университет  
ТФ, ЭдТиМЭ

В настоящее время малоразмерные газотурбинные двигатели (микротурбины) получили достаточно широкое распространение. Являясь многоцелевыми источниками энергии, они могут использоваться в качестве основного элемента наземных энергетических установок, либо работать в составе силовых установок или вспомогательных источников питания транспортных средств и т. д. Основным недостатком микротурбин, работающих по простому циклу га-

зотурбинного двигателя, является сравнительно низкая по отношению к поршневым двигателям аналогичного назначения топливная экономичность. Использование в составе микротурбин теплообменников различных конфигураций даёт возможность добиться уровня топливной экономичности, позволяющего конкурировать с поршневыми двигателями внутреннего сгорания [1, 2, 3]. Очевидно, что увеличение топливной экономичности будет напрямую зависеть от тепловой эффективности теплообменника, которая оценивается с помощью степени регенерации:

$$\sigma_r = \frac{T_{x\_вых} - T_{x\_вх}}{T_{г\_вх} - T_{x\_вх}} \quad (1)$$

В данном выражении  $T_{x\_вх}$  и  $T_{x\_вых}$  – температура холодного теплоносителя (воздуха) соответственно на входе и на выходе из соответствующего тракта теплообменника,  $T_{г\_вх}$  – температура горячего теплоносителя (отработавшего газа) на входе в соответствующего тракта.

На рисунке 1 представлены графики зависимости удельного расхода топлива  $g_e$  [г/(кВт\*час)] от степени повышения давления  $\pi_k$  в двигателе при различных значениях степени регенерации. Кривой «1» соответствует значение 0,8, кривой «2» соответствует значение 0,85, кривой «3» соответствует значение 0,9, кривой «4» соответствует значение 0,95.

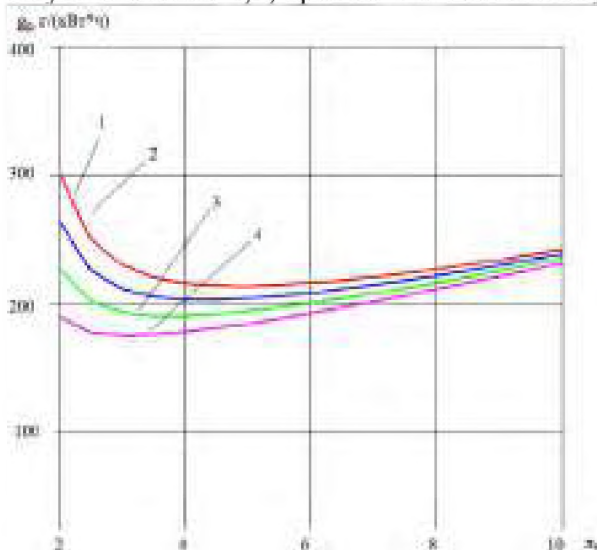


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива от степени регенерации теплообменника

Также следует отметить, что использование таких энергоустановок в режиме когенерации позволяет добиться значительного увеличения суммарного КПД [3, 4, 5]. Часто используемые в микротурбинах [6] рекуператоры имеют относительно невысокие значения коэффициента компактности [7], по этой причине повышение степени регенерации до высоких значений приводит к значительному увеличению их габаритов и массы. Во вращающихся теплообменниках регенеративного типа значение коэффициента компактности значительно выше [8], это позволяет, сохраняя приемлемые размеры устройства, добиться степени регенерации порядка 95% [9]. Матрицы таких теплообменников могут выполняться в различных конфигурациях и из различных материалов, одним из перспективных вариантов является матрица, состоящая из наборов тонких лент (металлических либо керамических). Расположенные на фиксированном малом расстоянии друг от друга, они создают щелевые каналы. Такие каналы на ламинарных режимах течения отличаются высокой тепловой эффективностью [10]. Для того, чтобы по всей длине выдержать необходимый размер щелевых каналов, на лентах выполняются дистанцирующие выступы, в рассматриваемом случае имеющие форму части сферы. Очевидно, что в таком случае щелевые каналы уже не являются плоскими, изменение их формы может повлиять на теплогидравлические характеристики матрицы. Данная работа посвящена изучению влияния изменения формы канала, связанного с вводом в конструкцию дистанцирующих элементов, на тепловую эффективность работы теплопередающей матрицы теплообменника.

Исследование проводилось в расчётном виде, течение в каналах теплопередающей матрицы моделировалось с помощью программы «ANSYS CFX».

Для исследования было построено пять вариантов канала с дистанцирующими элементами, различающихся количеством и взаимным расположением элементов. Геометрия данных каналов описывается с помощью следующих обозначений:

$n_{\text{шир}}$  – количество элементов в ряду, расположенном поперёк длины ленты;

$\Delta_l$  – шаг между рядами элементов на ленте, расположенными поперёк длины ленты, мм;

$\Delta_c$  – шаг между соседними рядами элементов двух лент, составляющих щелевой канал, мм;

$b$  – высота щелевого канала, мм;

$l$  – длина щелевого канала, мм;

$a$  – ширина щелевого канала, мм.

Исследуемые варианты геометрии щелевого канала имели следующие значения этих параметров:

1.  $n_{\text{шир}} = 3$ ,  $\Delta_l = 15$  мм,  $\Delta_c = 8$  мм;

2.  $n_{\text{шир}} = 4$ ,  $\Delta_l = 20$  мм,  $\Delta_c = 10$  мм;

3.  $n_{\text{шир}} = 4$ ,  $\Delta_l = 15$  мм,  $\Delta_c = 7,5$  мм;

4.  $n_{\text{шир}} = 4$ ,  $\Delta_l = 10$  мм,  $\Delta_c = 5$  мм;

5.  $n_{\text{шир}} = 5$ ,  $\Delta_l = 6$  мм,  $\Delta_c = 3$  мм.

Также был построен плоский щелевой канал без дистанцирующих элементов.

Длина всех исследуемых каналов – 96 мм, высота щели – 0,4 мм, толщина ленты – 0,1 мм, лента выполнена из стали.

На рисунке 2 представлена модель щелевого канала матрицы.

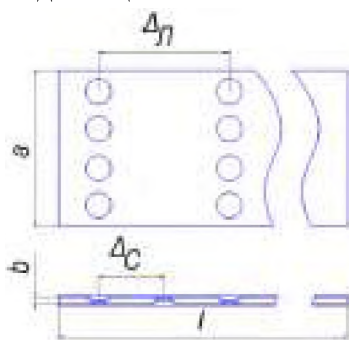


Рис. 2. Модель одного канала теплопередающего пакета

Для расчётного исследования были приняты следующие граничные условия:

- полное давление на входе в канал: 2000 Па;
- полная температура на входе в канал: 22 °С;
- массовый расход воздуха на выходе из канала:  $2,152 \cdot 10^{-5}$  кг/с;
- адиабатные боковые стенки, ограничивающие канал;
- линейное распределение температуры вдоль стенок, образующих щелевой канал: 23 °С в начале канала (при  $X = 0,000$  мм), 130 °С (при  $X = 0,096$  мм).

Чтобы оценить влияние числа Рейнольдса на тепловую эффективность матрицы, была проведена серия расчётов с аналогичными граничными условиями с той разницей, что массовый расход воздуха был увеличен в три раза, что привело также к аналогичному увеличению числа Рейнольдса – с величины 116 до величины 348.

Обработка результатов расчётов заключалась в определении значений критерия Нуссельта на коротких участках каналов (длина участка – 5 мм) и далее – в получении осреднённого по длине всего канала значения критерия Нуссельта. В качестве определяющего размера, по аналогии с плоской щелью, использовалась удвоенная высота щелевого канала.

Для учёта количества дистанцирующих элементов в исследуемом канале был введён безразмерный коэффициент:



$$k_D = n_{шир} \cdot \frac{l}{\Delta_n} \quad (2)$$

В таблице 1 представлены результаты определения осреднённого по длине всего канала значения критерия Нуссельта для плоского щелевого канала, а также для различных каналов, имеющих в составе дистанцирующие элементы. Результаты получены для описанных выше двух скоростных режимов.

Таблица 1. Средние значения числа Нуссельта в различных каналах на различных скоростных режимах

№	n <sub>шир</sub>	Δ <sub>л</sub> , мм	k <sub>д</sub>	Δ <sub>с</sub> , мм	Re <sub>in</sub> = 116	Re <sub>in</sub> = 348
					Nu <sub>ср</sub>	Nu <sub>ср</sub>
1	0	-	-	-	8,30	8,35
2	3	15	19,2	8	7,85	7,88
3	4	20	19,2	10	7,78	7,89
4	4	15	25,6	7,5	7,66	7,71
5	4	10	38,4	5	7,24	7,32
6	5	6	80	3	6,57	6,53

Результаты, приведённые в таблице 1, позволяют сделать вывод о том, что присутствие в канале дистанцирующих элементов приводит к снижению тепловой эффективности, выражаемой критерием Нуссельта, несмотря на увеличение площади теплопередающей поверхности. В случае, когда число дистанцирующих элементов заданной формы является максимальным для канала, относительное снижение среднего числа Нуссельта составляет 20,8 %.

Также следует обратить внимание на то, что очень большое влияние на параметры потока вносит именно общее количество дистанцирующих элементов, в то время как их взаимное расположение практически не влияет на величину критерия Нуссельта.

На рисунке 3 представлена в виде графика зависимость величины относительного изменения среднего значения числа Нуссельта (относительно значения, полученного для плоской щели) от количества дистанцирующих элементов на двух различных скоростных режимах.

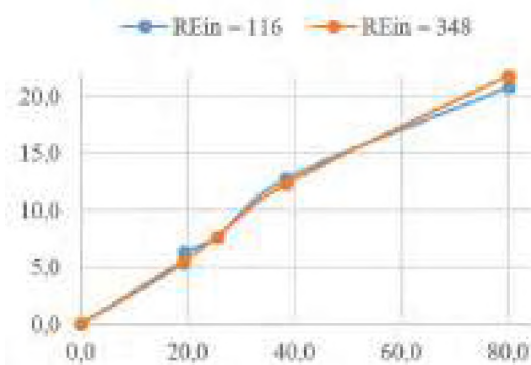


Рис. 3. Относительное изменение числа Нуссельта на различных скоростных режимах

Полученная зависимость достаточно близка к линейной. Помимо этого, на графике видно, что изменение скоростного режима не оказывает значительного влияния на тепловую эффективность канала.

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

1. При ламинарном режиме течения интенсивность конвективного теплообмена в щелевых каналах снижается при добавлении в их конструкцию дистанцирующих элементов.
2. Основное влияние на параметры течения вносит общее количество теплопередающих элементов.
3. При условии того, что течение остаётся ламинарным, изменение скоростного режима не вносит значительных изменений в картину теплообмена в канале.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Грачев Л.П., Булат П.В., Есаков И.И., Булат М.П., Волобуев И.А., Упырев В.В. Способ сжигания сверхбедных топливных смесей в камерах сгорания энергетической микро-турбины с помощью стримерного разряда. Проблемы региональной энергетики, № 2 (37), 2018, с. 70-84.
2. Костюков А.В., Косач Л.А., Горновский А.С., Валеев А.Г., Ковальчук Е.В., Дементьев А.А. Многоцелевая высокоэффективная микротурбина мощностью 50 квт. Научкоград, р. 23-26.
3. Шевелев Д.В., Сомкин С.А. Выбор оптимальных параметров термодинамического цикла когенерационных микроГТУ. Инженерный журнал: наука и инновации, 2014, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/1277.html>
4. Konecna E., Masa V., Review of Gas Microturbine Application in Industry, Chemical Engineering Transactions, 76, 2019, p. 355-360.
5. Wołowicz M., Kolasinski P.; Badyda K. Modern Small and Microcogeneration Systems – A Review. Energies, 14, 785, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14030785>
6. Сафонов Е.В., Бромер К.А., Шульц А.О., Шулев И.С. Особенности конструкции эффективных рекуператоров микрогазотурбинных энергоустановок. Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение №2, 2013, с. 63-67.
7. Shah, R. Compact Heat Exchangers for Microturbines, 2012.
8. Костюков А.В., Алексеев Р.А. Повышение эффективности роторного теплообменника малоразмерного газотурбинного двигателя. Известия МГТУ «МАМИ», № 1(13), 2012, с. 52-58.
9. A.V. Kostukov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2096 012205
10. Neale Adam, Derome Dominique, Blocken Bert, Carmeliet Jan. Determination of Surface Convective Heat Transfer Coefficients by CFD. Proceedings of the 11th NBEC Canadian Building Science and Technology Conference, 2007.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Костюков, зав. каф. ЭдТнМЭ МПУ.

## **ТЕПЛООБМЕН В ПАРЕ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ ПРИ ИХ РЯДНОМ И ШАХМАТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ**

В.А. Маслов, М.Д. Селезнёва, С.А. Князев, В.В. Яковлева  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
ВШАиТЭ, группа 3241301/10501

Канонические исследования течения и теплообмена круглых цилиндров были предметом многих научных исследований как экспериментальных, так и расчетных. Исследования этой геометрии особенно важны для проектирования теплообменного оборудования, используемого в промышленности (трубопроводы теплообменников, градирни и т. д.) [1]. При взаимодействии моделей с набегающим потоком необходимо оценить влияние неравномерности профиля скорости, уровня и масштабов турбулентности в следе на зависимость средних и местных чисел Нуссельта от режима течения, взаимного расположения цилиндров и т. д. [2]. В настоящее время не существует всеобъемлющего метода расчёта коэффициента теплоотдачи на поверхностях различной формы, поскольку он зависит от физических условий и геометрических параметров. В Научно-образовательном центре «Теплофизика в энергетике» для изучения вопросов связи течения и теплообмена созданы, апробированы и внедрены в натуральный эксперимент быстродействующие градиентные датчики теплового потока (ГДТП) [3].

Целью работы является использование градиентной теплотметрии в экспериментальном исследовании теплообмена при обтекании тандема круговых нагретых цилиндров. Данная работа является продолжением ранее выполненных исследований [4] где рассматривалось обтекание рядного расположения цилиндров.

Исследования проводились в лаборатории аэродинамики и теплообмена в рабочей зоне дозвуковой аэродинамической трубы (рисунок 1), разработанной, изготовленной и применяемой в НОЦ «Теплофизика в энергетике».

Труба имеет центробежный вентилятор 4, который обеспечивает скорость воздушного потока в диапазоне 0,1...60 м/с. Конфузор 7 (с поджатием 1:7) обеспечивает степень турбулентности на входе в рабочую зону  $3 Tu \leq 0,5 \%$  во всем диапазоне скоростей. Важно отметить, что за центробежным вентилятором установлен теплообменник, подключенный к системе холодного водоснабжения, что позволяет сохранять температуру в рабочей зоне трубы постоянной в ходе долгих экспериментов.

В рабочую зону трубы помещалась экспериментальная установка, состоящая из двух цилиндров кругового сечения. Исследуемые цилиндры – полые диаметром 66 мм и длиной 600 мм обогревались насыщенным водяным паром при атмосферном давлении, что позволило поддерживать температуру на поверхности постоянной (рисунок 2).

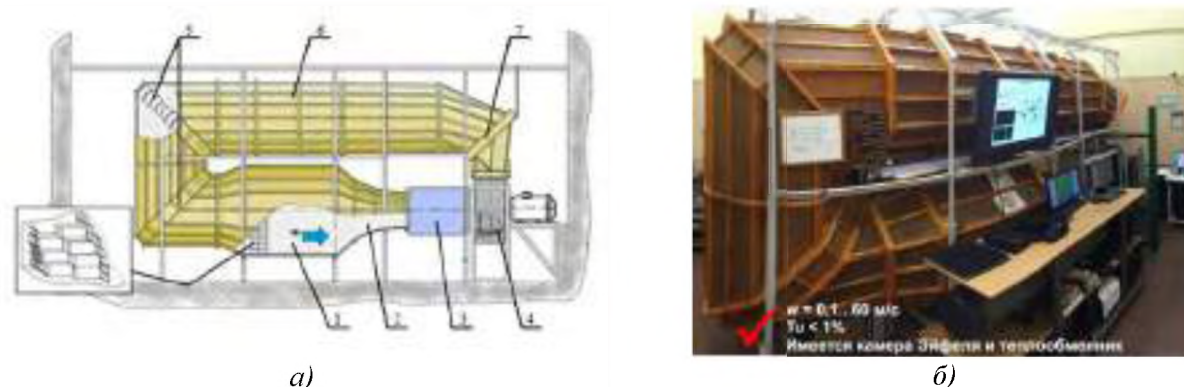


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) аэродинамической трубы НОЦ СПбПУ:  
 1 – форкамера с хонейкомбом, 2 – конфузор, 3 – камера Эйфеля, 4 – центробежный вентилятор,  
 5 – повороты с лопатками, 6 – обратный канал, 7 – водо-воздушный теплообменник

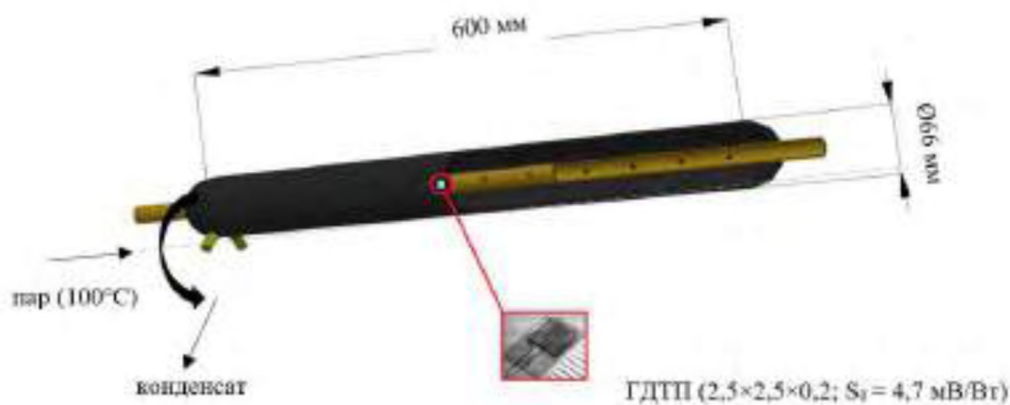


Рис. 2. Модель цилиндра с установленным ГДТП

На наружной поверхности второго по потоку цилиндра (рисунок 2) монтировался градиентный датчик теплового потока (ГДТП), выполненный на основе монокристаллического висмута. Датчик имеет размеры в плане  $2,5 \times 2,5$  мм и толщину 0,2 мм. Вольт-ваттная чувствительность ГДТП составляет 4,7 мВ/Вт.

Выбор такого ГДТП обусловлен тем, что:

- рабочая температура поверхности близка к 100 °С;
- рабочая среда не агрессивна;
- вольт-ваттная чувствительность ГДТП из висмута достаточно высока и практически постоянна для указанной температуры;

– сопротивление ГДТТ из висмута не превышает 1...2 Ом, что облегчает обработку сигналов.

Исследуемый цилиндр мог проворачиваться вокруг оси на угол  $\varphi = 0...180^\circ$ , что позволило получить распределение плотности теплового потока на всех углах проворота  $\varphi$ . Кроме того, в эксперименте измерялась температура набегающего потока (для расчета КТО) и варьировалась скорость набегающего потока  $W$ . Экспериментальная установка (рисунок 3) позволяет перемещать по вертикали верхний по потоку цилиндр на расстояние  $\pm 1$  калибр  $d$ .



Рис. 3. Экспериментальная модель в аэродинамической трубе

В результате исследования получены кривые распределения местного числа Нуссельта на втором цилиндре для различных режимов при фиксированном шаге вглубь ряда, равного  $S = 3d$ , и с разным шагом по вертикали  $h$ . На рисунке 4 совмещены кривые для трёх режимов. Кривые при  $h = \pm d$  получены для верхней полуповерхности цилиндра (рисунок 4).

Заметны значительные отличия в распределении местного КТО для всех исследуемых режимов течения (числа Рейнольдса), а также для различных вариантов расположения цилиндров. В случае рядного расположения для второго цилиндра явный минимум наблюдается вблизи угла  $\varphi = 120^\circ$ , где происходит отрыв потока на всех исследуемых режимах течения. При смещении по вертикали первого цилиндра на величину  $-d$  точка отрыва потока наблюдается вблизи  $\varphi = 90^\circ$ , что качественно совпадает с отрывом потока при обтекании одиночного цилиндра. При увеличении скорости набегающего потока отрыв происходит раньше. Вследствие взаимодействия второго цилиндра и вихря, сошедшего с первого цилиндра, отрыв пограничного слоя происходит на углах  $40...60^\circ$  при смещении верхнего по потоку цилиндра на  $h = +d$ . При смещении первого цилиндра на  $h = -d$  наблюдается локальный минимум вблизи  $10^\circ$ , который предположительно объясняется наличием низкоэнергетической зоны.

Полученные числа Нуссельта в лобовой точке нижнего по потоку цилиндра для конфигураций со смещением по вертикали больше в 1,5...2 раза, чем для конфигурации без смещения. Для  $Re = 4800$  и  $Re = 9600$  отличия КТО в кормовой части незначительные, в то время как при  $Re = 29800$  наблюдаются локальные максимумы вблизи  $150^\circ$  вследствие вихря, сошедшего с нижнего по потоку цилиндра. Наибольший локальный максимум прослеживается при смещении верхнего цилиндра на  $h = +d$ . Распределение КТО на режимах  $Re = 9800$ ,  $Re = 29800$  как для рядной системы, так и для шахматной имеют схожий характер.

Создана экспериментальная установка для исследования теплообмена тандема цилиндров с возможностью варьировать расположение цилиндров относительно друг друга. Проведены исследования теплообмена в тандеме цилиндров в двух конфигурациях: рядном и шахматном расположении в диапазоне режимов  $Re = 4800...29800$ . Выявлено влияние конфигурации и режима течения на распределение местного КТО и расположение точки отрыва пограничного слоя.

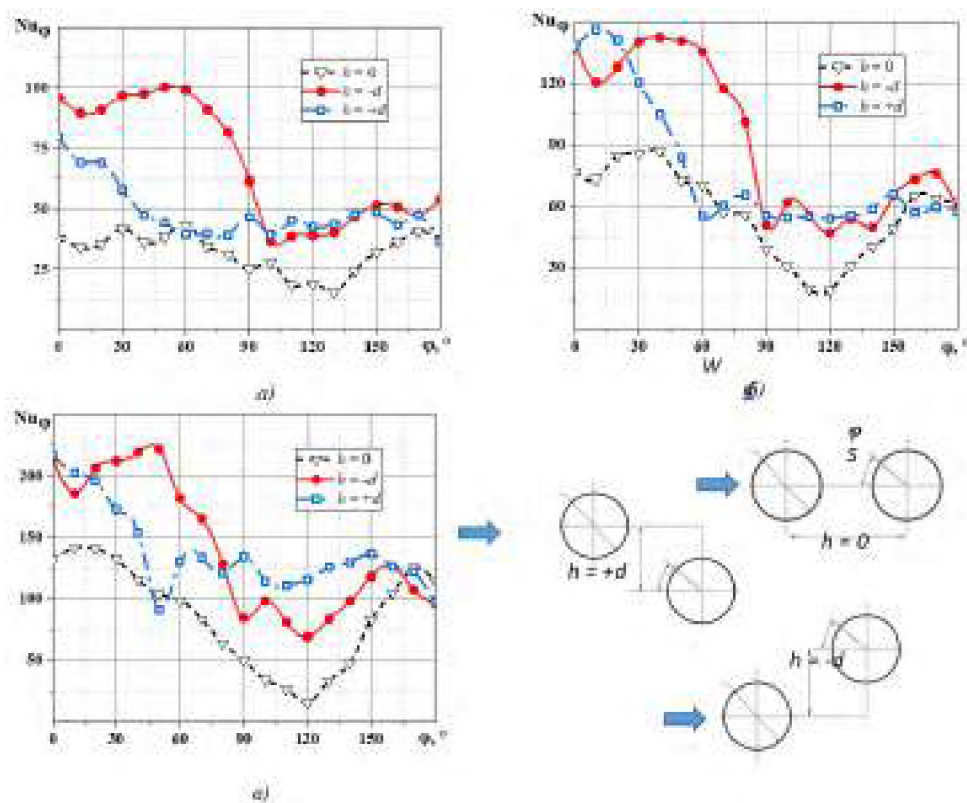


Рис. 4. Распределение местного числа Нуссельта по второму цилиндру:  
 а)  $Re = 4800$ ; б)  $Re = 9600$ ; в)  $Re = 29800$

Установлено, что местный КТО в большей степени зависит от конфигурации, чем от режима течения. При шахматном расположении наибольшее различие в распределении КТО наблюдается в лобовой части, в то время как распределения в кормовой части совпадают качественно и количественно. Наиболее интересным кажется локальный минимум при  $10^\circ$ , который требует более детального исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. – 471с.
2. Градиентная Gu Z., Sun T. On interference between two circular cylinders in staggered arrangement at high subcritical Reynolds numbers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1999. Vol. 80, no. 3. P. 287-309. DOI: 10.1016/S0167-6105(98)00205-0.
3. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V., Heatmetry, Springer International Publishing, 2020.
4. Исследование конвективного теплообмена вблизи цилиндров. В. В. Сучок, В. В. Сероштанов, Н. А. Жидков, М. Д. Селезнева. МНСК-2021 : Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021.

Научный руководитель: к.т.н. В.В. Сероштанов, доцент СПбПУ.

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ПЛАВКИ ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ ЛЭП 10 КВ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ

С.И. Будко

Самарский государственный технический университет  
ЭТФ, аспирант 1-УПНК-2.4.4

В данной работе рассматривается одна из известных глобальных проблем систем электроснабжения – образование гололедных осадков на проводах ВЛЭП. Результат их действия вызывает длительные нарушения в работе электрических сетей, а также приводит к серьезным негативным последствиям. Возникающие аварии имеют массовый характер, поскольку повреждения происходят на протяженных линиях электропередачи, что в свою очередь, приводит к серьезному материальному ущербу. Решение проблемы обеспечивается при выполнении мероприятий в соответствии со стандартными методиками, с помощью нагрева «аварийных» ЛЭП токами «плавки» гололедных отложений. Этому процессу предшествует отключение линии от источника питания, что создает условия для нарушения в обеспечении непрерывности электроснабжения.

По причине несовершенства существующих способов решения исследуемой проблемы, предлагается возможность применения электротехнического комплекса системы плавки гололёда без отключения нагрузки: установка компенсирующего устройства в начале линии и индуктивной нагрузки в конце линии (рисунок 1). Обеспечение необходимого уровня мощности тепловыделения в линии, превышающей отвод тепла в окружающую среду, может быть достигнуто за счет нагружения линии реактивными токами. Неоспоримым преимуществом такого решения выступает отсутствие отключения целевых потребителей, поддерживается стабильность режима, тем самым сохраняется бесперебойность электроснабжения сети, что положительным образом сказывается на надежности системы.

Особенностью предлагаемого решения является то, что увеличение тока линии сопровождается увеличением потребляемой от трансформатора мощности, что в свою очередь может привести к его перегрузке, а также и критическому уровню потерь напряжения в ЛЭП, на которой производится плавка гололёда [8]. Эксплуатация такой системы будет невозможной. Определять допустимый режим работы линии необходимо при различных нагрузках и уровнях напряжений. Также требуется моделирование тепловых процессов во время плавления гололедных образований и расчет отклонений напряжений при нагружении линии реактивными токами.

Условием образования гололёда в районах страны является неустойчивость погодных условий (отрицательная температура при тумане; осадки в виде «ледяного» дождя; смена оттепели на переохлаждение окружающей среды). Гололёд образуется при температурах от 0 до -10 °С [1]. Он формируется из капель воды при скоростях ветра 5–25 м/с, при этом образуются кристаллы льда. Эта масса оседает на металлических проводах и опорах линии. Интенсивность и расположение отложений напрямую зависит от направления ветровых потоков. Гололед представляет собой плотную твердую прозрачную массу с объемным весом 600–900 кг/м<sup>3</sup> [8].

Сложностью оперативного решения проблемы гололёдообразования на проводах является отсутствие быстродействующих и точных методов выявления гололеда. В работах [2–7] отмечается, что существующие устройства функционируют, как аппаратура сигнализации, и не решают комплексно вопрос предотвращения образования гололёда и управления системой плавки.

Наиболее эффективным способом очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений является нагрев проводов электрическим током до оплавления льда. Способ нашел широкое применение на ЛЭП. Так как гололёд образуется в тех случаях, когда температура проводника опускается ниже 0 °С, то при нагреве проводов до температуры выше нулевой отметки гололёд

образовываться не сможет. Если же проводник уже покрыт гололёдной коркой, то пропускание через него повышенного тока, приведет к тому, что температура проводника поднимется выше 0 °С, а лёд постепенно начнет оттаивать.

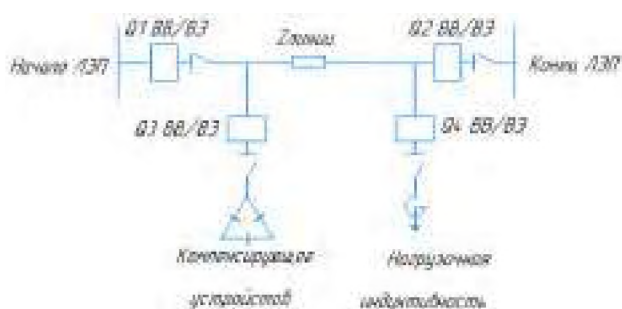


Рис. 1. ВЛЭП 10 кВ с оборудованием для плавки гололёда:  
Q – выключатели

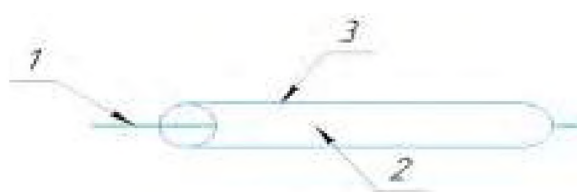


Рис. 2. Проводник с ледяной оболочкой:  
1 – токоведущий проводник; 2 – корка льда;  
3 – поверхность корки льда

Необходимый уровень температуры нагрева проводников зависит от погодных условий возникновения гололёда: температура и влажность окружающей среды; ветровое давление и изменение высоты относительно поверхности земли [8]. При пониженных температурах и повышенной скорости ветра прослеживается интенсивность охлаждения проводников, что свидетельствует, что температура нагрева проводников, необходимая для проплавления гололёда, требует большего значения.

Определение параметров системы нагрева проводников и режимов работы ЛЭП начинается с анализа тепловых процессов в системе «проводник – ледяная оболочка – окружающая среда» [8]. Возможность описания теплообмена дифференциальным уравнением в частных производных с граничными и начальными условиями имеет место быть при учете допущений о симметричном расположении ледяного слоя на проводнике и при постоянной скорости движения воздушного потока.

Уравнение теплопроводности для двумерной области с внутренними источниками тепла имеет следующий вид [8]:

$$\rho c \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \cdot (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) + \frac{d}{dy} \cdot (\lambda \cdot \frac{dT}{dy}) + w, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала проводника;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – температура;  $w$  – удельная мощность тепловыделения.

Начальными условиями является:  $T(x, y, 0) = T_0(x, y)$ .

В качестве граничных условий на боковой поверхности проводника выступает конвективный теплообмен [8]:

$$\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T - T_c). \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности записано для прямоугольной системы координат с учетом того, что в ходе расплавления ледяной оболочки происходит её смещение относительно проводника под действием силы тяжести. Изменение геометрии в ходе плавления льда проще учесть в плоской задаче, чем в осесимметричной [8].

Также необходимо учесть диапазон температур в зависимости от условий теплообмена, поскольку процесс плавки гололёда сопровождается нагревом участков провода без льда, что может привести к их перегреву [9].

При решении тепловой задачи предусматривается учет изменения агрегатного состояния: слой льда на границе проводника при нагреве превращается в воду, после чего происходит ее стекание к нижней части ледяной корки, где возможно повторное замерзание [8].

Определение параметров системы нагрева выполняется в несколько этапов.

**1. Моделирование нагрева голого провода.** Расчетная система соответствует нелинейной задаче с постоянной геометрией. Определяется значение температуры проводника для разных условий теплообмена, при вариации мощности тепловыделения.

**2. Моделирование процесса нагрева провода с ледяной оболочкой до полного перехода льда в жидкую фазу.** Особенностью расчета является сложность учета изменения теплосодержания при неизменной температуре, что имеет место при плавлении. Современное программное обеспечение позволяет решить эту проблему, например, «Comsol». Данный подход отражает завышенные энергозатраты, связанные с расплавлением всей массы оболочки.

**3. Моделирование процесса проплавления ледяной оболочки.** Расплавление слоя льда сопровождается протеканием воды к нижней области и перемещением проводника к верхней поверхности ледяной оболочки. Повышается сложность моделирования в условиях изменения геометрии системы, когда происходит относительное перемещение провода в оболочке из льда. В то же время, снижается время плавки гололеда, точнее сказать, разрушения корки льда.

Отдельной задачей является расчет условий теплообмена с внешней средой [9]. Необходимо определить коэффициенты конвективного теплообмена при принудительном движении воздуха. Для этого используются критерии Рейнольдса и Прандтля, которые вычисляются через физические свойства воздуха, геометрические параметры и скорость движения [9].

Числа Рейнольдса и Прандтля [9]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta}, \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot C}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность;  $v$  – скорость движения воздуха;  $D$  – диаметр провода (или льда);  $\eta$  – динамическая вязкость;  $C$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Для значений  $Re$  в пределах от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  определяется число Нуссельта [9]:

$$Nu = 0,245 Re^{0,6}. \quad (5)$$

Определив число Нуссельта, можно отыскать коэффициент конвективного теплообмена [9]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}. \quad (7)$$

По приведенным соотношениям появляется возможность рассчитать значения коэффициента конвективного теплообмена для проводов заданного ряда сечений при в диапазоне скоростей движения воздуха. Определение значений коэффициентов позволяет сделать заключение о степени интенсивности теплообмена и о необходимой величине температуры, поддержание которой позволит предотвратить образование гололеда. Моделирование процесса позволяет определить уровни мощностей, достаточных для плавки гололеда, а также затраченное время на процесс освобождения от ледяной корки.

В работе был предложен комплексный подход к постановке задачи моделирования тепловых процессов в проводах ЛЭП при плавке гололеда. Было учтено изменение агрегатного состояния и предложен алгоритм решения задачи. На основании расчетов с конкретными данными по сечениям проводников и уровнями напряжений в сети и длины линии, можно произвести математическое исследование процесса плавки гололеда, сделать выводы о допустимых и недопустимых потерях и обосновать оптимальный режим дополнительной загрузки ЛЭП реактивными токами для эффективной плавки гололеда при допустимой перегрузке силовых трансформаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бургсфорд В.В., Никитина Л.Г., Никонец Л.А., Хрущ П.Р. «Методические указания по плавке гололеда переменным током» // «Служба передового опыта и информации союзэнерго». – Москва: 1983.



2. Минуллин, Р.Г. «Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов» / Р.Г. Минуллин, Э.Ю. Абдуллазянов, В.А. Касимов, М.Р. Яруллин // «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики». – 2013. – № 7-8. – С. 68-78.
3. Минуллин, Р.Г. «Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием» / Р.Г. Минуллин, Д.Ф. Губаев. – Казань.: КГЭУ, 2010. – 208 с.
4. Кубкина О.В. «Исследование возможности применения емкостного способа контроля толщины стенки гололедно-изморозевых образований на проводах. Математическая модель емкости планарного конденсатора» // Всероссийская научно-практическая конференция «Транспорта-2008» («Ростов-на-Дону, 2007 г.), с. 95.
5. Молоканов, Д.Ю. Автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки на воздушных линиях электропередачи / Д.Ю. Молоканов, П.П. Кудряшов, А.М. Герасимов, С.А. Фоменков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – С. 52–57.
6. Ярославский, Д.А. Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Ярославский Данил Александрович. – Казань, 2017. – 135 с.
7. Костиков, И. Система мониторинга «САТ-1» – эффективная защита ВЛЭП от гололеда / И. Костиков // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 1–4 (4). – С. 32–35.
8. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Осипов В.С. «Система плавки гололёда на проводах линии электропередачи без отключения нагрузки» // «Вестник СамГТУ», 2015, № 3, с.109-117.
9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Научный руководитель: д.т.н. А.А. Базаров, доцент СамГТУ.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ ПРОСТЕЙШЕЙ ФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Д.А. Золин, М.С. Горшков

Ивановский государственный энергетический университет  
ТЭФ, ПТЭ, группа 3-7

В рамках данной работы была поставлена задача реализовать расчет температурных полей в случае нестационарного нагрева (или охлаждения) тел классической формы (бесконечной пластины, бесконечного цилиндра и сферы).

Для расчета температурного поля тел классической формы необходимо решить дифференциальное уравнение Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{k-1}{x_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_1} \right), \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $\tau$  – время,  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $x_1$  – первая координата в ортогональной системе координат:  $x_1 = x$  в декартовой системе координат,  $x_1 = r$  в цилиндрической и сферической системах координат;  $k$  – коэффициент формы тела.

При моделировании процесса теплопроводности принимаем следующие допущения: перенос теплоты проходит только теплопроводностью; теплофизические свойства не зависят от температуры; отсутствуют внутренние источники теплоты; осесимметричное распределение температуры.

В качестве начальных условий (в момент времени  $\tau = 0$  с) задавали равномерное распределение температуры по координате:

$$T(x_1, \tau = 0) = T_0. \quad (2)$$

На внутренней границе ( $x_l = 0$  м) использовали условия симметрии:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x=0} = 0. \quad (3)$$

На внешней границе тела задавали граничные условия:

– I рода (значение температуры на границе расчетной области – поверхности тела):

$$T|_w = T_w = const; \quad (4)$$

– II рода (значение поверхностной плотности теплового потока на границе расчетной области):

$$q|_w = q_w = const, \quad (5)$$

где  $q|_w$  – тепловой поток, уходящий в процессе теплопроводности от поверхности внутрь тела;

$q_w$  – тепловой поток, поступающий на поверхность твердого тела из окружающей среды;

– III рода (значение температуры внешней среды, которая окружает тело, и закон теплообмена между средой и поверхность тела):

$$q|_w = \alpha \Delta T, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\Delta T = |T_f - T_w|$  – разность температур окружающей среды  $T_f$  и поверхности тела  $T_w$ .

Для решения дифференциального уравнения Фурье с соответствующими краевыми условиями был выбран метод конечных разностей – метод сеток (явная разностная схема).

Конечно-разностный аналог дифференциального уравнения теплопроводности (1) во внутренних узлах сетки ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ) выполнен методом разностной аппроксимации [2]:

$$T_i^{m+1} = f(1 - I_k^-)T_{i-1}^m + (1 - 2f(1 + 0,5I_k^+ - 0,5I_k^-))T_i^m + f(1 + I_k^+)T_{i+1}^m, \quad (7)$$

где  $T_i^{m+1}$  – значение температуры в узле  $i$  в момент времени  $(m + 1)$ ;  $i$  – номер узла;  $m$  – текущий момент времени;  $f$  – разностный критерий Фурье;  $T_{i-1}^m$  – значение температуры в узле  $(i - 1)$  в момент времени  $m$ ;  $T_i^m$  – значение температуры в узле  $i$  в момент времени  $m$ ;  $T_{i+1}^m$  – значение температуры в узле  $(i + 1)$  в момент времени  $m$ :

$$I_k^- = (k - 1) \frac{0,5}{i - 0,5}; \quad (8)$$

$$I_k^+ = (k - 1) \frac{0,5}{i + 0,5}. \quad (9)$$

Аппроксимация граничных условий выполнена по методу контрольного объёма.

Так, для внутренней границы на оси симметрии ( $i = 0$ ) [2]:

$$T_0^{m+1} = (1 - 2fk)T_0^m + 2fkT_1^m, \quad (10)$$

где  $T_0^{m+1}$  – значение температуры в узле  $i=0$  в момент времени  $(m+1)$ ;  $T_0^m$  – значение температуры в узле  $i=0$  в момент времени  $m$ ;  $T_1^{m+1}$  – значение температур в узле  $i=1$  в момент времени  $m$ ;

для внешней границы (на поверхности тела  $i = N$ ) [2]:

– граничные условия I рода:

$$T_N^{m+1} = T_w = const, \quad (11)$$

где  $T_N^{m+1}$  – значение температуры в узле  $i = N$  в момент времени  $(m + 1)$ ;

– граничные условия II рода:

$$T_N^{m+1} = (1 - 2f)T_N^m + 2f(T_{N-1}^m + \Delta T), \quad (12)$$

где  $T_N^m$  – значение температуры в узле  $i = N$  в момент времени  $m$ ;  $T_{N-1}^m$  – значение температуры в узле  $i = (N - 1)$  в момент времени  $m$ ;

$$\Delta T = \frac{q_w \Delta x}{\lambda}, \quad (13)$$

где  $\Delta x$  – шаг по координате;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
– граничные условия III рода [2]:

$$T_N^{m+1} = (1 - 2f(b+1))T_N^m + 2fT_{N-1}^m + 2fbT_f, \quad (14)$$

где  $b$  – разностный критерий Био.

В настоящей работе был реализован данный алгоритм в среде MS Excel, которая имеет ряд преимуществ. Во-первых, MS Excel является стандартной программой пакета Microsoft. Во-вторых, MS Excel имеет простой и доступный интерфейс. В-третьих, наглядность представления результатов расчета, их графическое изображение. В-четвертых, все расчеты можно выполнить автоматически, регулируя только количество шагов по пространству и по времени (в таблице «исходных данных» указываем необходимое количество шагов по пространству и времени, затем выделяем последнюю строчку либо последний столбец таблицы в «расчетной области» и «протягиванием» устанавливаем данное значение шагов).

Трудность при реализации поставленной задачи возникла с представлением результатов расчета, значений температур. Необходимо было разработать таблицу, которая могла бы наглядно демонстрировать полученные значения температур. Таблица должна быть универсальной, т. е. необходимо предусмотреть возможность выполнения расчета для любого количества шагов по времени и пространству.

Для внутренней границы, совпадающей с осью  $0x$  (первая строка таблицы), использовали формулу расчета (10). Для остальных узлов сетки – всех внутренних узлов ( $i = 1, \dots, N-1$ ) и узла на внешней границе ( $i = N$ ) создали предварительную проверку с помощью функции «IF» с целью выбора необходимой формулы расчета. Если  $i$  не имеет какого-либо числового значения (т. е. расчет вышел за границы расчетной таблицы), то для этого узла рассчитываем температуру на внешней границе (по формуле (11), или (12), или (14)) в зависимости от заданных граничных условий. Если  $i$  имеет какое-либо числовое значение (номер узла по пространству), то – температуру во внутренних узлах сетки (по формуле (7)).

Разработанная программа может быть использована как для инженерных расчетов процессов, протекающих в оборудовании на промышленных предприятиях и в энергетике, так и в образовательном процессе в вузах. Например, для проведения лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен», «Информатика», «Информатика в сфере теплоэнергетики». Обучающиеся имеют возможность ознакомиться с алгоритмом расчета температурного поля, с возможностями среды MS Excel, проанализировать изменение температуры по координате и во времени как в табличном, так и в графическом виде. Созданная программа может быть использована при выполнении выпускных квалификационных и научно-исследовательских работ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учебное пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
2. Бухмиров В.В., Созинова Т.Е., Носова С.В., Никитин К.Б. Исследование процесса нестационарной теплопроводности и термонапряженного состояния твердых тел на имитационной математической модели: Методическое указание к лабораторной работе. – Иваново, 2003. – 41 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Т. Е. Созинова, доцент ТОТ ТЭФ ИГЭУ.

## СВЧ-ПИРОЛИЗ НАВОЗА КРУПНОРОГАТОГО СКОТА

И.Д. Димитрюк, М.А. Гайдабрус, Р.Б. Табакаев  
Тюменский государственный университет  
Х-БИО

В настоящее время в мире насчитывается более миллиарда голов крупного рогатого скота, каждая из которых в среднем производит 10–20 кг навоза в сутки [1, 2]. Однако, согласно [3] доля использования навоза не превышает 25 % от объемов накопления, остальная часть остается разлагаться на открытом пространстве. Это приводит к загрязнению воздуха выбросами  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и парниковых газов, таких как  $\text{CH}_4$  и  $\text{NO}_x$ , ухудшению качества воды из-за стоков и переносу патогенов [4, 5]. Это указывает на необходимость переработки навоза, например, для использования в энергетике. Стоит отметить, что навоз крупного рогатого скота относится к ресурсам биомассы, являющейся  $\text{CO}_2$ -нейтральным топливом.

Многими специалистами [6, 7] отмечается, что пиролиз является одним из наиболее перспективных методов термохимического преобразования биомассы, благодаря его ресурсоэффективности (процесс можно организовать в автотермическом режиме за счет теплоты от протекания экзотермических реакций), вне зависимости от характеристик исходного сырья (может быть переработано любое органическое сырье, например, пластик, биомасса, уголь, резина и др.), разнообразию получаемых продуктов (жидкость, газ и твердый остаток) и их свойств. Параметры пиролиза, такие как температура, скорость нагрева, время выдержки, тип инертного газа, оказывают огромное влияние на протекание процесса, распределение выхода продуктов и их свойства. При этом размер перерабатываемого сырья и способ подведения теплоты оказывают существенное влияние на эффективность термического разложения, время осуществления процесса и однородность свойств получаемых продуктов. В [6] показано, что использование микроволн для инициирования процесса пиролиза более выгодно, чем традиционный пиролиз с внешним нагревом: происходит эффективный объемный нагрев за счет проникновения электромагнитных волн в перерабатываемое сырье. Это решает проблему получения однородного продукта и снижает общее потребление энергии. Кроме того, микроволновый нагрев обеспечивает более высокую скорость нагрева и селективность в повышении выхода определенных продуктов, снижая металлоемкость технологического оборудования. Преобразование навоза путем СВЧ-пиролиза является весьма жизнеспособным вариантом, который может соответствовать принципу экономики замкнутого цикла.

В связи с вышеописанным, целью настоящей работы является исследование СВЧ-пиролиза навоза крупного рогатого скота для выявления и анализа взаимосвязей между его составом и характеристиками получаемых продуктов.

В качестве объектов исследования рассмотрен навоз крупного рогатого скота одного из фермерских хозяйств, расположенных в Сибирском Федеральном округе (Россия). Исследуемый навоз крупного рогатого скота отобран с общего навозохранилища, выдержан до достижения воздушно-сухого состояния, после чего проанализирован (таблица 1). Макро- и микроструктура исследуемого навоза (в естественном виде) после его измельчения представлена на рисунке 1. Видно, что неорганическая часть навоза представлена импрегнациями (рисунок 1б, д) и отдельными включениями (рисунок 1в, г).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав навоза крупного рогатого скота

Образец	Влажность, $W^a$ , %	Зольность $A^d$ , %	Выход летучих веществ $V^{daf}$ , %	Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , MJ/kg	Элементный состав, %				
					$C^d$	$H^d$	$N^d$	$S^d$	$O^d$
Навоз	7,0	15,64	75,16	14,92	45,05	4,98	2,27	0,19	31,86

Процесс СВЧ-пиролиза навоза в динамике продемонстрирован на рисунке 2. Облучение навоза СВЧ-излучением характеризуется формированием искровых разрядов в массиве образца при действии излучения. Такое формирование возможно при наличии очагов с металлическими или полупроводниковыми свойствами в объеме образца.

Как видно из результатов СЭМ (рисунок 1), в образце присутствуют такие частицы в достаточном количестве. Таким образом, присутствие взаимодействующих с излучением примесей в образце приводит к возникновению межчастичного электрического пробоя и его распространению вдоль образца по направлению действия поля (рисунок 3). Такой процесс распространения электрического пробоя в образце приводит к равномерному нагреву всего объема образца и инициированию пиролиза, как в каналах пробоя, так и вблизи частиц примеси. Таким образом, такое принципиальное различие в механизме подвода и распространения тепла при СВЧ-пиролизе в сравнении с обычным нагревом должно приводить к различию состава продуктов пиролиза.

В результате СВЧ-переработки навоза выход углеродистого остатка составил 34,5 %. Характеристики полученного остатка представлены в таблице 2. Состав пиролизного газа практически на половину представлен метаном ( $\text{CH}_4$ ) – 47,0 % от всего выделившегося объема газа. Количество остальных компонентов газа относительно его общего объема составило:  $\text{CO}$  – 21,3 %,  $\text{H}_2$  – 14,1 %,  $\text{CO}_2$  – 13,2 %, прочее ( $\text{N}_2$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$  и др.) – 4,4 %. Теплотворная способность пиролизного газа составила 21,08 МДж/м<sup>3</sup>.

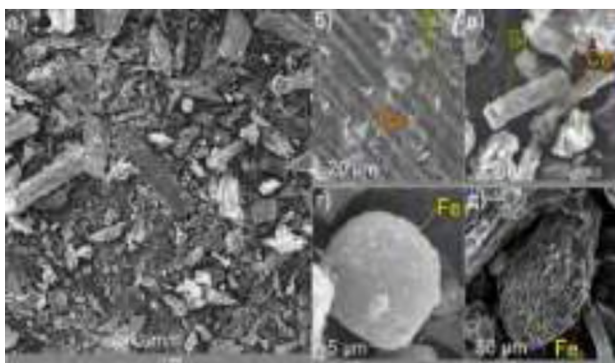


Рис. 1. СЭМ-изображения измельченного исходного навоза:

а) общий вид при увеличении в 50 раз; б, в, г, д) выделенные элементы неорганической части в структуре навоза

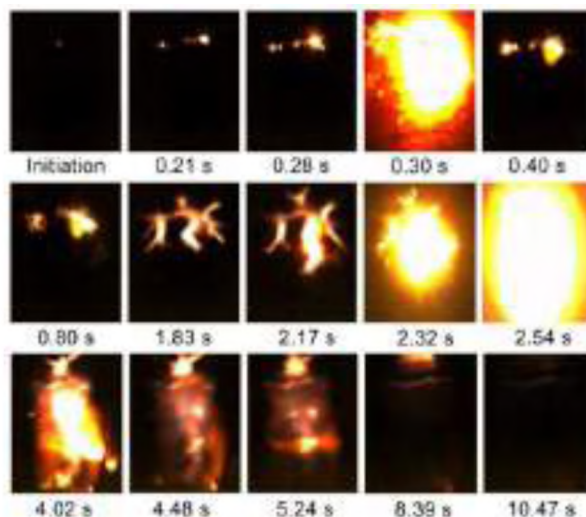


Рис. 2. Кадры высокоскоростной видеосъемки СВЧ-пиролиза навоза крупнорогатого скота с момента инициации процесса и до его окончания

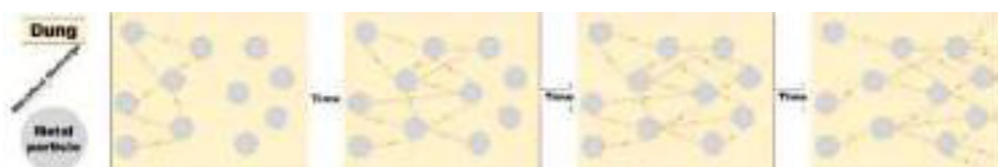


Рис. 3. Схема распространения электрического разряда в среде навоза со включениями металлических частиц

Таблица 2. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка, полученного при СВЧ-пиролизе навоза крупнорогатого скота

Образец	Зольность $A^d$ , %	Низшая теплота сгорания $Q_f^l$ , МДж/кг	Элементный состав, %				
			$C^d$	$H^d$	$N^d$	$S^d$	$O^d$
Углеродистый остаток	38,1	17,14	50,48	1,24	1,40	0,19	6,48

## Заключение

Изучен вопрос пиролиза навоза крупнорогатого скота в условиях СВЧ-излучения. Показано, что использование СВЧ-излучения приводит к быстрому и равномерному прогреву навоза (время протекания процесса от момента инициализации до полного окончания – 10,5 с).

Получаемый при СВЧ-пиролизе газ содержит большее количество горючих компонентов, имеет высокую теплоту сгорания (21,08 МДж/м<sup>3</sup>), за счет большего количества водорода и меньшей забалластированности более экологичен, чем аналогичный газ, полученный при медленном нагреве.

Результаты сканирующей электронной микроскопии навоза и высокоскоростная видеосъемка протекания процесса СВЧ-пиролиза позволили определить механизм инициализации и протекания термической деструкции. Воздействие СВЧ-излучения на навоз приводит к формированию искровых разрядов в массиве образца за счет наличия очагов с металлическими или полупроводниковыми свойствами в объеме образца, которые могут быть представлены элементами неорганической части.

Таким образом, СВЧ-пиролиз навоза крупнорогатого скота можно рассматривать в качестве способа получения высококалорийного и экологичного газа, энергетическое использование которого оказывает меньшее влияние на образование парникового эффекта.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Number of cattle worldwide from 2012 to 2022 (in million head) // Docslide. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/263979/global-cattle-population-since-1990/> (дата обращения 25.11.2022).
2. Biogas Production Potential from Livestock Manure in Pakistan / M.U. Khan, M. Ahmad, M. Sultan, I. Sohoo, P.C. Ghimire, A. Zahid, A. Sarwar, M. Farooq, U. Sajjad, P. Abdeshahian, M. Yousaf // Sustainability. 2021. V. 13. – P. 6751.
3. Multivariate optimisation study and life cycle assessment of microwave-induced pyrolysis of horse manure for waste valorisation and management / G.R. Mong, C.T. Chong, J.-H. Ng, W.W.F. Chong, H.C. Ong, M.-V. Tran // Energy. 2021. V. 216. – P. 119194.
4. Ammonia emission factors from swine finishing operations / D.B. Harris, R.C. Shores, L.G. Jones // US Environmental Protection Agency. Docslide. 2001. URL: [https://gaftp.epa.gov/Air/nei/ei\\_conference/EI10/ammonia/harris.pdf](https://gaftp.epa.gov/Air/nei/ei_conference/EI10/ammonia/harris.pdf) (дата обращения 25.11.2022).
5. Persistence of livestock-associated antibiotic-resistant staphylococcus aureus among industrial hog operation workers in North Carolina over 14 days / M. Nadimpalli, J.L. Rinsky, S. Wing, D. Hall, J. Stewart, J. Larsen, K.E. Nachman, D.C. Love, E. Pierce, N. Pisanic, J. Strelitz, L. Harduar-Morano, C.D. Heaney // Occup Environ Med. 2015. V. 72. – P. 90- 99.
6. Valorization of animal manure via pyrolysis for bioenergy: A review / G. Su, H.C. Ong, N.W. Mohd Zulkifli, S. Ibrahim, W.H. Chen, C.T. Chong, Y.S. Ok // Journal of Cleaner Production. 2022. V. 343. P. 130965.
7. Sustainable Valorisation of Animal Manures via Thermochemical Conversion Technologies: An Inclusive Review on Recent Trends / P.R. Rout, D.S. Pandey, M. Haynes-Parry, C. Briggs, H.L.C. Manuel, R. Umapathi, S. Mukherjee, S. Panigrahi, M. Goel // Waste Biomass Valor (article in press). 2022.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00410 «Разработка научно-технических основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций». Аналитическое оборудование, использованное при аналитических измерениях характеристик, приобретено в рамках программы развития Тюменского государственного университета (программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»).

Научный руководитель: к.т.н. Р.Б. Табакаев, с.н.с. Х-БИО ТюмГУ.

# МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Т.А. Листопадская, Н.Н. Кожухов, А.А. Махоренко  
Тамбовский государственный технический университет  
ИЭПР, ЭПТ, группа БТЭ201

Теплофизические характеристики определяют скорость протекания процесса нагревания тел. К ним относятся коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $a$  и удельная теплоемкость  $c$ . Теплофизические характеристики зависят от природы, структуры, физико-химических параметров и характеристик материалов. На коэффициент теплопроводности дисперсных материалов влияют влажность, размер частиц, плотность, пористость, объемная масса материала и др. Таким образом, модернизация экспериментальной установки позволят повысить точность определения коэффициента теплопроводности сыпучего материала, что представляет собой практический интерес. Так как песок является одним из самых распространенных строительных материалов, то исследование процесса теплопроводности сыпучего материала, является актуальной задачей.

Метод определения коэффициента теплопроводности сыпучих материалов методом трубы имеет следующий вид [1, 2]:

1. С помощью тарировочной таблицы для термопар ТМК переводим термо-ЭДС в градусы  $^{\circ}\text{C}$ . Так как холодные концы термопар находятся при температуре воздуха в лаборатории, то  $\Delta t = t_c - t_b$ .

2. Определить температуру стенки в каждой точке с учетом поправки на температуру холодных концов термопар  $t_c = \Delta t + t_b$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

3. Для исключения систематических погрешностей температура внутренней и наружной трубы измеряются в четырех точках каждой. В расчетах используют среднеарифметические значения.

4. Определить мощность теплового потока, которая равна мощности нагревателя на расчетном участке,  $l_p = 0,5$  м,  $Q = W_3 = I \cdot U$ , Вт.

5. Рассчитать по формуле (1) коэффициент теплопроводности сыпучего материала.

$$\lambda = \frac{W_3 \cdot \ln(d_2/d_1)}{(t_{c1} - t_{c2}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l_p}$$

где  $W_3$  – тепловой поток,  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры внутренней и наружной труб соответственно,  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температуры на поверхности внутренней и наружной труб соответственно,  $l_p$  – длина рабочего участка.

Таким образом, в результате проведения эксперимента на лабораторной установке среднее значение коэффициента теплопроводности по формуле (1) имеет следующий вид:

$$\bar{\lambda} = \frac{(0,51 \cdot 41,2) \cdot \ln \frac{0,033}{0,025}}{3,14 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot (65,47 - 63,317)} = 0,86 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Далее определяли случайные погрешности косвенных измерений [3].

$$\bar{\lambda} = (0,86 \pm 0,02436) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \text{ с } \alpha_d = 0,9.$$

Представим погрешность в виде:

$$E = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{0,02436}{0,86} \cdot 100\% = 2,83 \%$$

Далее определяли систематические погрешности косвенных измерений [3].

Относительная ошибка систематической погрешности:

$$\Delta E = \frac{|\Delta \lambda|}{\lambda} = \frac{0,1067}{0,86} \cdot 100\% = 12,4 \%$$

Таким образом, окончательный ответ будет выглядеть следующим образом:

$$\lambda = (0,86 \pm 0,1067) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Для повышения точности определения коэффициента теплопроводности возможны следующие мероприятия:

1. Для замены вольтамперметра электронного цифрового ВК 2-20, мы выбрали универсальный измеритель В7-99. Измеритель универсальный прецизионный В7-99 предназначен для высокоточного измерения и статистической обработки значений сигналов термоэлектрических преобразователей (ТП), обладает измерительной способностью разрешением 0,001 К.

2. Также необходимо установить электронные вольтметр и амперметр, что позволит более точно определять тепловой поток нагревательного элемента установки в нужный момент времени. Для этого мы выбрали цифровой вольтамперметр *DSN-VC288*. Вольтамперметр *DSN-VC288* измеряет напряжение в диапазоне до 100 В, а силу тока – до 10 А, разрешение измерения напряжения 0,1 В, разрешение измерения силы тока 0,01 А. Установка этого вольтамперметра снизит систематическую погрешность, по формуле на 9,96 %.

3. Увеличение числа термопар на поверхности внутренней и внешней труб, до 8 штук на каждой, позволит снизить случайную погрешность. Увеличение числа термопар позволило снизить случайную погрешность на 0,29 %.

4. Стабилизация параметров переменного электрического тока во время экспериментальной работы позволит сгладить колебания при работе экспериментальной установки. По результатам исследования они дают наибольшие случайные и систематические погрешности.

5. Необходимо заменить следующее устаревшее оборудование, а именно: лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), переключатель термопар и выпрямитель постоянного тока.

6. Необходимо ввести поправочный коэффициент в формулу (1). Тогда новая формула имеет следующий вид:

$$\lambda = \frac{W_3 \cdot \ln(d_2/d_1) \cdot K_{п}}{(t_{c_1} - t_{c_2}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l_p},$$

где  $K_{п}$  – поправочный коэффициент,  $K_{п} = 0,29$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дурнов, А. А. Моделирование процесса теплопроводности для определения теплофизических свойств твердых тел / А. А. Дурнов, С. А. Воеводкин, А. А. Балашов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 16–17 ноября 2021 года. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2021. – С. 99-100.
2. Дурнов, А. А. Виртуальная модель определения коэффициента теплопроводности твердых тел методом трубы / А. А. Дурнов, С. А. Воеводкин, А. А. Балашов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы VII Международной научно-практической конференции, Тамбов, 12–14 октября 2021 года. Том Выпуск 7. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2021. – С. 119-121.
3. Балашов, А. А. Характеристики погрешностей при определении температуры структурных переходов в полимерах / А. А. Балашов, Д. С. Кацуба // Метрология, 2014. – № 9. – С. 36-42.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Балашов, доцент кафедры ЭОПиТТ ТГТУ.



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПК ANSYS FLUENT ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПИРОЛИЗНОЙ ПЕЧИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

С.Э. Шавадзе

Ивановский государственный энергетический университет  
ТЭФ, ПТЭ, группа 1-4М

Термическая переработка твердых коммунальных отходов осуществляется чаще всего в специальных печах шахтного типа – термических реакторах, в которых слой ТКО последовательно проходит процессы сушки и пиролиза с последующей газификацией твердого углеродистого остатка [1, 2, 3]. Образующееся в процессе переработки газообразное топливо отводится потребителю.

Для выбора рационального режима работы печи актуальным является математическое моделирование процесса теплообмена в ее рабочем пространстве.

Нами разработана математическая модель шахтной печи для утилизации твердых коммунальных отходов методом пиролиза.

Модель реализована в программном комплексе ANSYS FLUENT.

Модель позволяет определить температурное поле материала и время его переработки в зависимости от расхода топлива на установку.

Построение модели в программном комплексе ANSYS FLUENT проводится в несколько этапов. Первым этапом является построение геометрической модели в модуле DesignModeler, представленной на рисунке 1.

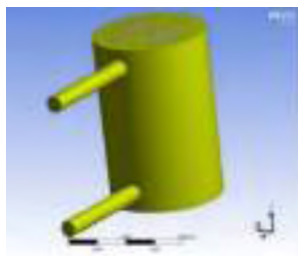


Рис. 1. Геометрическая модель

Вторым этапом производится формирование расчетной сетки в модуле Mesh, показанной на рисунках 2 и 3.

Следующим этапом проектирования является задание условий расчета. Все настройки решателя производятся в разделе «Setup».

В этом разделе необходимо указать уравнения и модели, которые будут участвовать в решении.



Рис. 2. Расчетная сетка

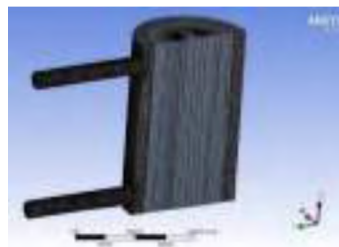


Рис. 3. Расчетная сетка в разрезе

Переходим на вкладку «Materials». В данном разделе необходимо указать свойства веществ, участвующих в процессе. По условию задачи мы имеем два вещества: непосредственно твердые коммунальные отходы (ТКО) и пиролизный газ. Задание свойств твердых и текучих сред производится раздельно.

Для инженерных расчетов эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф}$  предлагается принять по сумме проводимости тепла ТКО (скелетом) и порами – расчет по формуле Л.А. Бровкина (1):

$$\lambda_{эф} = \lambda_{ск} \cdot [k_1 \cdot k_2(1 - f) + \Lambda \cdot f], \quad (1)$$

где  $\lambda_{ск}$  – коэффициент теплопроводности ТКО (скелета), Вт/(м·°С);  $(1 - f), f$  – площадь, занимаемая соответственно скелетом и порами в 1 м<sup>2</sup> поперечного к направлению теплового потока сечения садки;  $\Lambda$  – относительный перенос тепла через пору без учета конвекции.

Расчеты эффективной плотности и средней удельной теплоемкости выполнены по принципу аддитивности по следующим формулам (2–3):

$$\rho_{эф} = \rho_{ск}(1 - f) + \rho_{г} \cdot f, \quad (2)$$

где  $c_{ск}$  – средняя удельная теплоемкость ТКО (скелета), Дж/(кг·°С);  $c_{г}$  – средняя удельная теплоемкость газов, Дж/(кг·°С);  $f$  – пористость тела.

$$c_{эф} = c_{ск}(1 - f) + c_{г} \cdot f, \quad (3)$$

где  $\rho_{ск}$  – плотность ТКО (скелета), Дж/(кг·°С);  $\rho_{г}$  – плотность газов, Дж/(кг·°С);  $f$  – пористость тела.

В результате расчетов, произведенных по формулам (1, 2, 3) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства ТКО в зависимости от температуры

t, °С	20	40	60	80	95
$\lambda_{эф}$ , Вт/(м·°С)	0,074	0,075	0,077	0,079	0,081
$c_{эф}$ , Дж/(кг·°С)	1448,41	1492,07	1533,51	1569,18	1600,1
$\rho_{эф}$ , кг/м <sup>3</sup>	529,63	529,61	529,59	529,56	529,58

Для упрощения расчета введем постоянные теплофизические свойства пиролизного газа, полученные при усреднении их значений в интервале рабочих температур.

Завершаем задание свойств материалов, участвующих в процессе.

После выполнения всех этапов моделирования математической модели смотрим результаты моделирования при расходе газа 1200 кг/ч, представленных на рисунке 4.

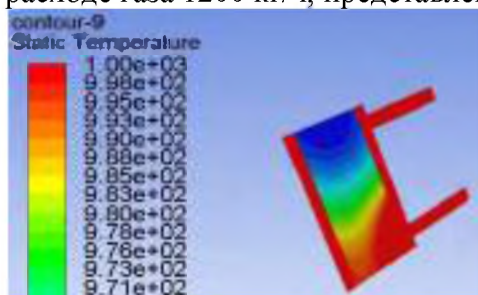


Рис. 4. Температурное поле в рабочем пространстве печи

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Колибаба О.Б., Сокольский А.И., Габитов Р.Н. Исследование сушки слоя твердых бытовых отходов в процессе термической переработки // Вестник Череповского Государственного Университета. – 2015 - №3. – С.21.
2. Власов О.А., Мечев В.В. Анализ работы сжигания отходов // Твердые бытовые отходы. – 2017 – Т.2. – С.199 – 202.
3. Горинев О.И., Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Самышина О.В., Скворцов И.А. Установка для термического разложения несортированных твердых органических отходов: пат. РФ, №2645029; опубли. 15.02.2018. Бюл. № 5.
4. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л: Энергия, 1974. – 264 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. О.Б. Колибаба, зав. каф. ЭТГ ИФФ ИГЭУ.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕСЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Е.А. Шувалов

Рыбинский государственный авиационный технический университет  
кафедра ОТФ, группа ТФМ – 21

В технике огромное значение имеет внедрение способов интенсификации тепломассообменных процессов. Одним из распространенных способов интенсификации теплообмена, массообмена и переноса импульса в элементах конструкций технических устройств является закрутка потока рабочего тела. Закрученные потоки наиболее часто используются в теплообменных аппаратах, горелочных устройствах, вихревых эжекторах и вихревых трубах.

При использовании несжимаемой жидкости в вихревой трубе возможна реализация самых разных эффектов таких как: разделение жидкости на разные фракции, очистка жидкости, нагрев жидкости в результате диссипации энергии при вихреобразовании. В закрученном потоке в приосевой области возникает локальное понижение статического давления, что приводит к образованию кавитационных полостей в вихревой камере. Современные технологии позволяют при использовании численного моделирования достаточно точно прогнозировать кавитационные характеристики технических устройств [1]. Поэтому численный расчет кавитации может способствовать более глубокому пониманию процессов, протекающих в вихревых устройствах, и, на основе этих данных, совершенствованию устройств преобразования энергии.

Цель настоящей работы заключается в исследовании условий формирования кавитационных полостей в закрученном потоке несжимаемой жидкости.

Объектом исследования использовалась модель противоточной вихревой трубы, использующая смесь воды и водяного пара в качестве рабочего тела. Вода поступает через тангенциальный ввод в закручивающее устройство, встроенное в корпус. В камере энергоразделения с относительным диаметром диафрагмы 0,81 и длиной вихревой камеры в 16 калибров происходит разделение потока на прямоток, проходящий в периферийной зоне в сторону раскручивающего устройства на выход, и противоток формирующийся в приосевой зоне и направленный в сторону 1 корпуса к закручивающему устройству.

Построение сетки выполнялось в программе ICEM CFD в пакете Ansys. Сетка модели тетрагональная неструктурированная. На граничных условиях задавались: на входе полное давление, на холодном выходе статическое давление, а на горячем выходе объемный массовый расход.

Численный расчет выполнялся в программе Ansys CFX. Для стационарного расчета использовалась модель турбулентности Shear Stress Transport SST, учитывающая как удельную кинетическую энергию ( $k$ ) и изотропную диссипацию турбулентности ( $\epsilon$ ) для расчета во внешнем потоке, так и относительную удельную диссипацию ( $\omega$ ) для расчета при стенной области.

Определяющим параметром является число Рейнольдса, определяемое по средне расходной скорости на входе в тангенциальный подвод и диаметру вихревой камеры:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Режимы проведения численных расчетов сведены в таблицу 1. В ходе расчета варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды  $\mu$ , выходящей через диафрагму и через крестовину. Полученные результаты давления и объемной доли воды для различных режимов представлены на рисунке 1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением полного давления на входе зона вакуумирования уменьшается, а ее форма принимает вид капли. Предполагается, что данное изменение связано с перестройкой структуры закрученного течения и

образованием более мелкомасштабных вихревых структур. С ростом давления на входе с 6 до 10 атмосфер глубина вакуумирования снизилась в 2 раза.

Таблица 1. Расчетные режимы

№ режима	Полное давление $P^*_{вх}$ , бар.	Число Рейнольдса $Re$ .	Относительная доля охлажденного потока $\mu$ .
1 режим	6	8006	1
2 режим	8	9345	1
3 режим	10	10571	1
4 режим	10	10602	0,97
5 режим	10	10663	0,95
6 режим	10	10724	0,89

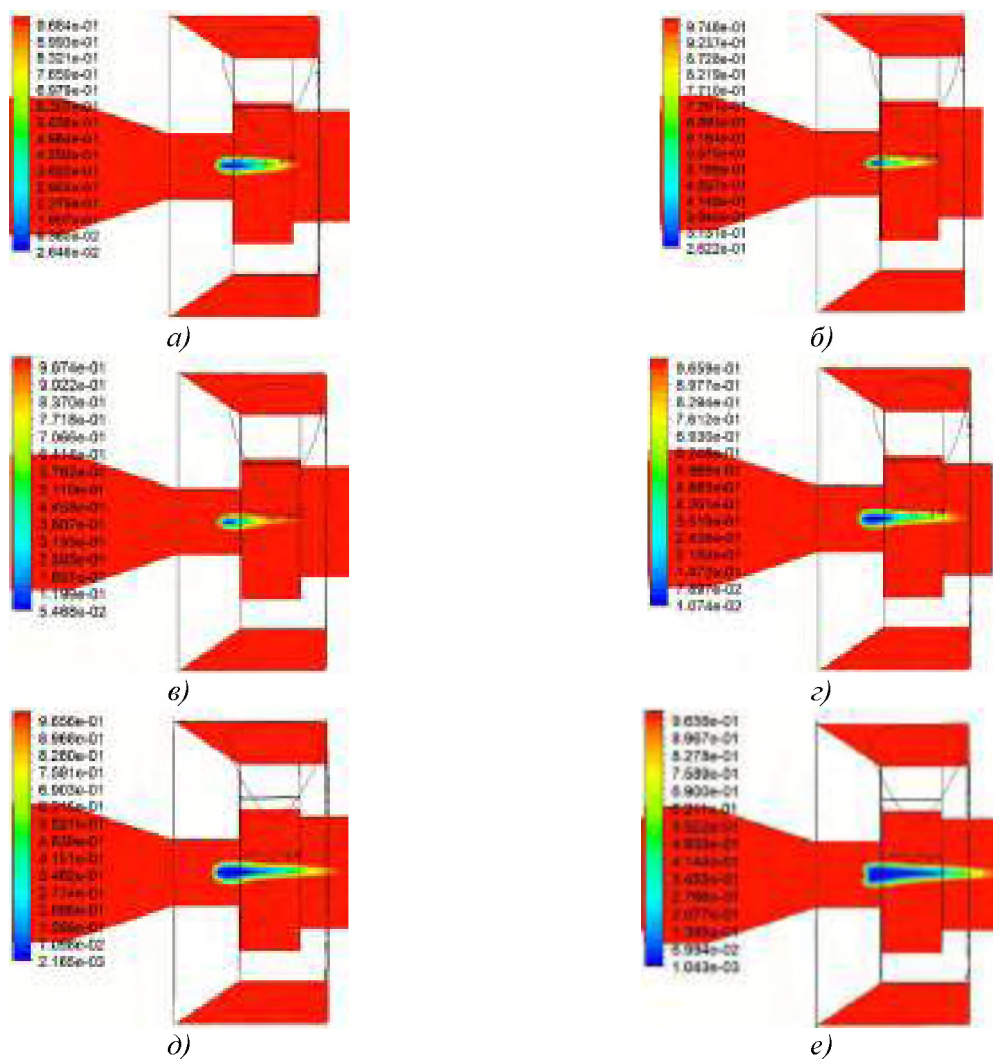


Рис. 1. Распределение объемной доли воды в модели вихревой трубы:  
а) 1 режим; б) 2 режим; в) 3 режим; г) 4 режим; д) 5 режим; е) 6 режим

Проанализировав результаты, приведенные на рисунке 1 (в, г, д, е), можно заметить, что при равном давлении на входе и сравнении горячего выхода увеличивается общая область вакуумирования. С уменьшением относительной доли охлажденного потока форма зоны пониженного давления вытягивается в сторону горячего выхода. Полученные результаты показали, что на всех исследованных режимах возможно формирование кавитационной полости. Дальнейшие исследования требуют экспериментальной верификации полученных результатов, которые будут выполнены на прозрачной модели вихревой трубы.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Багаев Д.В., Егоров С.В., Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Таранов А.Е. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений // Труды Крыловского государственного научного центра 4 (382), 2017, – С. 1-11.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-01199.

Научный руководитель: к.т.н. С.В. Веретенников, зав. каф. ОТФ РГАТУ.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЖЕКТОРА СО ШНЕКОМ

А.А. Шилов

Рыбинский государственный авиационный технический университет

Вихревые эжекторы широко применяются в технике [1]. Это связано с тем, что на оси закрученного потока создается область с пониженным давлением. В эту область можно организовать подвод пассивного потока. Характеристики работы такого типа эжектора существенным образом зависят от того, как организуется закрутка потока. На практике для этой цели используют тангенциальные завихрители. Такие завихрители просты по конструкции и позволяют создать достаточно интенсивный закрученный поток. Однако такого типа завихрители не позволяют менять в широких пределах степень закрутки. Такого недостатка лишены шнековые завихрители.

Таким образом представляется актуальным, разработка вихревого эжектора с шнековым завихрителем.

В данной работе предлагается схема вихревого эжектора с шнековым завихрителем, показанная на рисунке 1.

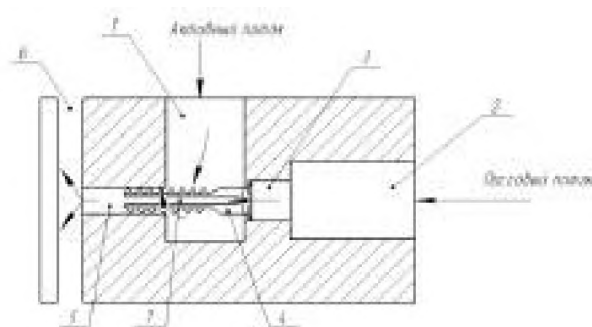


Рис. 1. Схема конструкции вихревого эжектора:

- 1 – патрубок ввода активного потока; 2 – патрубок ввода пассивного потока;  
3 – цилиндрический участок для герметизации посадки завихрителя; 4 – шнековый завихритель;  
5 – выходной канал; 6 – щелевой зазор; 7 – отверстие для пассивного потока

Задачей исследования являлось определение газодинамических характеристик работы эжектора, к которым относится зависимость коэффициента эжекции от режимных и геометрических параметров эжектора.

В работе варьировалась толщина щелевого зазора на выходе из эжектора, а также давление на входе.

Коэффициент эжекции вычислялся по формуле:

$$\eta = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{а}}},$$

где  $G_{\text{а}}$  – расход активного потока;  $G_{\text{п}}$  – расход пассивного потока.

На рисунке 2 представлены результаты эксперимента, т. е. зависимость коэффициента эжекции от перепада давления при различных щелевых зазорах.

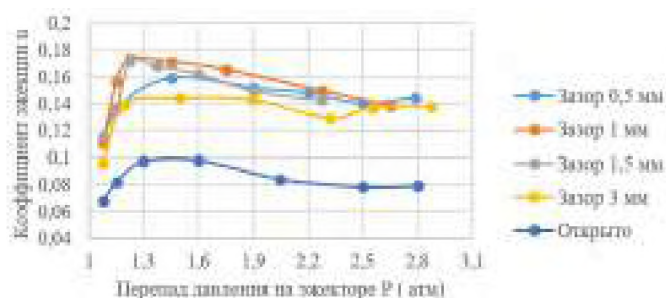


Рис. 2. График зависимости коэффициента эжекции от перепада давления на эжекторе

Из представленных результатов видно, что коэффициент эжекции достигает своего максимального значения при перепаде давления вблизи 1,3, затем при повышении перепада давления он плавно убывает и далее практически не меняется. Наиболее сильное изменение коэффициента эжекции имеет место при малых перепадах давления, до значения перепада 1,3 атм.

Также данные эксперимента были представлены в виде зависимости коэффициента эжекции от ширины щелевого зазора (рисунок 3).

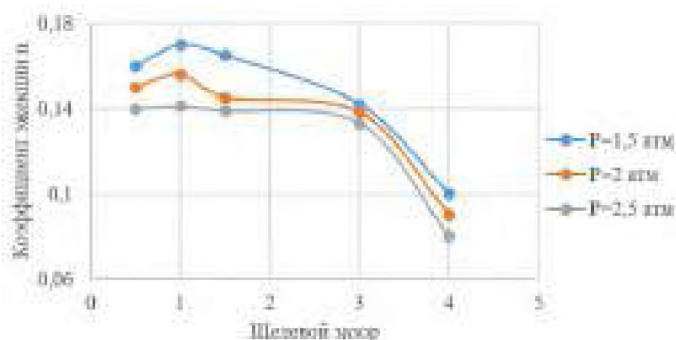


Рис. 3. График зависимости коэффициента эжекции от величины щелевого зазора

По результатам, которые изображены на графике видно, что при различных значениях перепада давления, коэффициент эжекции принимал свои максимальные значения при щелевом зазоре равном 1 мм.

В ходе эксперимента также были получены расходные характеристики эжектора, которые представлены в виде зависимости расхода пассивного потока от перепада давления на рисунке 4.

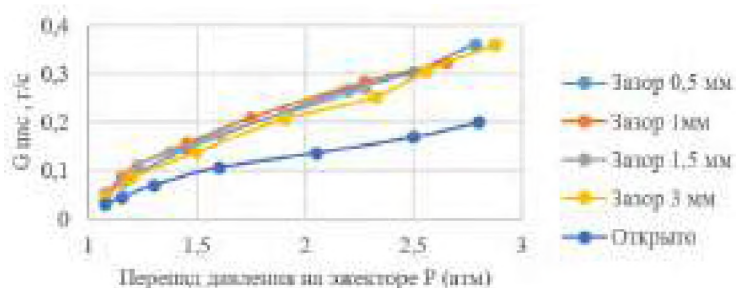


Рис. 4. График зависимости расхода пассивного потока от перепада давления на эжекторе

На графике рисунок 4 видно, что с увеличением перепада давления происходит увеличение расхода пассивного потока для каждого значения щелевого зазора.

Было проведено исследование расходных характеристик активного потока эжектора при различных величинах щелевого зазора результаты которого представлены на рисунке 5.

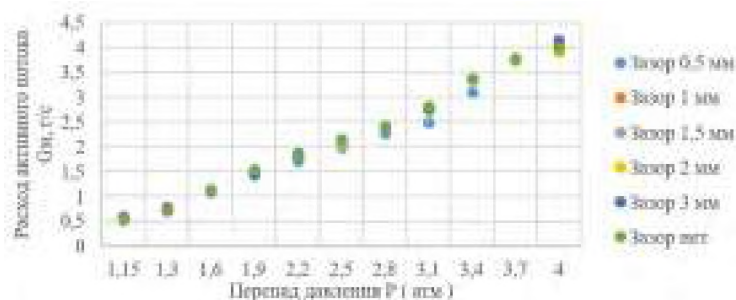


Рис. 5. График зависимости расхода активного потока от перепада давления на эжекторе

Из рисунка 5 видно, что с увеличением перепада давления на эжекторе расход возрастает практически линейно. В зависимости от изменения щелевого зазора сопротивление эжектора практически не изменяется.

Коэффициент сопротивления  $C_f$  определялся по формуле:

$$C_f = \frac{\Delta P}{\rho w^2},$$

$$\Delta P = P - P_{\text{атм}}.$$

Число Рейнольдса определялось по формуле:

$$Re = \frac{wd}{\nu}.$$

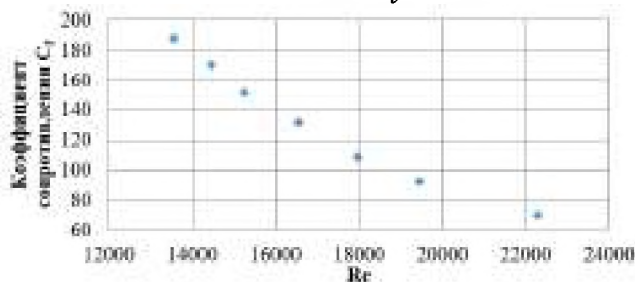


Рис. 6. График зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

Из графика на рисунке 6 можно видеть то, что коэффициент сопротивления уменьшается при росте числа Рейнольдса. Зависимость является типичной для таких устройств.

В результате экспериментального исследования прямоточного эжектора с шнековым завихрителем были определены режимные характеристики его работы. Показано, что ширина щелевого зазора неоднозначно влияет на величину коэффициента эжекции. Для предложенной в работе конструкции максимальный коэффициент эжекции равный 0,17 имеет место при ширине зазора 1 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Вихревые аппараты / А.Д. Сулов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-01199.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. М.Н. Сергеев, доцент кафедры ОиТФ РГАТУ.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ТОПЛИВ

П.О. Смоленцев  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, группа А0-44

Построена математическая модель и проведено исследование сопряженного теплообмена резервуара для хранения мазута с окружающей средой по средствам конвекции и теплопроводности, при различных значения параметров окружающей среды и теплоотвода в грунт. Исходя из исследования, мазут находился в резервуаре, изолированном стекловатой.

Для описания процессов теплопередачи в условиях естественной конвекции использовались следующие уравнения:

Для воздуха:

$$\begin{aligned} & \frac{d\Omega}{d\tau} + U \frac{d\Omega}{dX} + V \frac{d\Omega}{dY} = \\ & = \frac{d^2}{dX^2} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{Gr}} + \frac{1}{Re_t} \right) \Omega \right] + \frac{d^2}{dY^2} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{Gr}} + \frac{1}{Re_t} \right) \Omega \right] + \frac{dT}{dY} + 2 \frac{dU}{dY} \frac{d^2}{dX^2} \left( \frac{1}{Re_t} \right) \\ & \quad - 2 \frac{dV}{dX} \frac{d^2}{dY^2} \left( \frac{1}{Re_t} \right) + 2 \left( \frac{dV}{dY} - \frac{dU}{dX} \right) \frac{d^2}{dXdY} \left( \frac{1}{Re_t} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{dT}{d\tau} + U \frac{dT}{dX} + V \frac{dT}{dY} = \\ & \frac{d}{dX} \left[ \left( \frac{1}{Pr_t \sqrt{Gr}} + \frac{1}{Pr_t Re_t} \right) \frac{dT}{dX} \right] + \frac{d}{dY} \left[ \left( \frac{1}{Pr_t \sqrt{Gr}} + \frac{1}{Pr_t Re_t} \right) \frac{dT}{dY} \right], \end{aligned}$$

$$\frac{d^2\psi}{dX^2} + \frac{d^2\psi}{dY^2} = -\Omega.$$

Для сплошных стен резервуара:

$$\frac{1}{Fo} \frac{dT}{d\tau} = \frac{d^2T}{dX^2} + \frac{d^2T}{dY^2}.$$

Условия, которые выполнялись для данной системы уравнений:

– на внешнем контуре области, за исключением левой границы, граничные условия второго рода:

$$\frac{dT_i}{dn} = 0,$$

– на левой внешней границе:

$$-\lambda_i \frac{dT}{dX} = BiT + Bi(T_e) + N[(T)^4 - (T_e)^4],$$

– на границе раздела стенка-газ устанавливаются следующие условия:

$$\psi = 0, \frac{d\psi}{dn} = 0, \frac{dT_1}{dX} = \lambda_{1,2} \frac{dT_2}{dX},$$

– для модели к-ε вблизи твердой поверхности принимается следующее:

$$\frac{dK}{dn} = 0, E = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{k \Delta n}.$$

В результате численного моделирования были получены температурные поля конвективного распределения мазута в резервуаре (рисунки 1–3), и поля теплоотвода в грунт (рисунки 4–6), а также поля распределения скорости движения мазута (рисунок 7) в разных частях резервуара в определенные моменты времени.

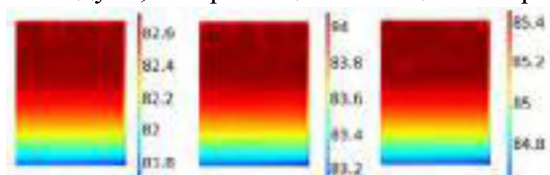
Рассматривая температурные поля изображенные на рисунках 1–3 мы наблюдаем, что огромное значение при снижении температуры имеет температура наружного воздуха  $t$  в, так же можно наблюдать процесс перемещения мазута в резервуаре при снижении температуры – вблизи стенок мазут отдает тепловую энергию поверхностям резервуара в результате чего пе-



ремещается к днищу резервуара (на рисунках видны характерные “струи” перемещения мазута), где температура имеет более низкие значения по сравнению с верхней частью резервуара.

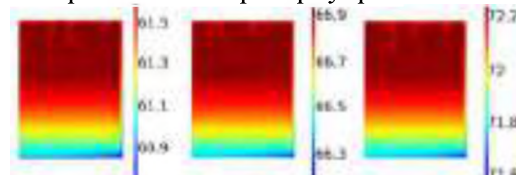
Если говорить про теплоотдачу в грунт, изображенную на рисунках 4–6, то можно сделать вывод что со временем зона прогрева грунта увеличивается.

Скорость перемещения мазута внутри резервуара не зависит от температуры окружающего воздуха, а перемещения вещества происходит в верхней части резервуара.



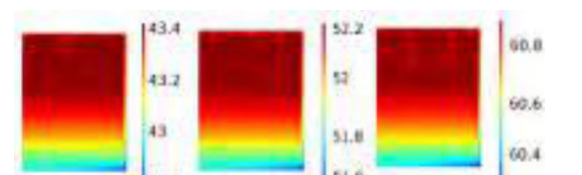
а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 1. Температурные поля мазута при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 300\text{ ч}$



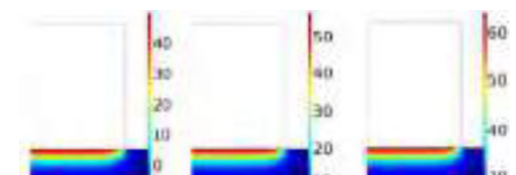
а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 2. Температурные поля мазута при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 1350\text{ ч}$



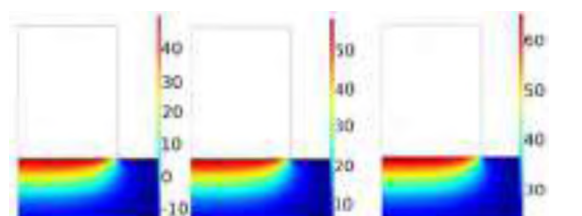
а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 3. Температурные поля мазута при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 2550\text{ ч}$



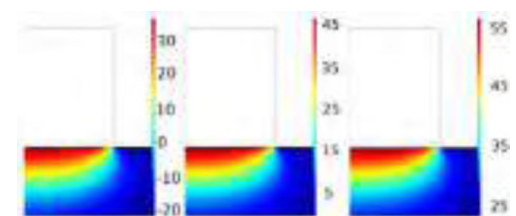
а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 4. Теплоотдача в грунт при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 300\text{ ч}$



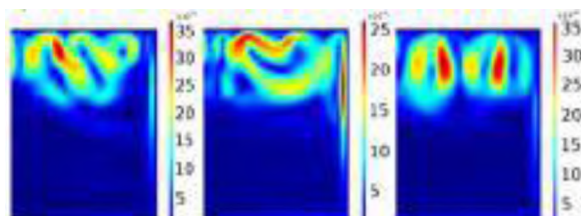
а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 5. Теплоотдача в грунт при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 1350\text{ ч}$



а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 6. Теплоотдача в грунт при различных значениях температуры наружного воздуха и времени остывания  $T = 2550\text{ ч}$



а)  $t_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$     б)  $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$     в)  $t_a = +20\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 7. Поля скорости мазута [м/с]

В результате численного моделирования была построена математическая модель и проведено исследование сопряженного теплообмена резервуара для хранения мазута с окружающей средой по средствам конвекции и теплопроводности, при различных значениях параметров окружающей среды и теплоотвода в грунт. Были установлены закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе и получены температурные поля конвективного движения

мазута в резервуаре, поля теплоотода в грунт, а также поля распределения скорости движения мазута в разных частях резервуара.

При изменении температуры окружающей среды на величину от  $t_b = -20\text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_b = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , время остывания мазута варьируется от  $T = 1350\text{ ч}$  до  $T = 2550$ , когда при температуре наружного воздуха  $t_b = 0\text{ }^\circ\text{C}$ , время остывания мазута до  $t_m = 60\text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $T = 1800$  часов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 612 с.
2. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. – 89 с.
3. Оленев Н.М. Хранение нефти и нефтепродуктов. М.: Недра. – 1964. – 428 с.
4. Ляндю И.М. Эксплуатация мазутного хозяйства котельной промышленного предприятия. М.: Энергия. – 1968. – 151 с.

Научный руководитель: д.т.н. В.Ю. Половников, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ ПРОТОЧНОЙ ЁМКОСТИ

К.В. Колотилкина

Самарский государственный технический университет  
ТЭФ, ТОТиГ, 1-УПНК-1.2.2

В данной работе выполнена математическая модель системы автоматического регулирования управляющим объектом (разработана в среде Simulink математического пакета MATLAB 7.10).

Представленный объект (рисунок 1) состоит из резервуара (проточная ёмкость), фактически являющийся паровым водонагревателем. Условия протекающего процесса следующие: масса воды равна 100 кг, уровень – постоянный, температура воды (на входе) равна  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , а массовый расход равен 40 кг/мин, а также принято, что температура воды (на выходе) равна нулю [5].

С помощью пропорционально-интегрального регулятора выполняется регулирование температуры за счет применения эффекта управления вследствие воздействия на показатель температуры методом изменения его значения. За счет изменения показателя расхода пара в змеевике обеспечивается постоянство температуры воды. Возмущающее воздействие заключается в изменении скорости потока воды при поступлении в комплекс, то есть изменение расхода.

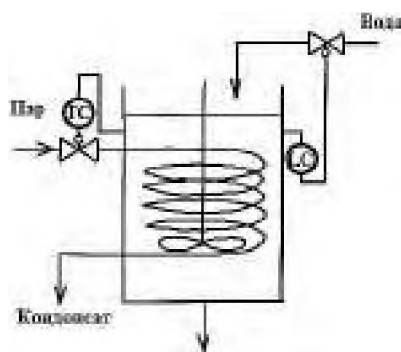


Рис. 1. Схема САП температуры

Отметим, что указанный объект – это комплекс с идеальным перемешиванием потока, а разбору подвергаются лишь тепловые процессы, следовательно, параметры математической модели фиксированы и представляют следующую систему условностей: толщина стенки змеевика – малая, пар целиком конденсирован, неизменные тепловые и физические параметры [5].

Перенос тепла в резервуаре осуществляется от греющего пара к воде, проходящей через саму емкость [1]. Уравнение теплового баланса следующее [5]:

$$Q_B + Q_{II} - Q_{ВЫХ} = \frac{dQ}{dt}. \quad (1)$$

Подставляя выражения в уравнение теплового баланса (2), получается [4]:

$$m_B \cdot c_B \cdot (T_{BX} - T_3) + m_{II} \cdot r = M_B \cdot c_B \frac{dT}{dt}. \quad (2)$$

На основе модели статики объекта определяется начальный массовый расход пара  $m_{II}^0$  в змеевике, тогда получается [5]:

$$m_{II}^0 = \frac{m_B \cdot c_B \cdot (T_3 - T_{BX})}{r}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что по сравнению с инерционностью комплекса инерционность первичного преобразователя (ПП) бесконечно мала [3]. Зависимость (4), преобразующая выходной сигнал ПП в регулирующее воздействие (в начальный момент времени) равна нулю [5].

$$U = K_y \varepsilon + \frac{1}{T_U} \int \varepsilon dt, \quad (4)$$

$$U|_{t=0} = 0. \quad (5)$$

Рассогласование (ошибка регулирования)  $\varepsilon$  вычисляется следующие образом:

$$\varepsilon = \frac{T - T_3}{(T_{\max} - T_{\min})} \quad (6)$$

Инерционностью исполнительного устройства (ИУ) пренебрегается, данный факт принят за допущение [2]. Степень открытия клапана определяется, согласно формуле [5]:

$$A = A_0 + U. \quad (7)$$

Расходная характеристика является линейной [5]:

$$m_{II} = k \cdot A, \quad (8)$$

$$k = m_{II}^0 / A_0. \quad (9)$$

В результате объединения уравнений (2), (3), (4), (5), (6), (7), (9) получается следующая модель динамики САР температуры:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_B \cdot c_B \cdot (T_{BX} - T_3) + m_{II} \cdot r = M_B \cdot c_B \frac{dT}{dt} \\ m_{II}^0 = \frac{m_B \cdot c_B \cdot (T_3 - T_{BX})}{r} \\ \varepsilon = \frac{(T - T_3)}{(T_{\max} - T_{\min})} \\ U = K_y \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int \varepsilon dt \\ A = A_0 + U \\ k = m_{II}^0 / A_0 \\ T|_{t=0} = 80^\circ C \\ U|_{t=0} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

В Simulink создаем модель объекта (рисунок 2).

При ступенчатом изменении расхода воды в емкости (на 20 %) переходная характеристика объекта представлена ниже (рисунок 3) [5]:

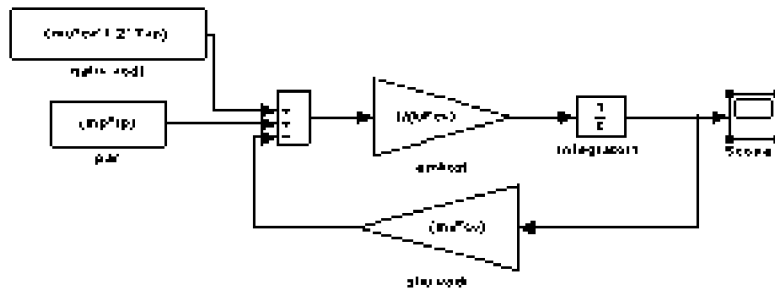


Рис. 2. Создание модели объекта

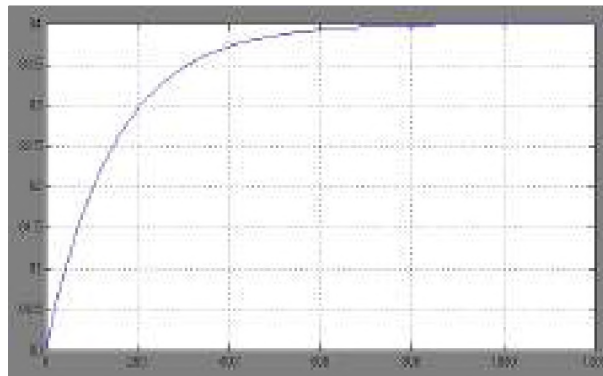


Рис. 3. Переходная характеристика рассматриваемого комплекса

Далее аналогичным способом создаются модели следующих подсистем: ПИ-регулятора, ИУ, ПП. В результате их объединения, получается модель САР температуры (рисунок 4) [5]. Запуск программы осуществляется в рабочем окне Simulink (параметры настройки регулятора следующие:  $k = 1$  и  $T_i = 1$ ; интервал времени: от 0 до 1000 с.), следовательно, получаются следующие графики переходного процесса (рисунки 5, 6) [5].

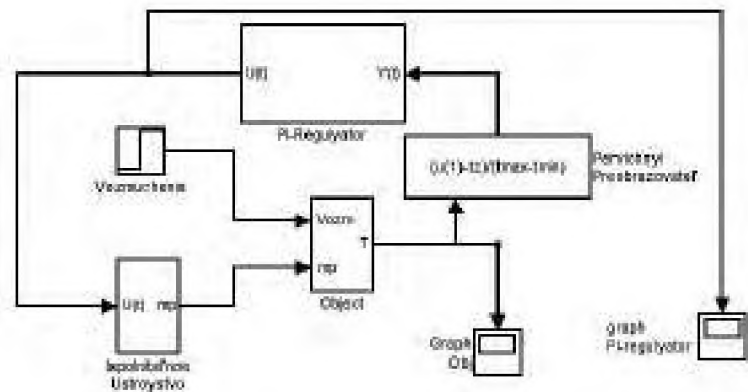


Рис. 4. Модель САР температуры

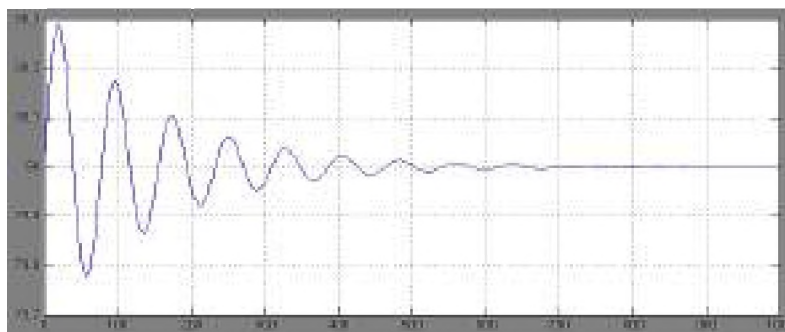
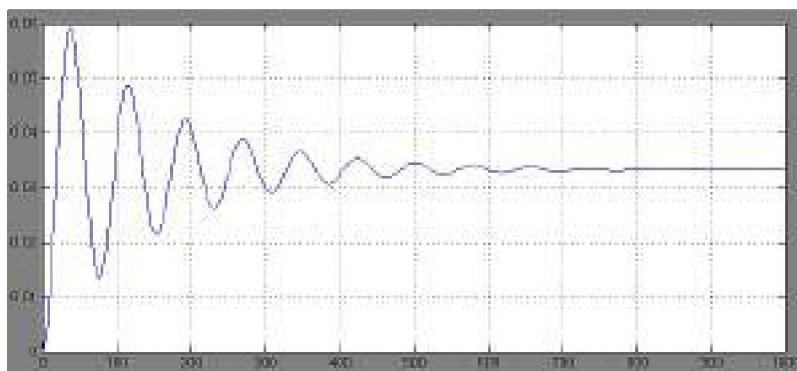


Рис. 5. Переходный процесс в рассматриваемом комплексе



*Рис. 6. Регулирующее воздействие ПИ-регулятора*

Таким образом, при наличии существующего воздействия эффективность функционирования указанной системы регулирования, определяется точностью построения математической модели и наилучшими критериями процесса [5]. Благодаря замкнутому контуру регулирования, за счет изменения потока пара в змеевике (применяется как регулирующее воздействие), выполнена устойчивость температуры. В результате получены отраженные в форме графиков зависимости протекающего процесса перехода в САР температуры и регулирующего воздействия ПИ-регулятора [5].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 719 с.
2. Масловская, А.Г. Основные принципы работы и конструирование интерфейса в Matlab: Практикум / Масловская, А. Г. – Благовещенск.: Амурский гос. ун-т, 2008. – 55 с.
3. Масловская, А. Г. Численные методы. Моделирование на базе Matlab: Практикум / Масловская, А. Г. Черпак, Л. В. – Благовещенск.: Амурский гос. ун-т, 2006. – 120 с.
4. Тарасевич, Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование / Тарасевич, Ю.Ю. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 152с.
5. Колотилкина К.В. Математическое моделирование системы автоматического регулирования температуры в пакете MATLAB 7.10. Материалы XIV Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029612> (дата обращения: 1.11.2022).

Научный руководитель: д.т.н., профессор В.А. Кудинов, зав. каф. ТОТиГ ТЭФ СамГТУ.

## Третья секция. ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### ОРГАНИЗАЦИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ АЭС С РЕАКТОРОМ БРЕСТ-ОД-300

Р.В. Дадашов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5091

#### Введение

Тема подготовки воды и создания водно-химического режима (ВХР) имеют первостепенное значение для поддержания работы электростанций и предприятий без ущерба и снижения эффективности, вызываемых коррозией внутренних поверхностей теплоэнергетического оборудования, а также без образования отложений на теплопередающих поверхностях, шлама в оборудовании и трубопроводах.

#### Постановка первостепенной задачи

В ядерных установках IV поколения всё оборудование, включая активную зону реактора, находится в расплавленном металле. Поддерживать металл в таком состоянии позволяет температура питательной воды, которая на входе в парогенератор достигает более 340°C, это обеспечивается за счет высокого давления. Проанализировав технологическую схему реактора БРЕСТ-ОД-300 [1], а также химические показатели источника водоснабжения [2], откуда будет браться питательная вода для второго контура энергоблока, пришли к выводу, что для повышения надёжности работы контура необходимо подобрать оптимальный режим водочистки [3].

На основании проведенного анализа параметров исходной воды и требуемого качества питательной воды для использования на АЭС, необходимо разработать технологическую схему очистки.

#### Корректировка показателей и подбор схемы предочистки

Предельно допустимые концентрации в основном обусловлены требованиями к чистоте пара и минимизацией протекания процессов коррозии и накипеобразования в парогенераторе.

Основными источниками примесей в питательной воде являются химические компоненты образующиеся при коррозии оборудования и поступающие с неочищенной и очищенной водой (потери пара, конденсата).

Пробы всех основных показателей питательной воды должны производиться перед ее подачей в парогенератор.

С учётом вышеперечисленной информации и представленных показателей качества исходной воды (рисунок 1), определим основные показатели, которые необходимо скорректировать: концентрацию взвешенных веществ, содержание железа и алюминия, содержание кремния, показатель жёсткости, показатель окисляемости, содержание нефтепродуктов, содержание фенолов.

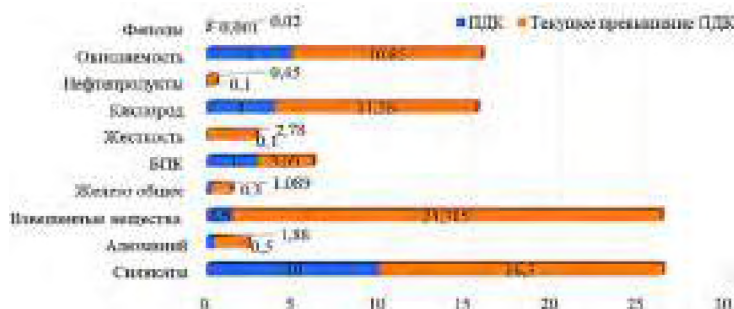


Рис. 1. Диаграмма с показателем ПДК веществ и его превышением в р. Томь, мг/л

С учетом вышеперечисленных показателей, для уменьшения их концентраций, схема должна состоять из следующих элементов (рисунок 2):

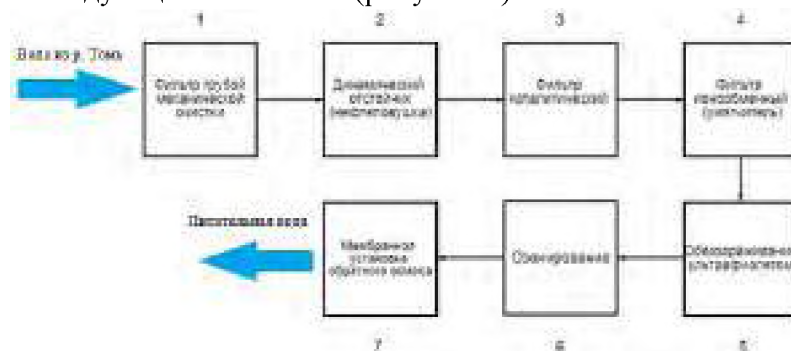


Рис. 2. Схема водоочистки питательной воды для АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300

Водоочистительная установка работает согласно принципу (рисунок 2): вода, проходя через фильтр 1, очищается от грубодисперсных примесей. Затем фильтр 2 избавляет воду от нефтепродуктов, фильтр 3 удаляет из воды железо и алюминий, фильтр 4 умягчает воду. После этого необходимо произвести удаление кремния из воды с помощью фильтра 5, и провести обеззараживание воды ультрафиолетом (6) и при помощи обратного осмоса (7).

### Заключение

На основании проведенного анализа параметров источника водоснабжения (р. Томь) для проектируемого энергоблока АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300, были выделены основные показатели с наибольшим превышением ПДК. С учетом данных показателей была подобрана схема водоочистки, которая позволит обеспечить АЭС питательной водой требуемого качества, с минимальным образованием продуктов коррозии. Это позволит сократить затраты на ремонтные работы, а также увеличить период эксплуатации энергоблока в целом.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами/ под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с. – ISBN 978-5-98706-129-9.
2. Копылов, Анатолий Сергеевич. Водоподготовка в энергетике : учебное пособие для вузов / А. С. Копылов, В. М. Лавыгин, В. Ф. Очков // 2-е изд., стер. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.: ил. – Список литературы: с. 303-304. – Предметный указатель: с. 305-306. – ISBN 5-903072-453.
3. СанПиН 2.1.4.559–96. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды. Централизованные системы питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Госкомсанпиднадзор России, 1996.

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ, к.т.н. Т.С. Тайлашева, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРНОЙ ТОПКЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

К.И. Мальцев

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А0-46

Доля угольной генерации России в течении последних десяти лет планомерно падает. Взамен угольных электростанции увеличивается доля газовых, данная тенденция отслеживается предпочтительно в центральной части России. В Сибирском и Дальневосточном федеральных округах уголь является предпочтительным способом получения тепловой и электрической энергии в виду его низкой стоимости [1].

Значительная часть генерирующего оборудования России имеет наработку более 40 лет. Выбор оборудования тепловых электрических станций основан на характеристиках сжигаемого топлива, и чаще всего прикреплен к определенному угольному месторождению. В процессе эксплуатации происходит исчерпание проектного топлива или изменение его теплотехнических характеристик. Использование непроектных углей влечет за собой изменение в работе тепломеханического оборудования станции, например, невозможность несения номинальной паровой нагрузки, чрезмерное шлакование экранных и конвективных поверхностей нагрева, повышение температуры металла пароперегревателя и перегретого пара на выходе из котла [2].

В данной работе представлены результаты численного исследования топочных процессов при сжигании непроектного угля в пылеугольном котле БКЗ-220-100Ф, установленном на Артемовской ТЭЦ (Приморский край). Данная станция введена в эксплуатацию в 1936 году. В качестве топлива используются каменные угли различных месторождений Приморского края и других регионов, в виду исчерпания месторождения, на использование которого проектировалась станция.

Объектом исследования является паровой котел БКЗ-220-100Ф, предназначенный для сжигания каменных углей в пылевидном состоянии. Котлоагрегат имеет П-образную компоновку. Топка прямоугольного сечения, размером 6656x9536 мм, оборудована четырьмя двойными пылевыми щелевыми горелками, расположенными по углам топочной камеры и направлены по касательной к окружности 1330 мм (рисунок 1).

В работах [3–5] представлены результаты численных исследований сжигания проектного топлива – Артемовского угля марки ЗБ и замещающих углей Липовецкого, Ургальского и Эльгинского месторождений на номинальной нагрузке. Результаты численного исследования показали возможность сжигания непроектных углей в топочной камере котельного агрегата БКЗ-220-100Ф на номинальной нагрузке. Однако отмечают повышенные температуры дымовых газов на выходе из топки при сжигании эльгинского угля, которая превышает значение температуры начала шлакования и может привести к шлакованию пароперегревателя. В результате численных исследований отмечены недостатки компоновки горелочных устройств, из-за особенностей размеров топочной камеры (соотношений сторон составляет 1,4) наблюдается смещение горелочных струй на экраны топки [4].

Целью данного исследования является анализ физико-химических процессов в топочной камере котла БКЗ-220-100Ф при сжигании непроектного угля Ургальского месторождения при нагрузках 100, 75, 50 %.

При рассмотрении горизонтального разреза на уровне горелок видно, что вследствие тангенциального расположения горелочных устройств поток закручивается, образуя окружность в форме эллипса, смещенного к горелочному устройству № 1 (рисунок 2).



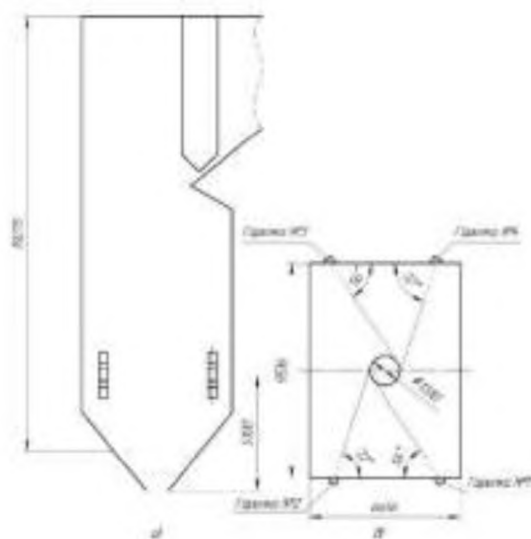


Рис. 1. Эскиз топочной камеры котла БЗК-220-100Ф:  
а) продольное сечение; б) компоновка горелочных устройств

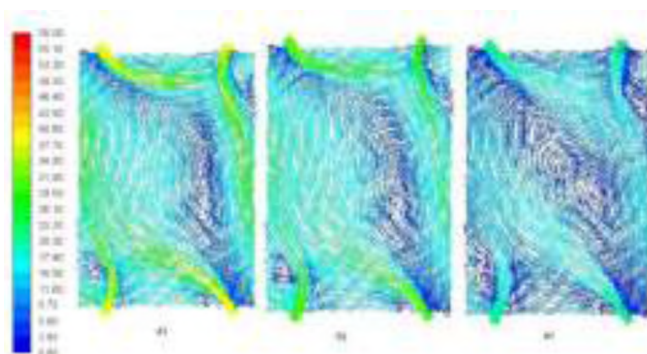


Рис. 2. Векторное поле скоростей (м/с) в горизонтальной плоскости на уровне горелок при сжигании угля Ургальского месторождения при нагрузках:  
а) 100 %; б) 75 %; в) 50 %

Исходя из полученных векторных полей скоростей, можно сделать вывод о том, что аэродинамика в топочной камере при снижении нагрузки качественно не изменяется.

Изменение температуры в топке происходит следующим образом (рисунок 3а). В нижней части топки температура на всех рассматриваемых нагрузках составляет порядка 1250 °С. Затем, с увеличением высоты топочной камеры температура возрастает и достигает максимальных значений от 1400 до 1450 °С. С дальнейшим подъемом факела температура плавно уменьшается и на выходе из топки имеет значение 1080 °С при нагрузке 100 %, 1030 °С при нагрузке 75 % и 940 °С при нагрузке 50 %.

На всех из рассматриваемых нагрузок котельного агрегата при сжигании угля Ургальского месторождения температура на выходе из топочной камеры не превышает температуру начала деформации золы, тем самым шлакование ширмового пароперегревателя расплавленной золой сводится к минимуму.

Объемная доля кислорода (рисунок 3б) в области горелочных устройств стремится к нулю, так как кислород вступает в реакцию с топливом. В дальнейшем содержание кислорода возрастает по высоте топочной камеры. Объемная доля на выходе из топочной камеры составляет: при 100 % нагрузке – 4,5 %; при 75 и 50 % нагрузке – 5,2 %.

Также при нагрузке 50 % наблюдается повышенное содержание кислорода в области холодной воронки (около 10 %), вследствие смещения в эту область потока с тыльной стены топочной камеры.

Концентрация СО во всех исследованных вариантах на выходе из топочной камеры близка к нулю, что свидетельствует о высокой полноте выгорания топлива.

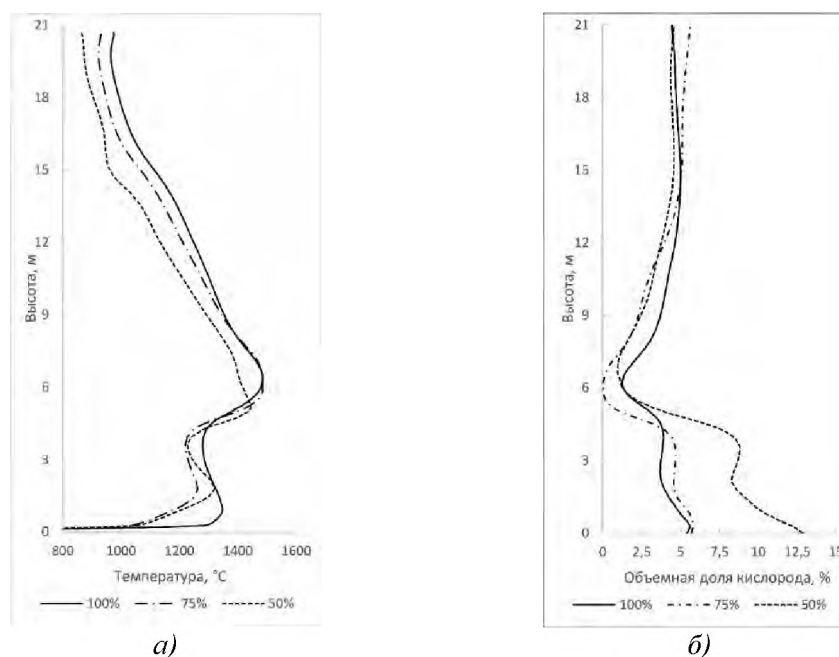


Рис. 3. Распределение среднеинтегральных значений в горизонтальных сечениях при сжигании угля Ургальского месторождения:

а) температура дымовых газов; б) объемная доля кислорода

Согласно данным, полученным при помощи численного моделирования топочных процессов при сжигании каменного угля Ургальского месторождения в котельном агрегате БКЗ-220-100 Ф, можно сделать следующие заключения:

- тангенциальная компоновка обеспечивает закручивание пылевоздушного потока в топочной камере, образуя окружность в форме эллипса;
- температура на выходе из топочной камеры на рассматриваемых нагрузках не превышает температуру начала деформации золы, что сводит к минимуму зашлаковывание ширмового пароперегревателя;
- объемная доля кислорода на номинальной нагрузке составляет 4,5 %, что превышает нормативный избыток воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Перспективы развития угольных ТЭС России / А.Г. Тумановский // Теплоэнергетика. – 2016. – Т. 6. – № 6. – С. 3-13.
2. Бурчаков В.А. Маркетинг в горной промышленности: Учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2013. – 272 с.
3. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле производительностью 220 т/ч / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь // Теплоэнергетика. – 2022. – Т. 12. – № 12. – С. 73-83.
4. Мальцев К.И. Исследование аэродинамической структуры в топочной камере с тангенциальной компоновкой горелочных устройств // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, 2022. С. 336-340.
5. Мальцев К.И., Заворин А.С., Гиль А.В. Численное исследование процессов в топочной камере котла производительностью 220 т/ч при переводе на непроектное топливо // Радиотехника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва: ООО «ЦПУ «Радуга»», 2021. – 881 с.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Гиль, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГТД В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ

В.С. Шабаловский  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б95

В последние десятилетия при проектировании силовых установок основное внимание уделялось энергоэффективности и низкому уровню выбросов загрязняющих веществ. Вследствие этого, выбор силовых установок все еще является важным аспектом в различных отраслях [1].

В водном и наземном транспорте часто применяются различные силовые установки. Каждые из них обладают своими недостатками и преимуществами, а также особенностями эксплуатации. Но если выделить основные разновидности, то можно выделить: газотурбинные двигатели и двигатели внутреннего сгорания [2].

Основные преимущества ГТД перед ДВС:

- высокая удельная мощность;
- высокий КПД на предельных режимах работы;
- многотопливность;
- простота запуска при экстремальных минусовых температурах;
- экономичность;
- меньшая шумность.

Недостатки ГТД перед ДВС:

- более высокие требования в качестве топлива и воздуха;
- высокая инертность;
- большая стоимость;
- более сложное обслуживание.

В наземном транспорте массо-габаритные характеристики силовых установок имеют важное значение, однако требуемые мощностные показатели, как правило, имеют не столь высокие показатели. Именно поэтому в наземном транспорте преобладают ДВС. Несмотря на все свои преимущества, недостатки, которыми обладают ГТД, куда существеннее, нежели, те преимущества, которые мы можем получить [2].

Однако, это не означает, что ГТД вовсе не используются. На сегодняшний момент, очень часто встречаются образцы военного транспорта и бронетехники с газотурбинной силовой установкой. Благодаря меньшему весу, шумности и дымности выхлопа, установка ГТД становится предпочтительнее [2].

Например, на танке Т-80Б установлен двигатель ГТД-1000Т. Он куда мощнее, экономичнее, обладает меньшим весом и габаритами по сравнению с двигателем В-84-1 от танка Т-72Б.

Помимо этого, были попытки использования ГТД в качестве силовых установок для Ж/Д транспорта. В СССР разрабатывались и использовались «Газотурбовозы», даже сейчас встречаются широко эксплуатируемые модели, например, ГТ1 [3].

Однако, из-за необходимости установки дополнительной силовой установки для оптимальной работы, ГТД не сыскали популярности и в железнодорожном транспорте [4].

В водном транспорте ситуация немного другая. Ограничений по массе и габаритам незначительны, а на первый план, выходят мощностные показатели и экономичность [5].

На танкерах и контейнеровозах часто встречаются дизельные ДВС. Они обладают достаточной экономичностью, и поэтому удовлетворяют требованиям. Так же ДВС встречаются и на военных кораблях, однако зачастую, используются комбинированные установки, состоящие из ДВС и ГТД [5, 6].

В дальнейшей перспективе, возможно увеличение распространенности ГТД в наземном и Ж/Д транспорте. Это возможно за счет разработки новых ГТД с биротативной турбиной и

более простым способом регулирования термодинамического цикла. Они способны уменьшить или устранить недостатки текущих ГТД [7].

На рисунке 1 представлена схема предполагаемого двигателя.

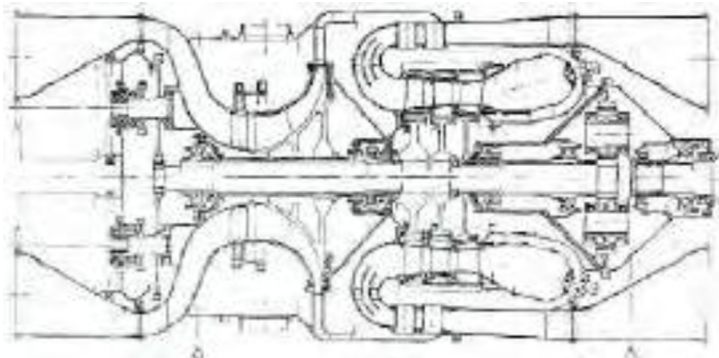


Рис. 1. Схема продольного разреза ГТД [7]

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.Ф.Тихонов, Е.Г. Шумихина, Л.С. Секлетина Дизель-электрическая силовая установка, Заметки ученого. Южный университет (ИУБИП). 2021.
2. В.И. Меркулов Ю.С. Кустарев энергетические машины и установки, учеб.пособие. – Мск. : Изд.-во МГТУ «МАМИ», 2006г.
3. Локомотивы на альтернативных видах топлива. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/locomotives\\_for\\_alternative\\_types\\_of\\_fuels/](http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/locomotives_for_alternative_types_of_fuels/) свободный.– Инновационный дайджест. – (дата обращения: 10.11.2022)
4. В.И. Кочергин, И.К. Далюк, В.В. Красников Перспективные направления использования газомоторного топлива на железнодорожном транспорте, Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. 2015. № 1
5. О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. С. Капустянский Газотурбинные двигатели на флоте: история и перспективы, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 2021 год. Том 13. № 2
6. Medica-Viola V, Mrzljak V, Anđelić N, Jelić M. Analysis of low-power steam turbine with one extraction for marine applications. “Naše more” 67(2)/2020., pp. 87-95
7. В. И. Яишников А. М. Карпенко Газотурбинный двигатель для наземного транспорта, Вестник двигателестроения. 2012. №1.

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, ст. преп. НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **РАСЧЕТ ПОТЕРЬ РЕАКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ШЛАКОВАНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР-1200**

Ю.С. Цыбочкина, И.А. Крутовский  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5081

В результате проектирования ядерных энергетических реакторов нового поколения необходимо самостоятельно получить данные, наиболее приближенные к реальным результатам. Для этого должны учитываться основные процессы, протекающие в активной зоне реактора. Однако возникает вопрос о наличии актуальных данных для учета этих процессов или хотя бы для их оценки.

В течение кампании реактора ядерное топливо делится, высвобождая энергию и оставляя после себя осколки, которые не способны к делению. Некоторые из образованных осколков

обладают высоким сечением радиационного захвата и большим периодом полураспада. Они участвуют в непроизводительном поглощении нейтронов, тем самым мешая протеканию процесса деления ядерного топлива. Эти осколки носят название – шлаки.

Шлакование – процесс накопления в работающем реакторе стабильных и долгоживущих продуктов деления, непроизводительно поглощающих нейтроны [1, с. 334].

Учитывать процесс шлакования в течение работы реактора при проектировании важно и нужно, поскольку шлаки уменьшают запас реактивности реактора и тем самым сокращают кампанию (время работы реактора между перегрузками ядерного топлива).

Основные шлаки (с большой долей выхода) объединены в три группы по отношению микроскопического сечения поглощения<sup>1</sup> шлака к микроскопическому сечению поглощения основного топлива<sup>2</sup>. Первая группа – шлаки с микроскопическим сечением поглощения на порядки больше микроскопического сечения поглощения основного ядерного топлива (<sup>235</sup>U). Вторая группа – шлаки, порядок микроскопических сечений которых совпадает с порядком микроскопического сечения поглощения <sup>235</sup>U. Третья группа – шлаки, микроскопическое сечение поглощения которых на порядки меньше микроскопического сечения поглощения <sup>235</sup>U.

Цель данной работы состоит в актуализации характеристик шлаков разных групп, образующихся в ядерном реакторе и расчета потерь реактивности за счет протекания этого процесса.

Данные микроскопических сечений радиационного захвата устарели и в некотором роде противоречивы. Определить род (или тип) шлака достаточно трудоемкий процесс из-за их большого количества и недоступности данных по их характеристикам (в особенности относительной доли выхода). Поэтому, типы шлаков и их относительные доли выхода не уточнялись, а были взяты из литературы [3, с. 214-215]. Уточнению подверглись микроскопические сечения поглощения шлаков.

В работе были собраны современные характеристики<sup>3</sup> шлаков разных групп и методика расчета потерь реактивности за счет шлакования.

Для расчета потерь реактивности микроскопические сечения поглощения должны усредняться [2]. Для реактора типа ВВЭР-1200 с тепловой мощностью 3500 МВт, предварительно рассчитанные усредненные микроскопические сечения поглощения представлены в таблице 1 вместе с актуальными характеристиками шлаков.

Для упрощения процесса определения потерь реактивности, расчет проводился в зависимости от степени выгорания<sup>4</sup>.

Таблица 1. Характеристики шлаков при делении <sup>235</sup>U

Первая группа шлаков							
Изотоп	<sup>62</sup> Sm <sup>149</sup>	<sup>64</sup> Gd <sup>157</sup>	<sup>63</sup> Eu <sup>155</sup>	<sup>48</sup> Cd <sup>113</sup>	<sup>62</sup> Sm <sup>151</sup>		
$\sigma_{a0}^i$ , барн	40537,86	253254,4	3760,361	20170,61	15164,05		
$\bar{\sigma}_a^i$ , барн	21306,7624	133110,9076	1976,4516	10601,7041	7970,2483		
$\gamma_i$ , %	1,3	0,0074	0,03	0,014	0,445		
Вторая группа шлаков							
Изотоп	<sup>36</sup> Kr <sup>83</sup>	<sup>61</sup> Pm <sup>147</sup>	<sup>45</sup> Rh <sup>103</sup>	<sup>54</sup> Xe <sup>131</sup>	<sup>60</sup> Nd <sup>143</sup>	<sup>62</sup> Sm <sup>152</sup>	<sup>63</sup> Eu <sup>153</sup>
$\sigma_{a0}^i$ , барн	202,3203	167,7	133,1357	99,6685	325,0467	205,8906	312,6178
$\bar{\sigma}_a^i$ , барн	106,3399	88,1434	69,9763	52,3859	170,8451	108,2164	164,3124
$\gamma_i$ , %	0,62	2,6	2,9	2,9	6,2	0,28	0,14

<sup>1</sup> Для неделящихся изотопов микроскопическое сечение поглощения совпадает с микроскопическим сечением радиационного захвата.

<sup>2</sup> Основным топливом в реакторах ВВЭР является уран-235.

<sup>3</sup> Каждый шлак характеризуется стандартным микроскопическим сечением поглощения  $\sigma_{a0}^i$  и выходом  $\gamma_i$ .

<sup>4</sup> Степень выгорания – доля выгоревшего основного топлива от первоначального его количества [1].

Третья группа шлаков							
Изотоп	${}_{36}\text{Kr}^{82}$	${}_{36}\text{Kr}^{85}$	${}_{42}\text{Mo}^{95}$	${}_{47}\text{Ag}^{109}$	${}_{53}\text{I}^{127}$	${}_{53}\text{I}^{129}$	${}_{55}\text{Cs}^{133}$
$\sigma_{a0}^i$ , барн	19,0761	1,6605	13,6016	90,26	6,403	30,32	28,9
$\bar{\sigma}_a^i$ , барн	10,0264	0,8728	7,1490	47,4408	3,3654	15,9362	15,1899
$\gamma_i$ , %	0,3	0,32	6,3	0,028	0,25	1,0	6,5
Изотоп	${}_{57}\text{La}^{139}$	${}_{59}\text{Pr}^{141}$	${}_{60}\text{Nd}^{144}$	${}_{60}\text{Nd}^{145}$	${}_{60}\text{Nd}^{146}$	${}_{43}\text{Tc}^{99}$	
$\sigma_{a0}^i$ , барн	8,94	11,48	3,6257	49,4449	1,4901	23,6038	
$\bar{\sigma}_a^i$ , барн	4,6989	6,0339	1,9057	25,9883	0,7832	12,4062	
$\gamma_i$ , %	6,3	5,7	6,0	4,0	3,2	6,2	

Ядерная концентрация и макроскопическое сечение поглощения  $i$ -го шлака в зависимости от степени выгорания рассчитываются соответственно:

$$N_i(z) = \frac{\gamma_i \bar{\sigma}_f^5 N_{50}}{\bar{\sigma}_a^i - \bar{\sigma}_a^5} (1-z) \left( 1 - (1-z)^{\frac{\bar{\sigma}_a^i}{\bar{\sigma}_a^5} - 1} \right), \quad (1)$$

$$\Sigma_a^i(z) = N_i(z) \bar{\sigma}_a^i, \quad (2)$$

где  $\gamma_i$  – удельный выход  $i$ -го шлака;  $\bar{\sigma}_a^i$  – среднее микроскопическое сечение поглощения  $i$ -го шлака.

Относительная доля поглощаемых нейтронов для каждого шлака рассчитывается следующим образом:

$$q_{\text{ш}i}(z) = \frac{\Sigma_a^i(z)}{\Sigma_a^5(z)}. \quad (3)$$

Так как эта величина аддитивная, то относительная доля поглощаемых нейтронов равна сумме относительных долей поглощаемых нейтронов каждого шлака:

$$q_{\text{ш}}(z) = \sum_{i=1}^k q_{\text{ш}i}(z), \quad (4)$$

где  $k$ -число изотопов.

Потеря реактивности в связи с накоплением шлаков в течение кампании:

$$\rho_{\text{ш}}(z) = -q_{\text{ш}}(z)\theta. \quad (5)$$

Таким образом потеря реактивности зависит от концентрации основного топлива, мощности реактора, и длительности кампании.

Результатом расчета процесса накопления шлаков в течение кампании является график изменения потерь реактивности (рисунок 1).

Из полученных данных видно, что характер изменения зависимостей по уточненным (сплошная линия) и по неуточненным (штриховая линия) характеристикам не отличается. Однако, без уточнения характеристик шлаков, величина общей потери реактивности увеличена более чем в 1,5 раза (при максимальном выгорании). В целом, погрешность расчета между отдельными группами варьируется от 5 % до 150 %. Такая высокая погрешность связана с тем, что микроскопические сечения поглощения шлаков:

- устарели, т. е. появились более новые библиотеки данных;
- были округлены до целых чисел (зачастую кратных 5);
- не были усреднены (влияние температуры нейтронного газа весомо занижает усредненные микроскопические сечения).

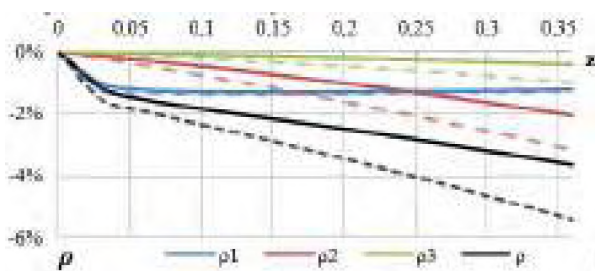


Рис. 1. Изменение потери реактивности в течение кампании по уточненным характеристикам (сплошная линия) и по неуточненным характеристикам (штриховая линия)

## **Заключение**

В результате проведенной работы были актуализированы характеристики шлаков и методика расчета, которыми можно воспользоваться при проектировании реакторов ВВЭР на других уровнях мощности, так как потери реактивности за счет шлакования реактора ВВЭР в разных группах изменяются по схожим зависимостям, а мощность реактора влияет только на интенсивность потерь реактивности. Вначале кампании основной вклад в потерю реактивности вносят шлаки первой группы, что связано с быстрым нарастанием концентрации сильных шлаков до их стационарных концентраций.

В реакторе типа ВВЭР-1200 с тепловой мощностью 3500 МВт, при степени выгорания 35 %, потери реактивности за счет шлакования не превышают 4 %, что влияет на продолжительность кампании реактора.

Уточнение параметров шлакования значительно повышает точность определения потерь реактивности, что позволяет повысить эффективность эксплуатации ядерного реактора.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Мерзлякин Г.Я. Основы теории ядерных реакторов. Изд.4-е, переработанное и дополненное. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2015. – 452 с.
2. Подготовка параметров к нейтронно-физическому расчету реактора на тепловых нейтронах: методические указания к выполнению индивидуального домашнего задания по дисциплине «Физика ядерных реакторов» для студентов, обучающихся по специальности 140404 «Атомные электрические станции и установки» направления 140400 «Техническая физика» / сост. А.В. Кузьмин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 61 с.
3. Румянцев, Геннадий Яковлевич. Расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах : Упрощенное методическое пособие / Г. Я. Румянцев. – Москва : Атомиздат, 1967. – 124 с.: черт. – Библиогр.: с. 121-122.

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **NPP POWER UNIT FOR THE CITY OF ALEXANDRIA WITH A DESALTING PLANT**

M.A.E. Hegazy  
Egyptian russian university, Tomsk polytechnic university  
ISHE, group 5071

### **Introduction**

Sustainable development is the main goal of the whole world and it is not forgotten that energy is the main engine and the active element for all growth and development, as it is the basic element for all sectors of the economy and a companion to human life. In an attempt for Egypt to enter this race, the government is working on increasing the supply of electricity generated using nuclear energy. Usually it is used in cities that overlook a natural source of water such as the Nile River or any of the seas overlooked by Egypt, the Mediterranean or the Red Sea. Since the salinity of these two seas is high and contains chemicals, so a desalination and treatment plant must be established for these Water before entering the plant in order to ensure that no damage or loss of efficiency occurs due to corrosion of the internal surfaces of thermal power equipment, as well as without the formation of deposits on the surfaces of heat transfer, sludge in equipment and pipelines.

### The purpose of the project

This project aims to replace the dilapidated Abu Qir power station in Alexandria city (figure 1), which used to work with coal as fuel, and to establish a 650 MW nuclear power station in its place, equipped with a desalination and water treatment plant, based on a decision issued by The head of the Egyptian Electricity Holding Company stipulates the beginning of the implementation of the plan to degrade and stop the aging power plants, whose operational life exceeded 27 years, due to their increasing consumption of fuel, and their lack of need at the present time [1].



Fig. 1. Alexandria city (Abu Qir sector) [2]

### Justification of the choice of location

In implementation of the decision that was presented above, there were more than 4 stations that were stopped, including the Abu Qir station in Alexandria, which this project aims to replace, And I chose this one specifically to replace as there are more than one power plant has been shut down next to this one, so this region will need more energy production to cover what has been stopped in the coming days and on another hand I choose this area at Alexandria because of the availability of all the ingredients that we can need to establish a nuclear power plant from a source of water as it overlooks the Mediterranean Sea and the availability of a large area to contain the power station and the desalination station. At the same time it is somewhat far from the residential communities in order to avoid any radiation that may be emitted from the station.

### Parameters and schemes of the project

An attempt to cover the same amount of energy that was produced by the old station, and based on the climatic condition of the place, such as the average temperature and atmospheric pressure, it reached the following initial parameters at table 1 which the project calculations were based on.

Table 1. Initial parameters of the project

$N_e$ , MW	650
$t_{\text{cooling water}}$ , °C	30

By working on the initial data I got all the remaining parameters of the station and designed the suitable scheme for it (figure 2). And after calculating all the flow rates in the station I managed to design the suitable scheme for the desalination plant (figure 3), which covers the flow rate of leakage which at our situation  $G_{\text{leak}}=11,5 \text{ kg/s}$ .

### Main results of the project

At this project I designed an NPP with electrical power 650 MW. The steam turbine has HPC and LPC between their one separator and one stage of superheating. Finally with these components the efficiency of the plant is 29 percent. The number of LPFH is 4 and HPFH is 3. With this calculation the final parameter of the plant shown in table 2.

Table 2. Final Parameters for the NPP plant

Parameter	Value	Parameter	Value
$Q_{SG}$	$2106,8 \cdot 10^3 \text{ kW}$	$G_0$	1152 kg/s
turbine efficiency	31,2 %	Gross efficiency of NPP	30 %
Net efficiency of NPP	29 %	efficiency of steam generating unit	97 %

After that choosing the suitable material for each equipment according to my calculation, my choice should include technical and economic properties.

I also designed the desalination plant with the elements (table 3).



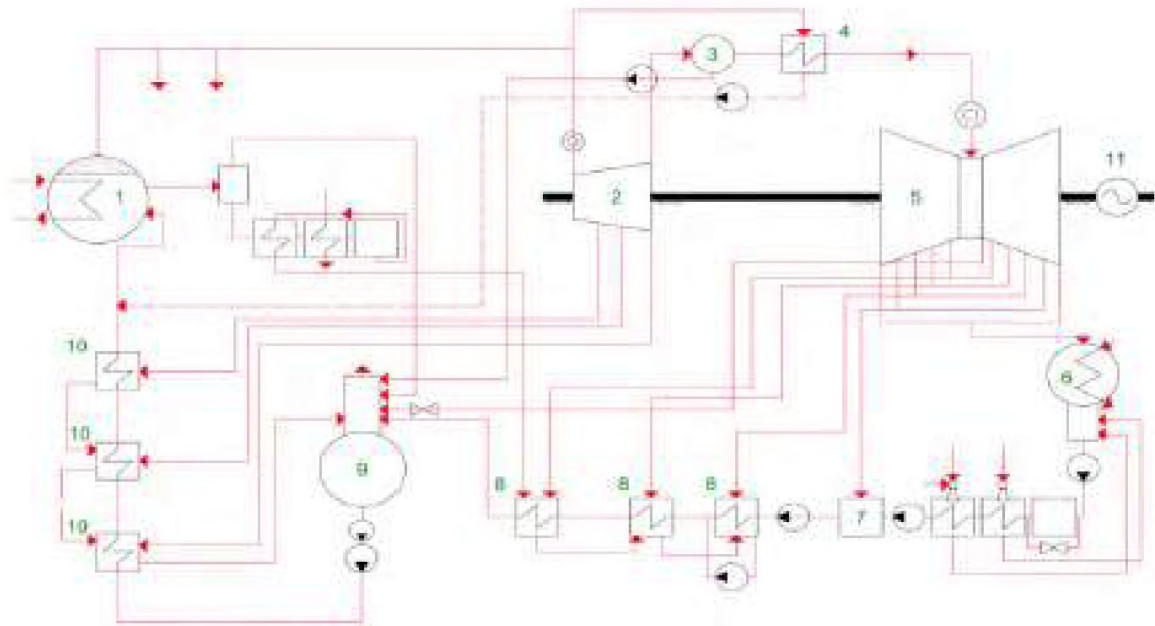


Fig. 2. Scheme for NPP plant:

1 – steam generator, 2 – high pressure turbine, 3 – separator, 4 – reheater, 5 – low pressure turbine, 6 – condenser, 7 – open low pressure heater, 8 – closed low pressure heater, 9 – deaerator, 10 – high pressure heaters, 11 – electric motor

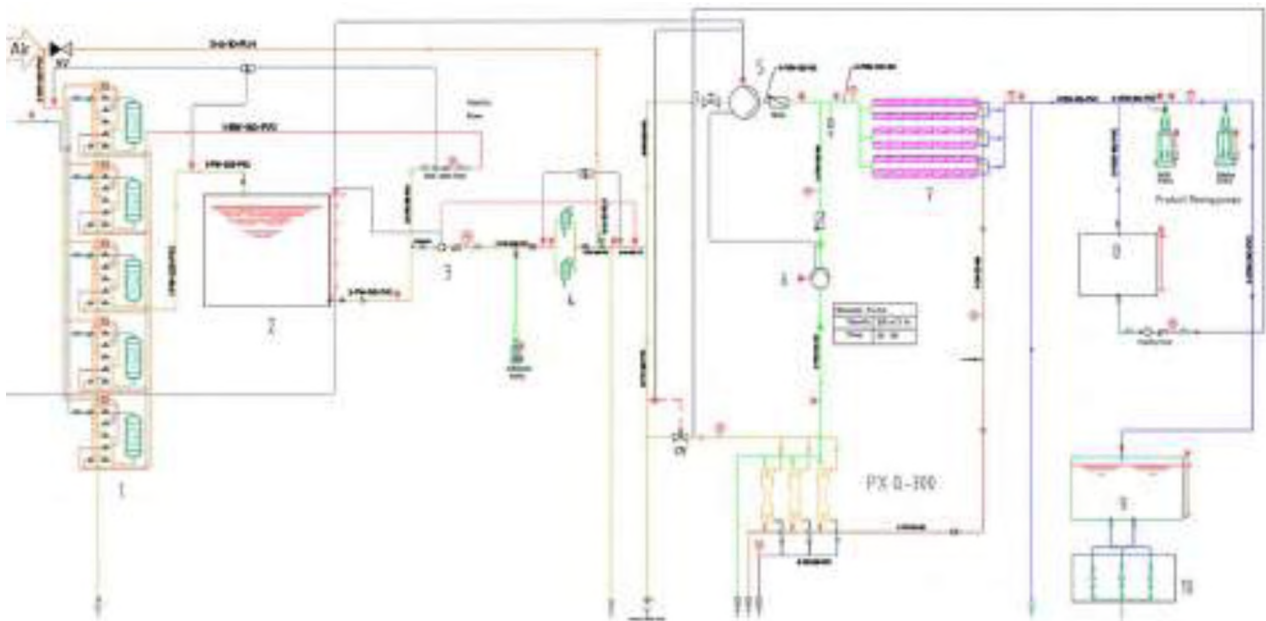


Fig. 3. Scheme for desalination plant:

1 – Sand filters, 2 – Raw water tank, 3 – Feed pump, 4 – Fine filter, 5 – HPP, 6 – booster pump, 7 – pressure vessel, 8 – flushing tank, 9 – permeate tank, 10 – permeate pumps

Table 3. Final Parameters for the desalination plant

Name of the element	Quantity of elements	Power, m <sup>3</sup> /hr
Sand filters	5	49.1
Feed pump	1	145
HPP	1	55
Booster pump	1	125
Fine filters	2	30
Pressure vessels	15	
Membranes	90	

## **Conclusion**

In this project we developed a nuclear power plant as an alternative to a thermal power plant that has spent its life and that effects on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere which helps to preserve the environment. We have presented the calculations of the project for the construction of a complete nuclear power plant in addition to a water desalination plant to support this plant. It can also be benefited from the water desalination plant for civil use and be a source of potable water.

## **REFERENCES:**

1. Egypt begins removing aging power stations from service, Energy Research Unit Reports, ATTAQA site, posted in 2020.
2. <https://goo.gl/maps/NWbxeeK9SF79tXjH6>

Supervisor: S.V. Lavrinenko, Candidate of Pedagogical Sciences, ISHE TPU.

## **ADVANCED TURBINE REGENERATION SYSTEM WITH DIFFERENT NUMBER OF HIGH-PRESSURE HEATERS**

A.F. Abdelzaher  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, group 507I

## **Introduction**

The course of the globe is changing. Our world continues to be heavily dependent on fossil fuels despite the significant efforts to decarbonize the economy and the many billions spent on those initiatives. Over 80% of the world's energy still comes from fossil fuels, and the trend is clear: rather than reducing our reliance on fossil fuels, we are growing it. A global initiative is in way to create a sustainable energy system. The demand for clean, plentiful, and affordable electricity is at the center of this initiative.

The utilization of nuclear energy offers a quick pathway to a high-powered, clean energy system that is inexpensive, results in a healthier environment, and increases a nation's energy security.

The only low carbon technology that has been shown to work and can be implemented at the pace and scale necessary to meet the goals of the Paris Agreement are large-scale nuclear reactors. Regardless of the weather or the time of year, these reactors quietly operate in the background while providing enormous amounts of power constantly. The operational performance of nuclear energy is outstanding on a global scale, with many reactors achieving capacity factors above 80% on average.

Current nuclear power facilities throughout the globe are built on tested technology that has developed and matured over the past 40 years. These reactors, which have capacities ranging from roughly 600MWe to 1700MWe, offer their national systems a safe and reliable source of electricity.

This project's objectives included developing a nuclear power unit with 900 MW, figuring out the best way to balance efficiency and economic concerns, and upgrading the nuclear power plant's Feed water heating system – heat regeneration. These developments were necessary because they would meet the needs of countries in the Middle East and South Asia.

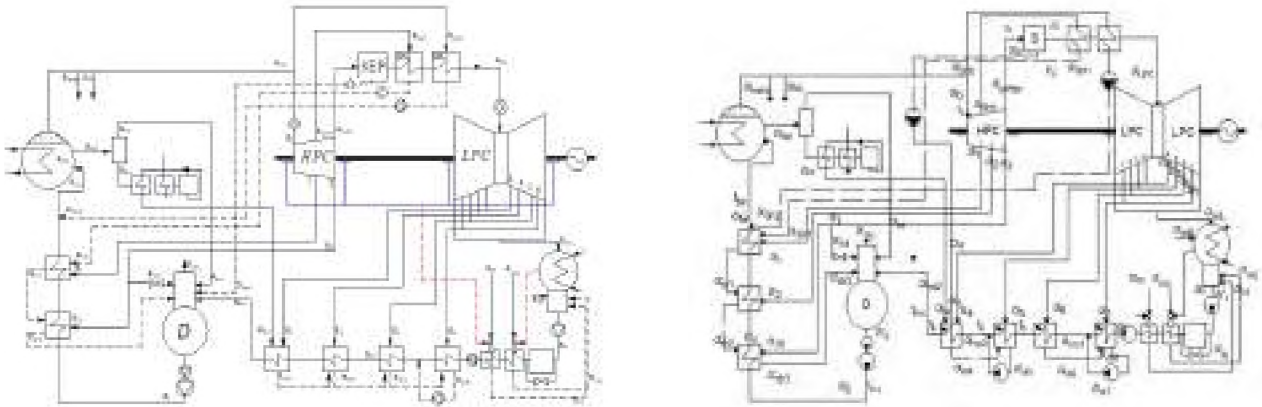
### **1. Heat regeneration for the feed water heating system**

The feedwater heating system typically includes:

- low-pressure feedwater heaters;
- deaerator;
- high-pressure feedwater heaters.

### 1.1 low-pressure feedwater heaters

Condensate from condensate pumps is then passed via a series of low-pressure feedwater heaters, where heat transfer from steam derived from low-pressure turbines raises the condensate's temperature. The cascade of low-pressure feedwater heaters typically has three or four stages. At around, the condensate leaves the low-pressure feedwater heaters, approximately  $p = 1 \text{ MPa}$ ,  $t = 150^\circ\text{C}$ , and enters the deaerator. A mechanical condensate purification system for eliminating contaminants is also part of the main condensate system. Self-regulating feedwater heaters are available. It implies that the rate of heat absorption from the steam and the flow of extraction steam increase with feedwater flow.



*Fig. 1. Scheme of a typical 900 MW steam turbine from VVER*

Between the feedwater heaters and the turbine, the extraction steam lines have non-return valves. In the event of a turbine trip, these non-return valves stop the flow of steam or water in the opposite direction, resulting in a sharp drop in pressure inside the turbine. Any water that enters the turbine in this way has the potential to seriously harm the turbine blading.

### 1.2 deaerator

In the deaerator, the condensate is typically heated to saturated conditions using steam that is taken from the steam turbine. A system of spray nozzles and cascading trays between which the steam percolates mixes the extraction steam in the deaerator. This procedure results in the release of any dissolved gases in the condensate, which are then eliminated from the deaerator by venting to the atmosphere or the main condenser.

The feedwater storage tank is located directly beneath the deaerator, where a sizable amount of feedwater is kept at close to saturation levels. This feedwater can be provided to steam generators in the turbine trip event to keep the necessary water inventory during a transient. In order to provide an appropriate net positive suction head (NPSH) at the entrance of the feedwater pumps, the deaerator and the storage tank are typically situated at a high elevation in the turbine hall.

NPSH is a metric for gauging a fluid's proximity to saturation. Cavitation can be produced by decreasing the suction side pressure.

The chance of cavitation in the pump is reduced by this configuration.

### 1.3 high-pressure feedwater heaters

The feedwater output from the pumps enters the containment, passes through the high-pressure feedwater heaters, and then enters the steam generators.

By drawing steam from the high-pressure turbine, or HP Turbine, the high-pressure feedwater heaters are heated. Deaerators typically receive drains from high-pressure feedwater heaters. Through the feedwater inlet, feedwater is injected into the steam generator.

## 2. Initial data:

Table 1. Initial data

$n$ HPH	2	3
$N_e$ MW	900	900
$P_0$ , MPa	7,3	7,3
$t_0$ , °C	$t_s$ (288,7)	288,7
$P_c$ , kPa	4	4
Superheater	double-stage	double-stage
$t_{fw}$ , °C	240	240
$P_d$ , MPa	1,1	0,6

- Reactor Power is 900 MW.
- I took  $P_0 = 7,3$  MPa, because  $t_{fw}$  will be high and will give me a higher efficiency.

Increased initial temperature causes increase in  $\eta_t$ , effects  $\eta_{oi}$  since:

1. As steam expands, its specific volume rises; as a result, the first stage turbine blades' height rises.

2. The ultimate level of moisture declines, resulting in a reduction in moisture-related losses in the last stages of the turbine.

- $p_c = 4 \div 6$  kPa, I have chosen the minimum because

1. Thermal efficiency rises when the final pressure is lower because the cycle's heat losses are reduced.

2. The steam humidity rises at the end of the expansion phase as the pressure at the turbine's outlet decreases, increasing losses in the turbine.

3. Due to the expansion of the heat-exchange surface, capital expenses rise when attempting to approximate the temperature of steam in a condenser to that of cooling water.

The efficiency of the turbine decreases by 1,25 % for every kPa rise in condenser pressure.

- $P_d = 1,1$  MPa, I have chosen high pressure in deaerator to obtain My goal which is high efficiency, the steam system is shielded from corrosive gas effects by deaeration. By lowering the concentration of dissolved oxygen and carbon dioxide to a point where corrosion is minimal.

- Steam is passing through a moisture separator to remove the condensed moisture prior to further expansion in the low-pressure turbines Installation with intermediate double separation. Removal of moisture from the high-pressure exhaust steam helps to prevent low-pressure blading degradation (keep steam humidity below the limited values).

- the second intermediate separation is used as second stage of the separation because of the intermediate turbine cylinder and to keep the quality of the steam.

- $t_{fw} = 240$  °C, I took feed water temperature to reduce the number of heaters.

Feedwater temperature increase

1. Amount of heat added in the SG decreases

2. Size and cost of low-pressure equipment (LPC, condenser, etc.) decreases.

## 3. Results

Table 2. Results

$n$ HPH	2	3
$Q_{SG}$	2488 MW	2440,74 MW
$Q_{TS}$	2452 MW	2439,27 MW
$G_{SG}$	1347,4 kg/s	1341,6 kg/s
$bnf$	18,73 ton/year	18,42 ton/year
$\eta_{NPP}$	35,00 %	35,70 %

## Conclusion

In this work, a 900 MW nuclear power unit with an increased efficiency was developed. This is due to high values steam pressure (7,3 MPa) and feed water temperature (240 °C).

As a result of the calculated comparison of schemes with two and three HPHs, it was found that the efficiency of a power unit with three HPHs is 0,7% higher.

The preference for further development was given to a simpler scheme with two HPHs. In addition to simplicity, such a scheme requires significantly less investment.

#### LITERATURE:

1. <https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/policy-papers/the-need-for-large-and-small-nuclear,-today-and-to.aspx>
2. Improving the energy efficiency of NPP - ScienceDirect
3. <https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/policy-papers/the-need-for-large-and-small-nuclear,-today-and-to.aspx>
4. <https://openedu.urfu.ru/files/book/foreword.html>

Scientific supervisor: Candidate of Technical Sciences A.M. Antonova, Associate Professor of the I.N. Butakov Scientific and Educational enter of the Tomsk Polytechnical University School of Energy Engineering.

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF STEAM REHEATING SCHEMES AND DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS

A.Y. Elsayed  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, group 507I

#### Goal of MSR:

Moisture separator reheaters (MSRs) are installed after high-pressure; their purpose is to reheat cycle steam and remove cycle steam moisture, High-pressure, high temperature, steam, is used to further heat the cycle steam. High pressure steam passes through the inside tube shell and tube heat exchanger on the tube side. The cycle steam passes over the outside of the tubes and is thus the shell-side fluid. The temperature of the cycle steam increases as it passes over the heat exchanger tubes, Moisture (condensate) that has been separated from the steam, is drained from the system via the condensate drain, condensate is fed back to the steam generator feedwater system. After moisture has been removed from the cycle steam, and the cycle steam has been reheated, the steam is then fed to the low-pressure turbine [1].

#### Comparison between Vertical & Horizontal MSR:

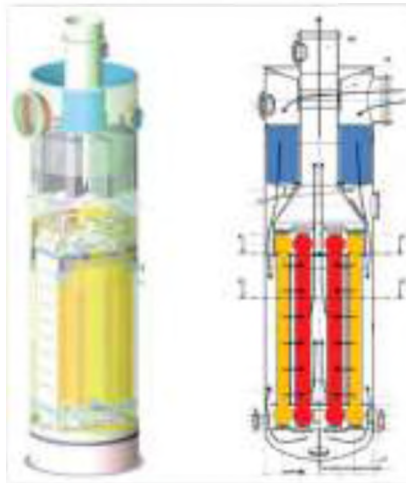


Fig. 1. MSR of the firm Black Durr for Lovisa NPP (Finland)[2]

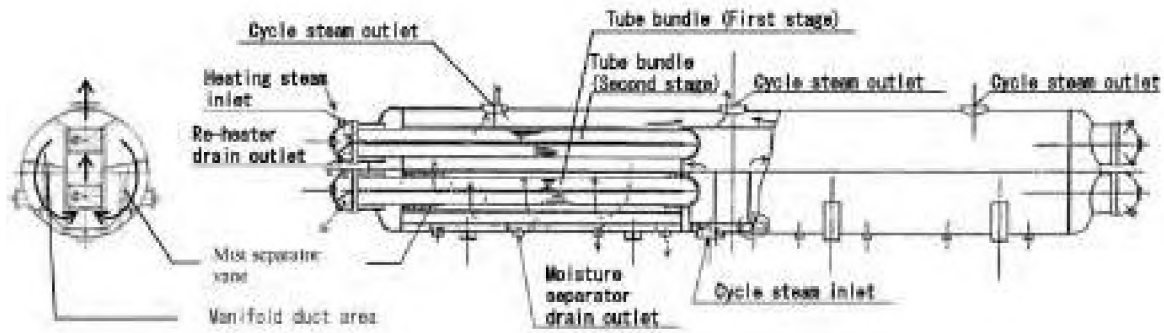


Fig. 2. Construction of the current model MSR[3]

When comparing the drawings of MSR, it can be seen that we choose horizontal MSR, because horizontal MSR has less dimension and smaller size than vertical MSR, also vertical is very high and horizontal MSR components is close to turbine

**Formulation of MSR:**

We will calculate number of tubes, length of tubes, pressure drop of heating steam and heated steam by changing velocity of heating steam in the range (1,5 ... 4) m/s. The equations of convective heat transfer and heat transfer of a flat wall were used in the calculations.

In the power unit being developed, we choosed a two-stage reheating of steam. Parameters of heating and heated steam is determined from calculation of the thermal scheme of NPP.

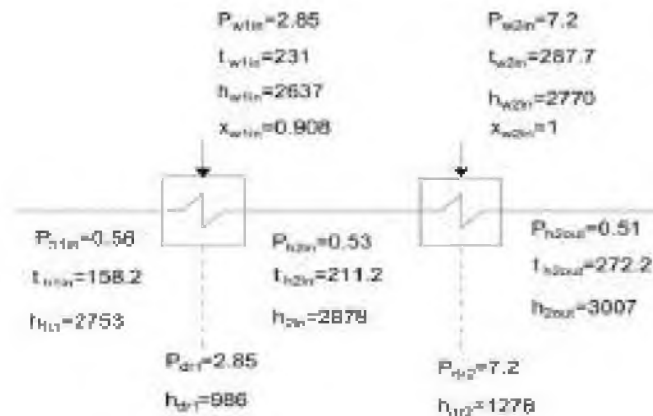


Fig. 3. Parameters of two stage reheaters

**Conclusion:**

We calculated the length of the tubes of the heat exchange surface is calculated, also we calculated pressure drop in tubes of heating and heated steam, for heating steam we choosed different velocity of heating steam at the entrance of tubes of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> stage. We realized that when we increased velocity in the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> stages, number of tubes decreased, number of rows of tubes decreased, length of tubes increased. Pressure losses in tubes increased but this increases not big.

So, we choosed velocity of heating steam in both stages  $w = 4 \frac{m}{s}$ , because it gives us small number of tubes, also material cost of tubes will be decreased, and diameter of moisture separator reheater will be decreased also and so on cost will be decreased.

For heated steam velocity of steam between the tubes is  $20 \frac{m}{s}$  but number of rows of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> stages decreased when number of tubes decreased. We realized that when length of tubes increased, pressure losses in 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> stages decreased, but we realized that total heated pressure losses bigger  $\Delta p_{heated\ total} = 9,36\ kPa$ . That's mean that internal and relative energy drop-in low-pressure cylinder is decreased, also capacity of turbine system increased, electrical efficiency increased, and so on total NPP efficiency increased.

## LITERATURE:

1. Moisture Separator Reheater (MSR) Explained - saVRee [Электронный ресурс]. URL: <https://savree.com/en/encyclopedia/moisture-separator-reheater-msr> (дата обращения: 26.11.2022).
2. Legkostupova V. V, Sudakov A. V. Модернизация Сепараторов-Пароперегревателей Modernization of Moisture Separator Reheaters in Nuclear Power Units With Vver Reactors. 2017. Т. 23, № 03. С. 61–73.
3. MANABE J., KASAHARA J. Moisture Separator Reheater for NPP Turbines // Journal of Power and Energy Systems. 2009. Т. 3, № 2. С. 368–381.

Scientific supervisor: Candidate of Technical Sciences A.M. Antonova, Associate Professor of the I.N. Butakov PES TPU.

## DESIGN OF A NPP POWER UNIT WITH A VVER-TYPE REACTOR WITH AN ELECTRIC POWER 1000 MW

M.M. Abdelal<sup>1</sup>, V.E. Gubin<sup>2</sup>  
Tomsk polytechnic university<sup>1</sup>, Sevastopol state university<sup>2</sup>  
ISHE, group 507I<sup>1</sup>

Nuclear power plants are modern energy facilities that are the optimal source of heat and electricity. On the one hand, nuclear power plants are efficient and have a large capacity, on the other hand, they do not harm the environment, and during their operation there are no emissions of sulfur dioxide, carbon dioxide, nitrogen oxides and other harmful impurities.

In a nuclear power plant, energy is generated through a controlled nuclear fission reaction in a nuclear reactor.

My research design consists of designing a fully functional nuclear power plant by designing all the main elements of the life cycle of the plant, turbine plant, nuclear reactor, horizontal steam generator and condenser.

As part of the work, the design of the NPP thermal scheme with high and low pressure turbines and a single-stage superheater and closed-type recuperative heaters.

A separate block of work is the development of the concept of defense in depth of a nuclear power plant, since safety issues are the main ones in the operation of any facility using atomic energy.

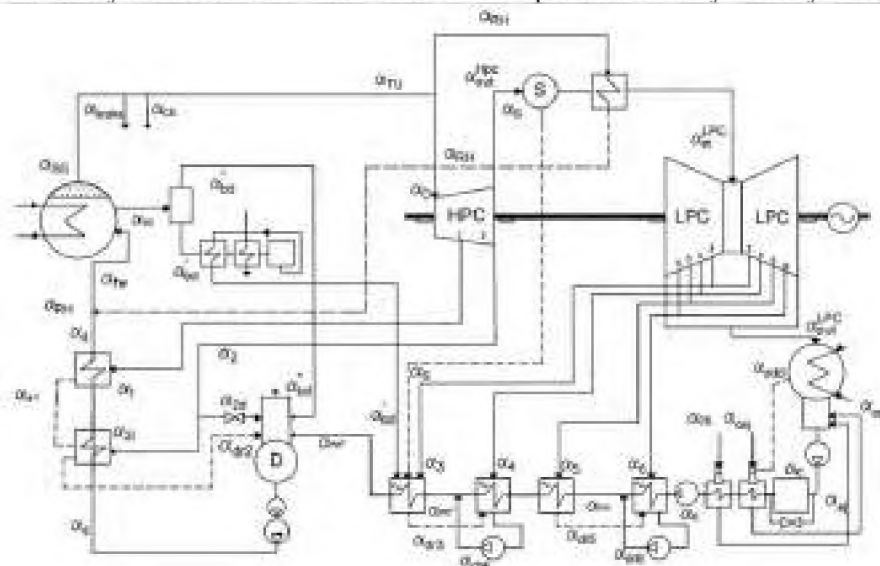


Fig. 1. NPP Scheme

Table 1. Final results

Name	Symbol	Value
Electrical power	$N_e$ , MW	1000
Initial pressure	$p_0$ , MPa	6,27
Initial temperature	$t_0$ , °C	$t_{sato}$
Feed water temperature	$t_{fw}$ , °C	220
Thermal power of SG	$Q_{sg}$ , MW	754,9
Coolant temperature at the inlet to the SG	$t_1'$ , °C	321,0
Coolant temperature at the outlet of the SG	$t_1''$ , °C	291,0
Coolant flow	$G_1$ , kg/s	4455
Number stages of Superheater	-	1
Steam temperature at the outlet of the SG	$t_{st}$ , °C	281,7
Final pressure	$p_c$ , kPa	3,5
Deaerator pressure	$p_d$ , Mpa	0,62
n HPH	2	Number of high-pressure heaters
n MLPH	4	Number of low pressure heater
Steam flow rate for a turbine	$G_0$ , $\frac{kg}{s}$	1507
Thermal loading of turbine	$Q_{TS}$ , Mpa	2974

Efficiency of heat transport

$$\eta_{pipe}^{II} = \frac{Q_{TS}}{Q_{SG}} = \frac{2974}{3006} = 989 = 98,9\%.$$

NPP Efficiency:

$$\eta_{NPP} = \eta_{rs} \cdot \eta_{pipe}^{II} \cdot \eta_{pipe}^I \cdot \eta_{SG} \cdot \eta_e.$$

The calculation is acceptable according to conditions. NPP efficiency is 32,28% and it's in the range.

LITERATURE:

1. Status report 93- VVER-1000. [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000\(V-466B\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000(V-466B).pdf)

Scientific adviser: V.E. Gubin, Ph.D., Head of the Department "Steam Turbine Plants", Sevastopol state university.

## DESIGN OF A POWER UNIT WITH VVER FOR A NPP WITH ELECTRIC CAPACITY OF 870 MW

Y.R. Shahin<sup>1</sup>, V.E. Gubin<sup>2</sup>

Tomsk polytechnic university<sup>1</sup>, Sevastopol state university<sup>2</sup>

ISHE, group 507I<sup>1</sup>

### Introduction

The most widely used kind of reactor in the world is VVER, the VVER uses water as both a coolant and a moderator. Water-based energy reactor VVER.

Heat from the reactor core is transferred to the secondary circuit via the primary coolant [1].

A well-regulated chain reaction powers nuclear reactor, while the majority of reactors produce electricity. Fission heat is used in power reactors to create steam, which powers turbines to provide electricity [1].

The fuel assembly, control rods, coolant, pressure vessel, containment structure, and an external cooling facility are all common parts of nuclear reactors.



A reactor, a pressurizer, and four circulation loops, each of which has a steam generator and a reactor coolant pump, make up the reactor coolant system [2].

**Object**

Design NPP with an electrical power of 870 MW:

- Design and calculation thermal diagram of NPP;
- Turbine condenser Design ;
- Design Calculation of a Saturated Steam Generator;
- Calculation of WWER NPR;
- Passive safety systems from modern VVER reactorsю

**The main task of the work**

This task's goal is to determine what relative flow rate calculations for each part and determine steam flow at the turbine and verify of efficiency of turbine installation and efficiency power plant and to choose of suitable equipment for the water -steam circuit.

Through the Calculation I find out number of low-pressure heaters it will be 4 LPH, and calculate the real temperature rises after each heater it would be  $\Delta t_{LPH} = 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Using the optimal value of feedwater temperature  $t_{fwp} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$ , I find out number of high-pressure heaters it will be 2 HPH, and the Real temperature rises after each heater  $\Delta t_{HPH} = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$  [3].

Table 1. The main parameters and features of NPP

Electrical power	$N_e$ MW	870
Initial pressure	$p_0$ , MPa	6,5
Pressure of condenser	$p_c$ , kPa	4
Pressure of deaerator	$p_d$ , MPa	0,6
Stage of reheat	$N_{stage}$	Double

**Calculation of processes in Turbine**

For Low Pressure Cylinder I calculated the Isentropic process of extractions from LPC with absolute internal efficiency  $\eta_{oi}^{LPC} = 0,80$ .

So, I find out that the Exhaust steam quality from LPC,  $x^{LPC} = 0,885$ .

For High Pressure Cylinder the Isentropic process of extractions from LPC with absolute internal efficiency  $\eta_{oi}^{HPC} = 0,83$  [3].

Thermal diagram shows the main components of secondary circuit/

After getting the values of relative flowrates I determined steam flow to a turbine  $G_0 = 1287 \text{ kg/s}$  ; the find Values of flow rate at all the part of NPP.

Table 2. The main results of Calculation of indicators of thermal efficiency

SG Thermal capacity	$Q_{SG}$ , kW	$2622 \cdot 10^3$
Thermal loading of turbine	$Q_T$ , kW	$2589 \cdot 10^3$
Turbine Plant efficiency	$\eta_e$ , %	33.6
NPP Gross efficiency	$\eta_{npp}^{Gross}$ , %	32.3

**Steam Generator**

According to project calculation based on the type of horizontal steam generator. One of the basic and essential components of equipments in the NPP is the steam generator.

The "Horizontal steam generator" concept, which related to heat exchange technology, can be applied to nuclear power plant steam producing facilities [2].

A horizontal steam generator's vessel is a massive, thick-walled vessel. It has a bottom, two side shells, and a middle shell. Welding is used to join every component to the other components[4].

Horizontal steam generators are preferred in the Russian nuclear sector. In Russia, steam generator tubes are constructed of steel of such 08H18N10T type.

The calculation of the thermal part of the SG To evaluate the primary dimensions of the heat exchange surface, a steam generator's thermal calculation is performed.

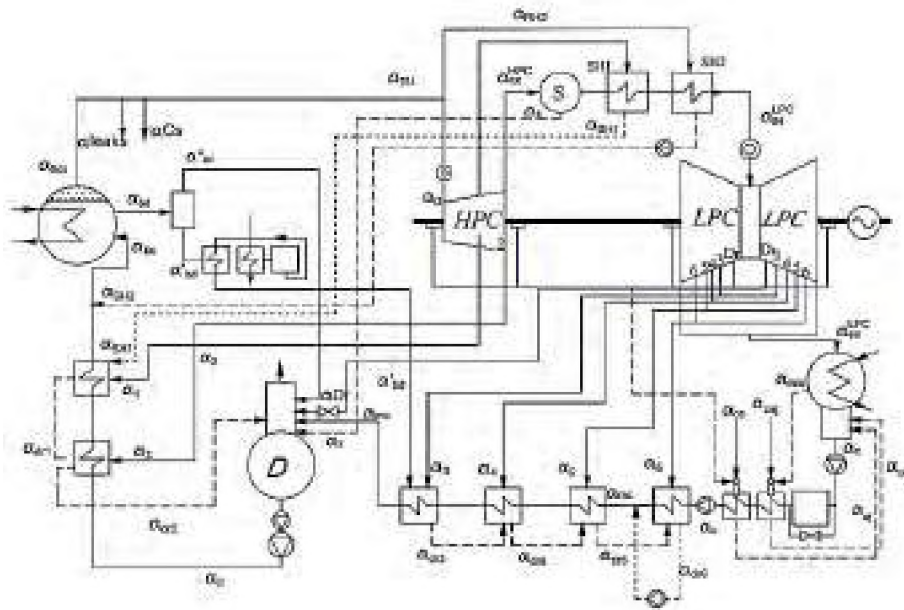


Fig. 1. NPP Thermal diagram

As the Calculation of mechanical part of Horizontal SG of Saturated Vapor with U-Shaped Tubes, the results of mechanical analysis is to evaluate static strength and the wall thickness of these components [4].

Table 3. The Final results calculation of SG

Thermal Power of reactor.	$Q_R, \text{ MW}$	2729
Number of loops	$Z_{loop}$	4
Mass flow rate of steam.	$D_2, \text{ kg/s}$	351,4
Coolant flow	$G_1, \text{ kg/s}$	2703
The inlet pressure of Coolant to SG	$P_1, \text{ MPa}$	16,56
Feed water temperature.	$t_{fw}, \text{ }^\circ\text{C}$	210
Number of SG tubes	$N_{tube}, \text{ pcs}$	8813

### Conclusion

The calculations show a design for a nuclear power plant VVER with 4 loops of a horizontal steam generator and an electric power of 870 MW.

Through cancelations of the work I find that all results is in the acceptable rang according to the standards, the efficiency of NPP is 32,3%.

### LITERATURE:

1. Rosatom State Atomic Energy Corporation ROSATOM global leader in nuclear technologies nuclear energy [Electronic resource]. URL: <https://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/engineering-and-construction/modern-reactors-of-russian-design/> (accessed: 26.11.2022).
2. Rosatom. The VVER today; Evolution, Design, Safety // State At. Energy Corp. Rosatom. 2015. P. 50.
3. Антонова А.М., Воробьев А.В. Атомные электростанции: учебное пособие / А.М. Антонова, А.В. Воробьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 230 с.
4. Atomic I, Agency E. Steam generator IAEA-TECDOC-981.pdf.

Scientific adviser: V.E. Gubin, Ph.D., Head of the Department "Steam Turbine Plants", Sevastopol state university.

# STUDY OF THE EFFICIENCY OF DIFFERENT SEPARATION AND REHEATING SCHEMES FOR A TURBINE UNIT OF NUCLEAR POWER PLANT WITH A VVER-1250 REACTOR

A.A. Mahany Mohamed  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, Butakov research center, group 5071

Nuclear energy is the energy which comes from the reactor core or the nucleus of the atom. The bonds which hold the atoms together contain a massive amount of energy. This energy must be released in order to make electricity. This energy can be freed in two ways: nuclear fission and nuclear fusion [1]. Therefore, most international institutions have turned to looking for clean sources of energy to reduce environmental pollution [2]. Therefore, most of the world's countries have turned to clean energy sources such as wind, solar and nuclear energy, so many countries around the world have built nuclear power plants that have helped reduce the use of environmentally harmful energy sources. In addition, Nuclear Energy does not produce two harmful chemicals responsible for acid rain – sulfur dioxide and nitrogen oxides [3]. However, the production of nuclear energy still involves uranium mining, the construction of power plants, and other processes that produce harmful carbon emissions. In addition, Nuclear Energy does not generate nearly as much energy / heat as conventional fossil fuel burning does. Nuclear power plants also tend to be expensive [4]. Therefore, the purpose of the work is study of the efficiency of different separation and reheating schemes for a turbine unit of nuclear power plant with a VVER-1250 reactor.

The initial data for the calculation are presented in table 1.

Table 1. Initial data

Electrical power	$N_e$ MW	1250
Initial pressure	$p_0$ , MPa	6,4
Initial temperature	$t_0$ , °C	279,8
Initial steam quality	$x_0$	1
Pressure of condenser	$p_c$ , kPa	4
Number of stages of super heater	Super heater	1
Temperature of Feedwater	$t_{fw}$ , °C	227
Pressure of deaerator	$p_d$ , MPa	0,62

The schemes of turbine unit considered:

- 1) Design of turbine with single stage of reheating and separation (SR);
- 2) Design of turbine with double separation (2S);
- 3) Design of turbine with double stage of reheating and one separation (S2R);
- 4) Design of turbine with double separation and one stage of reheating (2SR).

The schematic diagram of turbine is shown in figure 1.

The results of the calculations are presented in table 2.

Then we calculated the same schemes with different  $P_0$ . The results showed that when we increased  $P_0$  the efficiency of cycles increased and when we reduced it the efficiency decreased.

Then we calculated the same schemes with different  $P_c$ . We got that when we increased  $P_c$  the efficiency of cycles decreased and when we reduced it the efficiency increased.

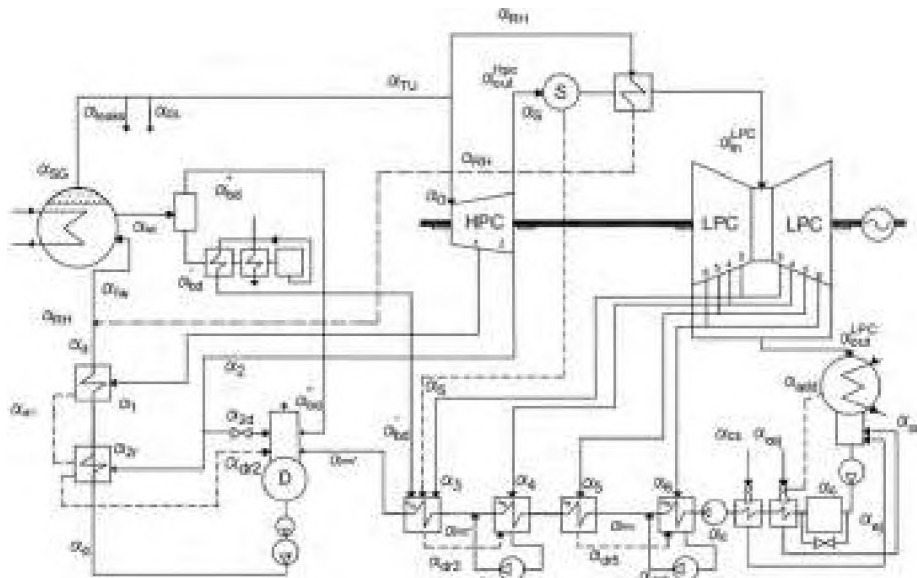


Fig. 1. Schematic diagram of the turbine unit

Table 2. Comparison of different schemes

Designation	SR	2S	S2R	2SR
$G_0, \text{kg/s}$	1918	1777,36	1897,91	1738,7
$Q_{sg}, \text{MW}$	3742,5	3272,7	3665,13	3255,71
$Q_{ts}, \text{MW}$	3702,52	3233,75	3625,6	3217,65
$\eta_e$	33,76%	38,65%	34,5%	38,85%
$q_{ts}, \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}$	10663,3	9313,2	10441,6	9266,8
$\eta_{pipe}$	98,9%	98,8	98,9%	98,8%
$\eta_{npp}$	32,41%	37,06%	33,1%	37,25%
$b_{nf}, \text{ton/year}$	27,85	24,38	27,28	24,25

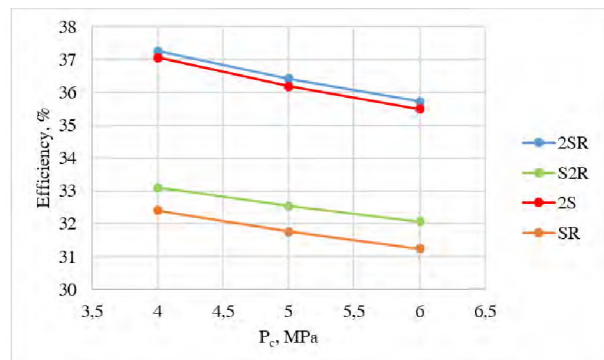
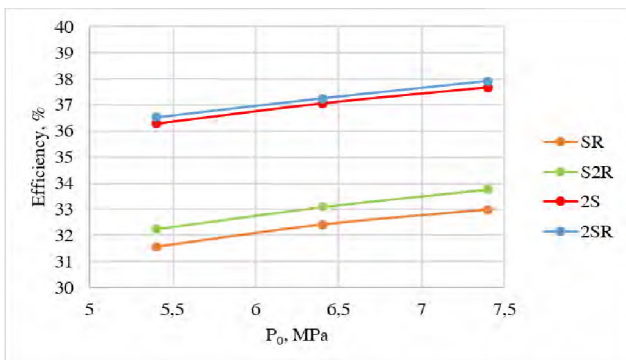


Fig. 2. Dependence of the turbine unit efficiency on  $P_0$

Fig. 3. Dependence of the turbine unit efficiency on  $P_c$

As a result, we got that the efficiency of NPP is directly proportional to  $P_0$  and inversely proportional to  $P_c$ . The most efficient scheme is the one with double separation and single stage of re-heating. However, the difference between such cycle and double separation configuration is negligible. Thus, it is more preferable from the point of view of economics.

LITERATURE:

1. International Atomic Energy Agency. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants // Saf. Fundam. 2010. Vol. No. SSG-4. P. 108.

2. Thorpe, Gary S. (2015). AP Environmental Science, 6th ed. Barrons Educational Series. ISBN 978-1-4380-6728-5. ISBN 1-4380-6728-3
3. Kok, Kenneth D. (2010). Nuclear Engineering Handbook. CRC Press.
4. Information and Issue Briefs. World Nuclear Association. 2006. Archived from the original on 2013-02-16. Retrieved 2006-11-09.

Scientific supervisor: A.V. Zenkov, Cand. Sc., associate professor of The Butakov research center, ISHE, TPU.

## ОРГАНИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ В КОТЛАХ С ЦКС

С.А. Пузырёв

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б94

Основой всякого топочного устройства является организация и поддержка необходимой аэродинамической структуры газоздушного потока, которая в свою очередь определяет процессы горения в топке [1].

Одним из промежуточных способов факельного и слоевого сжигания топлива является его сжигание в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) [1]. Первый пуск энергетического котла, реализованного на технологии ЦКС, произошёл в Финляндии в 1979 году [2].

Гидродинамика внутритопочных процессов котлов с ЦКС определяет особенности процессов теплообмена внутри контура циркуляции частиц, конструкцию котельного агрегата и его эксплуатацию [2].

Разностороннее развитие технологии с момента первого пуска энергетического котла с ЦКС позволило многократно повысить производимые мощности таких котельных агрегатов, рисунок 1 [3].

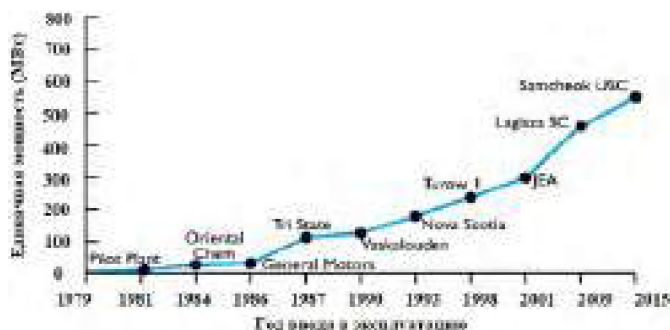


Рис. 1. Повышение единичной мощности котлов с ЦКС

Тем не менее, такой способ организации горения всё ещё не получил повсеместного применения [3]. Процесс проектирования котлов с ЦКС является трудоёмкой задачей, причиной чего является отсутствие доступных публикаций по методике теплового расчёта [2]. Описанные в Нормативном методе теплового расчёта котлов [4] рекомендации могут быть учтены только при расчёте конвективных поверхностей.

Повышенный интерес на такую перспективную технологию обуславливается её уникальными достоинствами [2]:

- “Всеядность” по отношению к применяемым топливам;
- Высокая эффективность сжигания;
- Низкие выбросы  $\text{NO}_x$ ;
- Приблизительно такие же значения теплонапряжения сечения топки в сравнении с пылеугольными котлами;

- Большая равномерность распределения температуры и способность чёткого регулирования, в том числе в вынесенных теплообменниках, позволяют применять технологию на сверх- и сверхкритических параметрах пара;
- Возможность глубокого поглощения оксидов серы собственной золой или добавками измельчённого известняка.

Благодаря “всеядности” (при сжигании возможно использовать одновременно различные смеси топлива, в том числе присутствует возможность использования в качестве топлива твёрдые бытовые отходы) технология нашла широкое применение как в развивающихся странах Азии, особенно в Китае, так и в обеспокоенных за экологичность сжигания странах Европы [5].

Причинами отсутствия повсеместного применения технологии также являются проблемы обслуживания и эксплуатации. Такие аспекты практически не отражаются в доступных научно-исследовательских работах [3].

В опубликованной статье [3] рассматривается ряд возникающих в ходе эксплуатации проблем, в их число входят: обеспечение очистки дымовых газов; контроль температуры кипящего слоя, проблематика пуска котла из холодного состояния; обеспечение специальных гидродинамических условий внутри контура циркуляции (донном слое, надслоевом пространстве, пневмозатворе).

В работе [6] дан глубокий анализ влияния технического состояния колпачков на работу воздухораспределительной решётки. В статье указывается, что даже при условии обеспечения необходимых значений перепада давления, создаваемого решёткой, возможно неравномерное распределение псевдоожижающего слой воздуха, отчего образуются, так называемые, мёртвые зоны.

Ещё одним показательным примером освоения технологии является попытка ввода в эксплуатацию первого в Российской Федерации котла с ЦКС на Новочеркасской ГРЭС в 2015 году. Излишнее количество крупных частиц непроектного топлива и его состав стали причиной повышенных температур, близких к критическим; поддержание номинальной нагрузки являлось трудноосуществимой задачей [5].

Сравнительно безопасное сжигание в ЦКС всё же требует надлежащего рассмотрения вопросов, связанных как с его проектированием, так и с эксплуатацией. Высокая температура слоя и качество его материала являются часто встречаемыми проблемами таких котлов [3]. Опытное сжигание, создание научно-экспериментальной базы, детальное изучение процессов и доводка оборудования позволят внедрить технологию в отечественную энергетику.

Поскольку проектирование энергетических котлов с ЦКС большой мощности связано с прогнозированием и учётом характера движения двухфазного потока частиц, то применение методов численного анализа с использованием компьютерных технологий представляется наиболее рациональным ввиду ряда широко известных преимуществ по отношению к теоретическим и экспериментальным методам.

На рисунке 2 представлены примеры применения пакета FIRE 3D для численного моделирования топочной камеры котельного агрегата с ЦКС [7, 8].

На рисунке 3 показано, что наиболее интенсивный вынос частиц центральной части топочной камеры соответствует данной высоте. Концентрация частиц в горизонтальном сечении топки на высоте 3,5 м в средней зоне достигает максимального значения и составляет  $0,18 \text{ кг/м}^3$ . Однако несмотря на снижение концентрации в периферийных зонах, зафиксировано её увеличение в пристенной зоне до значений  $0,08 \text{ кг/м}^3$ , что может свидетельствовать о возникновении внутренней циркуляции. Таким образом, частицы центральной зоны поднимаются направлено вверх, однако вблизи стен топки возникает опускное движение.

Вышеуказанные подходы численного моделирования позволяют получить не только визуальную картину, но и интегральные характеристики протекающих физических процессов в контурах циркуляции частиц.

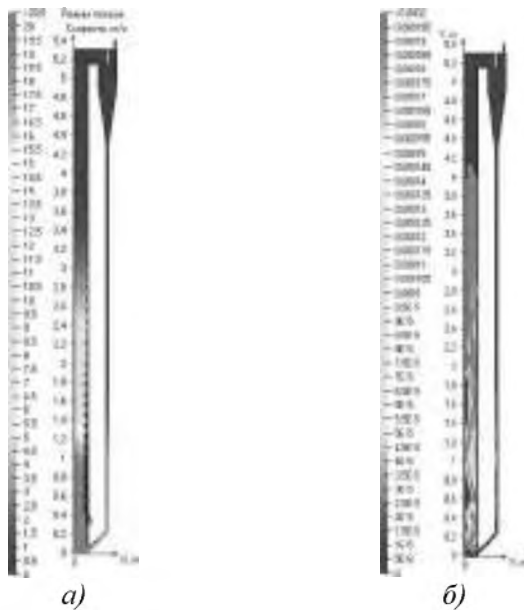


Рис. 2. Результаты численного моделирования модели установки с циркулирующим кипящим слоем:  
 а) изменение скорости (м/с); б) концентрация частиц (кг/м<sup>3</sup>)

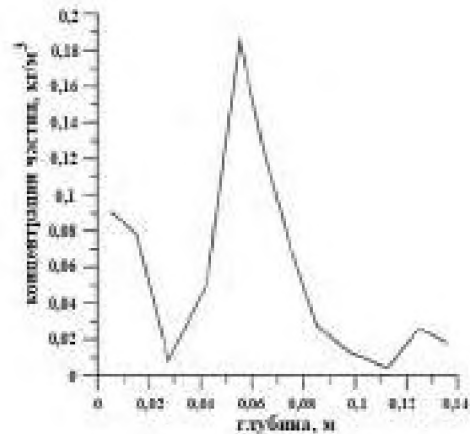


Рис. 3. Изменение концентрации частиц по глубине точки на высоте 3,5 м

Исходя из анализа полученных данных, можно заключить, что резкое снижение скорости потока на высоте примерно 2/3 от полной высоты вызвано обратным потоком частиц вблизи стен и увеличением концентрации частиц над этим участком.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Котельные установки с циклонными предтопками: монография / А.Н. Штым, К.А. Штым, Е.Ю. Дорогов. Владивосток: Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – 421 с.
2. Basu P. Circulating Fluidized Bed Boilers. Design, Operation and Maintenance. – Zug: Springer International Publishing, 2015. – 366 p.
3. A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers / A. Arjunwadkar, P. Basu, B. Acharya // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 102. – PP. 672 – 694.
4. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод) / СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
5. Опыт пуска и начальной эксплуатации блока №9 с котлом с ЦКС Новочеркасской ГРЭС / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Е.В. Антоненко, И.В. Крутицкий // Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла. – М.: ОАО «ВТИ», 2018. – С. 73-82.
6. Mirek P. Air Distributor Pressure Drop Analysis in a Circulating Fluidized-Bed Boiler for Non-reference Operating Conditions // Chemical Engineering and Technology. – 2020. – V. 43. – No 11. – PP. 2233-2246.
7. Mathematical modeling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D / A.V. Gil, A.V. Starchenko // Thermophysics and Aeromechanics. – 2012. – V. 19. – No 3. – PP. 503–519.
8. Numerical analysis of the burning of pulverized coal with different thermal properties in the furnace of a BKZ-420-140-2 boiler / A.V. Gil, A.S. Zavorin, A.V. Starchenko, S.V. Obukhov // Power Technology and Engineering. – 2011. – V. 45. – No 1. – PP. 42-49.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Гиль, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОФИКАЦИИ ПРИ ОТПУСКЕ ТЕПЛОТЫ ОТ ПГУ-ТЭЦ

А.А. Бенедиктов<sup>1</sup>, О.Ю. Ромашова<sup>2</sup>, В.С. Долиный<sup>1</sup>  
Томский политехнический университет,  
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова<sup>2</sup>, группа 5Б91<sup>1</sup>

Выбор оптимального коэффициента теплофикации при комбинированном отпуске теплоты и электроэнергии от ТЭЦ является оптимизационной задачей. Определяющее влияние выбор коэффициента оказывает годовая экономия топлива в энергосистеме, которая зависит от эффективности производства электрической и тепловой энергии на ТЭЦ и замещающей КЭС. Изменение структуры энергосистемы за счет внедрения парогазовых технологий требует исследования эффективности теплофикации на базе ПГУ-ТЭЦ.

Цель работы – выбор оптимального коэффициента теплофикации  $\alpha_{ТЭЦ}$  в системе комбинированного производства электроэнергии и теплоты на ПГУ-ТЭЦ и пиковой водогрейной котельной (ПВК).

За критерий эффективности принята относительная годовая экономия топлива при комбинированном производстве энергии по сравнению с раздельным. На основании анализа специальной литературы принято, что соотношение удельных капиталовложений в водогрейные котлы и теплообменное оборудование ПГУ-ТЭЦ не оказывает существенного влияния на оптимальное решение. Исследования проводятся для моноблочной установки (1ГТУ+1КУ+1ПТУ) на базе газотурбинной установки ГТЭ-160 и котла утилизатора П-96. Отпуск теплоты от ПГУ-ТЭЦ на отопление  $Q_{Т}^{СУ}$  осуществляется от сетевой установки ПТУ и сохраняется постоянным при изменении  $\alpha_{ТЭЦ}$ . При таком методическом подходе поставленная задача означает выбор оптимальной присоединенной тепловой нагрузки потребителя  $Q_{Т}$  с передачей переменной части  $Q_{Т}^{ПВК}$  на ПВК.

При заданном температурном графике теплосети изменение  $\alpha_{ТЭЦ}$  приводит к изменению максимальной температуры сетевой воды  $t_{СУ}$  на выходе из сетевой установки (СУ) турбины в соответствии с зависимостью

$$t_{СУ} = t_{OC} + \alpha_{ТЭЦ} \cdot (t_{ПС} - t_{OC}),$$

где  $t_{ПС}/t_{OC}$  – температура сетевой воды в прямой и обратной магистралях соответственно при расчетной для отопления температуре наружного воздуха  $t_{НВ}^P$ .

Изменение  $t_{СУ}$  определяет разные схемы отпуска теплоты от ПГУ (рисунок 1) в зависимости от включенных СП.

Годовые показатели работы энергосистемы на базе ПГУ-ТЭЦ интегрируются на основе часовых показателей в характерных режимах работы ТЭЦ – теплофикационном при работе паротурбинной установки по тепловому графику и конденсационном режиме в летний период. Для расчета показателей работы ГТУ и котла-утилизатора используются энергетические характеристики (ЭХ) оборудования [1, 2].

Исходные данные. В теплофикационном режиме ПГУ-ТЭЦ работает по тепловому графику; температурный график теплосети 150°C/70°C, расчетная для отопления температура наружного воздуха  $t_{Н.В.} = -40$  °С (климатический район – г. Томск); для паровой турбины внутренний относительный КПД  $\eta_{oi} = 0,87$ ; вентиляционный расход пара в конденсатор  $D_{К} = 5\%$  от  $(D_0^{ВД} + D_0^{НД})$ . Удельные расходы условного топлива на производство электроэнергии в энергосистеме с раздельной выработкой приняты для трех вариантов КЭС:  $b_{кэс1} = 0,235 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт}}$ ;  $b_{кэс2} = 0,270 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт}}$ ;  $b_{кэс3} = 0,340 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт}}$ .

Анализ полученных результатов. Увеличение коэффициента теплофикации приводит к снижению экономичности выработки электрической энергии на ПГУ-ТЭЦ при работе по тепловому графику – снижается электрическая мощность паровой турбины, растет удельный расход условного топлива на производство электроэнергии из-за роста температуры сетевой воды на выходе из сетевой установки турбины с соответствующим увеличением параметров



теплофикационного пара, снижается число часов использования максимума работы ПГУ-ТЭЦ в теплофикационном режиме.

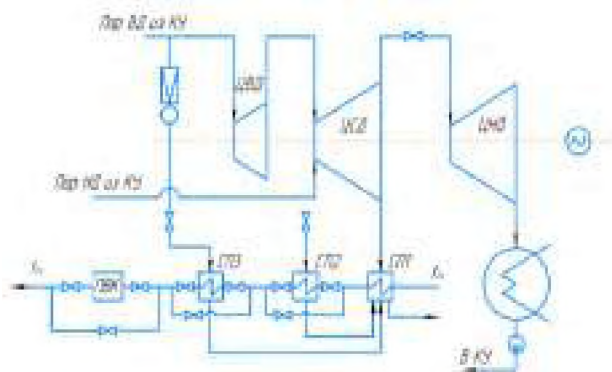


Рис. 8. Расчётная схема ПГУ

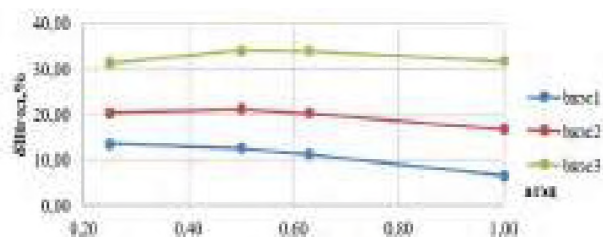


Рис. 2. Годовая экономия топлива ПГУ-ТЭЦ по сравнению с раздельной выработкой

При этом вне зависимости от  $\alpha_{ТЭЦ}$  комбинированная выработка на ПГУ-ТЭЦ наиболее экономична по сравнению с раздельной. Экономия топлива в энергосистеме составляет от 6 до 35 % в зависимости от значений удельного расхода условного топлива на замещающих КЭС. Наибольшая экономия от комбинированной выработки ЭЭ и ТЭ на ПГУ-ТЭЦ по сравнению с раздельной приходится на вариант с менее замещающей КЭС-3, для которой  $b_{КЭС3} = 0,340$  кг.у.т./кВт. Оптимальное значение  $\alpha_{ТЭЦ}$  также зависит от тепловой экономичности замещающей КЭС.

При высокоэкономичной замещающей КЭС1 (ПГУ-КЭС) с удельным расходом  $b_{КЭС1} = 0,223$  кг.у.т./кВт оптимальный коэффициент теплофикации равен  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,25$ . При менее экономичных вариантах замещающих КЭС ( $b_{КЭС2} = 0,270$  кг.у.т./кВт и  $b_{КЭС3} = 0,340$  кг.у.т./кВт) оптимальное значение  $\alpha_{ТЭЦ}$  увеличивается. При этом расчеты показывают, что в этих вариантах нет ярко выраженного оптимума, оптимальное решение лежит в диапазоне (0,4-0,63). Уточнение оптимального варианта возможно с учетом капитальных вложений по вариантам схем.

Анализ расчетных исследований показывает, что для варианта с замещающей КЭС1 на выбор оптимального решения влияют показатели работы сравниваемых энергосистем только в отопительный период, так как в конденсационном режиме расход топлива на ПГУ-ТЭЦ и замещающей КЭС – одинаковый и в сравнении не учитывается. Для варианта  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,25$  выработка электроэнергии на ПГУ-ТЭЦ в теплофикационном режиме наиболее экономичная по сравнению с большими значениями  $\alpha_{ТЭЦ}$ : удельный расход условного топлива составляет  $b_{э/э}^{ПГУ} = 0,182$  кг.у.т./кВт (например, при  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,5$  -  $b_{э/э}^{ПГУ} = 0,187$  кг.у.т./кВт) число часов использования максимума теплофикационного отбора составляет 5500 часов (для варианта  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,5$  - 4567 часов). В итоге для варианта  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,25$  экономия топлива на производство электроэнергии превышает пережог топлива на ПВК. При более высоких значениях  $\alpha_{ТЭЦ}$  снижается эффективность теплофикационной выработки на ПГУ, поэтому экономия топлива на производство электроэнергии уже не может компенсировать снижение экономичности производства теплоты на ПВК.

При увеличении  $\alpha_{ТЭЦ}$  снижаются показатели тепловой экономичности ПГУ-ТЭЦ в теплофикационном режиме и годовая теплофикационная выработка электроэнергии при одновременном росте годовой конденсационной выработки электроэнергии на ПГУ-ТЭЦ. Учитывая, что конденсационный режим ПГУ-ТЭЦ относительно теплофикационного дает меньшую экономию топлива по сравнению с раздельной выработкой на КЭС2 и КЭС3, годовая экономия топлива в вариантах с КЭС2 и КЭС3 (с учетом пережога топлива на ПВК) достигается при более высоком значении  $\alpha_{ТЭЦ}$ , чем в варианте с КЭС1.

## **Выводы**

1) при увеличении коэффициента теплофикации ухудшаются показатели теплофикационной выработки электроэнергии на ПГУ-ТЭЦ из-за роста температуры сетевой воды на выходе из сетевой установки турбины с соответствующим увеличением параметров теплофикационного пара и недовыработкой электрической мощности паротурбинной установкой. При увеличении  $a_{\text{ТЭЦ}}$  от 0,25 до 1,0 электрическая мощность ПТУ снижается от 60,4 до 34,23 (на 43,3 %), удельный расход условного топлива повышается от 0,182 до 0,196 (на 7,7%). При этом число часов использования максимума тепловой нагрузки ПТУ падает от 5500 до 2577;

2) не зависимо от  $a_{\text{ТЭЦ}}$  комбинированная выработка на ПГУ-ТЭЦ наиболее экономична по сравнению с отдельной. Экономия топлива в энергосистеме составляет от 5 до 35 % при разных значениях удельного расхода условного топлива на замещающих КЭС;

3) оптимальное значение  $a_{\text{ТЭЦ}}$  зависит от тепловой экономичности замещающей КЭС. С ростом удельного расхода условного топлива на замещающей КЭС оптимальное значение  $a_{\text{ТЭЦ}}$  повышается;

4) для варианта высоко-экономичной ПГУ-КЭС оптимальное значение  $a_{\text{ТЭЦ}}$  составляет 0,25. Для вариантов замещающей КЭС с удельным расходом условного топлива (0,270–0,340) кг у.т./кВтч оптимальное решение лежит в диапазоне (0,4–0,63).

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013.
2. Бекмансуров А.В. Анализ возможных путей расширения Томской ТЭЦ-3 // магистерская диссертация. – Томск, 2020. –155 с.

Научный руководитель: к.т.н. О.Ю. Ромашова, доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СКОПЛЕНИЯ НАКИПИ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АГРЕГАТОВ**

Д. Супуева

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б95

Вместе с ростом населения и улучшением уровня жизни развивается коммунально-бытовой сектор, что ведет за собой повышение спроса на теплоэнергию. Стабильное обеспечение населения теплом – одно из важнейших условий поддержания жизнедеятельности человека в бытовых условиях.

Одной из первостепенных задач в системе теплопотребления является получение качественно очищенной воды. Всем известно, что люди на 80 % состоят из воды и при несоответствии необходимым критериям не смогут полноценно существовать, так и системы теплоснабжения не смогут долгое время прослужить при её плохом качестве. Неудовлетворительная химическая обработка и несвоевременное очищение теплового оборудования снижают производительность агрегатов на 50 %.

На теплоэнергетических объектах применяется горячая вода, которая нагревается в энергосистемах. Системы горячего водоснабжения подпитывают водой из водопроводов или из природных источников, это делается с целью возмещения потерь воды, сопряженных с ее бытовым и производственным использованием [1]. При неправильной обработке воды растворенные в ней примеси активно выпадают в твердую фазу и формируют внутритрубные отложения (или более привычно – накипь).

В зависимости от состава отложения делят на несколько групп [2]:

1. Отложения соединений меди. В состав элементов насосов входит медь, которая в результате коррозии проявляется в питательной воде в виде оксидов меди. Отложение меди происходит на участках с тепловыми потоками при процессе дистилляции. При существенной разности потенциалов и контакте с железом ионы меди восстанавливаются до чистой меди.

2. Щелочноземельные отложения. С добавочной водой в состав питательной попадают соединения магния и кальция. При превышении концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и анионов растворимости происходит быстрое отложение соединений кальция. Существует два вида щелочноземельных отложений: карбонатная ( $\text{CaCO}_3$  – более 50 %) и гипсовая ( $\text{CaSO}_4$  – до 50 %), при этом характер отложений карбонатных: от аморфного порошка до котельного камня, а гипсовые оседают в виде твердых, плотных частиц.

3. Железооксидные отложения. Продукты коррозии железа также входят в состав отложений и составляют более 90 %. Доля железооксидных отложений растет по мере улучшения системы водоподготовки и увеличения давления. Основой отложений является преобразующийся в питательной воде магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Большая часть оксидов находится в дисперсном состоянии, так как из-за роста температуры снижается растворимость.

4. Отложение быстрорастворимых соединений. В питательной воде после умягчения подпиточной воды по средству Na-катионирования присутствуют соединения натрия. На поверхностях нагрева при химическом воздействии и адсорбции соединения натрия входят в состав отложений.

5. Алюминиевые отложения. В составе данного вида отложений преобладает свободная  $\text{SiO}_2$ . Содержание в составе накипи  $\text{SiO}_2$  составляет более 25 %, находятся в виде твердых частиц. При эксплуатации аппаратов концентрации кремниевой кислоты изменяются в пределах: 10 – 1000 мкг/кг. В результате повышения показателей давления  $\text{SiO}_2$  вступает в химические реакции с оксидами (оксиды железа вступают в реакцию, образуя при этом ферросиликаты) [2].

Образование отложений происходит при насыщении котловой воды роггизитовыми примесями. Соли жесткости в виде кристаллов выпадают в нижние слои. Центрами кристаллизации являются шероховатости на поверхности нагрева. Как правило, является плотной и трудно удаляемой. Толщина слоя может достигать вплоть до 10 мм, ощутимо уменьшая проходное сечение.

По мере роста толщины слоя образований, температура начинает значительно превышать критические показатели прочности и предела текучести металлов труб. При этом образуются следующие механические повреждения: а) с щелевидными сквозными пробоинами вдоль поверхности труб, через которые с высокой скоростью начинает просачиваться поток воды; б) с образованием локальной деформации трубы в виде вздутия стенок.

Накипи присущи низкие показатели коэффициента теплопроводности, что оказывает непосредственное влияние на теплообменные процессы. Согласно данному обстоятельству, тонкая прослойка отложений приводит к росту температуры. Отложения накипи также являются недопустимыми в водогрейных котлах и экономайзерах, однако само увеличение температуры вдоль поверхности труб никак не влияет на безопасность работы, но производительность тепловых аппаратов уменьшается, кроме того, падает мощность в результате значительного снижения коэффициента теплопередачи и связанного с этим повышением температуры выходящих газов [4].

При проектировании систем теплоснабжения, выполняют гидравлический и тепловой расчеты, которые позволяют также рассчитать экономическую стоимость проекта. В результате проведенных анализов производится выбор основного и вспомогательного оборудования для систем теплоснабжения. Необходимость предусмотреть качество и жесткость воды, является важным фактором при проведении таких расчетов [3].

Для определения воздействия отложений на теплопередачу, применяют одно из основных выражений:

$$k_f = \frac{1}{\frac{S_a + S_a R_\mu + \frac{S_o \ln(\frac{d_o}{d_i})}{2\pi\lambda L} + R_\rho + \frac{1}{a_o}}{S_i a_i + S_i}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность стали;  $d_i$  и  $d_o$  – внутренний и внешний диаметры поверхности теплогенераторов, м;  $a_o$ ,  $a_i$  – коэффициенты теплоотдачи теплоносителя и газа;  $R_\rho$ ,  $R_\mu$  – тепловое сопротивление отложений со стороны теплоносителя и продуктов сгорания, К/Вт;  $S_i$ ,  $S_a$  – площади поверхностей нагрева продуктов горения и теплоносителя, м<sup>2</sup> [2,4].

Из (1) следует, что термические сопротивления отложений на наружных и внутренних поверхностях зависят от теплопроводности и толщины отложений, при этом снижение коэффициента теплопередачи вносит избыточное термическое сопротивление.

Далее рассмотрим выражение, позволяющее найти скорость образования отложений  $A$  [5]:

$$A_i = k \cdot C_i \cdot q^n, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $C_i$  – концентрация примеси, мг/дм<sup>3</sup>;  $q$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>; показатель  $n$  зависит от химического состава отложений и варьируется от 1 до 3.

Для анализа зависимости (2) были смоделированы топочные процессы в испарительных элементах энергообъекта [5]. Были получены значения тепловых потоков в пристеночной зоне по всей высоте труб. Значения тепловых потоков представлены в таблице 1.

В результате полученных данных были построены графики тепловых потоков в испарительных элементах, которые представлены на рисунке 1.

На рисунке 2 изображены графики скорости отложений продуктов коррозии железа, построенные по данным таблицы 1 с учетом выражения (2).

Таблица 1. Тепловые потоки  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) [5]

Труба	№1	№2	№3	№4	№5	№6
X, м	0,0960	0,4808	1,3256	1,536	2,1704	2,3816
Y, м						
0,1	847	849	827	810	734	702
1,1	739	784	823	815	749	718
1,5	695	751	817	813	756	726
1,8	656	717	802	802	754	726
2,2	608	670	765	767	728	701
2,4	568	628	723	727	692	667
2,6	535	593	686	690	659	635
2,8	490	544	632	637	611	590
3,1	439	489	570	575	555	536
3,3	387	432	506	513	498	483
3,5	334	375	445	452	444	432
3,7	283	321	389	397	395	385
3,9	228	262	331	340	345	338
4,3	156	186	263	274	287	284
4,6	104	129	211	224	243	242
4,9	78	97	174	187	208	209
5,3	69	84	150	162	182	184
5,4	67	81	141	153	173	175

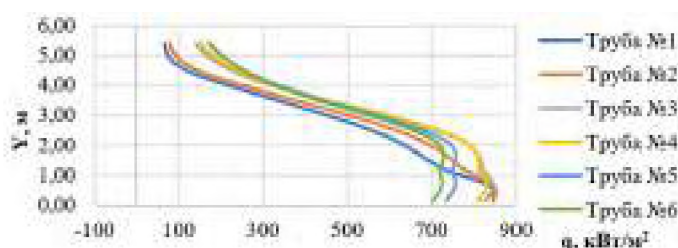


Рис. 1. График тепловых потоков в испарительных элементах

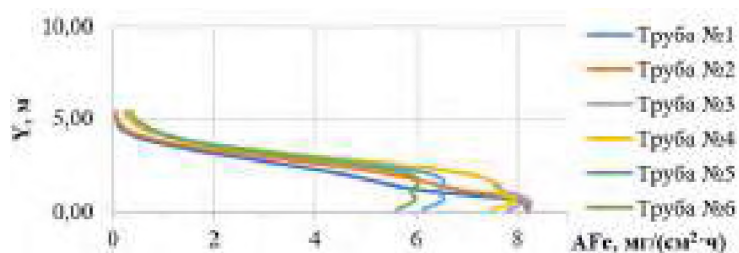


Рис. 2. График скоростей образования отложений продуктов коррозии железа в испарительных элементах

Благодаря данным расчетам, предполагается прогнозировать время работы энергетического оборудования до образования критического количества отложений различных примесей. Результаты данного исследования позволят прогнозировать нештатные ситуации и аварийные риски, связанные именно с повреждением труб экранных поверхностей нагрева.

В результате проделанного анализа выяснилось, что коррозионная прослойка и отложения влияют на надежность, эффективность и функциональность теплообменных аппаратов и трубопроводов, увеличивая потребление горючего топлива и др.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Галковский В.А., Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности / В.А. Галковский, М.В. Чупова // Интернет журнал «Науковедение» – 2017. – Том 8, № 2. – С 61.
2. Тербилов С.В., Образование отложений накипи на поверхностях нагрева в жаротрубных котлах / С.В. Тербилов, А.Г. Михайлов, Е.Н. Слободина, А.В. Васильев // Омский научный вестник – 2017. – № 3. – С 74.
3. Верховинский И.Л., Использование магнитного преобразователя накипи для повышения эффективности работы котлоагрегатов / И.Л. Верховинский, Н.Д. Накардзе, Е.А. Кривобок // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки – 2014. – № 5. – С 27.
4. Kakac S. Heat exchangers: selection, rating and thermal design. Taylor Francis Inc, Unated States. – 2012. – 491p.
5. Evaluation of scale formation in waterwall heated surfaces / T.S. Taylasheva [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 92: Thermophysical Basis of Energy Technologies (ТВЕТ-2016). – 4 p.

Научный руководитель: к.т.н. Т.С. Тайлашева, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И СХЕМЫ ОДНОКОНТУРНОГО ЭНЕРГОБЛОКА С ГЕЛИЙОХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ

О.В. Кульбида

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5072

Создание нового направления в реакторостроении в крупнопромышленном масштабе требует, в первую очередь, анализа негативных сторон внедрения энергоустановок с газоохлаждаемыми реакторами в энергетику. К таким сторонам можно отнести: необходимость использования дорогостоящих жаростойких сталей и сплавов, создание и организация промышленного изготовления новых видов оборудования (гелиевой арматуры, турбомашин замкнутого цикла и т. д.) и применение в качестве теплоносителя дорогостоящего гелия.

Все существующие реакторные установки с ВТГР и БГР выполнены по двухконтурным (а также трехконтурным) тепловым схемам. Но больший интерес вызывает концепция одноконтурных энергоустановок. В таких установках в качестве привода генератора используется гелиевая турбина замкнутого цикла: это повышает КПД цикла и упрощает тепловую схему установки в целом.

Успешное решение проблемы промышленного внедрения энергетических установок с ВТГР на тепловых и быстрых нейтронах является качественно новым шагом в области реакторостроения, а также подарит новые возможности использования ядерного горючего, что может коренным образом изменить структуру топливопотребления в различных отраслях промышленности.

**Постановка задачи.** Рассмотрим одноконтурный энергоблок с быстрым газоохлаждаемым реактором с гелием в качестве теплоносителя и рабочего тела, тепловой мощностью 270 МВт.

Для реализации АЭС с таким типом реактора используем схемы с газотурбинной установкой (ГТУ).

Изменяя параметры гелия в заданных диапазонах, найдем значения термического КПД и расхода гелия и уточним оптимальные значения параметров.

Зададим в первом приближении:

- давление гелия в реакторе – 7 МПа;
- температура на выходе из реактора ( $T_3$ ) – 850 °С;
- температура, до которой охлаждается теплоноситель в охладителе и поступает в компрессор ( $T_1$ ) – 24 °С.

Показатель адиабаты для гелия:  $k = 1,660$ .

Значения относительного внутреннего КПД:

- компрессора – 0,85;
- турбины – 0,9.

Потери давления [1]:

- в тракте между компрессором и реактором ( $\lambda_1$ ) – 0,97...0,98;
- в системах всасывания (перед компрессором) и выхода газов (за турбиной) ( $\lambda_2$ ) – 0,96...0,98.

**Расчет простой ГТУ замкнутого цикла.** Теоретический цикл простейшей и идеализированной газотурбинной установки состоит из двух адиабат (сжатия в компрессоре и расширения в турбине) и двух изобар (передачи теплоты теплоносителю из реактора и отвод теплоты).

В результате расчетов [1, 2] получаем следующие зависимости (рисунок 1).

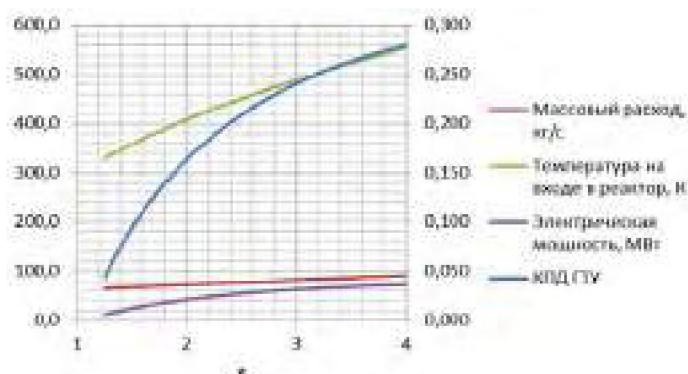


Рис. 1. Зависимости КПД, электрической мощности, температуры на входе в реактор и массового расхода от степени повышения давления в компрессоре (простейшая схема ГТУ)

На рисунке 1 видно, что температура на входе в реактор изменяется в диапазоне 56...281 °С. Расход гелия увеличивается при увеличении  $\epsilon$ . КПД простейшей ГТУ в диапазоне

$\varepsilon = 3 \dots 4$  изменяется от 24 % до 28 %, что является низким показателем эффективности для энергоблоков с БГР.

Поэтому рассмотрим один из способов повышения эффективности работы ГТУ – регенерацию.

**Расчет ГТУ замкнутого цикла с регенератором.** Регенерация тепла – использование части отводимого к нижнему источнику тепла, внутри цикла в качестве части тепла, подводимого к рабочему телу.

Поставим перед собой задачу выявить связь между КПД и степенью регенерации, варьируя последнюю. Влияние регенерации на КПД ГТУ в диапазоне степени повышения давления, выбранного исходя из результатов прошлой главы показано на рисунке 2.

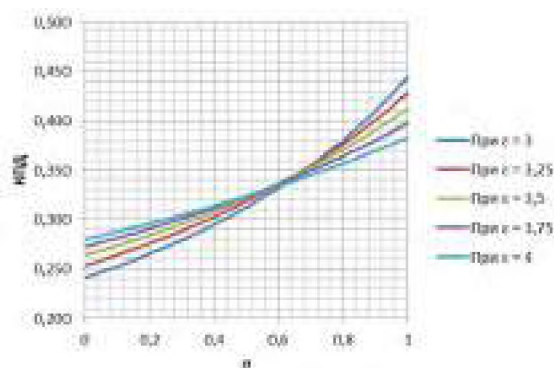


Рис. 2. Зависимость КПД ГТУ с регенерацией от степени регенерации при различных значениях степени повышения давления

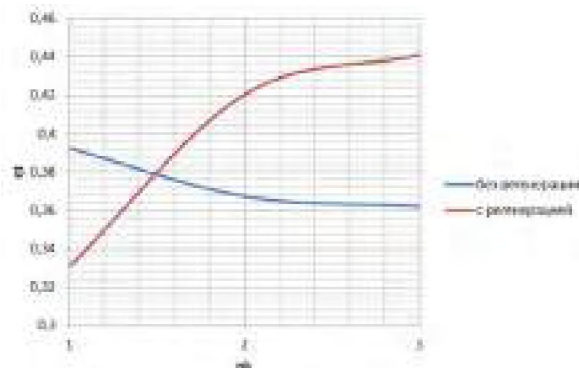


Рис. 3. Изменение КПД от числа ступеней сжатия в компрессоре и регенерации тепла при  $\varepsilon = 3$  и  $\sigma = 0,6$

КПД здесь увеличивается при увеличении степени регенерации.

При увеличении значения степени повышения давления, КПД ГТУ с регенератором сначала увеличивается при  $\sigma = 0 \dots 0,5$ , но при достижении  $\sigma = 0,6$  мало изменяется, а при дальнейшем увеличении  $\sigma$  значение КПД падает.

При  $\sigma = 0,6$  значение  $\varepsilon$  мало влияет на значение КПД, температуры  $T_a$  и  $T_b$  изменяются так, что значение разности уменьшающейся температуры  $T_a$  и постоянной  $T_1$  уменьшается, как и значение разности постоянной температуры  $T_3$  и увеличивающейся температуры  $T_b$  одинаково, что и приводит к практически не изменяющимся значениям КПД. При дальнейшем увеличении степени регенерации и степени повышения давления значения КПД падают, так как разность первых температур уменьшается слабее второй.

**Расчет ГТУ замкнутого цикла с регенератором и ступенчатым сжатием с целью оптимизации параметров.** Покажем, что организация многоступенчатых процессов сжатия в компрессоре приводит к уменьшению термического КПД цикла без регенерации и к увеличению – с введением регенерации тепла по сравнению с исходным простейшим циклом ГТУ с неизменным значением степени повышения давления  $\varepsilon$  (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что при регенерации значение КПД увеличивается с увеличением числа ступеней сжатия в компрессоре. Но также следует учесть, что при увеличении числа ступеней сжатия увеличиваются капитальные затраты и материалоемкость всей установки. При этом прирост КПД с увеличением существенно падает. Отсюда делаем вывод, что оптимальное число ступеней сжатия 2.

**Расчет ГТУ замкнутого цикла с учетом потерь давления.** Более детальное исследование влияния степени регенерации на потери давления связано с конструктивным расчетом регенератора (или рекуператора).

Включение регенератора в схему ГТУ помимо использования теплоты уходящих газов для нагрева сжатого гелия понижает полное давление гелия перед реактором и создает гидравлическое сопротивление при выходе из турбины [3].

Учтем, что коэффициент сопротивления  $\gamma = 0,02$  – достаточно высокое значение, то изменение относительного гидравлического сопротивления должно происходить от 0 до 1. На рисунке 4 показана зависимость КПД цикла от степени регенерации при увеличении  $\epsilon$  при неизменном значении  $\gamma$ .

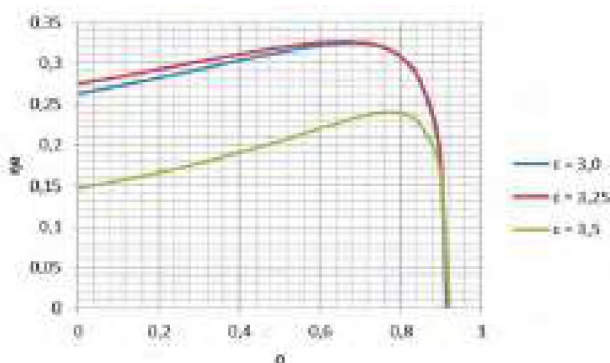


Рис. 4. Зависимость КПД цикла от степени регенерации при различных  $\epsilon$ , при  $\gamma = 0,02$

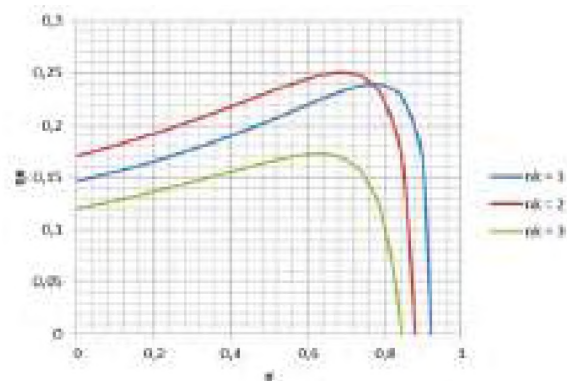


Рис. 5. Зависимость КПД цикла от степени регенерации при различных  $n_k$ , при  $\gamma = 0,02$ , при  $\epsilon = 3,5$

Исходя из рисунка 4 можно сказать, что зависимость КПД цикла от степени регенерации не линейна и имеет максимум при  $\sigma = 0,68$  при  $\epsilon = 3,0$ . Кроме того, чем выше значение степени повышения давления в компрессоре, тем дальше смещается максимум и при  $\epsilon = 3,5$  максимум находится в точке  $\sigma = 0,78$ , но при этом уменьшается само значение максимума: при  $\epsilon = 3,0$  КПД составляет 33 %, а при  $\epsilon = 3,5$  – 24 %.

Рассмотрим, изменятся ли данные зависимости от числа ступеней сжатия (рисунок 5).

Из рисунка 5 видно, что при числе ступеней сжатия 2 КПД при фиксированном значении степени регенерации возрастает, но при числе ступней сжатия 3 резко падает. Максимум с увеличением числа ступней сжатия смещается в сторону уменьшения степени регенерации. Так при  $\sigma = 0,7$ , при  $\epsilon = 3,5$  и  $n_k = 2$  КПД составляет 25 %.

При этом, учтем, что при  $\sigma = 0,68$ , при  $\epsilon = 3,0$  и  $n_k = 1$  КПД составляет 33 %. Из этого следует, что увеличение числа ступеней сжатия невыгодно для данного энергоблока.

**Заключение.** В данной исследовательской работе был проведен анализ возможных схем и параметров одноконтурного энергоблока с гелийохлаждаемым реактором.

Данный энергоблок имеет следующие параметры (таблица 1).

Таблица 1. Параметры проектируемого энергоблока

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	270
Давление гелия в реакторе, МПа	7
Температура на входе в реактор, °С	197
Температура на выходе из реактора, °С	850
Температура, до которой охлаждается теплоноситель в охладителе и поступает в компрессор, °С	24
Степень понижения давления в компрессоре	3
Число ступеней сжатия, шт.	1
Степень регенерации	0,68
Внутренний относительный КПД компрессора	0,85
Внутренний относительный КПД турбины	0,90
КПД ГТУ	0,324



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Паровые и газовые турбины для электростанций [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
2. Толмачев, Е.М. Техническая термодинамика. Термодинамический расчет и анализ циклов газовых двигателей и паросиловых установок. Часть 2 / Е.М. Толмачев. – Екатеринбург, 2007.
3. А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, В.Л. Иванов, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев, В.Д. Моляков, М.И. Осипов, И.Г. Суровцев, Н.И. Троицкий Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов/ [А. Н. Арбеков и др.]; под общ. ред. А. Ю. Вараксина. – 4-е изд., испр. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 678 с.: ил.
4. Проектирование энергоустановок с газоохлаждаемыми реакторами / Сметанников, И. Х. Ганев, В. Д. Колганов и др.; Под ред. чл.-кор. АН СССР И. Я. Емельянова. – М.: Энергоиздат, 1981, 232 с. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/proektirovanie-energoustanovok-s-gazoozhlazhdaemymi-reaktorami.html>

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.М. Антонова, доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

## COMPARATIVE THE EFFICIENCY ANALYSIS OF DIFFERENT STEAM GENERATORS TYPES FOR A POWER UNIT WITH A VVER-700 REACTOR

K.S. Samy  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, group 5071

A steam generator (SG) is a heat exchange device that generates non-radioactive steam in the second (third) circuit due to the heat of the coolant. The steam generator is a crucial component of a nuclear power plant because it creates the steam required to power the steam turbines, which in turn power the electric generators, which create the electricity required for different aspects of daily living. In pressurized water reactor (PWR or VVER) nuclear power facilities, there are two different types of SG: horizontal SGs with VVER are used in Russia, and vertical SGs with PWR are used in America.

The vertical SG has a vertical housing, two horizontal tube sheets, and a vertical U-shaped tube. Two-step separation facilities are located on the housing's top. The tube bank's whole height is covered by a shell that organizes the circulation loop (figure 1).

The horizontal SG has a horizontal cylindrical housing and horizontal U-shaped tubes of the heat exchange surface which are installed in two vertical collectors. Gravitational separation is used to dry the steam at the top of the housing (figure 2) [4].

This article briefly discusses the various types of steam generators. The calculated parameters, thermal and hydraulic characteristics are compared and analyzed at different coolant velocities. The calculations were done in the traditional method [1–3].

The main differences between the methods for calculating these steam generators:

- the need to take into account the economizer section in the vertical steam generator;
- various formulas for calculating the heat transfer coefficient when the working fluid boils in a large volume.

Table 1 provides the basic data that was used in the calculations.

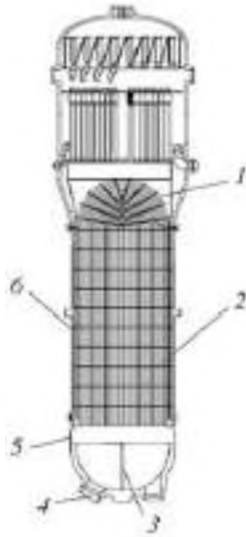


Fig. 1. Vertical SG:

1 – tube bundle; 2 – tube bundle supports;  
3 – partition; 4 – coolant inlet and outlet stub pipes;  
5 – tube sheet; 6 – house [4]

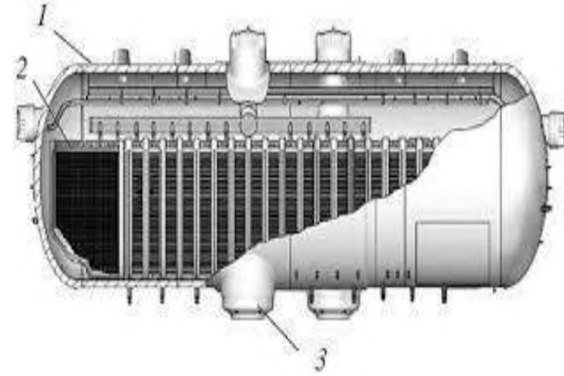


Fig. 2. Horizontal SG:

1 – housing; 2 – tube bank;  
3 – coolant inlet and outlet collector [4]

Table 1. Basic data for SG calculations

Parameter	Value	Units	Parameter	Value	Units
Thermal power	2015	MW	Coolant inlet temperature	330	°C
Steam pressure	7	MPa	Coolant outlet temperature	300	°C
Coolant pressure	16,53	MPa	Feedwater temperature	230	°C

### 1. Thermal Calculation for SG

The purpose of the thermal calculation of the SG is to determine the main dimensions of the SG (heat exchange area, number and average length of pipes). To carry out variant thermal calculations of steam generators, an original program was developed in the Excel working environment. Features of the algorithm of this program are shown below.

#### 1.1. Building a tQ-diagram

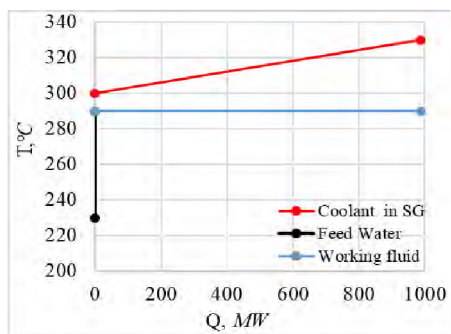


Fig. 1. tQ-diagram for horizontal SG

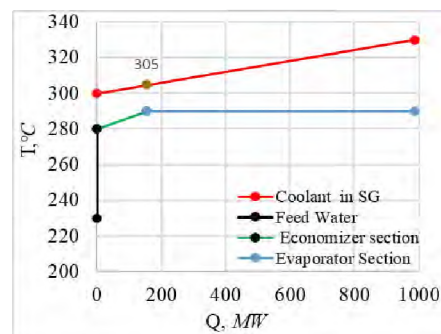


Fig. 2. tQ-diagram for vertical SG

#### 1.2. Calculation of heat transfer inside tubes

In both cases, the known standards equation was applied to determine the amount of heat transfer that would flow from the coolant to the tubes.

$$\alpha_{1avr} = 0,021 \cdot \left( \frac{\lambda_{1avr}}{d_{in}} \right) \cdot (Re_{avr})^{0,8} \cdot (Pr_{avr})^{0,43}, \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \quad (1)$$

where  $\nu_{1avr}$  – kinematic viscosity of the coolant,  $m^2/s$ ;  $Pr_{avr}$  – Prandtl criterion for coolant parameters;  $\lambda_{1avr}$  – thermal conductivity of the coolant,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $Re_{avr}$  – Reynold's criterion for coolant parameters.

1.3. To calculate the heat transfer from pipes to the working fluid in different steam generators (horizontal/vertical), different equations were used:

➤ For horizontal SG [1],

$$\alpha_2 = \frac{10.45}{3.3 - 0.0113 \cdot (t_s - 100)} \cdot q_{in}^{0.7}, \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}; \quad (2)$$

➤ For vertical SG [5],

$$\alpha_2 = 1.26 \cdot q_{in}^{0.75} \cdot e^{\frac{p_2}{6.2}}, \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}. \quad (3)$$

Where  $q_{in}$ -initial value of the heat flux,  $W/m^2$ ;  $p_2$ - pressure of the working fluid, MPa.

## 2. Thermal calculation results of SGs

The results of thermal-hydraulic calculation of horizontal SG and vertical SG are shown in figure 3–5.

Figure 3 illustrates how the speed of the coolant inside the tubes affects the overall heat transfer coefficient. The graph shows that when the velocity of the coolant velocity increases, it also increases.

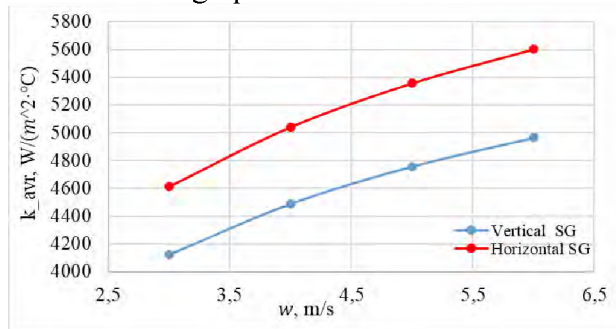


Fig. 3. Dependency of the heat transfer coefficient on the coolant velocity

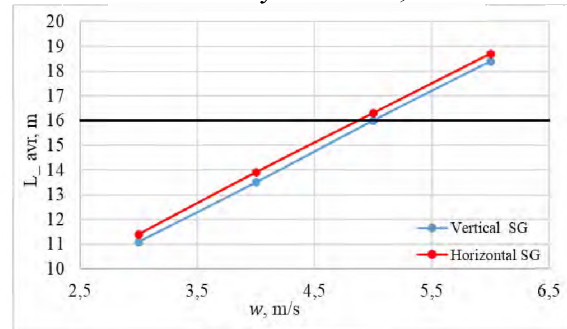


Fig. 4. Dependency of the average length on the coolant velocity

Figure 4 represents the relationship between the average length and the coolant velocity in the tubes. The maximum allowable pipe length for both SGs is 16...17 meters, however, in figure 4 shows that at a speed of 5 m/s, the length of the horizontal SG pipe exceeds 16 meters and is close to 17 meters of the vertical SG. Thus, the coolant velocity of more than 5 m/s is the limit for both steam generators.

Figure 5 depicts how the coolant velocity in the tubes affects the total pressure drops. The graph demonstrates how the total pressure drops rise as coolant velocity rises. In comparison to horizontal SG, vertical SG has greater overall pressure drops.

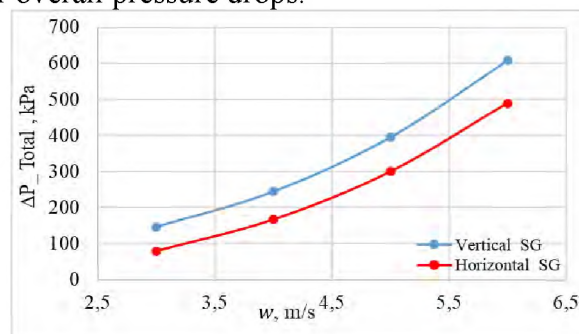


Fig. 5. Distribution of the pressure loss due to change in coolant velocity

## Conclusion

A program for thermal calculations of horizontal and vertical SGs of nuclear power plants has been developed. Variant calculations of the main characteristics of these steam generators are performed at different coolant velocities.

According to these calculations, at a heat carrier velocity of more than 5 m/s, the average length of the tubes of both steam generators may exceed the maximum allowable value.

## LITERATURE:

1. N.G. Rassokhin, Steam generation equipment of nuclear power plants, Energoatomizdat, Moscow (1987)
2. B. I. Lukasevich, N. B. Trunov, Yu. G. Dragunov, and S. E. Davidenko, Steam Generators of VVER Reactor Facilities for Nuclear Power Plants, IKTs Akademkniga, Moscow (2004)
3. Steam generators – horizontal or vertical (which type should be used in nuclear power plants with VVER? / N. B. Trunov, B. I. Lukasevich, D. O. Veselov, Yu. G. Dragunov2 //Atomic Energy, Vol. 105, No. 3, 2008.
4. Qingsen Zhao / The Research of Heat Transfer Area for 55/19 Steam Generator / Qingsen Zhao и другие- Journal of Power and Energy Engineering, 2015, 3, 417-422.

Supervisor: Associate Professor, Ph.D., A. V. Vorobyov, Associate Professor REC I.N. Butakova ISHE TPU.

## JUSTIFICATION FOR THE CHOICE OF MATERIAL FOR CONDENSER TUBES FOR STEAM TURBINE PLANTS OF NUCLEAR POWER PLANTS

M.M. Khalaf

Tomsk polytechnic university  
ISHE, Butakov research center, group 507I

### Introduction

A condenser is a type of heat exchanger that transfers heat from hot to cold fluid. The condenser condenses or cools the exhaust steam from the last stage of the steam turbine, either directly or indirectly with cooling water via a heat transfer medium.

Each low-pressure turbine typically has one condenser. The condenser is characterized by a large number of small tubes made of admiralty metal, copper, stainless steel, or titanium.

The condenser is essentially a large heat exchanger with horizontally mounted tubes. The tubes can be held up (or staked). In a water box, water from the circulating water system enters the condenser. The water level in the water box must be kept above the uppermost tubes or the condenser will not work properly. In general, the plant is more efficient when the circulating water is cold. When the condenser tubes become fouled, for example, by mud, plugging, or the accumulation of other materials that reduce the ability of the condenser tubes to transfer heat from the steam to the water, power plants become less efficient.

The water boxes are kept full by using an air ejector or other system that keeps the water level in the column above the tubes. Water collects at the bottom of the condenser's steam side in a hot well, which serves as the water source for the condensate pumps' suction.

The pressure within a steam condenser is kept below atmospheric pressure to improve efficiency. It is commonly used to reduce the backpressure of turbine exhaust.

### 1. Description of the condenser

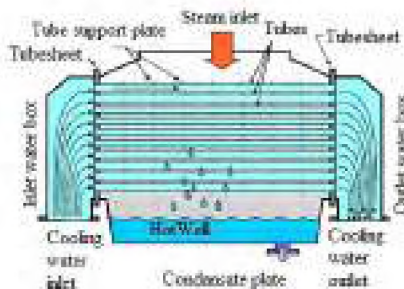


Fig. 1. Condensing unit schematic diagram

The cooling water inside a steam condenser is constantly flowing back and forth between the condenser and the cooling tower.

As a result, the heat from the condensed steam is transferred through the circulating cooling water when exhaust low-pressure steam from the turbine passes through the condenser and is converted to water.

## 2. Initial data for the calculation of the condenser

Table 1. Initial data

Parameter	Denomination, units	Value
Exhaust steam flow per condenser	$G_{c1}, \text{kg/s}$	514
Pressure in the condenser	$p_c, \text{MPa}$	0,005
Number of cooling water tube-side passes	$z$	1
The temperature of the coolant at the condenser's inlet	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	11
The speed of the cooling water in the condenser's tubes	$w_w, \text{m/s}$	1,9
Condenser tube sizes	$d_{out} \times \delta_{wall}, \text{mm}$	$25 \times 1$

## 3. Features of the thermal calculation of the

### 3.1. Tube materials used

The choice of material for the condensate heat exchanger tubes is a determining factor in its reliable operation. Brass, cupronickel, titanium and stainless steel are the most common condenser tube materials.

### 3.2. The overall heat transfer coefficient

A. Shcheglyayev's formula was used to calculate the overall heat transfer coefficient [1]. The type of tube material is set by a special coefficient  $a_m$ .

$$k = 4070 \cdot a \cdot \left( \frac{1,1 \cdot w_w}{d_{in}^{0,25}} \right)^x \cdot \left[ 1 - \frac{0,52 - 0,002 \cdot d_c \cdot \sqrt{a}}{1000} \cdot (35 - t_{w1})^2 \right] \cdot \left[ 1 - \frac{z-2}{10} \cdot \left( 1 - \frac{t_{w1}}{35} \right) \right],$$

where:  $k$  – in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $x = 0,12 \cdot a \cdot (1 + 0,15 \cdot t_{w1})$ ;  $a = a_0 \cdot a_m$  is a coefficient that takes into account tube pollution and tube material;  $a_0 = 0,65 \dots 0,85$  is a coefficient that considers tube contamination;  $a_m$  is a correction factor that takes the tube material into account;  $w_w = 1,9 \dots 2$  m/s is the speed of water in tubes;  $t_{w1}$  is the temperature of the cooling water entering the condenser. This temperature is taken equal to  $11$   $^\circ\text{C}$ ;  $z = 1$  is the number of tube-side passes for cooling water.

### 3.3. Program for calculation

To calculate the capacitor and its performance indicators, an original program (in Excel) was developed in accordance with the algorithm [1]

## 4. Analysis of results

The calculation results are shown in figure 2 and table 2.

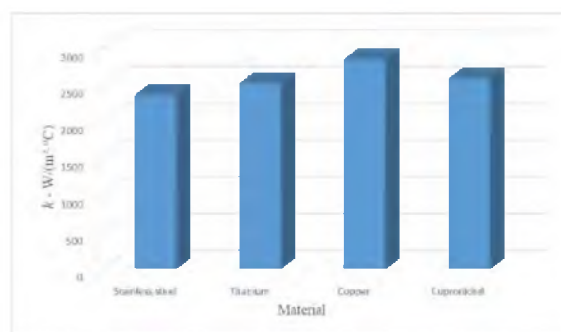


Fig. 2. The effect of the overall heat transfer coefficient in the material

The data in graph 1 show that the condenser with copper tubes has the highest heat transfer coefficient. This is because copper has the best thermal conductivity. On other hand, the condenser with stainless steel tubes has the lowest heat transfer coefficient. The thermal conductivity of stainless steel does not exceed  $20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{S})$ .

The data in table 1 show that condensers with copper and titanium tubes have the best efficiency criteria values.

Table 2. Result for comparing between different material used in the condenser

Tube material	$E, kW \cdot h$	$m_{y6}, kg/kW$	$\beta_{y6}, m^2/m^3$
Stainless steel	553,2	0,175	126,08
Titanium	584,7	0,091	126,2
Copper	684,7	0,147	126,04
Cupronickel	597	0,183	126,12

Notes: the value  $E$  can be considered energy efficiency or energy efficiency;  $m_{y6}$  specific material consumption kg/kW;  $\beta_{y6}$  compactness,  $m^2/m^3$ .

Taking into account the fact that copper alloys are not currently used in nuclear power plant condensers, it can be said that titanium is the best material for nuclear power plant tubes.

### Conclusion

A program for design calculation was developed steam turbine condenser. Variant calculations of a condenser with different tube materials were carried out.

Criteria for comparing options were selected and calculated.

An analysis of the results of the criteria was carried out and the most effective material for condenser tubes was proposed.

### REFERENCES:

1. Modern situation and trends in the design and operation of condensers of powerful steam turbines of TPPs and NPPs: a tutorial / Yu. M. Brodov [et al.]. - Yekaterinburg: Ural University Press, 2019. – 104 p.
2. Baumann P., Pesthy I. Development of Large Steam Condensers with Optimized Cost / Performance Ratio // ABB Review. 1997. № 3. Pp. 40-48.
3. Steam Condensers for Power Plant [Electronic Recourse] /Famet Group. URL: <http://www.famet.com.pl/steam-condensers-for-power-plant> (accessed at 12.11.22).

Supervisor: Associate Professor, Ph.D. A.V. Vorobyov, Associate Professor REC I.N. Butakova ISHE TPU.

## CHOOSE THE MATERIALS FOR STEAM TURBINES NPP

I.M. Ibrahim, S.V. Lavrinenko

Egyptian-russian university, Tomsk polytechnic university

ISHE, Butakov research center, group 507I

### Introduction

The majority of nuclear power reactors use a single-shaft turbine generator with a primary generator, three parallel multi-stage LP turbines, and one multi-stage HP turbine. The HP Turbine in my diplo-ma is a double-flow reaction turbine with around five stages and shrouded blades that generates between 30 and 40 percent of the gross power output of the power plant unit. LP turbines are about five-stage double-flow reaction turbines. About 60–70 % of the overall power output of the power plant unit is produced by LP turbines. Two bearings, one on each side of the turbine module, support each rotor of the turbine. Because of the necessity for high-temperature strength at a reasonable price, as well as the need to guarantee a good match of thermal properties, such as expansion and conductivity, the range of alloys used in steam turbines is very narrow. A steam turbine plant's condenser must deliver pressure behind the turbine with the beginning conditions listed below: incoming cooling water temperature, steam flow, and condenser pressure. You should be aware of the tubes' composition, size, and the quantity of cooling water passageways. [1].

## Material Problems of Turbines

- Creep

The permanent deformation that progresses over time under a continuous load or tension is called creep, often known as cold flow. It develops from prolonged exposure to significant external mechanical stress that is within the yielding limit and is more severe in materials that have been exposed to heat over an extended period of time. The qualities of the material, exposure period, exposure temperature, and the applied structural stress all affect how quickly a material deforms. If we employ materials at high temperatures, creep is crucial.

- Corrosion and erosion

Erosion Repeated electrochemical corrosion reactions and mechanical forces caused by relative motion between the corroding surface and the electrolyte are what lead to corrosion. The combination of erosion with another form of degradation, such corrosion, is called erosion-degradation, or erosion-degradation. Corrosion and wear combine to cause the material deterioration process known as erosion corrosion.

Systems that are susceptible to erosion corrosion include pipelines, valves, pumps, nozzles, heat exchangers, and turbines. Wear is a mechanical process that causes material deterioration on rubbing or impacting surfaces, whereas corrosion involves the substance going through chemical or electrochemical processes. Wear and corrosion both have the potential to accelerate one another.

- Steam Oxidation

Implementing ultra-supercritical steam power generation for increased efficiency and lower CO<sub>2</sub> emissions is closely related to steam oxidation behavior. Greater temperature increases efficiency, however when medium Cr-Ni, ferritic, or ferritic-martensitic steels are employed, higher corrosion rates happen in a steam environment.

The materials developed over 50–60 years ago are no longer suitable for ultra-supercritical regimes due to poor corrosion resistance and inadequate high-temperature creep and strength properties. These technologies require advanced austenitic steels and nickel (Ni)-based alloys with superior steam oxidation resistance [1].

### How to choose material

To enable increases in steam turbine performance resulting from retrofit, materials technology is essential. For each significant component of the high temperature and low temperature cylinders, the choice of materials, the primary mechanisms of deterioration, material concerns, as well as any unique processes necessary, are highlighted. It is shown that the efficiency gains from retrofitting steam turbines may be obtained with little danger of component failure by choosing the right materials and using unique procedures [2].

Also from part of maximum thermal power we determine the number of flow through determine the maximum thermal power for steel and titanium and we can get number of flow and according to this we can choose the lowest number of flow [3].

### Compare between material

The main distinction between the two materials is that titanium is an element while stainless steel is an alloy. Titanium's properties occur naturally in the metal. On the other hand, stainless steel is a metal alloy made up of chromium, iron, nickel, and other things.

Table 1. Of compare titanium alloy and stainless steel [4]

Parameter	Titanium alloy	Stainless steel
Density, kg/m <sup>3</sup>	4700	7780
Young's modulus, GPa	250	215
Thermal conductivity, W/k·m	24,5	15
Hardness, HB	334	149
Cost, Rub/kg	400	1900

### Calculation number of LPC

We will calculate the number of low-pressure cylinders with the same electrical power (900 MW) from calculation of maximum power for determine number of flow from equation (1) for each material:

$$n = \frac{N}{N_{max}}, \quad (1)$$

where,  $N$  – electrical power, MW;  $N_{max}$  – maximum electric power of a single-flow turbine, MW [3].

After calculate number of flow prefer choose the less number of flow (figure 1).

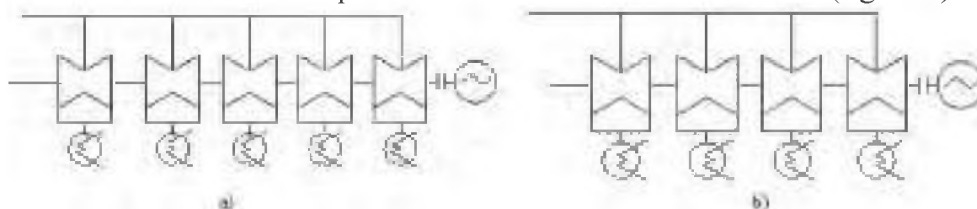


Fig. 1. Number of flow Low pressure turbine:  
a) stainless steel b) titanium alloy

### Calculation costs of material

The of material costs calculation according to the formula, million rubles (figure 2):

$$C_{cost} = \frac{M_{mat} \cdot c_{mat}}{10^6}, \quad (2)$$

where  $c_{mat}$  is price per 1 kg, rub/kg, for stainless steel  $c_{mat} = 350 \dots 400$  rub/kg; for titanium  $c_{mat} = 1900 \dots 2100$  rub/kg.  $M_{mat}$  is material weight, kg (figure 3).



Fig. 2. Compare between the material cost

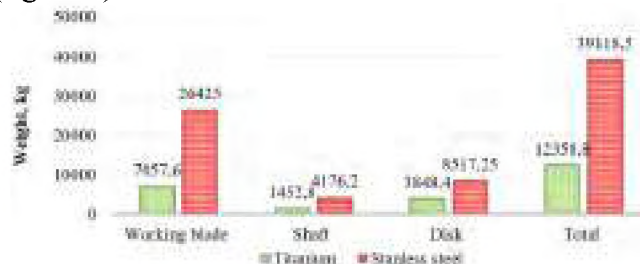


Fig. 3. Compare between the material weight

### Conclusion

So after compare between two material titanium and stainless steel according to the calculation results preferring choose titanium because it has lower number of flow compare with steel also pure titanium is stronger than common steel. It is also twice as strong. The metal has the highest strength-to-density ratio of any metallic element and corrosion resistance, which are its two most valuable characteristics. At normal temperatures, titanium alloys have particularly high levels of corrosion resistance. The formation of a strong, protective oxide layer is the foundation of titanium's resistance to corrosion. Although titanium is "commercially pure," it possesses respectable mechanical qualities.

### LITERATURE:

1. "Materials for Steam Turbines | nuclear-power.com." <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/reactor-and-power-plant-materials/materials-for-steam-turbines/#> (accessed Nov. 07, 2022).
2. "Chapter 13: Steam turbine materials selection, life management and performance improvement – Power Plant Life Management and Performance Improvement [Book]." <https://www.oreilly.com/library/view/power-plant-life/9781845697266/xhtml/B9781845697266500134.htm> (accessed Nov. 07, 2022).
3. Калугин Б.Ф. Турбомашини. Учебное пособие. Томск, изд. ТПУ, 1991. – 94 с.



4. “Stainless Steel Vs. Titanium: Differences Between These Two Metals - LEADRP -Rapid Prototyping And Manufacturing Service.” <https://leadrp.net/blog/stainless-steel-vs-titanium-differences-between-these-two-metals/> (accessed Nov. 07, 2022).

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## PROJECT OF NPP POWER UNIT WITH AN ELECTRIC CAPACITY OF 1250 MW WITH DRY COOLERS

E.A. Mohamed Mustafa  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, Butakov research center, group 5071

Currently, energy is an important factor in the development of society [1]. In recent decades, population growth and economic development in many countries have accelerated the growth of fossil fuel consumption [2]. As a result, there was a serious threat to the environment – global warming [3]. Therefore, in order to protect the environment, it is necessary to optimize the energy structure in order to ensure the possibility of obtaining clean energy and at the same time not have a negative impact on the economic growth of countries, their development and well-being [4]. In comparison with traditional carbon energy, nuclear energy is considered to be clean and relatively inexpensive, and also plays an important role in reducing emissions of hazardous substances into the atmosphere, which mitigates the effects of global warming [5–6]. At the same time, it should be noted that at traditional nuclear power plants, cooling tower are used to cool water from the condenser. In the process of their operation, they are a source of water vapor emissions into the atmosphere. If a nuclear power plant is located near a city or forest, an additional source of humidity in the atmosphere can negatively affect people or animals. The solution to this problem is the use of a dry cooling tower at a nuclear power plant. Therefore, the purpose of the work is the project of a nuclear power plant with a dry cooling tower. A nuclear power plant with a VVER-type reactor was chosen as a prototype of the power unit. The prototype of the projected NPP is 1250 MW.

The initial data for the calculation are presented in table 1.

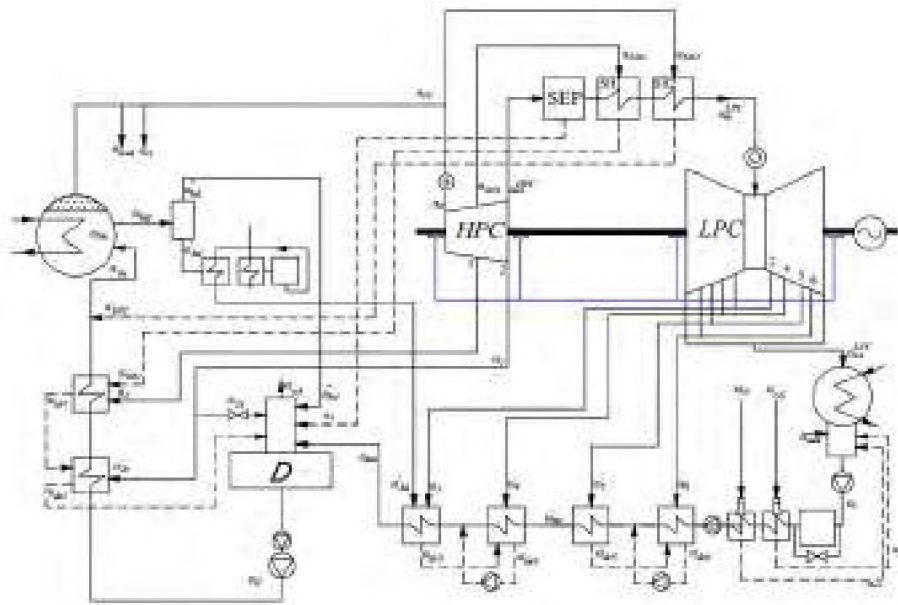
Table 1. Initial data

Name	Symbol	Value
Electrical power	$N_e$ , MW	1250
Initial pressure	$p_0$ , MPa	6.27
Initial temperature	$t_0$ , °C	$t_{sat}$
Final pressure	$P_c$ , kPa	5
Number stages of Superheater	-	Double-stage
Feed water temperature	$t_{fw}$ , °C	220
Deaerator pressure	$p_d$ , MPa	0.58
Number high pressure heater	NHPH	-
Number mixing low pressure heater	NMLPH	-

The main elements of the projected NPP:

- 1) Nuclear power reactor;
- 2) Steam generator;
- 3) Thermal scheme of the NPP;
- 4) Condensation plant;
- 5) Dry cooling tower.

The schematic diagram of the projected nuclear power plant with a dry cooling tower is shown in figure 1.



*Fig. 1. Schematic diagram of the power unit*

As a result of the project, the following most significant characteristics of the power unit were obtained:

- Thermal power 3750 MW;
- Absolute EFFICIENCY 33,2 %;
- The burn-up rate of nuclear fuel is 27,4 tons/year;
- Specific consumption of conventional fuel  $17,01 \times 10^{-6}$  Kg/(kW·hr);
- A dry cooling tower is designed.

The calculations performed on the project can be used as input data for a more detailed and expanded design of nuclear power plants with dry cooling towers.

#### LITERATURE:

1. R.A. Dias, C.R. Mattos, J.A.P. Balestieri. The limits of human development and the use of energy and natural resources. *Energy Pol.*, 34 (2006), pp. 1026-1031.
2. M.W. Zafar, M. Shahbaz, F. Hou, A. Sinha. From nonrenewable to renewable energy and its impact on economic growth: the role of research & development expenditures in Asia-Pacific Economic Cooperation countries. *J. Clean. Prod.*, 212 (2019), pp. 1166-1178.
3. A.K. Karmaker, MdM. Rahman, MdA. Hossain, MdR. Ahmed. Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh. *J. Clean. Prod.*, 244 (2020), p. 118645.
4. Yang Sui, Rui Ding, Hanqing Wang. A novel approach for occupational health and safety and environment risk assessment for nuclear power plant construction project. *Journal of Cleaner Production*. Volume 258, 10 June 2020, 120945.
5. A. Huhtala, P. Remes. Quantifying the social costs of nuclear energy: perceived risk of accident at nuclear power plants. *Energy Pol.*, 105 (2017), pp. 320-331.
6. R.J. Budnitz. Nuclear power: status report and future prospects. *Energy Pol.*, 96 (2016), pp. 735-739.

Scientific supervisor: Candidate of Technical Sciences D.V. Gvozdyakov, Associate Professor REC I.N. Butakova ISE TPU.

# THE PROJECT OF A NUCLEAR POWER PLANT UNIT FOR THE GOLDEN TRIANGLE AREA IN EGYPT WITH A TURBINE CAPACITY OF 600 MW

Mohamed Sayed  
Egyptian-Russian University, Tomsk Polytechnic University  
ISHE, Butakov research center, group 507I

## Introduction

Intentionally to preserve the environment from the danger of global warming and with a purpose to comply with the future vision of reducing carbon emissions, most countries focus on switching to advanced technology such as wind energy, solar energy, and thermonuclear reactors or fourth generation fast nuclear reactors, and based on the available resources for each country.

And according to the permanent need for energy in Egypt and in line with Egypt's sustainable development strategy in Egypt Vision 2030, therefore there is a pressing demand for clean energy instead of using fossil fuels, and in order to avoid an increase in carbon emissions. So, in our provided project is an Egyptian NPP power unit for a modern industrial region with a saturated steam condensing turbine with an electric capacity that supports the region, and constitutes total dependence on it, meeting modern requirements of efficiency, reliability and safety.

In the construction of the NPP, during which steam turbines are used with wet steam, and as one of the obstacles facing the designers of these turbines is the compatibility between obtaining high efficiencies that ensure maximum utilization of the potential energy of the steam, and obtaining very low humidity degrees that guarantee safe performance and preserve the working metal structure.

This problem will become evident by comparing several designs in order to achieve what we mentioned above.

## The city of construction of the NPP

The city of the NPP building will be in Egypt in the yellow area The Golden Triangle (figure 1) of the map, the city of construction is **El-QUSSIER City** specifically between the two cities of El-QUSSIER and SAFAGA, as it will be located directly on the Red Sea [1].



Fig. 1. Location of Golden Triangle region and NPP [1]

## The economic features and characteristics of the region (The Golden Triangle):

- The Golden Triangle is a modern area under construction located in the Eastern Desert on an area of 2,2 million feddans (9500 million square meters) between the governorates of Qena, Safage, and Qussier.
- It includes industrial, mining, tourism, agricultural and commercial areas. As the region is concerned with mineral and quarry resources such as gold, basalt, white sand, limestone and phosphate rocks.

- The area contains many elements of tourism, such as the extended sea beaches, and archaeological sites.
- The goal of the project (Golden Triangle) is to direct part of the population to live in the new area instead of the Nile Valley, and it is expected to accommodate about 2 million people.
- In addition, The City of Qussier was one of the cities nominated to build a nuclear power plant in the past, but the problem was that the electricity network is located 500 km away, but now there is a project of the Golden Triangle that will consume that electricity [2].

### Construction of NPP

According to the requirements of the NPP's location, and based on the average sea water temperature, which is 25,6 °C [3]. So, during this project, and according to our desire to achieve the highest efficiency based on the NPP's location, so we have calculated several different designs, they show in (table 1). With unified initial data for all scheme design, which an initial steam pressure of  $p_0 = 6.5 \text{ MPa}$  was used, and initial steam quality  $x=1$ .

Table 1. Thermal Efficiencies of NPP

Scheme design	Type of Cylinders	$G_0, \text{ kg/s}$	$G_{sg}, \text{ kg/s}$	$\eta_{npp}^{\text{net}}, \%$	$x^{\text{HPT}}$	$x^{\text{IPT}}$	$x^{\text{LPT}}$
1. Separator+2Reheaters+Separator	HPT+IPT+LPT	898	950	33,4	0,87	0,95	0,91
2. Separator+2Reheaters	HPT +LPT	885	934	34,1	0,87	--	0,86
3. Separator + Separator	HPT+HPT+LPT	974	989	32,3	0,87	0,88	0,90

Through a comparison between them in some parameters, it became clear that the first design (1. Separator+2Reheaters+Separator) was chosen as the best, in order to achieve the most suitable efficiency with an optimal steam quality, and its design is shown in (figure 2).

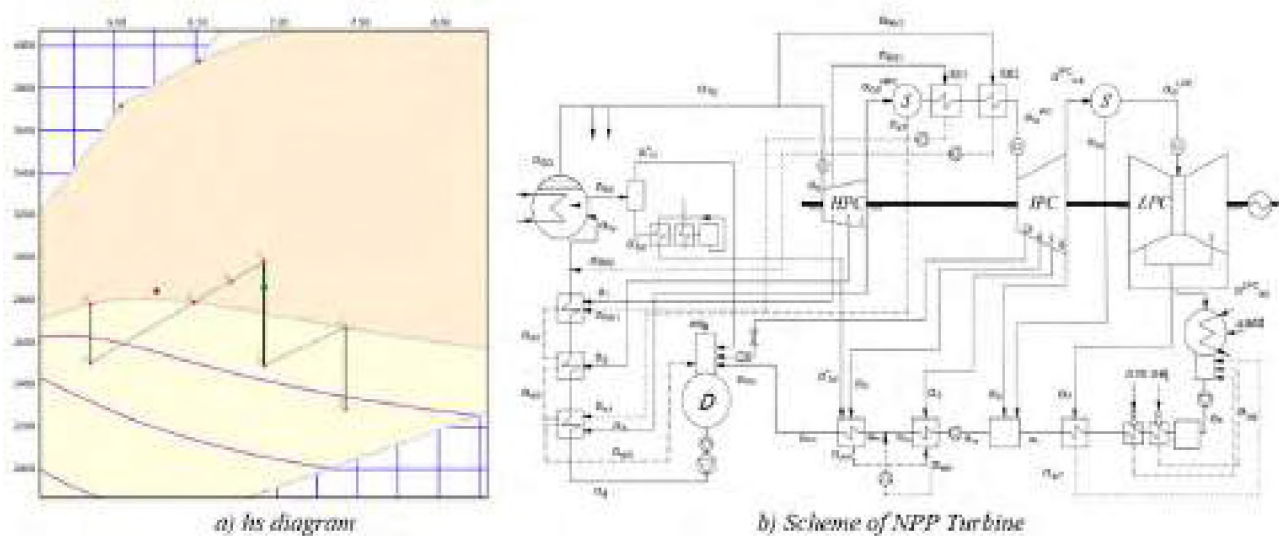


Fig. 2. Thermal Scheme of NPP Turbine

### Design of turbines

Design of the high-pressure turbine (figure 3a), the pressure inlet after a little loss in throttle valve, was a  $p_0 = 6,3 \text{ MPa}$ , with one direction-flow rate, and five stages, and relative error between first and last heat drop  $\delta \approx 0 \%$ , which creates a smoothness in the design, and the critical frequency  $n_{cr} = 9805 \text{ rpm}$ , which keeps the turbine balanced at high speeds.

Design of the intermediate-pressure turbine (figure 3b), the pressure inlet  $p_0 = 1,147 \text{ MPa}$ , one direction-flow rate, and four stages, relative error between first and last heat drop  $\delta \approx 0,31 \%$ , and the critical frequency  $n_{cr} = 8802 \text{ rpm}$ , similarly it achieves the condition of frequency.

The efficiency of converting thermal energy into kinetic energy in the nozzles are  $\eta_n = 96 \%$ , and in the blade is  $\eta_b = 81 \%$ , and average efficiency for one stage for stator and blade are 93 %.

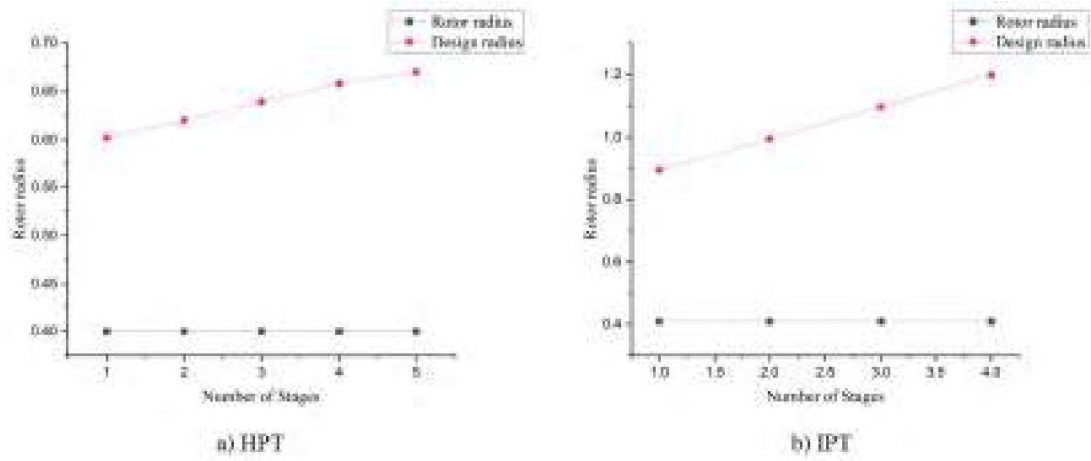


Fig. 3. Stages design of HPT, and IPT

Design low-pressure turbine (figure 4), the pressure inlet  $p_0 = 0,07962$  MPa, with a two direction-flow, three stages, relative error between first and last heat drop  $\delta \approx 0,52$  %, and the critical frequency  $n_{cr} = 9915$  rpm, here it is enough also to keeps the turbine balanced at very high speeds at low pressure, and as a comparing the number of flows for Titanium Material  $N_{\text{Titanium}} = 6$  Flows, with the number of flows for Steel Material  $N_{\text{steel}} = 8$  Flows. So, Titanium material has been selected, for the better performance with convergence of costs.

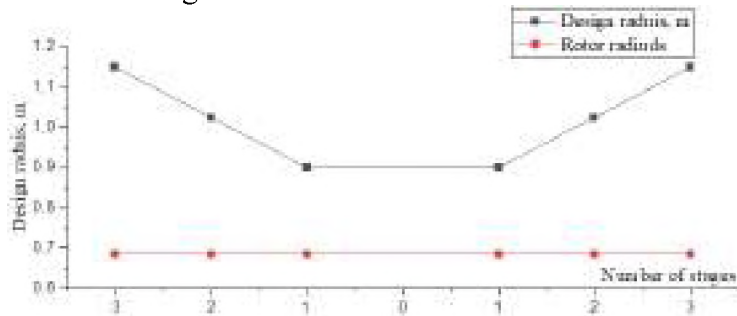


Fig. 4. Stages design of LPT

Table 2. Indicators of NPP's parameters

Name:	Equation	Value
Thermal loading of a steam generating unit	$Q_{SG}, MW$	1667,0
Thermal loading of turbine	$Q_T, MW$	1659,0
Turbine Plant efficiency	$\eta_{TU} = \frac{N_e}{Q_T}, \%$	36,2
Efficiency of pipelines connecting between the SGs and the Turbines	$\eta_{pip2} = \frac{Q_T}{Q_{SG}}, \%$	99,5
NPP Gross efficiency	$\eta_{Inpp}^{Gross} = \eta_{RU} \cdot \eta_{pip1} \cdot \eta_{SG} \cdot \eta_{pip2} \cdot \eta_{TU}, \%$	35,1
Efficiency of a steam generating unit	$\eta_{SGU} = \eta_{RU} \cdot \eta_{pip1} \cdot \eta_{SG}, \%$	97,5
The specific flow rate of nuclear fuel (natural uranium) requires at nuclear power plants	$b_{nf} = \frac{1000}{24 \cdot B \cdot \eta_{Nb}} \cdot \frac{x_n - x_o}{x_e - x_o}, g/MW \cdot h$	0,0339
Specific flow rate of degraded fuel for the electrical supply at nuclear power plants (block)	$b_{Ndf} = \frac{0,0537}{\eta_{Nb}}, g/MW \cdot h$	0,161

## Conclusion

During this project, and in order to reach the optimal values in relation to the construction site of the nuclear plant, and after comparing a number of different designs that were compared, the design mentioned above was chosen (1. Separator+2Reheaters+Separator), which contain three Cylinder: High, Intermediate and Low-pressure.

The design has achieved the efficiency for NPP Net  $\eta_{\text{NPP}} = 33,4\%$ , and Turbine Plant efficiency  $\eta_{\text{TU}} = 36,2\%$ , bearing in mind that the design is distinguished high final steam quality for all cycles of HPC, IPC and LPC, 87 %, 95 % and 91 % respectively, these humidity values give ample opportunity for the turbines to operate at minimal erosion, which ensures structural stability within the safe range, and thus reducing design, operating and repair costs.

In addition, according to statistics, a nuclear power plant with a capacity of 600 MW, prevents the release of 4,80 tons of carbon dioxide annually from a coal-fired plant of the same capacity, and prevents the release of 240 tons of carbon dioxide annually from a natural gas plant [4].

Eventually, the results obtained are competitive results, competing and more than with already existing nuclear plants, as it gives compatibility between high efficiencies and the required steam quality.

#### LITERATURE:

1. “A available resources in the golden triangle area. Prof. Dr Ahmed A. Melegy Head of Geological Sciences Dept. Natinal Research. - ppt download.” <https://slideplayer.com/slide/7944548/> (accessed Nov. 12, 2022).
2. “The golden triangle – Egypt Mining Forum | 4 July 2022, Cairo, Egypt.” <https://www.egyptminingforum.com/conference-programme/project-spotlight/2022/companies/the-golden-triangle/> (accessed Sep. 06, 2022).
3. “Red sea, Egypt – Average Annual Weather - Holiday Weather.” [https://www.holiday-weather.com/red\\_sea/averages/](https://www.holiday-weather.com/red_sea/averages/) (accessed Sep. 06, 2022).
4. Sayed, A. M. Nuclear energy in the face of global warming / A. M. Sayed // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов : Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – P. 802-806. – EDN LDDQAQ.

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА ЗАКРУТКИ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ, ЗАКРУЧЕННОЙ ПО ЗАКОНУ ПОСТОЯНСТВА ЦИРКУЛЯЦИИ, НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ**

А.С. Романов, М.А. Лаптев, В.В. Барсков  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
ИЭ, ВШЭМ, группа 3231303/90301

Увеличение мощности и усложнение конструкции турбомашин сопровождается повышением требований к их надежности. Повышение ресурса турбомашин также является одной из основных задач улучшения качества. Поскольку рабочая лопатка турбины является высоконагруженным элементом любой турбомашины, то к ней предъявляются высокие эксплуатационные требования, выраженные в надежности и долговечности данного элемента. На эксплуатационные качества рабочей лопатки сказывается большое количество факторов, одним из которых является её закрутка. Таким образом, цель текущего исследования заключается в определении влияния закрутки лопатки газовой турбины, закрученной по закону постоянства циркуляции.

С помощью внутренних пакетов ANSYS Static Structural и CFX был произведен сопряженный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) лопатки, построенной по закону постоянства циркуляции. Статический анализ НДС состоит из нагрузок, возникающих в

результате действия центробежных, газодинамических нагрузок (напряжения растяжения, напряжения изгиба от разности давлений на входе и выходе и от разности давлений на вогнутой и выпуклой поверхностях лопатки, напряжения кручения) и температурных напряжений.

Из анализа ранее полученных аналитических зависимостей распределение напряжений растяжения вдоль высоты лопатки будет зависеть только от функции изменения площади [1, 2]. Закон закрутки не сказывается на распределении растягивающих напряжений от поля центробежных сил. Из рисунка 1 можно заметить, что максимальные напряжения возникают в корневом сечении вблизи входной кромки, и далее уменьшаются от корня к периферии лопатки.

Также ранее были получены аналитические зависимости газодинамических нагрузок для ступени постоянной циркуляции [1]. Из сравнительного анализа данных зависимостей и результатов численного моделирования был сделан вывод, что выявленная особенность газодинамического нагружения на рисунке 5 не будет особенным образом сказываться на картине НДС, поскольку изгибающие моменты и напряжения от изгибающих моментов максимальны по абсолютному значению вблизи корневого сечения, периферийные сечения разгружены от напряжений изгиба (продемонстрировано на рисунке 2).



Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений от центробежных сил

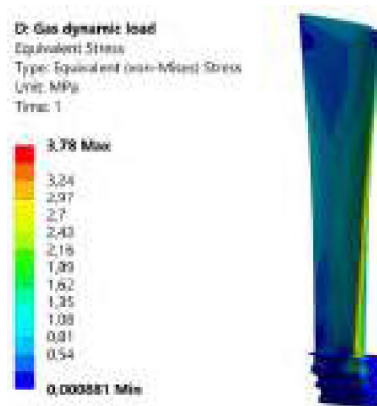


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений от газодинамических сил

В закрученных лопатках от совокупности центробежных, газодинамических и температурных нагрузок возникают напряжения кручения (касательные напряжения), которые в свою очередь приводят к деформациям кручения (деформации сдвига). Умеренный уровень касательных напряжений может быть получен лишь при плавном изменении геометрических параметров сечений лопатки. Главную роль здесь играет характер изменения первой производной угла естественной начальной закрутки, которая численно может быть выражена формулой [3, 4]:

$$\tau_i = \frac{\alpha_{0i} - \alpha_{0i-1}}{\Delta z_i} \quad (1)$$

Также очень важно учитывать возникающие деформации сдвига, поскольку сечения лопатки отклоняются от своего расчетного положения. Вследствие этого возникает отрицательный угол атаки, который в периферийной части лопатки может достигать  $10^\circ$ . Это вызывает существенное увеличение профильных потерь и может привести к возникновению отрывных явлений.

На рисунке 3 представлено распределение напряжений кручения по перу лопатки с учетом действия температурного градиента. Из рассмотрения представленной картины распределения напряжений кручения следует, что температурный фактор существенно влияет на увеличение напряжений кручения (поскольку без учета температур максимальное значение напряжений кручения составляло 69 МПа), следовательно, и на раскрутку пера лопатки.

Также было получено распределение абсолютных деформаций по перу лопатки с учетом действия всех нагрузок (от действия центробежных сил, газодинамических сил и действия гра-

диента температур). Максимальное значение отклонения составляет 1,53 мм. Данный показатель незначителен, следовательно, это практически не будет сказываться на аэродинамических свойствах пера лопатки.

На рисунке 4 представлено характерное распределение напряжений по перу рабочей лопатки, являющихся эквивалентом напряжений растяжения, кручения и изгиба от центробежных сил, от газодинамической нагрузки и температурных нагрузок. Из этого видно, что величина напряжений уменьшается по высоте лопатки, максимальные напряжения сконцентрированы в корневом сечении вблизи входной кромки, величина максимальных напряжений составляет  $\sigma_{\max} = 704,94$  МПа. При заданном материале лопатки ЭИ 388 коэффициент запаса прочности по пределу кратковременной прочности составляет 1,25, что является допустимым для концентратора напряжений. Периферия лопатки разгружена.

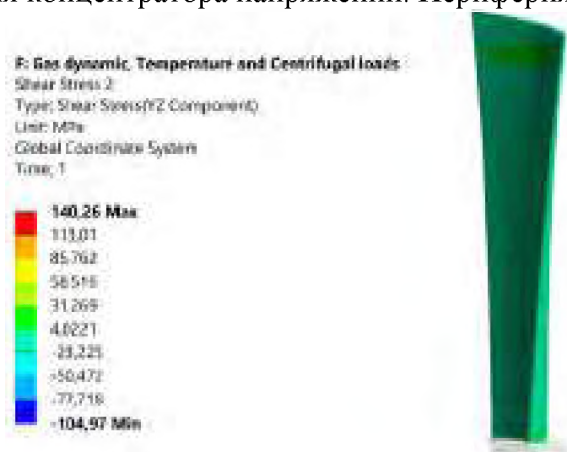


Рис. 3. Распределение напряжений кручения с учетом действия температур

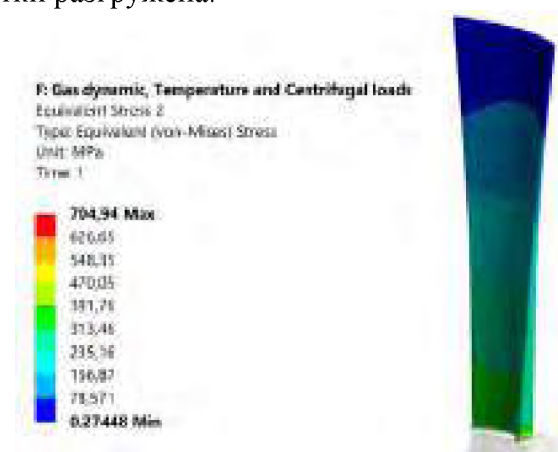


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений от центробежной, аэродинамической и температурной нагрузок

Результаты, полученные в ходе данного исследования, относятся к численному исследованию математической модели нагружения закрученной лопатки газовой турбины в поле центробежных и газодинамических сил, а также от нагрузок, возникающих в результате температурного градиента. При этом:

1. Проведено сравнение результатов, полученных на основании аналитических методов и экспериментальных зависимостей, и решения задачи численного моделирования методом конечных элементов. Исходя из анализа этих данных было показано, что решение задачи численного моделирования методом конечных элементов в достаточной степени совпадают с результатами эксперимента и ранее выведенных аналитических зависимостей.

2. Показано, что для турбинных лопаток газовой турбины закон закрутки лопатки не является определяющим фактором при оценке растягивающих напряжений от поля центробежных сил и изгибающих напряжений от газодинамического нагружения. Однако, в любых закрученных лопатках возникают напряжения кручения, вследствие центробежных, газодинамических и температурных нагрузок. Возникающие касательные напряжения и деформации сдвига могут приводить к отклонению сечений лопатки от своего расчетного положения, что в свою очередь приводит к возникновению отрицательных углов атаки и отрыву потока от пера лопатки. Как следствие, будут увеличиваться профильные потери, а образовавшиеся вихревые структуры будут создавать дополнительные циклические нагрузки, пагубно влияющие на эксплуатационные свойства рабочей лопатки. Данный фактор должен учитываться при проектировании закрученных лопаток и их дальнейшей газодинамической оценки. При проектировании лопаток газовых турбин, необходимо учитывать плавность изменения угла установки профиля, для достижения умеренного значения напряжений и деформаций кручения. Если высота лопаток сравнительно небольшая, возникающие деформации сдвига можно не учитывать.



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. – 2-е изд. - Москва: Издательство МЭИ, 2000. – 478 с
2. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л Газотурбинные двигатели. – Пермь: ОАО Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.
3. Шубенко А.Л., Сухинин В.П., Бояршинов А.Ю. Деформация кручения длинных лопаток паровых турбин // Энергосберегающие технологии. – 2013. – №3(8). – С. 21-24.
4. Шорр Б.Ф. Прочность и динамика авиационных двигателей [Текст]. – 3-е изд. – Москва: Машиностроение, 1966. – 213 с.
5. Ермаков А.И., О.В. Батурин О.В., Кривцов А.В., Попов Г.М., Шкловец А.О. Прочностная и газодинамическая доводка ступени осевой турбины с использованием её виртуальных моделей. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. – 120 с.

Научный руководитель: к.т.н. В.В Барсков, доцент ИЭ ВШЭМ СПбПУ.

## **РАЗРАБОТКА СХЕМЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ИНВЕРТНОЙ ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Н.Е. Фоменко, М.В. Фоменко  
Московский энергетический институт  
ИТАЭ, каф. ТЭС

Наиболее эффективной с точки зрения производства электроэнергии на твердом топливе на сегодняшний день является концепция паротурбинного энергоблока на ультравысоких параметрах пара (параметры свежего пара – 700 °С и 35 МПа). КПД производства электроэнергии подобных установок находится на уровне 50 % [1]. В настоящее время данный тип энергоблоков не реализован в связи с главной проблемой такой технологии – потребностью в главных паропроводах из никелевых сплавов, имеющих высокую стоимость, влияющую на величину капитальных затрат на энергоблок. Потенциальным решением проблемы является использование нестандартных компоновок котла, позволяющих уменьшить длину паропроводов между котлом и турбиной. Одним из вариантов являются котлы с инвертной топкой, подача топлива и воздуха в которую осуществляется в верхнюю часть, а дымовые газы движутся сверху вниз [2].

В НИУ МЭИ выполняются работы по разработке схем сжигания твердого топлива с использованием прямоточных горелок и сопл. Для проектирования схемы сжигания в инвертной топке с прямоточными горелками необходимо рассмотреть множество вариантов схем сжигания топлива с анализом их аэродинамики для определения оптимальной компоновки горелок и сопл. В работе рассматривается оптимизация схемы сжигания угля для инвертной топки котла на 500 МВт.

В качестве инструмента проведения исследования используется программный комплекс вычислительной гидрогазодинамики ANSYS. Исследование проводилось в несколько этапов: создание исходной схемы, оптимизация схемы с помощью моделирования аэродинамики с использованием авторской упрощенной численной модели [3] и оптимизация схемы при моделировании полных физических и химических процессов, происходящих при горении твердого топлива в топочном объеме.

Авторская упрощенная численная модель предназначена для анализа большого количества схем сжигания топлива на основе результатов моделирования топочной аэродинамики в

программе ANSYS с небольшими затратами времени и компьютерных мощностей. Особенности упрощенной численной модели: моделируется полноразмерный объем топочной камеры; в качестве моделируемого вещества используется воздух, а каждый тип воздуха (первичный/вторичный/третичный) маркируется отдельным названием; зависимости теплопроводности, теплоемкости и вязкости воздуха от температуры задается реальной нелинейной зависимостью; зависимость плотности первичного воздуха от температуры задается инверсной полиномиальной зависимостью (коэффициенты полиномов для различных реальных температур первичного воздуха представлены в работе [3]); температура первичного воздуха принудительно задается значением 2000 °С; моделируется движение воздуха, процессы турбулентности и конвективный теплообмен.

Программный комплекс ANSYS дает возможность смоделировать следующие процессы, происходящие при горении твердого топлива: движение потоков, процессы турбулентности, конвективный теплообмен, движение и теплообмен частиц угля и золы, процесс излучения, выход летучих, горение газовой и твердой фазы, образование оксидов азота.

Исходная схема сжигания выполнена со встречно-смещенным расположением прямо-точных горелок и сопел и предназначена для ступенчатого сжигания каменного угля. Схема должна обеспечить: рассредоточение ядра факела по ширине, глубине и высоте топки; интенсивный подвод топочных газов к корням горелочных струй; организация в объеме топки большого количества вихрей, вращающихся в противоположных направлениях; исключение зон повышенного динамического давления факела на экранные трубы. Изображение исходной схемы дано на рисунке 1а.

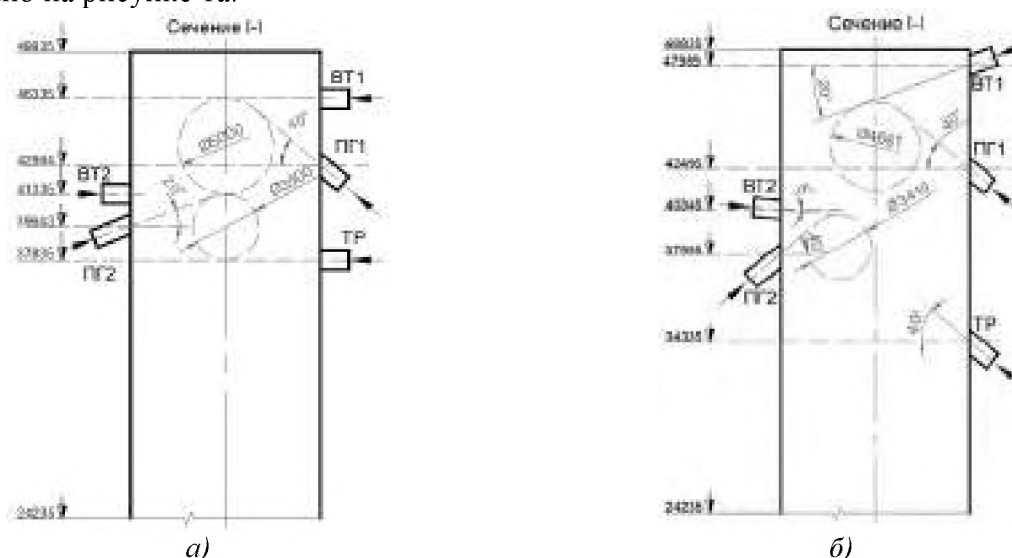


Рис. 1. Схема сжигания твердого топлива в инвертной топке:

а) – исходная (отметки высот даны в мм); б) – рекомендуемая (отметки высот даны в мм)  
 (ПГ1 – горелки первого яруса; ПГ2 – горелки второго яруса; ВТ1 – сопла вторичного воздуха первого яруса; ВТ2 – сопла второго яруса; ТР – сопла третичного воздуха)

Оптимальная схема сжигания топлива должна удовлетворять следующим условиям:

1. Отсутствие повышенных массовых долей первичного воздуха у стен топки для уменьшения вероятности шлакования экранов (отсутствие интенсивного касания топочных экранов топливными струями).
2. Наличие рециркуляции потоков к корню горелок для обеспечения надежного воспламенения.
3. Постепенное снижение массовых долей топливовоздушных струй, струй вторичного и третичного воздуха по мере проникновения их в топочный объем, как характеристика перемешивания струй первичного воздуха со вторичным и третичным воздухом и рассредоточения струй по топочному объему.

С использованием упрощенной численной модели проанализировано множество схем, в которых исследованы следующие конструктивные изменения: распределение избытков воздуха по соплам; изменение углов наклона горелок ПГ1, ПГ2 и сопел ВТ1, ВТ2 и ТР; высоты расположения горелок ПГ1, ПГ2 и сопел ВТ1, ВТ2 и ТР; положение вихря, образуемого ВТ2 и ПГ2, относительно центра топки; целесообразность расположения горелок и сопел одного яруса напротив друг друга; наличие рассекателей в горелках ПГ1 и ПГ2.

По упрощенной методике моделирования определяется оптимальная аэродинамическая схема сжигания топлива и для нее проводится полномасштабное моделирование сжигания угля с учетом процессов горения топлива в топке котла.

Критериями оптимизации схемы сжигания в инвертной топочной камере с применением численного моделирования процессов горения являлись показатели эффективности и экологичности работы инвертной топки, такие как:

1. Температура на выходе из топки должна быть меньше температуры начала деформации золы для исключения шлакования ширмовых поверхностей нагрева (для расчетного угля эта температура составляет 1340 °С);
2. Механический недожог топлива должен быть меньше нормативного при ТШУ для угля марки Кузнецкий ТР  $q_4 \leq 5\%$  по нормам теплового расчёта котлов 1998 г. [4]);
3. Желательно достижение концентрации оксидов азота  $NO_x$  на выходе из топки меньше нормативных значений удельных выбросов  $NO_x$  в соответствии с [5] (350 мг/нм<sup>3</sup> для котлов, вводимых в эксплуатацию после 2001 г.).

Помимо сформулированных критериев учитывалось распределение температур в топочном объеме для выявления центрального положения факела, а также наличие интенсивного вихревого движения в вертикальных и горизонтальных плоскостях топки для повышения времени пребывания частиц топлива в зоне активного горения и лучшего перемешивания топлива с воздухом.

Окончательная схема сжигания топлива приведена на рисунке 1б. Горелки верхнего яруса (ПГ1) выполнены с наклоном вверх под углом 40 градусов по отношению к горизонтальной плоскости и имеют рассекатели потока шириной 0,2 м на всех горелках, кроме крайних, расположенных у боковых стен. Горелки нижнего яруса (ПГ2) выполнены с наклоном вверх под углом 40 градусов к горизонтальной плоскости. Ввод вторичного воздуха (ВТ1 и ВТ2) выполнен выше каждого из уровней горелок и с наклоном сопел ВТ1 вверх под углом 40° вверх, а сопел ВТ2 – на угол 5° вниз. Третичный воздух подается в нижнюю часть топки. Сопла третичного воздуха (ТР) подают воздух в топку под углом 40° вверх. Все сопла и горелки имеют прямоугольное сечение. Избытки воздуха по горелкам ПГ1, ПГ2 и соплам ВТ1, ВТ2 и ТР имеют распределение 0,1095; 0,1095; 0,2; 0,32 и 0,441 соответственно.

Рекомендуемая схема расположения горелок и сопел в инвертной топке дает высокие показатели экологичности и эффективности топки: механический недожог топлива менее 1 % (меньше нормативного значения 2–5 %), температуру на выходе из топки 1242° (меньше температуры начала деформации золы 1340°). Уровень оксидов азота 442 мг/нм<sup>3</sup> требует использования вторичных мер подавления  $NO_x$ . Схема дает довольно растянутый факел по высоте топки с выделением двух высокотемпературных зон в области горелок верхнего и нижнего яруса. Отсутствует прямое касание горелочными струями стен топки, что должно уменьшить вероятность шлакования топочных экранов. Отмечается интенсивное вихреобразование в горизонтальных и вертикальных плоскостях.

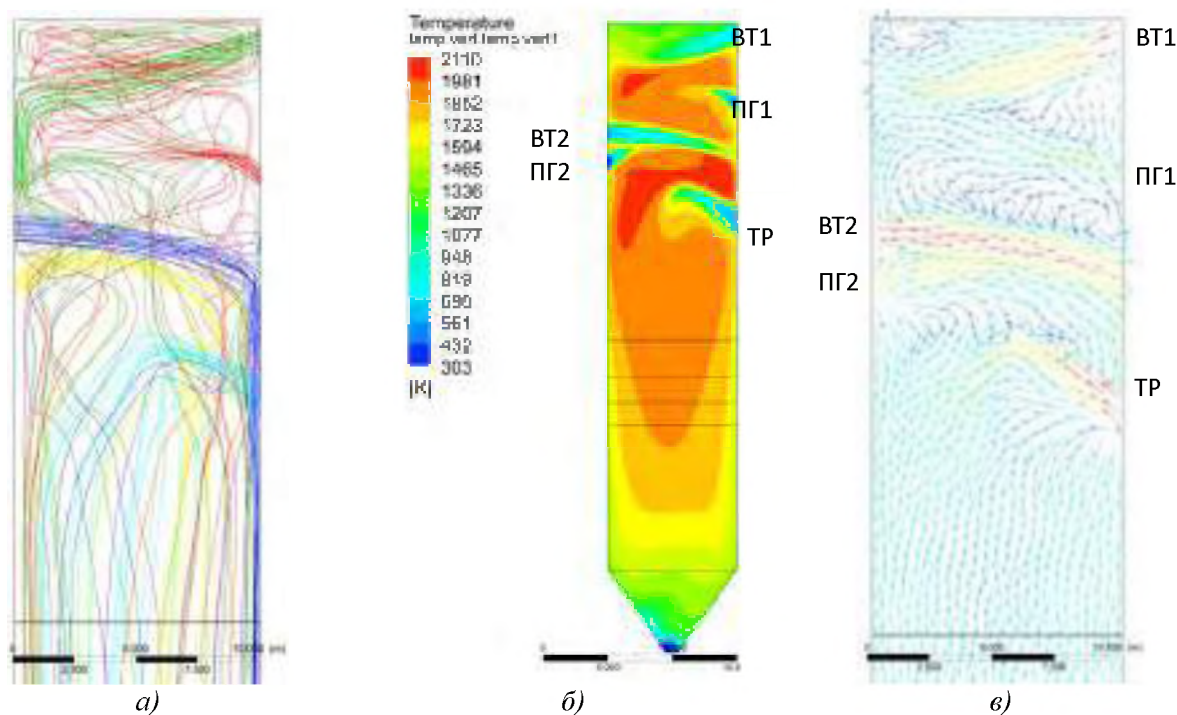


Рис. 2. Результаты численного моделирования рекомендуемой схемы сжигания в инвертной топке:

а) линии тока; б) температурное поле в вертикальной плоскости; в) векторное поле в вертикальной плоскости

Для рекомендуемой схемы выполнено моделирование горения в топке при работе котла на пониженных нагрузках. Таким образом, имеется проведено моделирование рекомендуемой схемы для нагрузок котла 100 %, 70 % и 50 %. Результаты показали, что разработанная схема обеспечивает надежную работу и высокие показатели эффективности при пониженных нагрузках работы котла и рекомендуется авторами к использованию при сжигании угля в инвертных топках.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Di Gianfrancesco A. The fossil fuel power plants technology. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants, 2017, pp. 1–49. DOI:10.1016/b978-0-08-100552-1.00001-4.
2. Volkov E.P., Chernov S.L., Fomenko N.E. Development M-shaped profile for A-USC steam boiler. Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019, vol. 1370, no. 1. 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012007
3. Prokhorov V. B., Fomenko N. E., Fomenko M. V. Development of a simplified methodology for furnace aerodynamics with vortex combustion of organic fuel modeling //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2088. – №. 1. – С. 012016
4. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – Энергия, 1998.
5. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1996.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>).

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Б. Прохоров, профессор ИТАЭ МЭИ.

# USE OF IMPROVED METHODS FOR DETERMINING RESERVOIR PRODUCTIVITY

O. Berdimyradova, B. Begliyew, A. Durdyev  
Yagshygeldi kakayev international oil and gas university

## A. Preparation of Rock Samples

For the laboratory tests Berea yellow sandstone, Berea gray sandstone, shaly sandstone, shale and limestone were used. Sandstone and limestone samples were obtained from core analysis laboratory.

## B. Measurement of Sandstone Core Sample Properties

After obtaining rock samples, properties of sandstone core samples were measured using Poroperm equipment by injection of helium gas at 400 psi. These properties are used when analyzing fracture and penetration rate after laser experiment.

## C. Cutting of Rock Samples

Each rock sample were cut into 4 different pieces with 2, 4, 6, 8 mm size using Trimming Machine. Lapping and Polishing Machine were used to produce precision flat polished surfaces.

## D. Penetration of Samples with Laser

Maximum power of the laser is 150W and rock samples were tested with 75 W, 90 W, 105 W, 120 W and 135 W. Diameter of the laser beam was kept constant as 2mm. Time taken to penetrate the rock samples with each power was recorded.

## Results and Discussion

### A. Measurement of Sandstone Core Sample Properties

The properties of sandstone core samples were measured using Poro perm and results are presented in table 1. Sandstone core samples had same diameter but different length (figure 1).



Fig. 1. Lasing of samples with laser machine

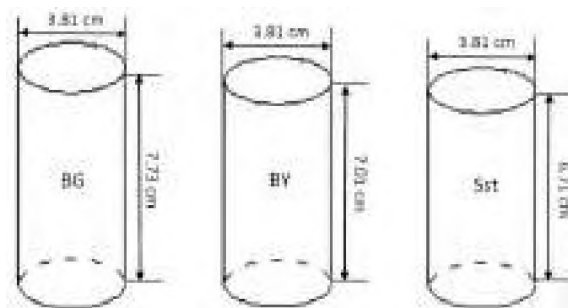


Fig. 2. Dimensions of sandstone core samples where, BY: Berea yellow sandstone; BG: Berea gray sandstone; Sst: Shaly sandstone; Ls: Limestone; Sh: Shale

Table 1. Measured properties of sandstone core samples

Core sample	Bulk volume (cc)	Pore volume (cc)	Porosity (%)	Permeability (md)
BY	79,4	16,2	20,4	917
BG	86,9	16,0	18,5	138
Sst	77,2	14,5	18,8	39

### B. Penetration Rate

Penetration rate of samples were calculated by dividing sample thickness to penetration time (equation 2). The unit of sample thickness were converted from millimeter (mm) to foot (ft) and time from second (s) to hour (hr) in order to present the results in ft/hr.

$$h=PR/t, \quad (1)$$

when:  $PR$  – Penetration rate (ft/hr);  $h$  – Sample thickness (ft);  $t$  – Penetration time (hr)

Results indicated that penetration rate increases with the increase of laser power regardless of rock type (figure 1 and figure 2). More laser power means more heat transfer and less penetration time. As penetration time decreases, penetration rate increases (equation 2).

Figure 1 and figure 2 shows the penetration rate comparison of rock types under each laser power. The highest penetration rate was obtained in limestone, followed by Berea gray sandstone, shale, shelly sandstone and Berea yellow sandstone. Several rock parameters effect on penetration rate. Penetration rate increases with high thermal conductivity, low percentage quartz, high bulk density, dark color and high permeability (table 1). The opposite of these parameters decrease penetration rate.

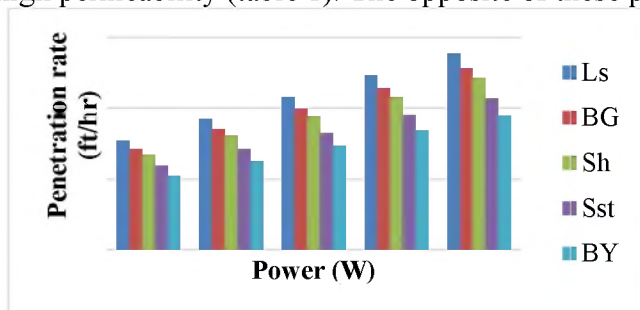


Fig. 3. Penetration rate comparison of rock types at each laser power

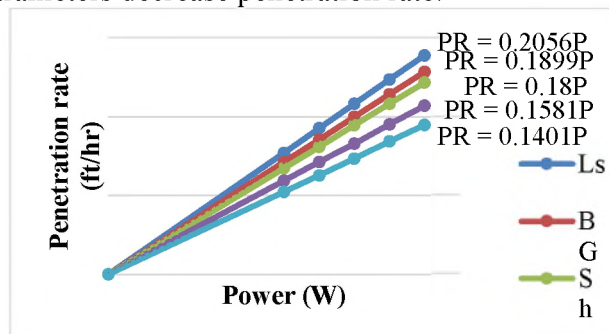


Fig. 4. Penetration rate comparison of rock types

1. Alternatives to hydraulic fracturing were reviewed and applicability of laser technology was investigated as an alternative to hydraulic fracturing.

2. Laboratory tests were performed and results were encouraging. Results showed laser beam can penetrate different types of rocks.

3. Penetration rate increases with the increase of laser power.

#### LITERATURE:

1. Bakhtbidar, M., Ghorbankhani, M., Alimohammadi, M., Kazemi Esfeh, M. R., & Rezaei, P. (2011). Application of Laser Technology for Oil and Gas Wells Perforation, Society of Petroleum Engineers.
2. Batarseh S.I. (2001). Application of Laser Technology in the Oil and Gas Industry: An Analysis of High Power Laser-Rock Interaction and Its Effect on Altering Rock Properties and Behavior. PhD Dissertation, Colorado School of Mines.
3. Batarseh, S. I., Abass, H. H., Al-Mulhem, A. A., & Habib, N. S. (2012). High Power Laser Application in Openhole Multiple Fracturing with an Overview of Laser Research; Past, Present and Future, Society of Petroleum Engineers.

## АНАЛИЗ ВОДНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЭС

А.В. Низамаева

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, АТЭС, группа Т-2-19

Образование бактерий в гидротехнических сооружениях является актуальной проблемой в различных отраслях промышленности, в том числе в энергетике. Установки водоподготовки и энергетическое оборудование на тепловой электрической станции (ТЭС) подвержены постоянному размножению и накоплению биологических микроорганизмов.

Из-за образующихся отложений в системе водоподготовки ухудшается качество воды и санитарно-техническое состояние трубопроводов. Микроорганизмы и продукты их жизнедея-

тельности образуют отложения на внутренних поверхностях энергетического оборудования, что требует увеличения дозирования реагентов при химических промывках и уменьшения межпромывочного интервала. Данные действия в конечном итоге приводят к увеличению эксплуатационных расходов. Из-за низкой теплопроводности отложений ухудшается эффективность процесса теплопередачи. Биологические загрязнения способствуют ухудшению вакуума в конденсаторах и заметному снижению КПД ТЭС по выработке тепловой и электрической энергии, а также к перерасходу топлива. Поэтому биологическому контролю в системе водоподготовки должно уделяться особое внимание.

В качестве объекта исследования была выбрана проба воды с Казанской ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2.

На любой ТЭЦ в системе ВПУ очень важно поддержание допустимых нормируемых показателей режимов работы системы, а именно анализ воды. На сегодняшний день существуют множество методов оценки количества бактерий и его состава, но наиболее распространенные для применения такие методы оценки, как ИК – спектроскопия, люминометрический, BART тесты и т. д.

1. ИК – спектроскопия основана на исследовании вещественного состава органических или неорганических соединений. Особенность этого метода заключается в том, что он допускает исследование вещества в любом агрегатном состоянии, в то время как другие методы исследования для этих целей не пригодны.

2. Люминометрический метод основан на определении внутриклеточного аденозинтрифосфата (АТФ). Величина концентрации аденозинтрифосфата указывает на уровень чистоты.

3. BART тест предназначен для определения биологической активности бактерий и их видов.

Для анализа была отобрана вода с промышленных площадок КТЭЦ-1 и КТЭЦ-2. Для анализа были использованы BART тесты.

Присутствие бактерий в образцах воды ВПУ определялось с помощью НАВ BART-тестов. Компьютерная программа “BART-soft V6” позволяет оценить риски возникновения биоиндуцированной коррозии и забивки технологического оборудования отложениями.

Показатели датчиков химического контроля воды на Казанской ТЭЦ-1 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета бактериального загрязнения и рисков КТЭЦ-1

Номер точки контроля	Преобладающие бактерии	Оценка популяции колоний, КОЕ/мл	Риск по девятибалльной шкале		
			коррозии оборудования	забивки оборудования	Ущерб здоровью персонала
исх. вода	Анаэробные и аэробные	47800	3	5	1
после ОсВ	Не обнаружено	-	-	-	-
после мех. ф-ра	Не обнаружено	-	-	-	-
на выходе из Н-П фильтра	Не обнаружено	-	-	-	-
на выходе из ФСД	Анаэробные и аэробные	6890000	4	7	2

Опасный уровень рисков был выявлен в схеме ВПУ КТЭЦ-1 на блоке ФСД. Причиной этого могло быть вызвано наличием гумусовых веществ природного происхождения, которые могут являться питательной средой.

Показатели датчиков химического контроля воды на Казанской ТЭЦ-2 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета бактериального загрязнения и рисков КТЭЦ-2

Номер точки контроля	Преобладающие бактерии	Оценка популяционной, КОЕ/мл	Риск по девятибалльной шкале		
			коррозии оборудования	забивки оборудования	Ущерба здоровью персонала
исх. вода	Анаэробные и аэробные	454000	3	7	1
после ОсВ	Не обнаружено	-	-	-	-
вход БМФ	Анаэробные и аэробные	6890000	4	7	2
Концентрат БОО	Анаэробные и аэробные	454000	3	6	1

На Казанской ТЭЦ-2 также существуют проблемы с биообрастанием. Основные узлы с активной биологической средой: вход БМФ и концентрат БОО. Причиной таких результатов может иметь химическая промывка, которая не обеспечивала полной отмывки мембранных модулей.

По результатам расчета рисков и количеству бактерий на оборудовании ВПУ КТЭЦ-1 и КТЭЦ-2 требуется незамедлительная обработка воды бактерицидными препаратами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Cullimore D.R. Preliminary comparison of the applicability of the HAV BART system and the agar spreadplate methods for the quantification of bacterial populations in selected dilutions of pure cultures of three bacterial species // J. Environmental Micropaleontology, Microbiology and Meiobenthology. 2008. V. 3. P. 31–43.
2. А.А. Гирфанов, А.Г. Филимонов, Т. Д. Шаммасова. Реализация мембранной технологии водоподготовки на Казанской ТЭЦ-2 // Энергетика Татарстана, 2012, № 3, с. 14-18.
3. Й. Тилеманн и др., Технология биоцидной обработки MOL®Clean современный метод борьбы с биообрастанием оборудования. //Мир Нефтепродуктов, 2011, № 2, с. 3-6.
4. ООО «Экохимприбор», Отчет опытно-промышленных испытания (ОПИ) технологией обработки воды aqua®LIK на установке обратного осмоса Казанской ТЭЦ-2. 2017 г.

Научный руководитель: к.т.н. С.М.Власов, доцент ИТЭ АТЭС КГЭУ.

## ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТЭЦ-7 ПРИ ИНТЕГРАЦИИ В ПЯМОТОЧНУЮ СИСТЕМУ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

И.И. Репин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
ВША и ТЭ, группа 3241301/10101

**Введение.** Производство электрической и тепловой энергии неизбежно сопровождается потерями в окружающую среду в особенности это касается теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с прямоточными системами технического водоснабжения, поэтому внедрение в производственный цикл энергосберегающих технологий является важной задачей на современных ТЭЦ.

**Актуальность.** Одной из таких технологий является применение теплоутилизационных установок, например, тепловых насосов (ТН). Однако при внедрении ТНУ требуется оценка их максимальной возможной мощности, а также оценка потенциала источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ). Предлагается оценить максимальную мощность ТНУ и потенциал ИНТ с учетом статистических данных о маргинальном доходе (МД) и особенностей режимов работы Василеостровской ТЭЦ-7.



**Цель исследования.** Определить максимальную мощность ТНУ и потенциал ИНТ на ТЭЦ-7.

Задачи исследования:

1. Рассчитать максимальные мощности ТНУ для разных режимов работы ТЭЦ за 2021-2022 гг.;
2. Определить потенциал ИНТ (охлаждающей воды после конденсаторов турбин и тех. воды. после масло- и газоохладителей);
3. Оценить полученные результаты.

**Расчет максимальной мощности ТНУ.** Для определения максимально-допустимой мощности ТНУ с учетом МД будет использовано уравнение 1, полученное в методике [1].

$$Q_{HP}^{max} = W_{e/e} * (1 - w_{TRP}^{on}) * (1 - b_{e/e} * (p_{nf}^{act} / C_{e/e}) * (29300 / Q_a^c)) * \mu, \text{ МВт} \quad (1)$$

где  $W_{e/e}$  – часовой объем выработки электроэнергии станции, МВт\*ч;  $w_{TRP}^{on}$  – относительная потребляемая мощность на собственные нужды станции в режиме без теплового насоса;  $b_{e/e}$  – удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, т.у.т./МВт\*ч;  $p_{nf}^{act}$  – цена природного топлива в руб/тыс. м<sup>3</sup>;  $C_{e/e}$  – стоимость электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ), руб/МВт\*ч;  $Q_a^c$  – фактическая теплота сгорания природного топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент преобразования теплоты.

Расчет произведен по фактическим данным работы ТЭЦ-7 за 2021-2022 гг. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета максимальной мощности ТНУ

Месяц	MIN				MAX			
	$\mu=3$	$\mu=4$	$\mu=5$	$\mu=6$	$\mu=3$	$\mu=4$	$\mu=5$	$\mu=6$
Январь	199	265	331	397	356	475	594	713
Февраль	186	247	309	371	341	455	569	682
Март	196	261	326	391	339	452	565	678
Апрель	224	299	374	449	319	425	532	638
Май	72	96	120	144	225	300	374	449
Июнь	34	46	57	69	90	120	150	180
Июль	56	74	93	111	95	127	158	190
Август	68	91	114	137	98	130	163	195
Сентябрь	108	143	179	215	196	261	326	392
Октябрь	215	287	359	431	313	418	522	626
Ноябрь	177	237	296	355	349	465	582	698
Декабрь	302	402	503	603	348	464	580	696

Из таблицы 1 видно, что для ТЭЦ-7 с точки зрения безубыточности работы на ОРЭМ возможно устанавливать ТНУ как в отопительно-зимний, так и летний период.

**Потенциал ИНТ.** Источником низкопотенциальной теплоты на ТЭЦ-7 является прямая система технического водоснабжения. Для оценки потенциала ИНТ были использованы данные по режимам работы станции, температуре и расходам охлаждающей воды на входе и выходе из конденсаторов турбин, а также данные с береговой насосной станции и паспортные данные газо- и маслоохладителей. Расчет потенциала произведен по формуле 2, результаты представлены в таблице 2.

$$Q_{инт} = (G_{цв} \cdot (t_{вых}^{цв} - t_{вх}^{цв}) + G_{мо+го} \cdot (t_{вых}^{мо+го} - t_{вх}^{мо+го})), \quad (2)$$

где  $G_{цв}$  – расход охлаждающей воды на турбины, т/ч;  $G_{мо+го}$  – расход охлаждающей воды на МО и ГО, т/ч;  $t_{вых}^{цв}$  – температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора турбины, °С;  $t_{вх}^{цв}$  – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор турбины, °С;  $t_{вых}^{мо+го}$  – температура охлаждающей воды на выходе из МО и ГО, °С;  $t_{вх}^{мо+го}$  – температура охлаждающей воды на входе в МО и ГО, °С.

Таблица 2. Потенциал ИНТ

Месяц	Q <sub>мин</sub> , МВт	Q <sub>макс</sub> , МВт
Январь	33,8	103,7
Февраль	36,4	110,7
Март	83,3	114,2
Апрель	32,9	101,9
Май	19,9	92,8
Июнь	14,7	35,3
Июль	12,8	53,4
Август	20,1	56,0
Сентябрь	21,0	83,4
Октябрь	43,8	81,0
Ноябрь	49,7	94,1
Декабрь	71,0	96,6

Полученные значения потенциала ИНТ позволяют установить тепловой насос мощностью до 130 МВт, отвечающий условиям безубыточной работы на ОРЭМ.

**Выводы.** Для ТЭЦ-7 были определены максимально возможные мощности ТНУ и потенциал ИНТ. В текущей ситуации данное тепло просто сбрасывается обратно в Неву, а потенциально эту энергию можно использовать в ТНУ для нагрева подпитки теплосети или сетевой воды.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Treshcheva M., Anikina I., Sergeev V., Skulkin S., Treshchev D. Selection of Heat Pump Capacity Used at Thermal Power Plants under Electricity Market Operating Conditions: Journal Energies 2021. Published 4th January 2021. – pages 3–6.

Научный руководитель: к.т.н. И.Д. Аникина, доцент СПбПУ.

## **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДУГИ В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА УСПЕШНОСТЬ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 0,4 кВ**

Н.Д. Зарецкий, А.Р. Ли  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
ВШВЭ, группа 3241302/10101

#### **Введение**

Исследование особенностей режимов работы сетей до 1 кВ играет важную роль в повышении надежного функционирования оборудования для обеспечения питания потребителей. Особенности физических процессов в сетях напряжением до 1 кВ должны в большей степени учитываться при моделировании и анализе переходных режимов. К основным переходным режимам относятся разные виды короткого замыкания (КЗ): однофазные, междуфазные, а также замыкания одной и более фазы на землю. Самыми распространенными электрическими сетями считаются сети 0,4 кВ, поскольку большинство крупных предприятий, заводов, систем обеспечения производства электроэнергии на электрических станциях и подстанциях работают на данном классе напряжения. В ходе работы будут рассмотрены особенности расчета КЗ в сетях 0,4 кВ.

### Постановка задачи

Анализ влияния аварийных режимов в сетях 0,4 кВ является важным аспектом при выборе коммутационной аппаратуры и токоведущих частей. В настоящее время, существуют основные нормативные документы, в которых приведены методики расчета токов КЗ [1, 2].

Особое внимание стоит обратить на проектирование защит сетей, так как условия отстройки защит для обеспечения дальнего резервирования не являются общими для всех схем питания. На условия обеспечения дальнего резервирования влияет схема соединения обмоток трансформатора. Для рассматриваемой схемы соединения обмоток – «треугольник – звезда с заземленной нейтралью» («Д/Ун») – значение однофазного КЗ не всегда является минимальным, как в случае схемы соединения «звезда – звезда с заземленной нейтралью» («У/Ун»).

При возникновении повреждений между токоведущими частями может образоваться электрическая дуга. В расчетах, зачастую, ее значение принимают постоянным [3]. Включение переходного сопротивления дуги в расчетную схему уменьшает значение тока КЗ и тем самым влияет на определение расчетного вида КЗ при выборе электротехнического оборудования и защиты аппаратов.

В работе произведены расчеты величин токов КЗ за питающим трансформатором при вариации его мощности, а также изменении сечения отходящей кабельной линии. По полученным данным будут даны рекомендации по выбору расчетного тока КЗ при проектировании защиты сети.

### Объект исследования

В статье рассмотрено состояние режима работы производится для типовой схемы, которая представлена на рисунке 1.

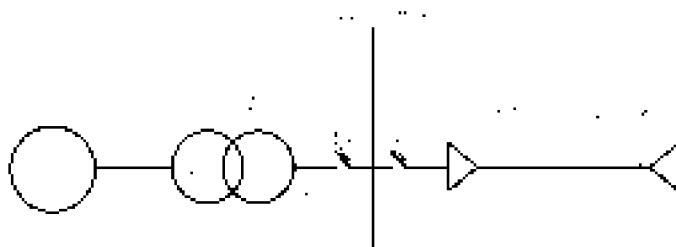


Рис. 1. Типовая расчетная схема

Схема, приведенная на рисунке 1, является эквивалентом радиальной схемы питания потребителей с оборудованием: эквивалентная энергосистема, питающий трансформатор с коэффициентом трансформации 6/0,4, отходящая кабельная линия (КЛ) с алюминиевыми жилами. Стоит отметить, что широкое применение находят именно алюминиевые проводники, ввиду низкой себестоимости, по сравнению с медными кабельными линиями.

Рассмотренные ниже методики расчета токов КЗ позволяют произвести анализ распределения токов КЗ для нормированных мощностей трансформатора от 160 до 1600 кВА [4] и длины отходящей линии с сечением от 4 мм<sup>2</sup> до 240 мм<sup>2</sup> [5] с учетом переходного сопротивления, возникающего в месте КЗ. Длина отходящей КЛ определялась по условию допустимости величины падения напряжения в линии [6].

### Методика учета переходного сопротивления дуги в месте КЗ в сетях 0,4 кВ

В настоящее время существует значительное количество трудов по определению влияния переходного сопротивления дуги на ток КЗ в сетях 0,4 кВ [3, 7, 8], тем не менее, в настоящий момент нет универсальной методики в решении данного вопроса. В процессе исследования были рассмотрены методики, изложенные в нормативных документах [1, 2].

Согласно рекомендациям [2] для учета электрической дуги в месте КЗ следует вводить активное сопротивление дуги  $R_d$  в рассматриваемую схему. Данное значение  $R_d$  можно определить по следующей формуле:

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{НН.ном}}^2}{3I_{\text{п0}}^2 K_c^2} - x_{1\Sigma}^2} - r_{1\Sigma}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{нном}}$  – величина среднего номинального напряжения сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;  $I_{\text{п0}}$  – значение периодической составляющей тока в месте металлического КЗ в начальный момент времени, кА;  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  – соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивления КЗ, мОм;  $K_c$  – среднестатистическое значение поправочного коэффициента, зависящего от сопротивления короткозамкнутой цепи  $Z_k$ .

Дальнейшие расчеты токов КЗ приведены с учетом дуги по методике [1].

Анализ расчета дуговых КЗ по ГОСТ 28249-93 также начинается с рекомендации ввести активное сопротивление ( $r_d$ ) в расчетную схему. В соответствии с [1] переходное сопротивление дугового КЗ зависит от действующего значения периодической составляющей тока в месте КЗ в начальный момент его возникновения ( $I_{\text{п0д}}$ , кА), а также от длины дуги ( $l_d$ , см) и определяется по следующему выражению:

$$r_d = 16 \frac{\sqrt{l_d}}{I_{\text{п0д}}^{0,85}} \quad (2)$$

В процессе определения активного сопротивления электрической дуги в месте аварии появляется сложность в нахождении длины дуги, которая зависит от расстояния между фазами проводников ( $a$ , мм). Такая проблема возникает при проектировании новых сетей, поскольку заведомо неизвестно сечение эксплуатируемого кабеля. В существующих энергорайонах такой проблемы не возникает, ввиду того, что кабель находится в эксплуатации и согласно паспорту объекта можно определить марку и параметры кабеля. При проектировании приближенное значение параметра « $a$ » следует принимать по [5], что обуславливает погрешность расчета. Длину дуги  $l_d$  рекомендуется определять по следующим выражениям:

$$l_d = 4a, \text{ при } a < 5 \text{ мм}, \quad (3)$$

$$l_d = 20,4 \ln \frac{a}{2} e^{-0,15r_{\Sigma} / x_{\Sigma}} \text{ при } a = (5 \dots 50) \text{ мм}, \quad (4)$$

$$l_d = a, \text{ при } a > 50 \text{ мм}. \quad (5)$$

### Анализ результатов исследований

Проводя анализ полученных результатов по учету переходного сопротивления в месте повреждения для расчетной схемы с алюминиевыми проводниками, можно сказать о том, что для оценки чувствительности дальнего резервирования защит сетей 0,4 кВ наибольший интерес представляет изучение распределения токов однофазного и двухфазного КЗ.

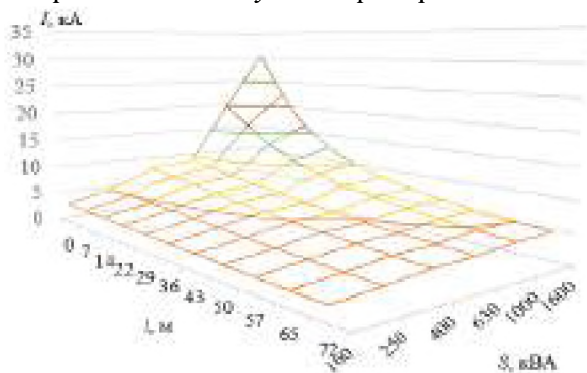


Рис. 2. Значения токов двухфазного короткого замыкания при вариации мощности трансформатора и удалении места возникновения аварии от источника питания на кабельной линии с алюминиевыми жилами сечением  $70 \text{ мм}^2$

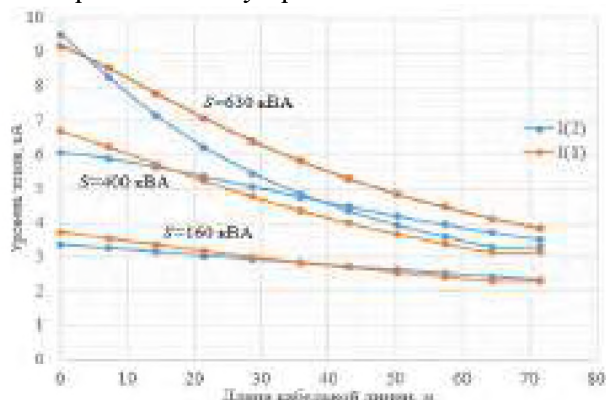


Рис. 3. Распределение уровней токов вдоль кабельной линии для различных мощностей трансформатора

На рисунке 2 представлены распределения уровня токов двухфазного КЗ в зависимости от места повреждения кабеля сечением  $70 \text{ мм}^2$  и мощности питающего трансформатора от

160 кВА до 1600 кВА. При вариации мощностей питающего трансформатора в сторону увеличения, получается, что соответствующая двухфазному току КЗ, в качестве расчетного, длина кабеля, для которого производится оценка чувствительности защитных аппаратов, становится меньше. При мощностях трансформатора от 1000 кВА и выше расчетным видом КЗ является однофазное КЗ на протяжении всей длины кабельной линии.

На рисунке 3 приведены распределения токов однофазного и двухфазного КЗ, где демонстрируется зона минимальных токов для каждой мощности трансформатора в диапазоне от 160 до 630 кВА. Именно этот диапазон мощностей представляет наибольший интерес, ввиду смены расчетного тока КЗ с минимального тока двухфазного КЗ на минимальный ток однофазного КЗ.

Полученные выше результаты расчета дугового КЗ по [1] для рассмотренного сечения алюминиевого кабеля 25 мм<sup>2</sup> и выше демонстрируют неоднозначность в выборе расчетного вида КЗ для выбора уставок автоматического выключателя. В таблице 1 пограничные значения для выбора минимального тока КЗ при изменении мощности питающего трансформатора для алюминиевых проводников.

Таблица 1. Длины кабелей, при которых минимальным током сопровождается однофазное КЗ

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>								
	25	35	50	70	95	120	150	185	240
	Расположение точки КЗ от начала кабеля, в которой $I^{(1)} > I^{(2)}$ , м								
160	-	70	65	60	70	140	120	135	110
250	65	50	50	35	55	105	100	110	90
400	45	35	30	30	35	70	70	80	60
630	30	20	20	20	20	50	50	55	35

### Выводы

В ходе работы и обработки результатов были замечены особенности выбора расчетных условий для дуговых КЗ:

1. Выбор защитных аппаратов по условию чувствительности для кабелей сечением 25 мм<sup>2</sup> и выше должен производиться с учетом расчетного вида КЗ, определяющего минимальный уровень тока.

2. Для алюминиевых проводников небольшого сечения (до 16 мм<sup>2</sup>) расчетным минимальным током КЗ для проверки защит будет всегда двухфазный.

3. Для алюминиевых кабелей сечением 25 мм<sup>2</sup> и выше расчетным видом КЗ для проверки защитных аппаратов по чувствительности дальнего резервирования заранее точно нельзя определить, какой ток – двухфазный или однофазный – выбрать в качестве минимального, что демонстрируют результаты расчета. По представленным выше рекомендациям по выбору расчетного тока с увеличением мощности трансформатора диапазон кабеля, при возникновении КЗ на котором производится оценка чувствительности по минимальному двухфазному аварийному току, уменьшается.

### ЛИТЕРАТУРА:

- ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электрических установках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Минск, 1993. – 66 с.
- РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
- Беляев, А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ: Учебное пособие / А.В. Беляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2012. – 270 с.
- ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 4 с.

5. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 40 с.
6. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Влияние расположения расчётной точки короткого замыкания на условия нагрева кабелей 0,4 кВ при реализации дальнего резервирования // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. №5. С 8-13.
7. М.А. Шиша, В.М. Александров, В.Н. Рычагов. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ // Новости Электротехники, 2011. – №6 (72). – С. 38-41.
8. Беляев А.В. Учет переходных сопротивлений при выборе защит и аппаратуры в сетях 0,4 кВ / А.В. Беляев, М.А. Шабад // Электрические станции. – 1981. – № 3. – С. 50-55.

Научный руководитель: к.т.н. Соловьёва С.Н., ст.преп. ВШВЭ СПбПУ; к.т.н. Лapidус А.А., доцент ВШВЭ СПбПУ.

## **ОТКЛЮЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА СТОРОНЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

А.В. Ахметшин

Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, РЗиА, группа АУСм-1-21

Рассмотрены причины и способы отключения понизительных трансформаторных подстанций без выключателей на стороне высшего напряжения.

**Ключевые слова:** релейная защита трансформаторов, понизительные подстанции, короткозамыкатели.

Система, состоящая из генератора и повышающего трансформатора, получила название блок генератор-трансформатор. Обеспечение надежной защиты данного элемента электрической сети является одной из наиболее важных задач, от которой зависит надежное и бесперебойное питание потребителей всех категорий.

В последнее время получили широкое распространение однотрансформаторные и двухтрансформаторные подстанции, выполненные по упрощенной схеме — без выключателей со стороны высшего напряжения [1]. Такой способ выполнения снижает денежные затраты, а также защита трансформаторов на таких подстанциях позволяет:

1) устранить воздействие сверхтоков при отключении повреждённых трансформаторов, что сокращает износ электрооборудования;

2) увеличить надёжность устройств релейной защиты из-за возможности применять полупроводниковые ключи, что предотвращает развитие аварий из-за отказов короткозамыкателей.

Целью данного исследования является раскрытие особенностей отключения трансформаторов без выключателя на стороне высокого напряжения.

Подстанции выполняются по упрощенным схемам присоединения к сети системы электроснабжения – по блочным схемам линия – трансформатор или отпайками от линий электропередач (рисунок 1).

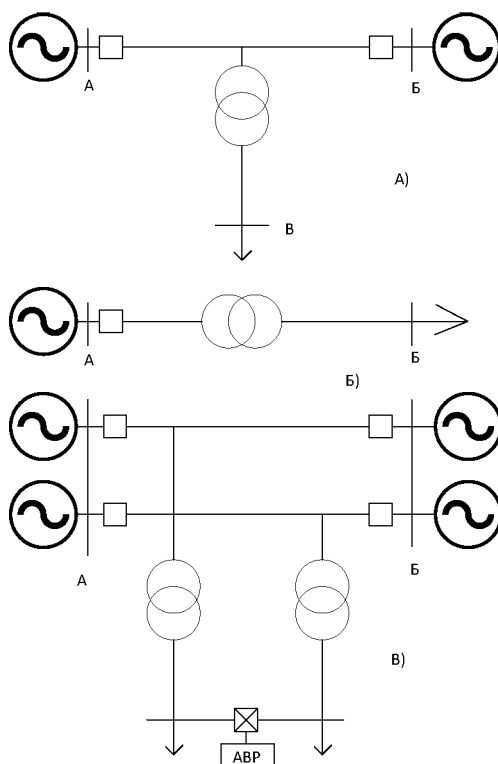


Рис. 1. Схемы подключения трансформатора без выключателя на стороне высокого напряжения: А) на ответвлении от одной линии, Б) по блочной схеме, В) на ответвлениях от 2 параллельных линий

В случае повреждений автоматическое отключение трансформаторов должно производиться выключателями на питающих концах линий следующими способами [2]:

- 1) посредством устройства, передающего отключающую команду от защиты трансформатора на выключатель линии по специальным каналам связи;
- 2) посредством короткозамыкателя: при повреждении в трансформаторе его защита срабатывает и подает ток в катушку включения короткозамыкателя, контакт которого замыкается и устраивает искусственное короткое замыкание, на которое реагируют защиты линии, отключающие и линию, и трансформатор.

Основной минус в способе с короткозамыкателем заключается в замедлении отключения поврежденного трансформатора, обусловленное временем действия короткозамыкателя и защиты линии, однако схемы с короткозамыкателем получили широкое распространение.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения – М.: Высшая Школа, 1991. – 496 с..
2. В.Н Вавин. Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор – М.: энергоиздат, 1982. – 256 с.
3. Правила устройства электроустановок: 7-ое издание. – 2017. – 500 с.
4. Красник В. В., Меламед А. М. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств. – М.: ЭНАС, 2016.

Научный руководитель: к.т.н. Ю.В. Писковацкий, доцент ИЭЭ РЗиА КГЭУ.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В СИСТЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИКАЛОВ В ПЛАМЕНИ

Д.С. Баршутина, В.В. Еремин, С.Н. Баршутин  
Тамбовский государственный технический университет  
ИЭПР, ЭПТ, БТЭ221

Эффективность сжигания топлива в системах получения электрической и тепловой энергии существенно зависят от скорости протекания химического процесса окисления топлива. Анализ физико-химических процессов в пламени показал, что скорость горения зависят от температуры в зоне реакции, типа используемого топлива, концентрации кислорода, а также от процессов образования радикалов.

Рассмотрим потребление электрической энергии, приведенной на 1 моль используемого топлива. Воспользуемся исходными данными ионизации пламени приведенной в источнике [1]. В статье приведены параметры эксперимента: сопротивление пламени  $R = 137$  Мом, опорное напряжение  $U = 0,05$ , диаметр электрода  $d = 0,5$  мм, расстояние между электродами  $l = 1$  мм, температура пламени  $T_{pl} = 1600$  К.

На первом этапе решения поставленной задачи необходимо определить концентрацию носителей электрического заряда. Так как подвижность электронов имеет значение на несколько порядков выше чем подвижность ионов в пламени, то вклад в формирование тока будем считать осуществляют только электроны.

Воспользуемся формулой, связывающей ток и количество электронов пройденное через исследуемую систему площадью  $S$  за 1 секунду:

$$n = \frac{I}{e \cdot S \cdot v_e}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация электронов  $\text{м}^{-3}$ ,  $v_e$  – скорость электронов.

Скорость движения электронов можно определить по температуре и разности потенциалов между электродами:

$$v_e = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_e}}, \quad (2)$$

где  $m_e$  – масса электрона.

При движении электрона в электрическом поле его скорость можно определить, объединив известные из курса физики [2] уравнения:

$$F = E \cdot e, \quad (3)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля.

$$F = m_e \cdot a, \quad (4)$$

$$a = \frac{v_e}{t}, \quad (5)$$

где  $t$  – время прохождения электрона между электродами,  $v_e$  – скорость электрона, приобретенная при преодолении разности потенциалов между двумя электродами

$$t = \frac{l}{v_e}. \quad (6)$$

Объединив уравнения (3) – (6) получим:

$$m \cdot \frac{v_e^2}{l} = E \cdot e. \quad (7)$$

В итоге скорость электрона выделяем из (7):



$$v_e = \sqrt{\frac{E \cdot e \cdot l}{m_e}} = \sqrt{\frac{U \cdot e}{m_e}}, \quad (8)$$

где  $U$  – напряжение между электродами (опорное напряжение измерительного устройства).

Так как под действием электрического поля электрон осуществляет направленное движение, а в тепловом движении осуществляется разнонаправленное движение, то при определении средней скорости электронной будем осуществлять по следующим зависимостям

$$\begin{cases} v_{cp\_e} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_e}}, \text{ при } E_e \leq \frac{3 \cdot k \cdot T}{2} \\ v_{cp\_e} = \sqrt{\frac{U \cdot e}{m_e}}, \text{ при } E_e > \frac{3 \cdot k \cdot T}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

где  $E_e$  – энергия электрона, приобретенная вследствие передвижения в электрическом поле в процессе измерения сопротивления:

$$E_e = \frac{U}{l} \cdot \lambda_{cp\_e}, \quad (10)$$

где  $\lambda_{cp\_e}$  – средняя длина свободного пробега электрона.

Далее найдем работу электрического поля на ускорение ионов в пламени. Так как, по заряду пламя имеет равновесное состояние, то концентрация ионов в пламени равна концентрации электронов. Кроме уравнения (3) для определения работы электрического поля на перемещение одного иона или электрона необходимо применить следующую формулу:

$$A_e = F_e \cdot l_e, \quad (11)$$

где  $F_e$  – сила действия электрического поля на электрон,  $l_e$  – длина пути, пройденная электроном до столкновения равная средней длине свободного пробега электрона [3]  $l_e = \lambda_{cp\_e}$ .

Для определения полной работы формулу (11) преобразуем:

$$A = 2 \cdot F_e \cdot \lambda_{cp\_e} \cdot n, \quad (12)$$

Объединив уравнения (1), (9) - (12) получаем:

$$\begin{cases} A = \frac{2 \cdot E_p \cdot \lambda_{cp\_e} \cdot U}{R \cdot S \cdot \eta \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_e}}}, \text{ при } E_e \leq \frac{3 \cdot k \cdot T}{2} \\ A = \frac{2 \cdot E_p \cdot \lambda_{cp\_e} \cdot U}{R \cdot S \cdot \eta \cdot \sqrt{\frac{U \cdot e}{m_e}}}, \text{ при } E_e > \frac{3 \cdot k \cdot T}{2} \end{cases}, \quad (13)$$

где  $\eta$  – параметр эффективности формирования радикалов,  $E_p$  – напряженность электрического поля формируемое для образования радикалов в пламени.

Полученная работа показывает какую энергию необходимо потратить электрическому полю, чтобы осуществить формирование радикалов в пламени объемом равным  $1 \text{ м}^3$ .

Рассмотрим затраты энергии электрического поля на примере данных, опубликованных в [1].

На первом этапе определим значение  $E_e = 8 \cdot 10^{-5}$  эВ тогда как средняя энергия электронов при температуре 1600 К равна 0,138 эВ. Соответственно для определения работы электрического поля воспользуемся верхней частью системы (13). Тогда  $A = 1,22 \cdot 10^{-13}$  Дж. Таким образом энергия, которую тратит электрическое поле на повышение радикалов несоизмеримо меньше, чем получаемая от сжигания топлива энергия. Соответственно повышение количества радикалов в пламени и в связи с этим увеличение скорости горения позволит повысить эффективность получения энергии от сжигания традиционного углеводородного топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курепина Д.С., Баршутин С.Н. Определение степени ионизации пламени по величине ее проводимости//Энергетическая безопасность сборник научных статей III Международного конгресса: в 2 т. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – Т.1. – С. 426-428.
2. Орир Дж. Физика: учебник/ Джей Орир; пер. с англ. и научная редакция Ю.Г. Рудого и А.В. Беркова. М.: КДУ, 2010. – 752 с.
3. Еремин В.В., Баршутин С.Н. Физико-математическая модель процесса ионизации пламени в импульсном электрическом поле // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2021. – С. 102- 104.

Научный руководитель: к.т.н. С.Н. Баршутин, доцент ЭПТ ИЭПР ТГТУ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТЭС

А.Б. Ларин, Е.Г. Ухалова, М.П.Савинов

Ивановский государственный энергетический университет

Во всех случаях работы качество пара, производимого котельными агрегатами, жестко нормируется и должно быть обеспечено при любом качестве добавочной воды и составе оборудования тепловой схемы котельной установки. В условиях совершенствования приборной базы химического контроля качества воды и пара и оптимизации условий эксплуатации теплоэнергетических установок возрастает потребность и появляется возможность создания измерительных систем, обеспечивающих контроль основных нормируемых и диагностических показателей качества пара расчетным способом на базе измерений удельной электропроводности и рН охлажденных проб, т. е. конденсата острого пара котлов. Такие расчеты могут быть реализованы в виде алгоритмов и программ для анализаторов примесей конденсата и питательной воды типа анализатора «Лидер-АПК» («НПП Техноприбор») г. Москва для котлов с давлением более 10 МПа при подпитке глубоко обессоленной водой. В отличие от названных, в паровых котлах с давлением пара 9,8 МПа и 3,9 МПа и промышленных котлах-утилизаторах пар в большей мере загрязнен солями (в расчете на NaCl) и углекислотой (в форме, выносимой CO<sub>2</sub>), а также содержит аммиак, практически полностью выносимый в пар из котловой воды. Для оценки качества пара здесь нередко пользуются двухкватратной номограммой Мостофина [1], представленной на рисунке 1.

По значениям удельной электропроводности ( $\chi^{25}$ , мкСм/см) и рН<sup>25</sup> охлажденной пробы конденсата пара можно определить концентрацию аммиака (мкг/дм<sup>3</sup>) и углекислоты (мкг/дм<sup>3</sup>, суммарно: свободной и связанной). Номограмма Мостофина дает зрительный образ зависимости  $\chi^{25}$  и рН<sup>25</sup> от соотношения концентрации NH<sub>3</sub> и CO<sub>2</sub> в конденсате пара, но расчет концентраций NH<sub>3</sub> и CO<sub>2</sub> по измеренным значениям  $\chi^{25}$  и рН<sup>25</sup> вблизи нейтральных значений рН может дать значительную ошибку, тем большую, чем больше солевая составляющая измеренной электропроводности, не учитываемая номограммой. При норме содержания натрия в паре технологических котлов-утилизаторов до 160 мкг/дм<sup>3</sup> и рН=6÷9, использование номограммы Мостофина становится неприемлемым. При отсутствии анализаторов натрия или некачественной подготовки пробы основным способом автоматического химического контроля качества пара остается измерение удельной электропроводности ( $\chi_{н}$ ) и рН.

В данной работе представлены результаты использования алгоритма расчетного определения концентраций названных примесей для охлажденных проб острого пара энергетических котлов с давлением как менее 10 МПа, так и для котлов СВД и СКД, а также промышленных котлов утилизаторов, включая блоки ПГУ.

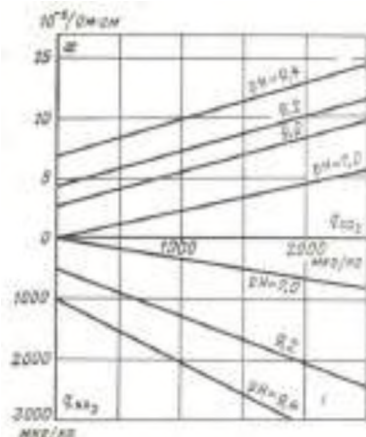


Рис. 1. Удельная электропроводность и значения pH водных растворов  $NH_3 + CO_2$  при 298 K [5]

Увеличение объема автоматического химического контроля согласно дает основание для привлечения искусственного интеллекта с целью расчетного определения отдельно концентрации солевых примесей и углекислоты без дополнительных затрат на специальные устройства. При участии авторов была разработана методика, алгоритм и программа расчета показателей качества пара энергетических котлов [2] блок-схема которой показана на рисунке 2.

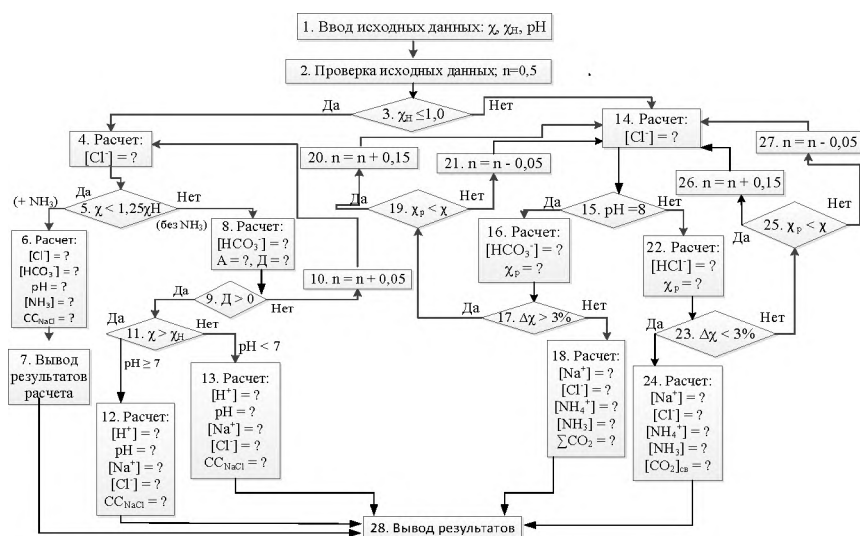


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета показателей качества пара энергетических котлов по измерениям удельной электропроводности прямой ( $\chi$ ), Н-катионированной ( $\chi_n$ ) пробы и pH

При этом, для пара высокой чистоты с удельной электропроводностью Н-катионированной пробы ( $\chi_n$ ) не более  $0,5 \div 1,0$  мкСм/см и значениях pH выше 8,0 достаточно измерений  $\chi$  и  $\chi_n$  с расчетом pH, солесодержания и концентраций катионов в расчете на  $[Na^+]^{усл}$ , концентраций анионов сильных кислот в расчете на  $[Cl]^{усл}$ . Для пара с повышенным солесодержанием и концентрацией углекислоты при  $\chi_n > 1,0$  мкСм/см в диапазоне pH от 6,0 до 9,5 необходимы измерения  $\chi$ ,  $\chi_n$  и pH охлажденной до  $25 \pm 10^\circ C$  пробы пара с расчетом солесодержания, концентраций натрия, углекислоты. Во всех случаях рассчитывается концентрация аммиака, или другого щелочного агента, в пересчете на аммиак.

Апробация способа для питательной воды и пара энергетических котлов и котлов-утилизаторов ПГУ представлена в таблице 1.

Сравнение результатов расчетов (таблица 1) показывает, что при близких (не сильно отличающихся) значениях концентраций аммиака в паре котла Е-420-140-565 ( $P_6 = 13,8$  МПа) Петрозаводской ТЭЦ и технологического котла-утилизатора Г-420 БПЭ ( $P_6 = 3,9$  МПа) «Фосагро», значение содержания различается в 25 раз ( $13,5$  мкг/дм<sup>3</sup> и  $350,1$  мкг/дм<sup>3</sup>). Суммарная концентрация форм углекислоты в примере 1 не превышает  $10$  мкг/дм<sup>3</sup>, тогда как в примере 2 составляет  $2,14$  мкг/дм<sup>3</sup>, т. е. превышает более, чем в 200 раз.

Сравнение рассчитанного значения рН с измеренным аналогом отличается на  $0,03$  ед. рН, что укладывается в паспортную погрешность рН-метра, равную  $\pm 0,05$  ед. рН и вполне приемлемо. Расчетное значение концентрации аммиака отличается от измеренного значения на  $4\%$ , что также приемлемо для условий оперативного химконтроля.

Таблица 1. Результаты измерений и расчета нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя

Место контроля	Измеренные данные				Расчетные данные				
	%, мкСм/см	%, мкСм/см	рН	$[NH_3]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	рН	$[Cl^-]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$[HCO_3^-]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$[NH_3]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$[CO_2]$ , мкг/дм <sup>3</sup>
<i>Питательная вода</i>									
Петрозаводская ТЭЦ, барабанный котел ( $P_6=13,8$ МПа)	4,6	0,225	9,2	587	9,22	0,27	0,59	567	-
Северо-западная ТЭЦ, ПГУ-450	8,04	0,19	9,47	1400	9,47	0,23	0,46	1330	-
<i>Перегретый пар блока ПГУ высокого давления (ППВД)</i>									
Прегольская ТЭС, ПГУ-60	2,80	0,86	8,83	-	8,87	37,0	348	337	252
Уренгойская ГРЭС, ПГУ-450	4,48	0,41	9,29	-	9,21	31,6	17,1	545	12,0
<i>Насыщенный пар котла Е-220-3,9-440 ДКГ</i>									
АО «Фосагро» (г. Череповец)	2,82	2,34	6,2	330	6,2	195	1244	346	2154

Данные таблицы 1 показывают возможность косвенного измерения ряда важных показателей качества водного теплоносителя в режиме оперативного химического контроля. Это позволяет обнаружить и своевременно устранить возникшие нарушения водно-химического режима.

В настоящее время ведется согласование условий на разработку автоматического анализатора качества пара энергетических котлов с ООО «НПП Техноприбор» (г. Москва), реализующего на базе измерений электропроводности и рН (рисунок 3) и искусственного интеллекта программу расчетного определения его основных показателей.

### Заключение

Таким образом, реализация искусственного интеллекта посредством программного продукта, обеспечивающего алгоритм расчетного определения ряда основных нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя, позволяет оперативно оценивать состояние и причины нарушения водно-химического режима паровых котлов, разделяя влияние отдельных факторов, и принимать правильные решения по устранению нарушений.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Мостофин А. А. Расчет значений рН и удельной электропроводности водных растворов  $NH_3$  и  $CO_2$  // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. Вып. 2. - М. - Л.: Энергия, 1966, С. 178-187.
2. Ларин А. Б. Доклад во II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, г. Ульяновск, 2022 // Разработка математических моделей растворов электролитов с реализацией в технологии химического контроля на ТЭС. Авторы: А. Б. Ларин, С. В. Киет, Е. Г. Ухалова, К. В. Зотова.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-08-00432.

Научный руководитель: д.т.н. А. Б. Ларин, профессор кафедры ХХТЭ ИГЭУ.

# ДИАГНОСТИКА ВОЗМОЖНЫХ НАРУШЕНИЙ ВХР ПАРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ

Б.М. Ларин, С.В. Киет, К.В. Зотова  
Ивановский государственный энергетический университет

Водный режим (ВХР) призван обеспечивать эксплуатацию теплоэнергетического оборудования без отложений (накипи) и коррозии. Нарушения ВХР могут привести (и приводят) к аварийным ситуациям разной степени глубины. Наиболее опасными являются образования свищей, и пережег экранных труб котла вследствие язвенной коррозии и отложений, снижение эффективности работы потребителей пара – паровых турбин и теплообменников, значительные присосы охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин. Нормативные документы, принятые на энергетических предприятиях, регламентируют качество питательной, котловой воды и пара энергетических котлов и предусматривают время ликвидации нарушений ВХР, включая аварийные случаи остановов котлоагрегата или другого теплообменного оборудования. Скорость нарастания нарушения ВХР, следовательно, развития аварийной ситуации, на паровом котле, в ряде случаев может быть достаточно высокой.

На рисунке 1 приведена тепловая схема энергетической системы на примере блока ТЭЦ с барабанным котлом СВД. Опытно-промышленные испытания состояния водно-химического режима проводились в режиме суточного изменения нагрузки со сбросом мощности со 110 МВт до 70 МВт.

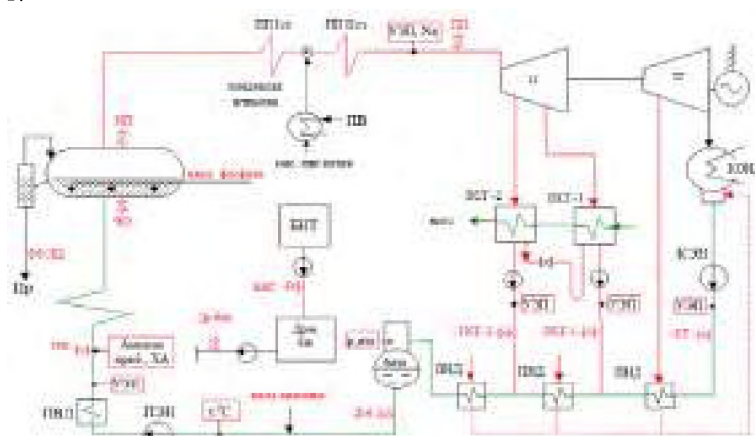


Рис. 1. Тепловая схема энергоблока ТЭЦ (котел ТМБЕ-464, паровая турбина Т-100/120-130)

Было установлено, что принятое изменение нагрузки ведет к резким изменениям ряда параметров теплоносителя по тракту энергоблока. Для оценки характера изменения измеряемых параметров водно-химического режима был проведен аналитический и приборный (автоматический) химический контроль (АХК) проб водного теплоносителя по потокам: конденсат паровой турбины, питательная и котловая вода, пар в течение 2-х суток.

Отбор проб производился через каждые 2 часа в основных потоках, включая добавочную воду.

В процессе мониторинга были обнаружены существенные изменения таких контролируемых параметров ВХР, как удельная электрическая проводимость (УЭП), рН, концентрация натрия, солесодержание и др.

Причиной нарушений ВХР были нарушения в работе испарительной установки (МИУ), в результате чего в дистиллят и далее в деаэрактор энергоблока был заброс концентрата МИУ. Так, электропроводность дистиллята МИУ во вторые сутки наблюдений возросла с 2,5 мкСм/см до 34 мкСм/см, содержание SiO<sub>2</sub> возросло с 20 мкг/кг до 1800 мкг/кг. При нормативном качестве конденсата паровой турбины и сетевых подогревателей (электропроводность

4÷5 мкСм/см), УЭП питательной воды возросла с 3,6 до 56,3 мкСм/см, а котловой воды: с 6,0 до 257,4 мкСм/см (чистый отсек) и с 90 до 910 мкСм/см (солевой отсек).

Таким образом, исследование показало, что автоматический химконтроль основных потоков водного теплоносителя необходим для контроля и диагностики состояния ВХР особенно в переменных режимах эксплуатации энергетического оборудования.

На рисунке 1 показан объем химического анализа (ХА) и (АХК), отвечающий требованиям нормативных документов. При этом следует отметить необходимость измерений УЭП прямой и Н-катионированной пробы ( $\chi$ ,  $\chi_H$ ) и показателя рН, практически, во всех основных потоках. На основе этих измерений может быть предложена система химико-технологического мониторинга (СХТМ), обеспечивающая высокую надежность контроля ВХР при сокращении объема ручного оперативного химконтроля (ХА). Такая СХТМ разработана в ИГЭУ с участием авторов и опробирована на Ивановской ТЭЦ-3.

Измерение УЭП давно используется для оценки состояния ВХР паровых котлов, однако, удельная электропроводность является интегральным показателем ионных примесей проб теплоносителя и не дает ответа об источнике поступления в тракт самой примеси. Так, известны попытки использования измерения электропроводности котловой воды для расчетного определения концентрации фосфатов.

Например, в публикации МЭИ предлагается следующее уравнение:

$$\chi_{\text{co}} = 9,501 \cdot \left( C_{\text{PO}_4^{3-}} \right)^{0,806} - 4,881, \quad (1)$$

где  $\chi_{\text{co}}$  – удельная электропроводность воды солевого отсека котла при 25 °С;  $C_{\text{PO}_4^{3-}}$  – концентрация фосфатов.

Применение такого уравнения для приведенного выше примера нарушения ВХР на ТЭЦ покажет заброс фосфатов в котловую воду и вызовет неверные действия оперативного персонала. Руководителем данной работы при активном участии соавторов, представлен новый метод, основанный на разработке и решении математической модели (ММ) поведения ионогенных примесей водного теплоносителя и позволяющей использовать искусственный интеллект в поиске причины нарушения ВХР. Согласно литературе [1], уравнение расчета концентрации фосфатов в воде солевого отсека барабанного котла СВД (Рб=13,8 МПа) предлагается в следующем виде:

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = 0,246 \cdot \chi_{\text{H,CO}} - 1,62 \cdot \chi_{\text{H,ПВ}}, \text{ мг/дм}^3.$$

Такое выражение позволяет отделить фактическую концентрацию фосфатов от солесодержания котловой воды. В этом случае нарушения ВХР на ТЭЦ в приведенном примере надежно определяется источник примесей – заброс солей с добавочной водой – дистиллятом испарителя.

Таким образом, использование искусственного интеллекта в данном случае основано на численном расчете отдельных компонентов примесей котловой воды, что позволяет оперативному персоналу принять правильное решение об источнике нарушения ВХР и избежать «ложных срабатываний». На основании проведенного исследования разработан анализатор примесей питательной воды и пара, защищенный патентом на изобретение РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ларин Б.М. Научные исследования в технологии воды на ТЭС и АЭС: Учеб. пособие / Ларин Б.М., Ларин. А.Б., ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 76 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-08-00432.

Научный руководитель: д.т.н. Б.М. Ларин, профессор кафедры ХХТЭ ИГЭУ.

# АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ИЛИ АБСОЛЮТНОЙ ОСТАНОВКИ ПОДАЧИ ФИЛАМЕНТА ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.М. Мугинов

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, ЭО-1-21

Сегодня аддитивные технологии необходимы для производства высокоточных изделий в самых разных отраслях промышленности: авиастроение, машиностроение, медицина, ВПК. К тому же аддитивное производство упрощает разработку новых устройств, благодаря прототипированию. Прототипирование – один из важнейших этапов производства. Именно на этой промежуточной стадии исследователь, инженер или дизайнер может максимально оценить геометрию, эргономичность и целостность своей разработки, прежде чем затратить значимые ресурсы на ее производство [1].

Аддитивное производство не исключает ошибок. Существует много факторов, которые могут негативно повлиять на производимую деталь. В данной работе будет рассмотрено временная остановка подачи филамента при 3Д печати принтером Creality Ender-3 Pro.

Есть несколько возможных причин по которой может возникнуть временная или абсолютная остановка подачи филамента:

1. Затруднена ротация катушка филамента;
2. Неисправность зажимного механизма;
3. Засорение сопла экструдера;
4. Обрыв нити филамента;
5. Подобрана неподходящая температура плавления филамента.



Рис. 1. 3Д принтер Creality Ender-3 Pro



Рис. 2. Питатель со сломанным рычагом прижимного механизма

При затруднённой ротации катушки экструдера рекомендуется обратить внимание на приспособление, используемое для фиксации катушки филамента. Возможно, филамент или катушка филамента зацепились за составляющие принтера или за иные внешние предметы.

При неисправности зажимного механизма необходимо обратить внимание на питатель принтера. Возможна поломка рычага прижимного механизма, в таком случае необходима замена рычага. К тому же возможно затруднено движение ротационных элементов подачи филамента, в таком случае следует их заменить.

При засорении сопла экструдера необходима его очистка от сора. Возможна очистка специальной иглой, подходящей под толщину сопла экструдера. Перед очистки необходимо отключить 3Д принтер от питания, затем стоит очистить головку экструдера от остатков приклеившегося филамента. Далее необходимо медленно высверлить отверстие в головке экструдера, прочищая сам засор. Бывают случаи, когда механическая чистка не устраняет проблему. Внутри сопла все еще остается налеты или наплывы пластика. Подобная ситуация часто встречается при работе с пластиком ABS. Чтобы произвести полную очистку сопла, необходимо поместить его в агрессивную среду, например, в ацетон или дихлорэтан. После отключения устройства и остывания экструдера необходимо открутить сопло и поместить его в ёмкость с

ацетоном или дихлорэтаном на 2–3 часа, затем необходимо вынуть из ёмкости сопло и прочистить его иглой. Прочистка филаментом – это один из самых безопасных способов, который не предполагает вмешательства в конструкцию экструдера или частичного разбора данного узла. Для прочистки сопла используют два типа пластика: филамент с большей температурой плавления. В принтер ставят бобину с тугоплавким пластиком. Он буквально выталкивает пробку из экструдера [2].

Возможен обрыв нити филамента как в открытой части, так и в закрытой (в трубке фитинга). Для обнаружения или исключения обрыва филамента необходимо отсоединить нить филамента от печки. При обнаружении обрыва нити филамента, необходимо установить возможные причины обрыва. Чаще всего причиной обрыва филамента становится брак филамента или не предусмотренное механическое воздействие на нить филамента. После устранения не предусмотренного механического воздействия филамента необходимо заново подключить нить филамента во входной фитинг.

К тому же филамент может не подаваться по причине того, что температура нагрева печки экструдера была подобрана неверно. Для 3Д печати на рассматриваемом 3Д принтере использовался пластик PLA, для которого оптимальной температура нагрева филамента 200–210 °С. Оптимальная температура нагрева филамента чаще всего указывается производителем на упаковке филамента.

В итоге анализа временной или абсолютной остановки подачи филамента были найдены возможные причины остановки, а также были представлены возможные пути устранения рассматриваемой ошибки при аддитивном производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Технологии 3D-прототипирования: предназначение и разновидности URL: <https://3d-expo.ru/article/tehnologii-3d-prototipirovaniya-prednaznachenie-i-raznovidnosti-76133> (дата обращения 21.10.2022).
2. Три способа прочистки сопла экструдера URL: <https://vektorus.ru/blog/kak-chistit-soplo-3d-printera.html#vruchnuyu> (дата обращения 21.10.2022).

Научный руководитель: к.т.н. В.А. Рукавишников, доцент кафедры ИГ ИЦТЭ КГЭУ.

## ИНТЕГРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Д.Р. Гатина

Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, РЗА, группа АУСм-1-22

Изменения скорости и изменения направления ветра напрямую влияют на производство электроэнергии: происходит увеличение или уменьшение мощности, вырабатываемой ветряными электростанциями (ВЭС). Для того чтобы иметь возможность управлять балансом между производством и потреблением электроэнергии необходимо предвидеть эти изменения. Современные средства прогнозирования оценивают выработку электроэнергии путем составления климатических данных (средняя скорость ветра за определенный период времени) и технических данных ветроустановок. Благодаря им, можно оценить производимую ветряными установками электроэнергию в широком интервале времени: от 5 минут до 72 часов до момента транспортировки этой электроэнергии. Стоит отметить, что чем больше продолжительность между моментом прогнозирования и моментом, когда эта электроэнергия дойдет до по-



требителя, тем более ненадежны прогнозы. Когда оценка осуществляется за 24 часа до транспортировки, погрешность составляет около 10 %, а если прогноз реализуется за 4 часа до транспортировки, то средняя погрешность составляет около 4 % произведенной энергии.

Внедрение энергии ветра в традиционные энергетические системы будет способствовать сокращению выбросов при производстве электроэнергии. Однако необходимо оценить возможные негативные последствия, чтобы убедиться, что они не превзойдут положительные последствия от этого внедрения [1]. Непредсказуемость скорости и направления ветра вызывают целый спектр проблем и дополнительных ограничений для работы электросети:

1. Если доля электроэнергии, вырабатываемой ветряными установками, невелика, а производство ветроэнергии хорошо рассредоточено по большой территории и согласуется с нагрузкой, то ветроэнергию легче интегрировать в систему [2]. По мере увеличения мощности, производимой ветроустановками, необходимо принимать меры для обеспечения того, чтобы изменения скорости и направления ветра не снижали надежность электрической системы.

2. Ограниченная пропускная способность линий электропередачи может представлять острую проблему в случае с ветроэнергетикой. Чтобы избежать перегрузки линий электропередачи, необходимо строить новые линии. Следует отметить, что срок строительства новой линии около 10 лет.

3. Изменчивость ветра может вызвать следующие проблемы с качеством электроэнергии: постоянные колебания напряжения, колебания частоты и низкий коэффициент мощности. Низкое качество электроэнергии может привести к тому, что оборудование конечного пользователя будет работать неэффективно.

4. Как уже говорилось, скорость ветра нельзя предсказать с высокой точностью. Следовательно, изменения мощности ветряных электростанций будут компенсироваться за счет обычных электростанций, так как в любом случае необходимо поддерживать баланс системы. Это приведет к отклонению традиционных электростанций от рабочих точек, выбранных для минимизации затрат, и повлечет за собой увеличение эксплуатационных расходов всей системы. В последнее время было проведено несколько исследований влияния энергии ветра на эксплуатационные расходы электроэнергетической системы. В этих исследованиях рассматривались системы с различным сочетанием генерирующих устройств и использовались разные аналитические подходы [2]. Вывод этих исследований состоял в том, что увеличение эксплуатационных расходов незначительно при низких уровнях интеграции энергии ветра и умеренно при более высоких уровнях интеграции.

В связи с перечисленными проблемами представляются подходы для управления ветроэнергией.

#### *1. Управление ветрогенерацией путем подключения ветряных электростанций к сети электропередачи*

Для правильной работы и стабильного производства электроэнергии большинству ветроустановок требуется мощная сеть, которая определяет частоту и напряжение. Кроме того, эта сеть также должна иметь возможность непрерывно поглощать мощность, вырабатываемую ветряными турбинами.

Для управления ветрогенерации путем подключения ветряных электростанций к сети электропередачи располагают большое количество ветряных установок на нескольких площадках. Выходную мощность регулируют, изменяя шаг лопастей. Если в период сильного ветра в сеть поступает избыточная электрическая мощность, способная влиять частоту, можно ограничить мощность, вырабатываемую ветряными турбинами, за счет воздействия на угол наклона лопасти [3].

С развитием ветрогенерации требуются дополнительные производственные резервы, чтобы удавалось сохранять баланс между производством и потреблением электроэнергии и поддерживать частоту сети в рамках очень строгих стандартов. Последние исследования показали, что резервная мощность, необходимая для интеграции ветроэнергии, ниже, чем первоначально предполагалось. В худшем случае резервная мощность может достигать 10 % от номинальной мощности ветряных электростанций, а большую часть времени она составляет от

3 % до 5 % этой мощности. Для большей универсальности и эффективности системы она должна запасать энергию в периоды высокой скорости ветра и восстанавливать ее при отсутствии ветра [4].

### *2. Управление ветрогенерацией путем подключения ветряных электростанций к накопителям энергии*

Идея накопления энергии заключается в передаче избытка ветроэнергии, вырабатываемой в периоды слабой нагрузки или в периоды высокой скорости ветра, в пиковые периоды или в периоды низкой скорости ветра. Первоначально электричество должно быть преобразовано в другую форму хранимой энергии (химическую, механическую и др.) и преобразовано обратно, когда появится необходимость.

Системы накопления энергии призваны обеспечивать баланс между производством и потреблением электроэнергии [5]. Они позволят избежать дисбаланса мощности в случае переизводства, а также повысить надежность сети. Кроме того, системы накопления энергии упрощают интеграцию ветряных турбин в энергетическую систему и улучшают качество передаваемой электроэнергии за счет лучшего контроля частоты и напряжения.

### *3. Управление ветрогенерацией путем гибридизации энергии ветра и другого источника*

Как правило, гибридная система производства энергии сочетает в себе несколько источников энергии. Сочетание нескольких источников энергии, особенно возобновляемых, улучшает эффективность систем производства электроэнергии, как с технической, так и с экономической точки зрения. Гибридные системы предназначены для снижения зависимости производства энергии от ископаемого топлива за счет использования ресурсов солнца и ветра. Однако на данный момент эти системы очень сложны по сравнению с традиционными системами, состоящими из одного источника, и требуют предварительной кропотливой проектной работы.

Может существовать несколько комбинаций гибридных систем, например, ветро-фотоэлектрическая или ветро-дизельная. Эти системы обеспечивают экономию топлива в пределах 50–80% в зависимости от ресурса ветра.

Отметим, что развитию ветроэнергетики значительно поспособствует более точное прогнозирование ветроэнергетического потенциала в промежутке времени от нескольких часов до нескольких дней. В настоящее время ведутся работы в этой области, и появляются некоторые новые методы и технологии в этой сфере. Остается интегрировать эти методы в повседневную работу энергосистем.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Holttinen, H. Estimating the impacts of wind power on power systems – summary of IEA Wind collaboration. IOP Publishing, 2008, no.3, p.6.
2. Pavlos S., Georgilakis M. Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, no.12, p. 852–863.
3. Saenz J.R., Tapia A., Tapia G., Ostolaza X., Albizu I. Reactive power regulation in Wind Farms : Control Strategies. EPE, 2001, p.6.
4. Barton J.P., Infield D.G. Energy Storage and its Use with Intermittent Renewable Energy. // IEEE Transactions on Energy Conversion, V.19, I. 2, p. 441-448.
5. Ibrahim H., Ilinca A., Younes R., Perron J, Basbous T. Study of a Hybrid Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage. Montreal, 2007, p.21.

Научный руководитель: к.т.н. Ю.В. Писковацкий, доцент РЗА ИЭЭ КГЭУ.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОТ СЖИГАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Д.С. Баршутина, С.Н. Баршутин  
Тамбовский государственный технический университет  
ИЭПР, ЭПТ, БТЭ221

Повышение эффективности получения энергии от сжигания традиционного топлива остается актуальной задачей при разработке систем генерации тепловой и электрической энергии. Традиционно для повышения КПД энергетических систем стремятся максимально приблизить к оптимальному соотношению окислительной среды и топлива в камере сгорания, а также применение конструктивных решений для активного смешивания исходных компонентов. В результате в камере сгорания образуется турбулентный поток, скорость которого ограничивается скоростью реакции окисления топлива. При повышении скоростных характеристик потока доля несгоревшего топлива будет увеличиваться, что приведет к уменьшению эффективности рассматриваемых систем, а также повышению вредных веществ в атмосферу. Таким образом, повышение скорости реакции позволяет решить основную задачу повышения эффективности процессов горения в энергетических системах.

Процесс горения газообразных и жидких топлив состоит из различных этапов. Например, горение наиболее распространенного и простого углеводорода метана может состоять из ряда последовательных и параллельных этапов. На начальном этапе возбужденные молекулы  $M^*$ , воздействуя на молекулы метана и пары воды в зоне реакции, разделяет обе молекулы на соответствующие радикалы:



Далее, образовавшиеся радикалы, взаимодействуют с кислородом и молекулами метана по схемам:



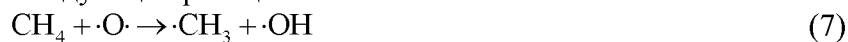
Кроме представленных выше реакций на короткое время возможно формирование метанола:



который далее реагирует с радикалом кислорода с образованием формальдегида:



На следующем этапе возможны следующие реакции:



И на завершающем этапе оставшиеся радикалы взаимодействуют по следующим схемам:



Кроме схем развития цепи в процессе горения возможны реакции обрыва цепи и перехода радикалов в стабильное молекулярное состояние:



Как видно из химических формул в процессе горения метан последовательно теряет водород, образуя радикалы  $\cdot\text{CH}_3$ ,  $\cdot\text{CH}_2$ ,  $\text{HCO}\cdot$  и т. д. Одновременно с образованием различных радикалов запускаются параллельные реакции взаимодействия метана и различных радикалов по формулам (4) и (7).

Анализ структуры этапов реакций окисления метана выявил узкое место реакций, которое заключается в малой степени разветвленности образования радикалов, которые далее должны поэтапно реагировать с молекулами метана. В связи с этим одним из возможных путей повышения степени образования радикалов является воздействие на зону реакции электрического поля с напряженностью, достаточной для образования радикалов. Энергия связи атома водорода с атомом углерода в метане составляет  $427\text{кДж/моль}$ , что соответствует для единичной молекулы  $E_{sv}=4,43\text{эВ}$ . Таким образом, для разрыва связи необходимо молекуле метана передать энергию больше или равную энергии связи атома водорода с атомом углерода.

При равновесном состоянии системы энергия электронов определяется по следующей зависимости:

$$E_e = \frac{3 \cdot k \cdot T}{2}. \quad (16)$$

В условиях зоны реакции, где температура поднимается до  $2000\text{ К}$  энергия электронов будет  $\approx 0,17\text{ эВ}$ . Для разрыва одной из связи водорода с углеродом в молекуле метана не хватает  $4,26\text{ эВ}$ . Чтобы увеличить энергию электрона на  $4,26\text{ эВ}$  необходимо чтобы он преодолел в электрическом поле разность потенциалов в  $4,26\text{ В}$ . Основная проблема увеличения энергии электрона состоит в достаточно малой длине свободного пробега, на которой он может набрать нужную кинетическую энергию без столкновения с молекулами газа.

Для определения длины свободного пробега  $\lambda$  воспользуемся такими характеристиками молекул смеси газов, как сечение взаимодействия электронов с молекулами, а также формулой определения вероятности наступления события при многократном повторении.

$$P_k = (1 - p_s)^k. \quad (17)$$

где  $k$  – количество повторений,  $p_s$  – вероятность наступления события.

Рассмотрим систему молекул, через которую двигается прямолинейно электрон в зоне действия электрического поля, представленного на рисунке 1. Для упрощения расчетов примем расстояние  $a$  в направлении движения молекул одинаковым по слоям молекул. За вероятность события  $p_s$  примем вероятность столкновения электрона с молекулой. Чтобы ее определить воспользуемся схемой, представленной на рисунке 2.

Как видно из схемы расположения молекул в слое площадь проекции элементарного объема одной ячейки включает только площадь проекции одной молекулы. Таким образом для определения вероятности взаимодействия электрона с молекулой газа необходимо сечение взаимодействия  $\sigma$  разделить на площадь проекции элементарной ячейки, которая определяется как квадрат расстояния между молекулами:

$$S = a^2. \quad (18)$$

Тогда вероятность столкновения с молекулой будем определять по формуле:

$$p_s = \frac{\sigma}{a^2} \quad (19)$$

Для определения расстояния  $a$  воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (20)$$

где  $P$  – давление,  $V$  – объем газа,  $n$  – количество вещества (газа),  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура.

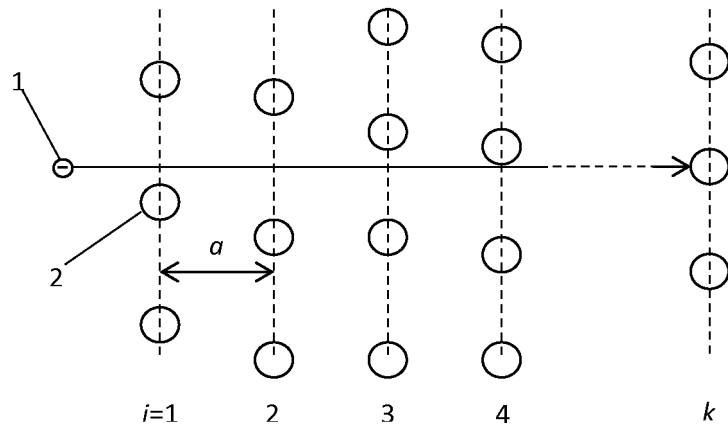


Рис. 1. Схема движения электрона в газе:

$i$  – номер слоя,  $a$  – расстояние между слоями,  $k$  – количество слоев до столкновения с молекулой

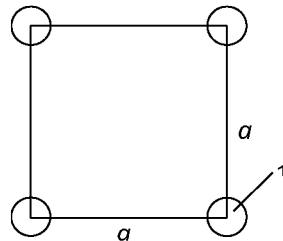


Рис. 2. Схема расположения молекул в слое:

1 – молекула газа

Найдем объем элементарной ячейки:

$$V_e = \frac{R \cdot T}{P \cdot N_A} \quad (21)$$

где  $N_A$  – число Авогадро.

В результате  $a$  будем определять как:

$$a = \sqrt[3]{V_e} = \sqrt[3]{\frac{R \cdot T}{P \cdot N_A}} \quad (22)$$

Объединим формулу (17) и (22) получим:

$$P_k = \left( 1 - \left( \frac{P \cdot N_A}{P \cdot T} \right)^{2/3} \cdot \sigma \right)^k \quad (23)$$

Из соотношения (23) определим количество слоев  $k$ :

$$k = \frac{\ln(P_k)}{\ln \left( 1 - \left( \frac{P \cdot N_A}{R \cdot T} \right)^{2/3} \cdot \sigma \right)} \quad (24)$$

В итоге длину свободного пробега определяется по соотношению:

$$\lambda = k \cdot a = \sqrt[3]{\frac{R \cdot T}{P \cdot N_A}} \cdot \frac{\ln(P_k)}{\ln \left( 1 - \left( \frac{P \cdot N_A}{R \cdot T} \right)^{2/3} \cdot \sigma \right)} \quad (25)$$

Для разрыва связи в молекулах газа топлива и окислителя необходимо создать напряженность электрического поля  $E$  определяемое соотношением:

$$E = \frac{E_{sv}}{\lambda} \quad (26)$$

При этом энергию связи необходимо брать в размерности эВ.

Проведем оценку необходимой напряженности электрического поля для повышения концентрации радикалов на примере метана и окислительной среды – кислорода с промежуточным определением длины свободного пробега для метана и кислорода. В результате расчетов длина свободного пробега для метана составила  $1,6 \cdot 10^{-6}$  м, а кислорода  $2,27 \cdot 10^{-6}$  м. Соответственно для разрыва связи водород-углерод необходимо сформировать напряженность 27 кВ/см, для разрыва связи в молекуле кислорода напряженность поля должна быть не менее 22 кВ/см. Полученные значения напряженности меньше электрической прочности рассматриваемых газов, поэтому потерь энергии на разогрев газов не будет. Останутся только потери на разгон электронов и ионов до фронта пламени.

В результате применения электрического поля в процессах сжигания топлива перед фронтом пламени будут более интенсивно образовываться радикалы топлива и окислительной среды, что приведет к увеличению скорости горения, а соответственно и возможности в более широких пределах регулировки динамических характеристик пламени без его срыва. Это позволит увеличить эффективность горения, а соответственно приведет к улучшению экологических характеристик и экономических параметров процесса горения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грачев А.С., Баршутин С.Н. Исследование ионизационных процессов в пламени под действием электрического поля//VII Международная научно-техническая конференция студентов, молодых учёных и специалистов "Энергосбережение и эффективность в технических системах". – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2020. – С. 126-129.
2. Баршутин С.Н., Илясов А.П., Мешкова Э.А. Определение вероятности ионизации нейтральной частицы при столкновении с электроном под действием электрического поля//Всероссийская научная конференция "Цифровая трансформация в энергетике". – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С.48-50.

Научный руководитель: к.т.н. С.Н.Баршутин, доцент ЭПТ ИЭПР ТГТУ.

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА НА ДВУХКОНТУРНОЙ ПГУ-ТЭЦ**

А.А. Галактионова<sup>1</sup>, О.Ю. Ромашова<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ Бутакова<sup>2</sup>, группа 5БМ22<sup>1</sup>

Цель работы – сравнение показателей работы ПГУ-ТЭЦ с турбиной Т-150-7,7 на базе ГТЭ-160 в характерных режимах работы.

Рассматриваются два схемных решения работы теплофикационной турбины Т-150-7,7 в составе ПГУ-ТЭЦ:

1. Схема с двухконтурным котлом утилизатором (КУ) без применения промежуточного перегрева пара (ПП).
2. Схема с двухконтурным КУ с применением промежуточного перегрева пара. Промежуточный пароперегреватель располагается в рассечку с пароперегревателем контура высокого давления.

Для каждого варианта схемы выполнен расчет показателей паросилового контура для конденсационного и теплофикационного режимов. Расход и температура газов после газовой турбины приняты по энергетической характеристике ГТУ [1]. Параметры генерируемого пара в контурах высокого и низкого давления – по прототипу [2, стр.139]

Принципиальная схема ПГУ-ТЭЦ с применением промежуточного перегрева пара представлена на рисунке 1.

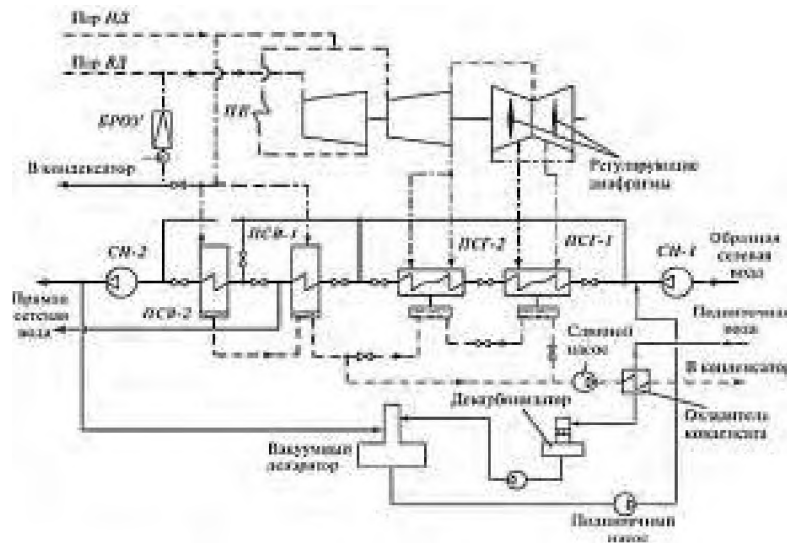


Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ-ТЭЦ с применением ПП

Исходные данные для конденсационного режима: мощность ГТУ  $N_{ГТУ} = 150,4$  МВт; температура наружного воздуха  $t_{нв} = 15$  °С; температура продуктов сгорания  $\theta_d = 548,2$  °С, расход газов за турбиной  $G_T = 503,5$  кг/с; коэффициент полезного действия ГТУ  $\eta_{ГТУ} = 33,5$  %; давление пара контура высокого давления (ВД) перед стопорными клапанами  $P_0^{ВД} = 7,41$  МПа; давление пара контура низкого давления (НД) перед стопорными клапанами  $P_0^{НД} = 0,6$  МПа; давление цилиндра низкого давления (ЦНД)  $P_{ЦНД} = 0,172$  МПа; давление в деаэраторе  $P_d = 0,7$  МПа; давление в конденсаторе  $P_k = 10,5$  кПа. В режиме с промперегревом давление и температура промперегрева равны  $P_{ПП} = 0,6$  МПа и  $t_{ПП} = 521,2$  °С.

Исходные данные для теплофикационного режима: мощность ГТУ  $N_{ГТУ} = 167,6$  МВт; температура наружного воздуха  $t_{нв} = -8,4$  °С; температура продуктов сгорания  $\theta_d = 539,4$  °С, расход газов за турбиной  $G_T = 533,3$  кг/с; коэффициент полезного действия ГТУ  $\eta_{ГТУ} = 33,5$  %; давление пара контура высокого давления перед стопорными клапанами  $P_0^{ВД} = 7,6$  МПа; давление пара контура низкого давления перед стопорными клапанами  $P_0^{НД} = 0,61$  МПа; давление в конденсаторе  $P_k = 1,64$  кПа. Турбоустановка в теплофикационном режиме работает по тепловому графику 90/50. Для схемы с промежуточным перегревом пара давление и температура промперегрева равны  $P_{ПП} = 0,61$  МПа и  $t_{ПП} = 512,4$  °С соответственно.

Для расчета теплофизических характеристик выхлопных газов использованы зависимости [2]:

$$I_T = 0,9416 \cdot \theta^{1,0242},$$

$$\theta = 1,062 \cdot I_T^{0,9763},$$

где  $I_T$  – энтальпия дымовых газов,  $\theta$  – температура дымовых газов.

Дополнительные исходные данные, приняты для расчета КУ: температурный напор на выходе из ППВД  $\delta t_0^{ВД} = 27$  °С; температурный напор на выходе из ППНД  $\delta t_0^{НД} = 23,5$  °С; гидравлические сопротивления ППВД и ППНД  $\xi_{ВД} = \xi_{НД} = 0,05$ , температурный напор в пинч-точке ВД и НД  $\delta t_s^{ВД} = \delta t_s^{НД} = 8$  °С.

Результаты расчета тепловых мощностей теплообменных поверхностей и энергетических показателей ПГУ-ТЭЦ для конденсационного режима представлены в таблице 1, для теплофикационного в таблице 2.

Таблица 1. Результаты расчета ПГУ-ТЭЦ в конденсационном режиме

	Показатели	Единица измерения	Режим работы	
			Без ПП	С ПП
Котел-утилизатор	Расход ВД	кг/с	61,47	47,58
	Расход НД		18,96	21,87
	Расход в деаэрактор		2,7	2,3
	Расход рециркуляции		10,8	9,3
	Температура уходящих газов КУ	°С	102,9	112,1
	Тепловая мощность КУ	кВт	248175,2	246009,5
Турбина	Электрическая мощность ПГУ	кВт	153229,9	165379,1
Экономические показатели	Электрическая мощность ПГУ	кВт	458736,4	466179,1
	Теплота камеры сгорания		448955,2	448955,2
	Абсолютный электрический КПД ПГУ по выработке ЭЭ	–	0,511	0,519
	Удельный расход условного топлива по отпуску электроэнергии	$\frac{\text{г.у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	240,7	236,99

При внедрении промежуточного перегрева в схемах ПГУ-ТЭЦ в конденсационном режиме снижается расход пара, генерируемого в контуре ВД на 23 %, при этом в контуре НД увеличивается на 15 %; возрастает температура уходящих газов на 9,2 °С; тепловая мощность котла-утилизатора снижается на 2165,7 кВт (с 248175,2 до 246009,5 кВт); электрическая мощность ПГУ повышается на 12149,2 кВт (с 153229,9 до 165379,1 кВт); электрическая мощность ПГУ прирастает на 1,6 %; увеличивается абсолютный электрический КПД на 0,8 % (с 51,1 до 51,9 %); расход удельного условного топлива по отпуску электроэнергии сокращается на 3,71 г.у.т./кВт·ч.

Анализ позволяет сделать вывод, что при введении промежуточного перегрева пара в котле утилизаторе энергетические показатели котла-утилизатора несколько ухудшаются, это связано с тем, что возрастает температура уходящих газов. При введении ПП улучшаются энергетические показатели ПГУ, в следствие этого схема с промперегревом в конденсационном режиме является более экономичной.

Таблица 2. Результаты расчета ПГУ-ТЭЦ в теплофикационном режиме

Наименование	Показатели	Единица измерения	Режим работы	
			Без ПП	С ПП
Котел –утилизатор	Расход ВД	кг/с	66,25	48,8
	Расход НД		16,06	23,62
	Расход в деаэрактор		2,8	2,4
	Температура уходящих газов КУ	°С	96,4	96,8
Отпуск теплоты на отопление	Расход СП <sub>2</sub>	кг/с	81,42	70,28
	Расход СП <sub>1</sub>		78,65	69,11
	Тепловая нагрузка СП <sub>2</sub>	кВт	171287,2	170952
	Тепловая нагрузка СП <sub>1</sub>		171287,2	170952
	Тепловая нагрузка потребителя		342574,4	341904
Турбина	Электрическая мощность ПГУ	кВт	129488	124928
Экономические показатели	Электрическая мощность ПГУ	кВт	468665,3	460128,1
	Теплота камеры сгорания		500298,5	500298,5
	Абсолютный электрический КПД ПГУ по выработке ЭЭ	–	0,712	0,699
	Удельный расход условного топлива по отпуску электроэнергии	(г.у.т.)/(кВт·ч)	172,75	175,96
	КПД блока по отпуску теплоты	–	0,912	0,912
	Удельный расход условного топлива по отпуску теплоты	(кг. у.т.)/ГДж	37,39	37,39
	Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении	–	1,37	1,35

При внедрении промежуточного перегрева в схемах ПГУ-ТЭЦ в теплофикационном режиме снижается расход пара, генерируемого в контуре ВД, на 26 %; при этом в контуре НД увеличивается на 47 %; снижается расход пар, в первом сетевом подогревателе на 12 % и во



втором сетевом подогреватели на 13,7 %; уменьшается тепловая нагрузка на потребители на 0,2 % (с 342574,4 до 341904 кВт); электрическая мощность ПТУ снижается на 3,5 %; электрическая мощность ПГУ снижается 1,8 %; абсолютный электрический КПД ПГУ снижается на 1,8 % (с 71,2 до 69,9 %); удельный расход условного топлива по отпуску электроэнергии возрастает на 1,8 %; удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении снижается на 1,46 % (с 1,37 до 1,35).

Сравнение показателей работы ПТУ в теплофикационных режимах позволяет сделать вывод, что введение промежуточного перегрева пара является неэффективным, так как понижает энергетические показатели ПГУ.

Окончательный выбор целесообразности введения промежуточного перегрева пара на двухконтурных теплофикационных ПГУ должен осуществляться с учетом годовых графиков теплового и электрического потребления в энергосистеме.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Диаграмма режимов ГТУ ГТЭ-160 – Энергетические характеристики ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ, 2015 – 58 с.
2. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013.
3. Цанев С.В. и др. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.

Научный руководитель: к.т.н. О.Ю. Ромашова, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

### **ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ СИСТЕМЫ РАСХОЛАЖИВАНИЯ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА РЕМИКС ТОПЛИВО**

Д.В. Погребной  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5072

После успешных эксплуатационных испытаний РЕМИКС топлива встает вопрос о готовности его использования на станциях с системами обеспечения безопасной работы, которые спроектированы для стандартного уранового топлива. Одной из таких систем является система расхолаживания бассейна выдержки. В связи с изменением состава топлива его остаточное тепловыделение поменяется. Следует убедиться, что обращение с отработавшими ТВС (далее ОТВС) будет безопасным и в модернизации данная система не нуждается.

Расчет остаточной тепловой мощности РЕМИКС топлива будет производиться по эмпирической формуле Уинтермайера-Уэллса [1, с. 136], которая учитывает вклад в остаточную тепловую мощность от распада продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ :

$$Q = 10 \cdot \left\{ (T + 10)^{-0.2} - (T + T_0 + 10)^{-0.2} - 0,87 \cdot \left[ (T + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} - (T + T_0 + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $T$  – момент времени после останова, на который определяется остаточное тепловыделение, с;  $T_0$  – время работы реактора, с.

Данная формула имеет следующую точность, оцененную Уинтермайером и Уэллсом для различных  $T$  [1, с. 137]:

$$\begin{aligned} &\pm 50\% \text{ для } 1 \leq T \leq 10^2; \\ &\pm 30\% \text{ для } 10^2 \leq T \leq 10^4; \\ &\pm 10\% \text{ для } 10^4 \leq T \leq 10^6; \end{aligned}$$

$\pm 50\%$  для  $10^6 \leq T \leq 10^8$ .

Для реактора ВВЭР-1000 Балаковской АЭС, топливная компания составляет 507,72 эффективных суток [2, с. 8], а по условиям проведения перегрузки топлива, с момента останова реактора должно пройти не менее 72 часов [3, с. 21].

Тепловыделение РЕМИКС ТВС в реакторе (после останова) с течением времени приведено в таблице 1.

Нагрузка на теплообменник расхолаживания бассейна выдержки, при перегрузке топлива, складывается из тепловыделения ТВС активной зоны и ОТВС, находящихся на выдержке, до их отправки на переработку.

Оценить тепловыделения ОТВС, находящихся в бассейне выдержки, можно с помощью формулы (1). Минимальное время выдерживания ОТВС в бассейне выдержки равно 3 годам [4, с. 158]. На момент 24-ой топливной загрузки реактора энергоблока №3 Балаковской АЭС в бассейнах выдержки находились 268 ОТВС (в бассейне 3TG21B01 – 157, 3TG21B02 – 71, 3TG21B03 – 40) [5].

В таблице 2 приведены результаты расчетов остаточного тепловыделения ОТВС, находящихся на выдержке в бассейнах, в зависимости от срока их выдержки.

Таблица 1. Энерговыведение ТВС в реакторе после останова с течением времени

T, сут	T, с	Q <sub>ТВС</sub> , кВт
1	86400	23038
2	172800	18475
3	259200	16090
4	345600	14514
5	432000	13356
6	518400	12449
7	604800	11710
8	691200	11089

Таблица 2. Энерговыведение ОТВС в бассейнах выдержки с течением времени

T, лет	T, с	Q <sub>ОТВС</sub> , кВт
1,5	$4,7 \cdot 10^7$	1022
3	$9,5 \cdot 10^7$	406
4,5	$1,42 \cdot 10^8$	230
6	$1,89 \cdot 10^8$	153

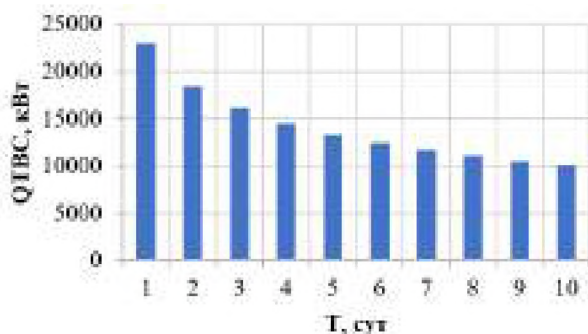


Рис. 1. Энерговыведение ТВС в реакторе после останова с течением времени

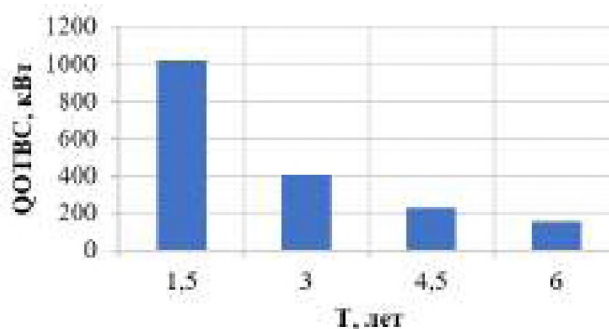


Рис. 2. Энерговыведение ОТВС в бассейнах выдержки с течением времени

Общее тепловыделение ТВС и ОТВС составляет:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{ТВС}}(T_0 = 507,72 \text{ сут}; T = 3 \text{ сут}) + Q_{\text{ОТВС}}(T_0 = 507,72 \text{ сут}; T = 3 \text{ г}) = 16496 \text{ кВт} \cdot$$

Теплообменник расхолаживания бассейна выдержки имеет следующие характеристики [4, с. 166].

Таблица 3. Технические характеристики теплообменника расхолаживания бассейна выдержки

Параметр	Величина	
	Трубное пространство	Межтрубное пространство
Расход среды, т/час (не более)	950 (техвода)	630 (РБК)
Давление расчетное, кгс/см <sup>2</sup>	10	5
Давление рабочее, кгс/см <sup>2</sup>	5	3
Объем, м <sup>3</sup>	2,48	5,2
Гидравлическое сопротивление, кгс/см <sup>2</sup>	0,83	0,72
Температура расчетная, °С (не более)	70	100
Номинальная тепловая мощность при t те- хводы 5 / 33 °С, МВт	20,12 / 10,35	
Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	325	
Количество / диаметр т/о труб, мм	962 / 16x1	
Материал поверхности теплообмена	08Х18Н10Т	

При температуре техводы равной 5 °С номинальная мощность аппарата составляет 20,12 МВт. Мощность общего тепловыделения составляет  $Q_{общ} = 16496 \text{ кВт}$ . Из этого следует, что теплообменник не требует замены при переходе со стандартного уранового топлива на РЕМИКС при нормальной эксплуатации.

Для некоторых аварийных режимов данный теплообменник может быть использован для работы на другую систему, а именно, на систему аварийно-планового расхолаживания [6, с. 50]. Для необходимого теплосъема из активной зоны максимальная мощность теплообменного аппарата должна быть не ниже мощности тепловыделения активной зоны после останова и предварительного расхолаживания через парогенераторы, а именно  $Q(T = 1 \text{ сут}) = 23 \text{ МВт}$  (таблица 1).

Таким образом, нынешний теплообменник системы расхолаживания бассейна выдержки не подходит, так как его максимальная номинальная мощность не соответствует нагрузке в аварийных режимах. Подходящим решением является замена теплообменника.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов / Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д., Клочков В.И., Семенов В.В. [и др.] – Москва: Атомиздат, 1977. – 280 с.
2. ИЭ.4.НФХ.ОЯБиН/02. Нейтронно-физические характеристики реактора ВВЭР-1000 – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2022. – 128 с.
3. И.ОЯБиН/18. ИНСТРУКЦИЯ по обеспечению ядерной безопасности при транспортировании, перегрузке и хранении свежего и отработавшего ядерного топлива на Балаковской АЭС1000 – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2016. – 62 с.
4. Балаковская атомная станция. Технологические системы реакторного отделения. Часть 1. Системы безопасности: Центр подготовки персонала, 2000. – 360 с.
5. ОЯБиН-2-01-3/786. Результат нейтронно-физических расчетов в обоснование безопасности 24-й топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 блока № 3 Балаковской АЭС – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС 2020.
6. Балаковская атомная станция. Техническое описание «Система аварийного и планового охлаждения зоны (активная часть)»: Центр подготовки персонала, 2007. – 92 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.В. Воробьев, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧАСТИЧНОГО УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Н-КАРБОКСИЛЬНОГО ФИЛЬТРА

А.Ю. Логинова

Ивановский государственный энергетический университет  
ТЭФ, ХХТЭ, аспирант

Водоподготовительная установка (ВПУ) на ТЭС предназначена для получения добавочной воды, которая направляется на восполнение потерь пара и конденсата в основном контуре. Для получения обессоленной воды требуются значительное количество ресурсов – привозных химических реагентов и воды на собственные нужды, при этом образуется значительное количество высокоминерализованных сточных вод. Актуальными являются вопросы ресурсосбережения и повышение экологичности работы ВПУ.

В последнее время широко внедряются ВПУ использующие мембранные методы очистки природных вод и прежде всего обратный осмос, который относится к малореагентным методам деминерализации воды [1, 2]. При очистке средне- и высокоминерализованных природных вод на установке обратного осмоса (УОО), при обеспечении высоких значений выхода пермеата на поверхности обратноосмотических мембран происходит образование осадков, прежде всего солей катионов жёсткости. Для предотвращения их образования предусматривают реагентную обработку исходной воды перед УОО [2]. Одним из таких мероприятий является предварительная обработка осветлённой воды на фильтре загруженном Н-карбоксильным катионитом. При пропуске через такой фильтр происходит снижение общей жёсткости и щёлочности, что ведёт к уменьшению вероятности образования карбоната и сульфата кальция. Н-карбоксильный катионит характеризуется высоким значением рабочей обменной ёмкости (2000–2500 моль/м<sup>3</sup>) и регенерируется с удельным расходом кислоты близким стехиометрическому (1,05–1,10 моль/моль). Образующийся после регенерации этого фильтра сток близкий к нейтральному. Традиционная технология Н-катионирования предполагает обработку всего потока очищаемой воды перед УОО. Применение Н-карбоксильных фильтров требует дополнительных ресурсов (товарной серной кислоты, воды на собственные нужды, фильтрующего материала) и приводит к ухудшению технологических и экологических показателей ВПУ.

В качестве мероприятия по совершенствованию технологии водоподготовки предлагается, при возможности, подвергать Н-катионированию только часть потока осветлённой воды (рисунок 1), как это находит применение при обработке на Na-катионите. Катионированию должна подвергаться такая часть воды, чтобы в концентрате УОО расчётное значение индекса Ланжелье не превышало допустимое значение [2]. Такое мероприятие может быть применено не для всех вод. За счёт уменьшения расхода обрабатываемой воды снижается среднесуточная потребность в серной кислоте, которая используется для регенерации Н-фильтра, а также повышаются экологические показатели ВПУ.

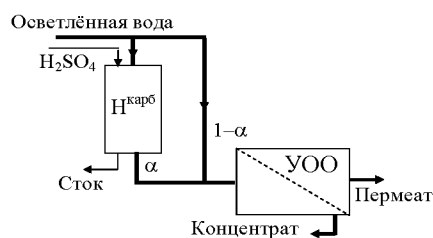


Рис. 1. Технологическая схема умягчения части воды перед УОО

Для анализа эффективности предложенного мероприятия была использована разрабатываемая с участием автора программа ПРОЕКТ ВПУ (рисунок 2) [3, 4]. Основное назначение

этой программы проведение технологического расчёта схем ВПУ ТЭС и АЭС, определение технологических, экологических и технико-экономических показателей работы ВПУ. Чтобы иметь возможность рассчитывать рассматриваемую технологию водообработки был разработан специальный элемент «разделитель водного потока», математическая модель которого основана на уравнениях материального баланса по количеству вещества и расходу. Такой элемент позволяет рассчитывать качество воды при смешении двух потоков – для рассматриваемой технологии осветлённой и умягчённой воды при задаваемом соотношении смешения. Предусмотрен также расчёт требуемого соотношения водных потоков для обеспечения задаваемого значения индекса Ланжелье в смешанном потоке.

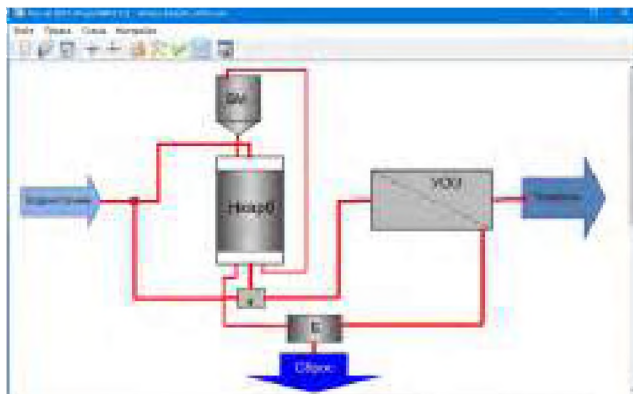


Рис. 2. Экранная форма программы ПРОЕКТ ВПУ с рассчитанной схемой

Проведение расчёта по программе требует выполнения итерационного расчёта по подбору оптимального соотношения при смешении осветлённой воды и воды после Н-карбонильного фильтра, чтобы обеспечить допустимое значение показателя индекса Ланжелье в концентрате УОО. Для упрощения подбора требуемого соотношения, минимально допустимую долю воды, которую нужно обработать на Н-карбонильном фильтре может быть определена, как

$$\alpha = \frac{LSI_{\text{осв}} - LSI_{\text{доп}}}{LSI_{\text{осв}} - LSI_{\text{ум}}},$$

где  $LSI_{\text{осв}}$ ,  $LSI_{\text{ум}}$  – индекс Ланжелье в осветленной воде перед УОО и воде после Н-карбонильного фильтра;  $LSI_{\text{доп}}$  – допустимое значение индекса Ланжелье с учетом гидравлического КПД УОО.

Был выполнен многовариантный технологический расчёт рассмотренного мероприятия, в ходе которого были определены основные технологические, экологические и технико-экономические показатели работы ВПУ. Анализ результатов расчёта показал, что при обработке на Н-карбонильном фильтре только части потока исходной воды перед УОО, позволяет для ряда случаев, существенно снизить расход серной кислоты на регенерацию (до 90%), а также уменьшить объём стоков и количество солей, сбрасываемых с ними при обеспечении маловероятного режима образования кальциевых осадков на поверхности мембран. Эффект ресурсосбережения и повышение экологических показателей зависит от качества обрабатываемой воды, производительности ВПУ, гидравлического КПД на УОО и её схемы. Умягчение на Н-карбонильном фильтре позволяет расширить область применения этого метода подготовки исходной воды перед УОО.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бушуев Е.Н. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – Вып. 1. – С. 8-14. – ISSN 2072-2672.

2. Бушуев Е.Н. Технология обессоливания воды на ТЭС на основе мембранных методов: Учеб. пособие / Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева // ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. –144 с. –ISSN 978-5-00062-266-7.
3. Технологический расчет водоподготовительной установки ТЭС и АЭС (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ) / Е.Н. Бушуев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016663460. Дата поступления 17 октября 2016 г., зарегистрировано 7 декабря 2016 г.
4. Обработка воды на ТЭС и АЭС / Б. М. Ларин, Е.Б. Юрчевский, В.В. Гостыков, А.Б. Ларин, Е.Н. Бушуев // ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". – Иваново: 2010. – 348 с. – ISBN 978-5-89482-690-5.
5. Ларин, Б.М. Анализ существующих технологий водоподготовки на тепловых электростанциях / Б. М. Ларин, Е. Н. Бушуев, М. Ю. Опарин, Н. В. Бушуева // Энергосбережение и водоподготовка –М.: –2002. – № 2. – С. 11-19.

Научный руководитель: д.т.н. Е.Н. Бушуев, доцент ХХТЭ ТЭФ ИГЭУ.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК**

Г.А. Крылов<sup>1</sup>, С.В. Гаврилова<sup>2</sup>

Ульяновский государственный технический университет  
ЭФ, ЭПиАПУ, группа ЭАмд-11<sup>1</sup>, к.т.н., доцент УлГТУ<sup>2</sup>

Рациональное и экономичное использование тепловой энергии потребителями на сегодняшний день является одной из самых важных задач промышленного комплекса. Практически любое современное предприятие оснащается собственной котельной, ее применение является экономически целесообразным решением, так как позволяет минимизировать расходы предприятия в целом. Технологический процесс котельной установки предполагает сжигание топлива для производства тепловой энергии, которая поступает на отопление или же технологические нужды. В зависимости от системы отопления, сжигаемое топливо (его продукты сгорания) может подогревать как теплоноситель в системе отопления, так и воздух, поступающий через приточную вентиляцию. Тепловая энергия, поступающая на технологические нужды, зачастую используется для производства пара с заданными характеристиками. Топливом чаще всего выступает природный газ, сжигаемый при помощи специальных устройств различных типов, называемых горелочными блоками.

Качественное регулирование процесса горения является основой экономичной и стабильной работы всей системы. Процесс горения требует автоматизации. На сегодняшний день, наиболее распространенный тип горелочного устройства – это модульное с принудительной тягой. В нем воздух поступает от дутьевого вентилятора.

Важно, что газ стабильно горит в смеси с воздухом только в определенном соотношении. Для каждого состава газового топлива это соотношение будет рассчитываться по-своему, в зависимости от процентного соотношения метана, тяжелых углеводородов, углекислого газа и мелкодисперсных паров воды. Усредненным соотношением считается 1 м<sup>3</sup> газа к 10 м<sup>3</sup> воздуха. Точное соотношение определяется давлением воздуха и газовой смеси, оно определяется для каждого значения мощности горелочного устройства. Это нелинейная зависимость, она представлена на рисунке 1.

Как видно из графика, при каждой заданной мощности необходимо поддерживать требуемое давление газа и соответствующее ему давление воздуха, это можно достичь при по-

мощи регулирования производительности дутьевого вентилятора и управления регулирующей арматурой на подводящем газопроводе к горелочному устройству. Возможно оснащение воздуховода шибером с настраиваемым положением на минимальную и максимальную мощность горелки. Минимальная мощность будет определяться величиной противодавления топочной камеры теплогенерирующей установки. Максимальная – согласно паспорту на конкретную горелку.

Также для автоматизации процесса горения важно учитывать, что при увеличении мощности горелочного устройства вначале увеличивают давление газа, а после этого поток воздуха, далее должна производиться регулировка тяги. Соответственно, при уменьшении мощности горения необходимо вначале уменьшить поток воздуха, затем уменьшать давление газа, после этого нужно также отрегулировать тягу. Регулировка тяги производится при помощи шибера или же снижением, или увеличением оборотов электродвигателя дымососа (для достаточно мощных аппаратов).

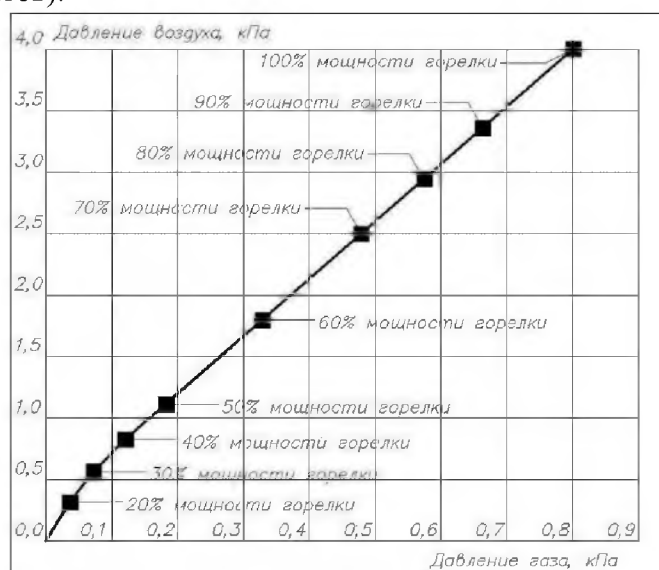


Рис. 1. Примерное соотношение давления газа и давления воздуха при диапазоне мощности горелочного устройства от 20 % до 100 %

Рассмотрим процесс и способы регулирования количества воздуха, подаваемого в горелочное устройство. В конструкцию некоторых модульных горелочных устройств вносится специальная заслонка, управляемая сервоприводом. Данный тип регулирования считается недостаточно экономичным, ввиду того, что электродвигатель дутьевого вентилятора продолжает работать на номинальной скорости и соответственно потребляет такое же количество электрической энергии. С учетом того, что большую часть времени горелочное устройство работает не на своей максимальной мощности, то можно считать, что такая работа электродвигателя является нецелесообразной. Более рациональным решением является применение в составе системы управления горелочным устройством частотного преобразователя, который, несмотря на достаточно большой срок окупаемости может существенно снизить расходы предприятия на электроэнергию.

Перейдем к рассмотрению процесса регулирования количества газа, подаваемого на горелочное устройство. В случае газового топлива применение заслонки, изменяющей сечение газопровода на участке у горелочного устройства является наиболее удачным решением, кроме нее также возможна установка электромагнитного регулирующего клапана, который способен поднимать или опускать свой рабочий орган в зависимости от величины поданного на него напряжения. В любом из приведенных случаев важно, что данные регулирующие устройства требуют тщательной наладки и высокого качества сборки заводом-изготовителем.

Регулировка тяги также является важной составляющей стабильного горения газовой смеси. В наиболее упрощенном виде она должна производиться следующим образом: чем выше мощность горения, тем больше должна быть тяга, создаваемая как естественным путем, так и

принудительно при помощи дымососа. В случае с принудительной тягой экономически целесообразно использование частотного преобразователя для управления электроприводом дымососа. В случае системы с естественной тягой, автоматическое ее регулирование может быть реализовано при помощи шиберов, управляемого сервоприводом. Рассмотренные способы регулирования представлены на рисунках 2 и 3.

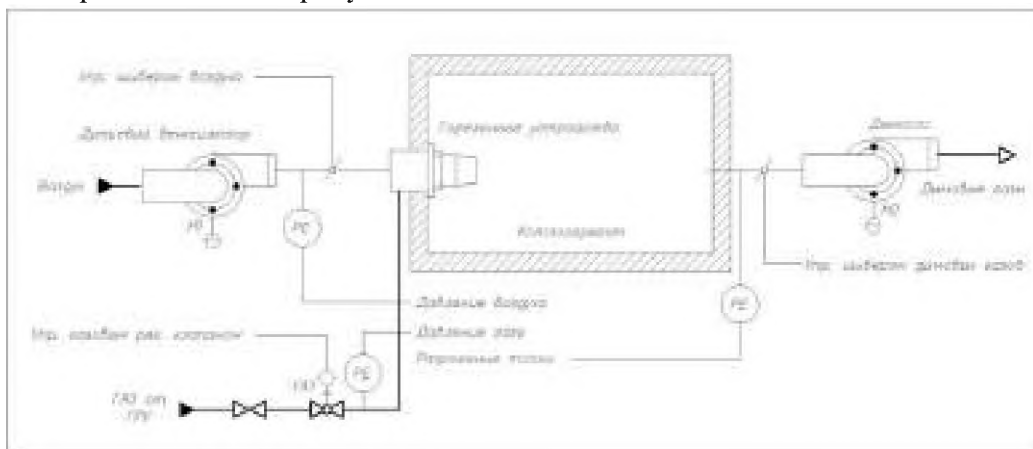


Рис. 2. Система автоматического регулирования процесса горения с использованием заслонок, регулирующих разрежение в топочной камере

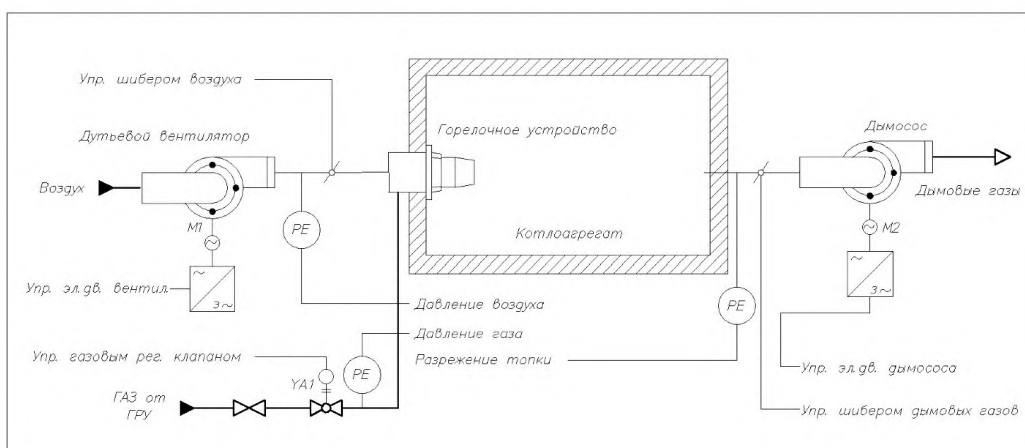


Рис. 3. Система автоматического регулирования процесса горения с использованием заслонок, регулирующих разрежение в топочной камере, а также с применением частотных преобразователей для электродвигателей

Также одними из возможных способов регулирования процесса горения являются двух или трехпозиционное регулирование. При данных способах горелочное устройство работает прерывисто, оно включается при понижении температуры в топочной камере ниже установленной и выключается при достижении установленной величины. Данный способ регулирования сравнительно прост в реализации, однако при его использовании элементы горелочного устройства, особенно электроды запальника испытывают высокие нагрузки и быстрее выходят из строя. Целесообразным при этом является применение в составе всей установки двух горелочных устройств, работающих попеременно и настроенных на различную мощность. Таким образом удастся добиться продления срока эксплуатации всей установки.

Немаловажным вопросом является алгоритм настройки коэффициентов цифровых регуляторов готовой системы. На сегодняшний день в системах тепловой автоматики ввиду сложности технических процессов и их объемного математического описания они подбираются в процессе пуско-наладочных работ, тогда как точное их значение получить крайне трудно. Получение коэффициентов ПИД регуляторов в автоматическом режиме могло бы существенно повысить качество регулирования процессов горения, а также прочих процессов в тепломеханических системах.



Текущая статья ставила собой целью рассмотреть основные методы регулирования процессов сжигания газового топлива на теплогенерирующих установках. Реализация вышеперечисленных принципов в составе реальных систем возможна только с учетом требований к конкретному горелочному устройству, технологическому процессу и виду теплогенерирующей установки. Кроме того, в любой системе автоматического управления должны присутствовать как программные, так и аппаратные защиты (от погасания пламени, от понижения или превышения давления газа, отсутствия разрежения, от аварии дымососа или же дутьевого вентилятора и элементов их приводов, от превышения температуры в топочной камере, от неисправности электродов розжига и т. д). Однако, общие указанные принципы являются универсальными в независимости от их конкретной реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учебное пособие. – СПб: СПбТУРП, 2011. – 84 с.
2. Карауш С.А. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Строительство». – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2003 – 161 с.

Научный руководитель: к.т.н. В.И. Доманов, доцент УлГТУ.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

В.Е. Новикова

Омский государственный университет путей сообщения  
ИЭСЭ, группа 41Ж

Для освоения Арктической зоны с помощью современных технологий необходимо стабильное электроснабжение. В силу климатических особенностей региона и его удалённости постройка стационарных электростанций очень затруднена. А так как потребители электроэнергии сильно удалены друг от друга, технически очень сложно доставить им энергию по замёрзшей поверхности океана или по его дну. Предлагается использовать возобновляемый источник энергии – ветер. Установка ветрогенераторов прямо рядом с потребителями позволит получать электричество в необходимых количествах именно там, где оно нужно.

Для рассмотрения применения ветрогенератора в условиях низких температур, необходимо изучить влияние низких температур и сурового климата на работу таких установок в целом.

Низкие температуры Арктической зоны отрицательно влияют на различные материалы, используемые в ветроэнергетических установках. Механические свойства стали, композиционных материалов, полимеров, цементного раствора и бетона – все они подвержены физическим изменениям при изменении (уменьшении) температуры. При низких температурах материалы имеют тенденцию становиться хрупкими (пониженная способность деформироваться без повреждений) и становиться менее жесткими (способность поглощать энергию при ударе, что выражается значением Шарпи). Композитные материалы, например, материалы, используемые в лопастях ротора, могут иметь неравную усадку компонентов матрицы, приводящую к остаточному напряжению.

Микрорастрескивание может произойти, если напряжение является избыточным и, если это явление не принимается во внимание при расчете. Этот потенциальный отказ относится не только к рабочим лопаткам, в которых снижается жесткость и непроницаемость, но и к

электрооборудованию, использующему изолирующую смолу. Бетонные или полированные конструкции в ветряной турбине должны быть адаптированы к холодному климату, так как термическое растрескивание может повлиять на проницаемость конструкции и увеличить вероятность возникновения коррозии из-за проникновения воды.

Низкие температуры также могут повредить электрооборудование, например, генераторы, приводные двигатели [1] для движения и наклона, трансформаторы и т. д. При запуске привода тангажа в холодных условиях в статоре могут возникнуть повреждения из-за внезапного увеличения тепла и результирующего дифференциального теплового расширения в холодной машине. Если это не будет должным образом учтено при проектировании, это в итоге может привести к отказу или уменьшению срока службы двигателя. В заполненных жидкостью трансформаторах тепло, генерируемое внутренними потерями, внутри обмоток трансформатора, может быть недостаточно быстро откачано в условиях холодного запуска [2]. Заполненные жидкостью трансформаторы могут охлаждаться до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  или даже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от их расположения в ветряной турбине, которые могут находиться либо снаружи, в основании башни, в средней секции башни, либо в гондоле. Вследствие более высокой вязкости охлаждающих жидкостей при таких низких температурах естественное конвекционное охлаждение внутренних обмоток может быть ограничено, поскольку масло является слишком жестким для циркуляции и теряет способность отводить тепло [2]. Конструкции жидко заполненных трансформаторов не только обладают дополнительной надежностью и безопасностью при низких температурах, но и подвержены риску трансформаторы из литой смолы. В трансформаторах из литой смолы, смола, содержащаяся в обмотках трансформатора, может стать хрупкой при холодных температурах, а тепловые напряжения могут вызвать микротрещины.

При холодной погоде также страдают редукторы, подшипники, системы наклона, а также гидравлические компоненты. Когда температура падает, вязкость смазочных материалов и гидравлических жидкостей увеличивается до того момента, когда масло становится слишком жестким для перекачки (высокие нагрузки насоса), что делает его неспособным достаточно смазывать редукторы и подшипники.

Недостаточная смазка таких компонентов может повредить шестерни, если масло слишком вязкое, чтобы свободно циркулировать. Кроме того, более высокая вязкость смазки снижает пропускную способность коробки передач и, таким образом, отрицательно влияет на её эффективность [3].

Уплотнения для компонентов, работающих с маслами и смазками, также требуют особого внимания во время проектирования, чтобы предотвратить утечку, поскольку они имеют тенденцию терять свою гибкость при низких температурах.

Низкотемпературные адаптации и холодная погода обеспечивают повышенную доступность и надежность ветряных турбин в местах с холодным климатом. Поскольку выход продукции в зимнее время обычно является хорошим из-за высоких и средних скоростей ветра и более высокой плотности воздуха, такая адаптация к холодному климату выгодна для доходов от производства.

Хотя установки благоприятны для холодного климата, но также требуют дополнительных потребляемых мощностей для нагрева пространства гондолы и других компонентов турбины. Снижение этой потребляемой мощности и сокращение времени холодного запуска за счет использования новых стратегий управления, которые увеличивают эффективность и время повторного включения питания турбины, по-прежнему являются проблемами. В ходе оценки сайта следует оценить, окупятся ли такие адаптации на основе исторических климатических данных.

Системы защиты от гололеда для ветряных турбин ориентированы на уменьшение накопления льда и, связанных с этим, рисков для лопаток турбин. Исторически различные системы ледовой защиты разрабатывались научно-исследовательскими институтами, независимыми поставщиками систем и производителями турбин с 1990-х годов.

Разработаны системы ледовой защиты роторов ветровых турбин для уменьшения рисков снижения производства, вызванного гололедом, включая повышенные шумовые выбросы и

выброс льда. Сообщается о резком сокращении производства из-за обледенения не только в Скандинавии и Канаде, но и в умеренных климатических условиях, таких как Испания, Португалия, Соединенное Королевство и Чешская Республика. Лед на лопатках турбины может повысить выбросы шума, потенциально нарушая правила выдачи разрешений на строительство. Выброс льда может создать угрозу безопасности для людей вблизи ледяных турбин, поэтому риски выброса льда необходимо регулировать и уменьшать.

Системы защиты ото льда можно разделить на активные (системы против [AI] и против обледенения [DI] и другие системы) и пассивные (покрытия или отсутствие действия).

Для активных систем противообледенитель является способом предотвращения значительного образования льда на лопатках ветряной турбины при обеспечении её нормальной работы. Удаление обледенения происходит с остановкой турбины и последующим включением системы защиты ото льда для его удаления. Другие системы защиты ото льда включают в себя, например, превентивные отключения турбин и связаны с безопасностью сокращения или остановки.

Альтернативные технологии.

Перечислены доступные технологии системы ледовой защиты:

– Системы защиты ото льда с горячим воздухом имеют источник тепла в сочетании с высокоэнергетическим вентилятором для циркуляции горячего воздуха в различные области лопатки.

– Системы электротермической защиты ото льда имеют нагревательные элементы, обычно из углеродного волокна, размещенные на наружной поверхности лопатки.

– Микроволновые системы защиты льда имеют специальное наружное покрытие на поверхности лопатки, которое нагревается при воздействии микроволн, создаваемых генераторами внутри лопатки.

– Пассивные системы используют покрытия лопаток со специальными свойствами материала для пассивного(?) (не требующего энергии) снижения рисков, вызванных воздействием льда.

– Системы механического удаления включают в себя ручное удаление обледенения с помощью троса или с помощью скоростного спуска, а также удаление обледенения лопастей(?) с использованием горячих жидкостей.



*Рис. 1. Лопасть без защитного покрытия, в условиях низких температур Арктической зоны*



*Рис. 2. Лопасть с защитным покрытием в условиях низких температур*

Контрольный список в таблице 1 описывает адаптации и модификации, которые обычно встречается в использовании совместно с холодной погодой.

Далее приведён обзор различных ледяных систем защиты.

1. Противообледенитель. Плюсами этого метода является: максимальное усиление АЕР; препятствует большей части формирования льда; нет необходимых остановок турбины. Минусами: может потребовать больше питания от вращающейся ступицы; мало технологических вариантов.
2. Горячий воздух. Плюсы: простота и надёжность в использовании. Минус: возможны потери тепла при использовании.
3. Электронагрев. Плюсы: мощность и возможность тепловой регулировки. Минусы: дорогостоящее обслуживание.
4. Механическое удаление. Плюсы: гарантированное удаление обледенения. Минусы: тяжело осуществить дополнительные вопросы безопасности персонала.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. M. Gemuend, "Cold climate – test of pitch system," GL, 2013.
2. Cloet, Bram & Jordaens, Pieter Jan & Nuri, Jama & Schevensteen, Raymond. (2014). Cold start of a 5.5MVA offshore transformer in in EWEA 2014, Barcelona, 2014.
3. P. J. J. (OWI-Lab) and S. G. (. W. Power), "Extreme cold start-up validation of a wind turbine gearbox by the use of a large climatic test chamber," in EWEA 2014, Barcelona, 2014.

Научный руководитель: к.т.н. А. Ю. Финиченко, доцент ОмГУПС.

## РАСЧЕТ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА МЕТОДОМ ПОДОБИЯ

А.Д. Панькина

Поволжский государственный технологический университет  
ИММ, ЭЭП, группа ТТ-41

### Аннотация

В данной работе представлена последовательность расчета насосов циркуляционного типа с помощью метода подобия. Этот метод может быть применен как при проектировании, так и для диагностики технического состояния насосного оборудования.

Существующие методы расчетов по насосным установкам содержат два критичных недостатка: размеры деталей и точность расчета машин. Многие размеры деталей, которые сильно влияют на к.п.д. агрегата, нельзя определить с помощью расчетов. Подходящие размеры рабочих лопастей, форму и размеры «языка» спиральной камеры лучше подбирать опытным путем. Точность расчёта машин напрямую зависит от верно подобранных коэффициентов потерь или коэффициента полезного действия. Ошибочный учет влияния числа лопастей и неправильный расчет к.п.д. приведут к разнице между реальным напором и расчетным на 5– 10%. Также, есть вероятность, что расчетный режим не совпадет с режимом максимального коэффициента полезного действия. Другими словами, высокоэкономичный насос реально создать, но только при помощи длительной подгонки, в процессе которой измеряются: ширина лопастей их входной угол и остальные важные геометрические характеристики. Именно поэтому при создании машин первым делом производят расчет модели и опытным путем находят подходящие размеры. Подгонка размеров и характеристик натуральной машины обходится дороже, чем подгонка небольшой модели. Расчет натуральной машины производится на безразмерных характеристиках моделей. В наше время создано большое количество производительных насосов, которые можно использовать как модель. Благодаря этому практически полностью пропадает нужда в создании новых насосных установок.

**Ключевые слова:** циркуляционный насос, насосное оборудование, диаметр рабочего колеса, напор, число оборотов, к. п. д.

Проектирование насосов по методу подобия как правило выполняется с целью упрощения без учета воздействия числа Re. Так как масштабы действительной машины больше размеров модели, следовательно, гарантируется незначительный резерв по давлению.

Произведем расчет насоса циркуляционного типа с следующими показателями: подача  $V = 2 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}$ ; напор  $H = 550$  Дж/кг, выбрав в качестве примера насос 48Д22, безразмерные и обычные характеристики которого представлены на рисунке 1а, б.

Выбираем из характеристик модели режим максимального к.п.д, для которого  $n_s = 11,5 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ , и считаем необходимое количество оборотов.

$$n = \left( \frac{n_s}{0,88} \right) \left( \frac{H^{\frac{3}{4}}}{V^{\frac{1}{2}}} \right) = \left( \frac{11,5}{0,88} \right) \left( \frac{550^{\frac{3}{4}}}{2^{\frac{1}{2}}} \right) = 1110 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (1)$$

Принимаем близкое допустимое число оборотов (согласно каталогу двигателей)  $n' = 970$  об/мин. Тогда величина удельного числа оборотов  $n'_s = 0,88 \cdot n' \cdot (V^{\frac{1}{2}}/H^{\frac{3}{4}})$  или  $n'_s = n_s \cdot (n'/n) = 11,5 \cdot (970/1110) = 10,1$  об/мин.

Вычисленному значению  $n'_s$  согласно характеристикам примера подходят данные размерные параметры:  $\bar{H} = 0,44$  и  $\eta = 0,84$ ; подача  $\bar{V} = 0,134$ . Так как уменьшение к.п.д., по сравнению с его максимальной величиной  $\eta_{max} = 0,88$ , составляет 4 % абсолютных, что принято считать возможным, то из этого следует, что найденный режим работы можно принять.

Требуемая окружная скорость

$$u_2 = \sqrt{\frac{H}{\bar{H}}} = \sqrt{\frac{550}{0,44}} = 35,3 \frac{\text{м}}{\text{сек}}. \quad (2)$$

Диаметр рабочего колеса:

$$d_2 = \frac{60u_2}{\pi n} = 60 \cdot \frac{35,3}{\pi \cdot 970} = 0,697 \text{ м}. \quad (3)$$

Масштаб моделирования:

$$\alpha = \frac{d_2}{d_{2м}} = \frac{0,697}{0,985} = 0,707. \quad (4)$$

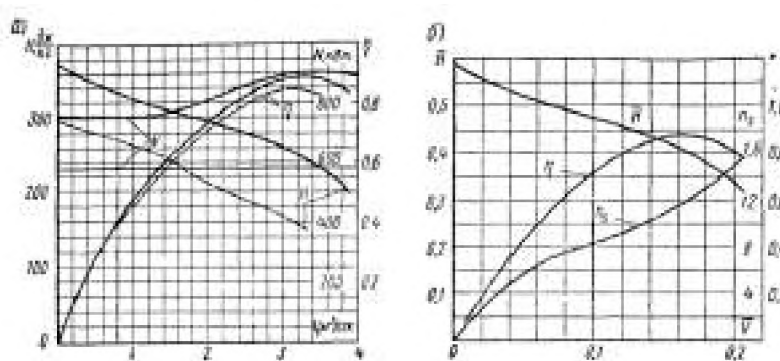


Рис. 1. Обычные и безразмерные характеристики циркуляционного насоса 48Д22

В таком случае принимать во внимание воздействие масштаба, а также числа Re не нужно, поскольку размеры действительного и модельного насоса различаются несущественно, помимо этого крайне значительны. Из этого следует, что верно подобранный насос сможет функционировать в пределах рабочей области, обеспечивая максимальный к.п.д. и экономя энергоресурсы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Центробежные и осевые насосы / Ломакин А.А. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва; Ленинград: Машиностроение. 1966. – 364 с.
2. Центробежные и осевые насосы: Теория, конструирование и применение / Степанов А.И., – Москва: Машгиз, 1960. – 463 с.
3. Подбор циркуляционного насоса: устройство, виды и правила выбора насоса для отопления // Совет инженера URL: <https://sovet-ingenera.com/otoplenie/otop-oborudovanie/podbor-cirkulyacionnogo-nasosa.html> (дата обращения: 14.05.2022).

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Медяков, зав. каф. ЭППГТУ.

# РЕЗЕРВНЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭНЕРГИИ НА АЛЮМИНИЕВОМ ТОПЛИВЕ ДЛЯ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

В.И. Белиловец, Е.Е. Шишкова  
Сибирский федеральный университет  
ИСИ, ИСЗиС

## Аннотация

В статье представлены существующие пути решения проблемы тепло- и электроснабжения Северных территорий России, их преимущества и недостатки. Предложена концепция энергообеспечения за счет использования алюминиевого топлива в качестве источника электрической и тепловой энергии для локализованных энергоузлов. Рассмотрена принципиальная схема работы электрохимического генератора на основе воздушно-алюминиевой батареи.

**Ключевые слова:** электрохимический генератор, воздушно-алюминиевая батарея, генератор с алюминиевыми анодами, тепло- и электроснабжение Северных территорий, освоение Арктики.

На сегодняшний день в России в связи с активным освоением районов Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока актуальна проблема энергоснабжения территорий. Северные населенные пункты и промышленные объекты получают тепло и электричество преимущественно децентрализованным путем – по локальным сетям при помощи отдельных энергоузлов. Факторы, способствующие уходу потребителей от централизованного электроснабжения, рассмотрены в работе [1]. Ускоренной модернизации энергетической инфраструктуры регионов и территорий с суровыми климатическими условиями и транспортной малодоступностью препятствует высокий рост цен, отсутствие должных инвестиционных программ и субсидий.

Основным источником работы тепло- и электрогенерирующих установок локальных энергоузлов служит дизельное топливо, которое часто является единственным доступным вариантом. Дизель обладает существенными недостатками: дорогостоящая доставка к месту использования, нанесение вреда окружающей среде Северных территорий при сжигании данного топлива, из чего следует высокая себестоимость получаемой электроэнергии. Например, для Ненецкого округа, согласно сведениям Корпорации развития Дальнего Востока и Арктики, себестоимость получаемого электричества, за 1 кВт\*ч, составляет 32 рубля, для Мурманской области – около 31 рубля, для населенных пунктов Поморья – около 19 рублей.

Для решения проблемы высокой стоимости дизельного топлива и его экологического вреда предлагаются различные пути: использование возобновляемых источников энергии, т. е. энергии ветра и солнца, однако ветряные и солнечные установки не обладают стабильностью при генерации энергии. Свой вклад вносят суровые климатические условия Северных территорий: если солнечные электропанели занесет снегом, они прекратят вырабатывать электричество, если ветрогенераторы останутся в сильный мороз, то необходимо предусматривать систему их обогрева. Таким образом, установки, работающие на основе возобновляемых источников энергии, могут только дополнить работу дизельных или угольных станций. В этом заключается идея автономных гибридных энергокомплексов, т. е. дизельная станция работает совместно с солнечными панелями и ветрогенераторами, которые снижают расход дизельного топлива. Синхронность работы обеспечивается специальной автоматизированной системой управления.

Другим вариантом решения проблемы энергообеспечения Северных территорий является создание плавучих атомных электростанций. По словам специалистов госкорпорации «Росатом», данные проекты прорабатываются для восточного сектора Арктической зоны. Для западного сектора прорабатывается проект по модернизации существующей АЭС в Мурманской области, снабжающей электроэнергией территории Заполярья и Карелии. Недостатками

использования атомной энергии являются большие инвестиции для постройки АЭС и высокие риски возможных экологических проблем.

Следующим перспективным направлением развития энергетического комплекса Северных территорий является использование технологий по генерации водорода. Минэнерго РФ разработана стратегия развития водородной энергетики до 2024 года. Согласно стратегии, к 2024 году «Газпром» и «Росатом» должны стать первыми в стране производителями водорода и выпустить водородные установки, в том числе и для АЭС [2]. Предполагается создание Арктического водородного кластера, куда войдут Мурманская область, Ямало-Ненецкий автономный округ и Камчатский край. Согласно планам Минэнерго РФ, Северным территориям России отводится роль полигона по внедрению и отработке инновационных экологически чистых и безопасных технологий на безуглеродной основе с использованием водородного топлива, возобновляемых и других источников энергии. Недостатком использования водородных технологий является небезопасное хранение и транспортировка водородного топлива. На сегодняшний день отсутствует технология простого и дешевого способа получения водорода в больших объемах из возобновляемых ресурсов.

В статье предлагается решение проблемы тепло- и электроснабжения Северных территорий России путем использования алюминиевого топлива в качестве источника электрической и тепловой энергии. Алюминий близок по своему энергетическому потенциалу к водородному топливу, но не имеет высокую степень взрывоопасности и малую плотность. По своей распространенности среди металлов в природе алюминий стоит на первом месте, его массовое содержание в земной коре составляет около 9 %. Сегодня 13 % всего производимого в мире алюминия используется в энергетике. При обычных условиях алюминий обладает химической инертностью, при взаимодействии с кислородом покрываясь оксидной пленкой толщиной около 10 нм. Продукты окисления алюминия, наработанные оксиды и гидроксиды, можно использовать в цикле вторичного производства металла на алюминиевом заводе.

Процесс получения энергии из алюминиевого топлива основывается на его химическом окислении. Различают 2 способа получения электрической и тепловой энергии из алюминия: через сжигание водорода, вырабатывающегося в процессе химического окисления металла, и путем прямого преобразования химического окисления металла – анодного окисления алюминия – в электрическую энергию. На способе прямого преобразования основана работа воздушно-алюминиевых электрохимических генераторов. Данные генераторы отличаются составом электролита и окислительно-восстановительными реакциями на электродах. Генератор включает в себя саму воздушно-алюминиевую батарею и вспомогательное оборудование. Срок хранения батареи до приведения ее в действие – более 20 лет, перезарядка батареи осуществляется путем замены блока алюминиевых анодов и электролита. Исследование алюминиевых катодов представлено в работе [3]. На рисунке 1 представлена принципиальная схема электрохимического генератора на основе воздушно-алюминиевой батареи с уравнением суммарной электрохимической реакции.

В России научные изыскания по созданию установок для преобразования алюминиевого топлива в электрическую и тепловую энергию проводятся научными организациями, среди которых: ОИВТ РАН, ГосНИТИ, ИНЭПХФ РАН, МАИ, МГУ [4]. Разрабатываются стационарные установки широкого диапазона мощностей, от 10 кВт до 10 МВт, а также мобильные и резервные генераторы с окислением алюминия в щелочных и солевых электролитах мощностью от 5 до 50 кВт. Разрабатываются портативные генераторы мощностью от 1 до 1000 Вт.

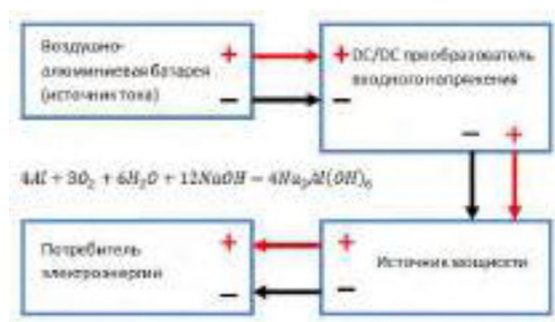


Рис. 1. Принципиальная схема электрохимического генератора на основе воздушно-алюминиевой батареи с уравнением суммарной электрохимической реакции

Применение энергетических установок на основе алюминиевого топлива различной мощности и конструктивного исполнения решает проблему тепло- и электроснабжения Северных территорий России. Преимущества электрохимического генератора на основе воздушно-алюминиевой батареи: 1) Дешевизна алюминия для перезарядки генератора. Устройство не требует частой смены деталей, алюминиевые аноды относительно легко и дешево производить; 2) Долговечность генератора, невозможность его разрядки в нерабочем состоянии. Генератор с алюминиевыми анодами может находиться в нерабочем состоянии десятки лет без потери своих заявленных качеств; 3) Использование генератора в населенных пунктах с суровыми климатическими условиями. В районах Крайнего Севера населенные пункты и промышленные объекты подключены к локальным электрическим сетям. Резервный генератор на основе воздушно-алюминиевой батареи способен дать нужную мощность потребителям электроэнергии; 4) Экологичность генератора и его безопасность для окружающей среды. Химические реакции на алюминиевых анодах, происходящие в генераторе во время его непосредственной работы, не производят вредных выбросов в атмосферу и губительных продуктов горения, как при сжигании углеродного топлива.

В качестве недостатка генератора с алюминиевыми анодами можно отметить отсутствие производства данных генераторов в промышленных масштабах.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузьмин П.С. Активные потребители электроэнергии: обзор инновационных моделей взаимодействия субъектов электроэнергетики и конечных потребителей // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2021. № 12. С. 277 – 368.
2. Жук А.З. Водородные и алюмоводородные накопители в электроэнергетике // Энергетическая политика. 2021. №5. С. 65 – 79.
3. Киселева Е.А. Разработка и исследование газодиффузионных катодов в составе цилиндрических элементов воздушно-алюминиевого электрохимического генератора // Журнал прикладной химии. 2018. №1. С. 65 – 69.
4. Шейндлин А.Е. Распределенная генерация тепловой и электрической энергии на основе возобновляемых источников с использованием алюминия в качестве промежуточного энергоносителя // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 51 – 57.

Научный руководитель: д.т.н. Ю. Л. Липовка, профессор ИСЗиС ИСИ СФУ.



# МОДЕРНИЗАЦИЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС С ВВЭР-1000

В.В. Цветкова

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5071

## **Введение**

Серийный паровой компенсатор давления (КД) имеет конструктивные недостатки, которые приводят к сокращению срока службы оборудования и трубопроводов системы, а также к сложностям управления системой компенсации давления в переходных режимах [1].

Во-первых, в переходных процессах при включении групп трубчатых электронагревательных элементов (ТЭН) в теплоносителе первого контура наблюдается развитое кипение. Известно, что по нормам ведения ВХР в теплоносителе растворены определенные газы. Газы концентрируются в верхней части парового объема КД, тем самым ухудшая упругие свойства паровой подушки, а также водородобезопасность первого контура.

Сдвух парогазовой смеси из КД в барботер, для которой предусмотрена отдельная разветвленная система, в стационарном режиме составляет 250 кг/ч. Очевидно, что в процессе сдвух также происходит потеря некоторого объема теплоносителя, который необходимо восполнять водой необходимого качества с добавлением аммиака и гидразин-гидрата [2].

Во-вторых, при работе энергоблока в стационарном режиме в КД включены 1-2 группы ТЭН малой мощности для компенсации тепловых потерь в самом КД. Таким образом, температура некоторого объема воды, находящегося в нижней части, под ТЭНами, ниже температуры насыщения при давлении в КД. Следовательно, данный объем не может участвовать в переходных процессах регулирования давления.

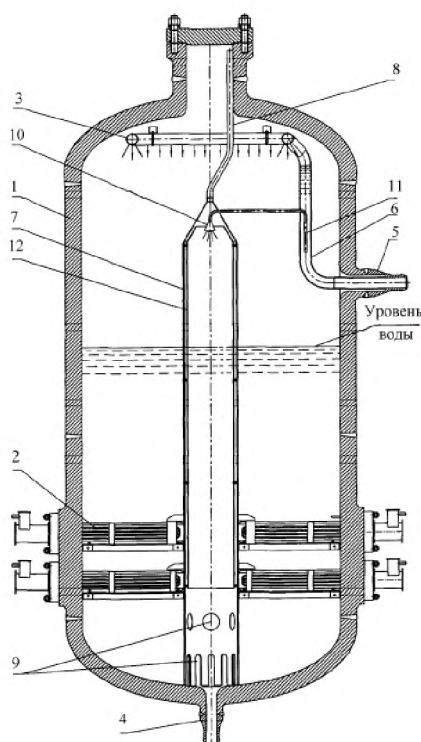
Прогрев этой части водяного объема путем включения дополнительных групп ТЭН нецелесообразно, так как за этим последует рост давления и включение впрыска из «холодной» нитки первой петли. Это приведет к дополнительным затратам энергии на догрев до температуры насыщения некоторой массы «холодной» воды, помимо прогрева водяного объема под ТЭНами.

В-третьих, из-за расположения штуцера трубопровода впрыска «холодной» воды в верхнем днище КД, трассировка трубопровода предполагает вертикальный опускной участок до штуцера, и горизонтально расположенный участок внутри КД в паровом объеме. Для поддержания температурного режима трубопровода и штуцера в системе КД предусмотрена постоянная протечка. Однако, протечка малого расхода заполняет только часть сечения трубопровода. Остальная же часть прогревается паром от паровой подушки, то есть часть трубопровода находится при температуре близкой к температуре насыщения в КД, а другая часть заполнена «холодной» водой с напора ГЦН первой петли. Следовательно, при полном открытии арматуры впрыска участки трубопровода и штуцера, прогретые паром, испытывают термические напряжения, что приводит к сокращению срока службы трубопровода.

Таким образом, основной целью данной работы является разработка проектного решения модернизации внутрикорпусных устройств компенсатора давления с целью минимизации описанных выше недостатков.

## **Описание модернизации внутрикорпусных устройств КД**

На рисунке 1 представлен упрощенный чертеж модернизированного компенсатора давления. Данная модернизация была запатентована в 2003 году ОКБМ им. Африкантова. Прототипом данного технического решения был патент 1985 года Технического научно-исследовательского института им. Ф.Э. Дзержинского [3].



*Рис. 1. Модернизаций ВКУ КД [4]:*

- 1 – корпус КД; 2 – ТЭН; 3 – душирующее устройство; 4 – патрубок подвода/отвода ТН;  
 5 – патрубок; 6 – трубопровод подачи охлаждающей воды; 7 – кожух; 8 – труба теплообменника;  
 9 – отверстия, соединяющие внутреннюю полость кожуха с нижним объемом КД;  
 10 – дополнительное душирующее устройство; 11 – трубопровод подачи воды во внутреннюю  
 полость кожуха; 12 – теплоизоляционный экран*

Основной модернизацией является установка в объеме КД кожуха, внутренняя полость которого в верхней части сообщается с паровым объемом КД (причем верхний конец входной трубы теплообменника расположен максимально близко к верхней части парового объема КД, так как именно в этой части наблюдается наибольшее скопление неконденсирующихся газов, подлежащих удалению из парового объема), а в нижней части, посредством отверстий (9) с частью более холодного водяного объема под ТЭНами. В верхней части внутренней полости кожуха размещено дополнительное душирующее устройство. Сама верхняя часть выполнена в виде конуса, конгруэнтно конфигурации душирующего устройства.

Таким образом, внутренний кожух разделяет КД на два объема: большой – пространство между внутренними стенками КД и кожухом и малый – внутри кожуха. Большой объем выполняет основную функцию – компенсации давления, в нижней части он заполнен на две трети водой при температуре насыщения, а в верхней части – почти чистым водяным паром.

В малый объем посредством конической формы кожуха организован подсос неконденсирующихся газов с целью дегазации теплоносителя. В нижней части малый объем сообщается с нижней частью большого объема через специально предусмотренные отверстия для прогрева теплоносителя под ТЭНами.

Также в кожухе организовано дополнительное душирующее устройство (воронка), конец которого заглублен в раздающую трубку основного впрыска. Такая конструкция позволяет осуществлять постоянный впрыск в малый объем и создание дополнительного эжектирующего эффекта для подсоса неконденсирующихся газов, которые конденсируются на факеле капель и струй «холодной» воды с напора ГЦН.

Штуцер трубопровода основного впрыска перемещен на верхнюю обечайку корпуса КД. Таким образом постоянной протечке передается часть теплоты парового объема, и термические напряжения в трубопроводе впрыска снижаются, тем самым увеличивая срок эксплуатации трубопровода и штуцера.

## **Заключение**

Описанное техническое решение способно продлить срок эксплуатации трубопровода впрыска КД, а также оптимизировать регулирование в переходных режимах. Для более детальной проработки проекта модернизации необходимо провести конструкторский расчет модернизированного компенсатора давления, а также оценить термические напряжения трубопровода впрыска.

Расчет будет проводиться для 4-го энергоблока Балаковской АЭС. Расчет модернизированного КД целесообразно вести на мощность  $N = 107 \% N_{\text{ном}}$ , так как на 4-ой энергоблоке БалАЭС ведутся расчеты по переходу на данный уровень мощности, следовательно, некоторое оборудование будет заменено и/или модернизировано. В этой связи возможно подготовить проект модернизации ВКУ КД.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Инструкция по эксплуатации. Первый контур реакторной установки ИЭ.4.УА.РЦ-2/03. – Балаково: Изд-во Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2021. – 113 с.
2. Техническое описание. Система компенсации давления первого контура. ТО.1,2,3,4.УР.ОИТПЭ/116. – Балаково: Изд-во Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2017. – 115 с.
3. Система компенсации давления атомной энергетической установки: пат. СССР, No 1017108, заявл.16.10.1981; опубл. 30.12.1985. Бюл No 48. – 4 с.
4. Паровой компенсатор давления: пат. Рос. Федерация, No 2254626. заявл. 21.08.2003; опубл. 20.02.2005. Бюл. No 17. – 7 с.
5. Разработка методики расчета давления в первом контуре в условиях больших течей в моделях экспресс-оценки для информационно-аналитического центра ростехнадзора/ Кавун О. Ю. и Пипченко Г. Р. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2020. – Т. 3. – No 97. – С. 23-31.
6. Мысенков А.И. Теплогидравлический расчет ЯЭУ с ВВЭР (Методика и алгоритм нестационарного расчета). – Москва: Изд-во Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1985. – 36 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.М. Антонова, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РУЧНОГО НАСОСА**

Ш.С. Ашуров

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ имени И.Н. Бутакова, группа 5БМ12

При подготовке квалифицированных инженеров энергетической отрасли особую важность имеют компетенции проектирования различного оборудования включая компетенции проведения механических, прочностных и гидравлических расчетов. Дисциплина «Компьютерное моделирование объектов проектирования» основной образовательной программы подготовки магистров «Тепловые и атомные электрические станции» направлена на изучение системы автоматизированного проектирования Siemens NX [1], которая используется в конструкторских бюро и проектных организациях ОАО «Силовые машины», ГК «Росатом» и др. В рамках дисциплины выполняется моделирование сборочного узла, проведение расчетов на прочность одной из деталей и гидравлический расчет потока жидкости внутри сборочного узла. Исходные данные представлены на рисунке 1.

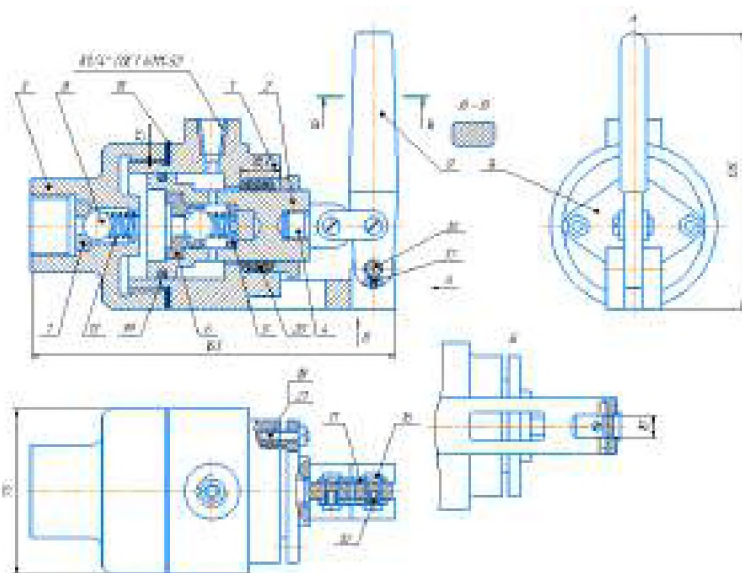


Рис. 1. Сборочного узла ручного насоса

По исходным чертежам были смоделированы детали сборки и создана сборочная модель при помощи сопряжений соосности, концентричности, выравнивания по касанию и центрирования. Результат сборки и продольный разрез показаны на рисунке 2.

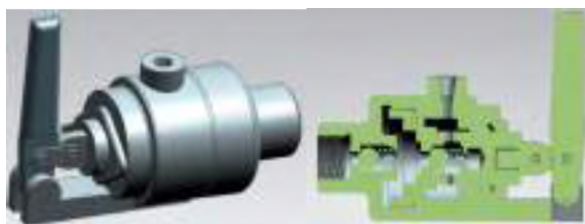


Рис. 2. Результат создания модели сборочного узла

Механические расчеты на прочность проводились на сеточной модели рукоятки насоса с использованием решателя Nastran. Наложено ограничение (фиксация) к поверхности нижнего отверстия и нагрузка (сила 30 Н) к одной из поверхностей рукоятки (рисунок 3). Там же справа отображен результат расчета.

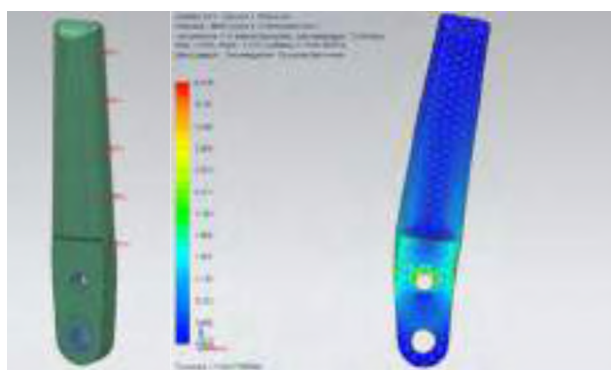


Рис. 3. Расчет модели рукоятки на прочность

### Заключение

1. При нагрузке 30 Н (3,05 кг) максимальное напряжение по Мизесу (4,58 МПа) не превышает предел текучести стали 40 (280 МПа при  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
2. При нагружении рукоятки в верхнем и нижнем отверстиях возникает сила реакции, вызванная сопротивлением движения поршня. Максимальное значение силы реакции 8,64 Н.

3. Деталь удовлетворяет условиям прочности.

Для моделирования потока жидкости в насосе сформирована область течения потока при помощи соответствующей команды интерфейса «Расширенная симуляция» [2, 3]. Создана конечно-элементная модель и симуляция с решателем NX Thermal/Flow, тип анализа Coupled Thermal/Flow. В сеточной модели использована тетраэдральная сетка, размер элемента сетки подбирался исходя из баланса детализации решения и скорости расчетов (рисунок 4). Материал среды – вода. В расчетной модели были определены граничные условия потоков первого рода. Для входного потока скорость 1 м/с и температура 20 °С. Для выходного потока граничное условие типа «Открытие».

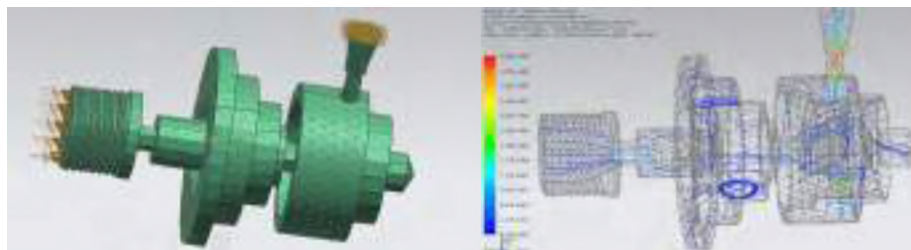


Рис. 4. Сеточная модель области течения и визуализация линий потока

Результаты расчета отображаются в «Навигаторе постпроцессора» (рисунок 5).



Рис. 5. Скорость потока в среднем продольном сечении

### Заключение

1. Скорость потока возрастает до 20 м/с в каналах поршня и до 39 м/с в сужении выходного патрубка.
2. Давление в насосе повышается на сжатии до 1,7 МПа.
3. Температура потока возрастает незначительно. Наибольшая температура сосредоточена у выходного канала, вследствие ускорения потока и повышения кинетической энергии.

В результате выполнения работы по моделированию сборочного узла и проведению расчетов формируются необходимые компетенции (знания и умения) для последующей работы над более сложными проектами моделирования энергетического буроводания.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
2. Гончаров П. С., Артамонов И. А., Халитов Т. Ф. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
3. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Практическое пособие. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 112 с.

Научный руководитель: к.т.н. В.В. Беспалов, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

**RADON AND ITS DECAY PRODUCTS DYNAMICS INSIDE  
THE ACCUMULATIVE CHAMBER**

E. Yeboah<sup>1</sup>, G.A Yakovlev<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Tomsk polytechnic university, <sup>2</sup>Tomsk state university,  
ИЯТШ, группа А1-43И

The basic requirement for this work was the need for a simple, reliable, and cheap method of using an accumulative chamber to measure radon flux density. A high sampling frequency is needed because the final goal is to acquire radon field data in a continuous, informative time series. At the monitoring stations, the accumulative chamber as well as radon pore activity measurement devices used in the soil and air will enable us to improve the accuracy of the predictive estimate. In addition, it will help in the specification and determination of the radon transport model parameters in the ground atmosphere and geological medium. The simulation of radon and its decay products' dynamics inside the accumulative chamber was the main goal of this research work.

The radon and its decay products' dynamics inside an accumulative chamber with a constant radon flux of  $10 \text{ mBqm}^{-2}\text{s}^{-1}$  from the soil surface at a volume of 3,14 liters, a height of 0,1 m, and an accumulative time of 1 hour selected based on optimal conditions were determined. The volumetric activity dynamics of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{218}\text{Po}$  at different radon flux densities ( $5\text{-}20 \text{ mBqm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) were also determined. Furthermore, the changes in the ratio of the decay product activity to the radon activity over time were calculated, as well as the ionizing radiation yield dynamics per radionuclide nuclear decay. The change in ionizing particles and gamma rays produced in 5 minutes was calculated, and the dynamics of the ion production rate were studied using different types of radon radiation as well as gamma radiation from soil radionuclides. The accounting of thorium and its decay products was also calculated.

Figure 1 shows the radon and its daughter nuclides' dynamics with a constant radon flux of  $10 \text{ mBqm}^{-2}\text{s}^{-1}$  in an accumulative chamber. The result showed that at a constant radon flux of  $10 \text{ mBqm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , the radon activity in the accumulative chamber reached  $350 \text{ Bqm}^{-3}$ , and the volumetric activities of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{218}\text{Po}$  increased linearly over time and can be written as:  $A_{1,2}(t) = at + b$ . The coefficients "a" and "b" for  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{218}\text{Po}$  were similar to integers as the radon flux was changed for the function of linear approximation, as shown in figure 2. This shows that they are determined by intensity value  $K$ .

Figure 3 represents the changing ratio of the decay product activity to radon activity over time. From the graph, it can be seen that in an hour, the activity of  $^{218}\text{Po}$  reached 90 %,  $^{214}\text{Pb}$  reached 40% and,  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Po}$  both reached 20 %. Furthermore, the beta and gamma radiation yields were approximately two times less than the alpha particle, so the alpha particle of radon and its daughter nuclides are primarily used for radon flux density measurements, as shown in figure 4. Figure 5 shows that when the gamma rays and ionizing particles produced in 5 minutes were changed, the flux of the alpha particles registered by a detector was twice that of the gamma radiation and beta particles under the same conditions. The curves of the combined radiation of the beta and gamma and the alpha particles, on the other hand, overlapped in the accumulative period of 90 minutes.

Figure 6 represents the rate at which various radon radiation types and the amount of gamma radiation emitted by soil radiation. The beta and gamma radiation contributed no more than 10– 12 ion-pairs  $\text{cm}^{-3}$  to the total ions produced in the accumulative chamber. After 15 min the alpha radiation-induced ion production was higher than the background value produced by the soil radionuclides.

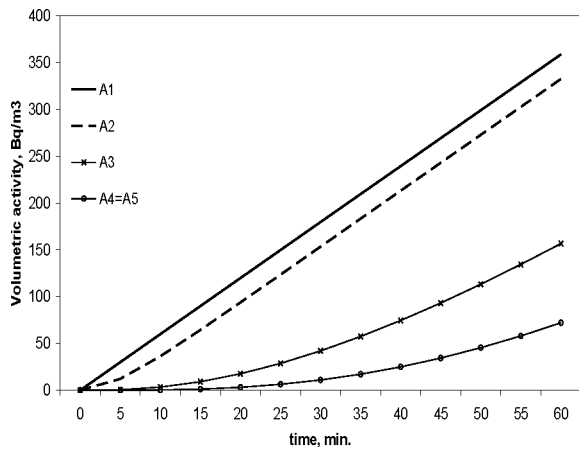


Fig. 1. Radon and its daughter nuclides dynamics in an accumulative chamber at the surface of the soil with a constant flux density of radon

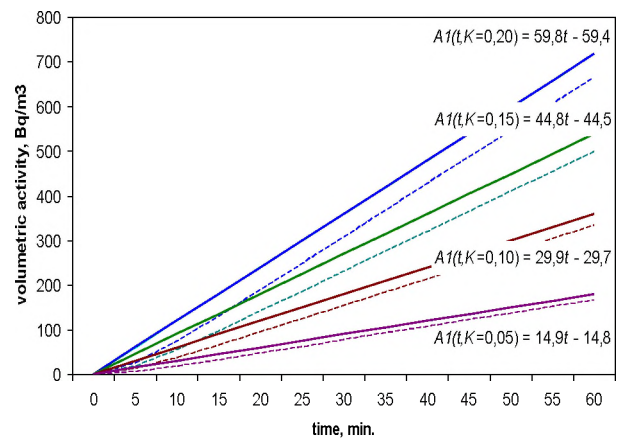


Fig. 2. The dynamics of volumetric activity for  $^{218}\text{Po}$  are represented with dotted line and that for  $^{222}\text{Rn}$  are represented in solid line at different intensities ( $K$  values)

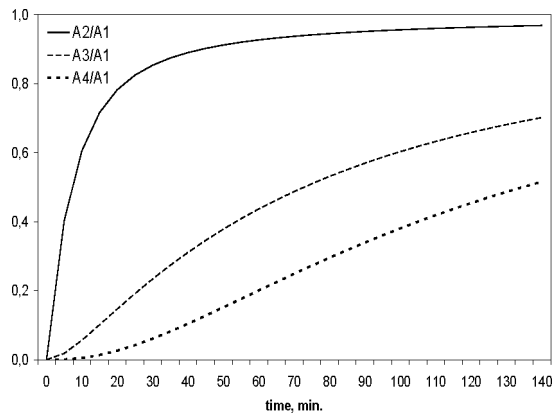


Fig. 3. The ratio of decay product activity to radon activity changes over time

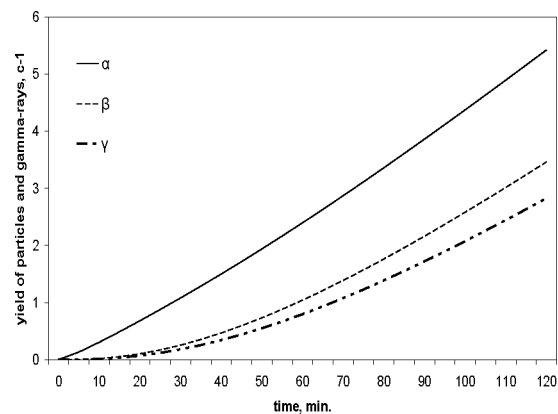


Fig. 4. Ionizing radiation yield dynamics inside the accumulative chamber

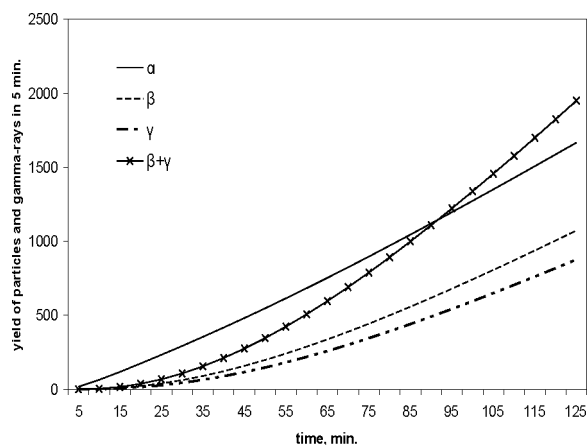


Fig. 5. The formation of the gamma-rays quantity and ionizing particles dynamics in 5 minutes

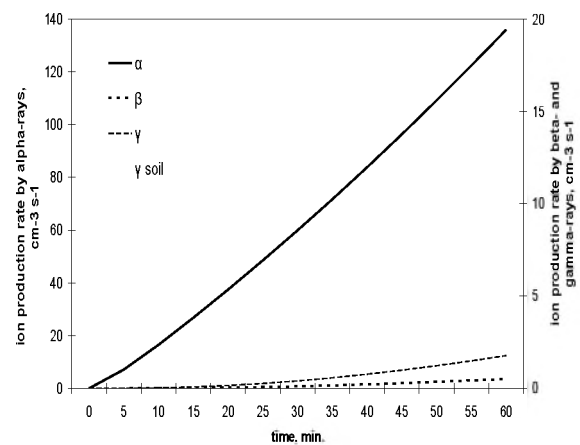


Fig. 6. The rate at which various types of radon radiation, DPR, and gamma-radiation of radionuclides of the soil produces ion

The dynamics of the volumetric activity of thoron and its daughter nuclides in the accumulative chamber are shown in figure 7. Figure 8, depicts the regularities in the dynamics of the yield of the ionizing radiation at the decay of radionuclides accumulating inside the chamber as well as the dynamics of the rate by which this radiation produces ions. From fig. 7, it is evident that the accumulative curves for  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  showed a significant difference due to the difference between the half-

lives of the parent and their daughter radionuclides. Both  $^{216}\text{Po}$  and thoron have similar accumulative curves. After the chamber is shut, they reach saturation in 6–7 min, and remain nearly constant for the duration of the accumulation period. The activity of thorium decay products and  $^{212}\text{Pb}$  accumulates insignificantly, about 6 % of thorium activity because of their long half-life. These specific differences in the regularities of thorium and radon accumulation inside the chamber can be accurately used for flux density measurements. The alpha-particles yield dynamics in figure 8 are caused by  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  and  $^{212}\text{Po}$  nuclei accumulating inside the accumulative chamber. Gamma-rays and beta radiation yields are caused by  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  and  $^{208}\text{Tl}$  nuclei accumulating.

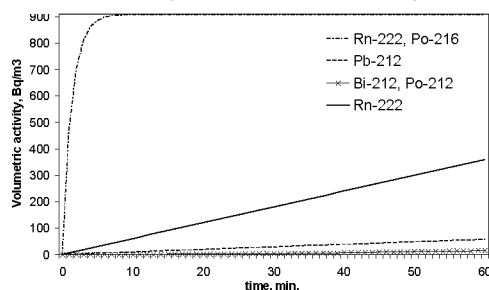


Fig. 7. Radionuclides volumetric activity dynamics inside the accumulative chamber

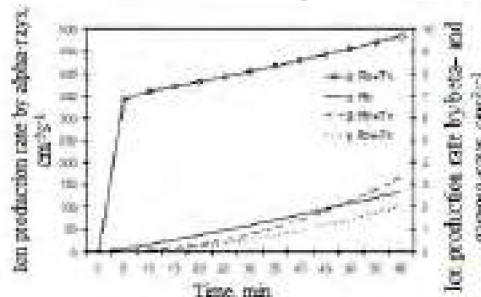


Fig. 8. Dynamics of the rate by which various types of radon, thoron, and their decay products produces ion

The presented works were performed to determine the use of the obtained regularities in the selection and design of a method and device to measure, from the surface of the ground, the flux density of radon. The results showed that because there is only one variable quantity, the soil radon entry K-intensity into the chamber, they have a qualitative character but are effective for quantitative estimation. Furthermore, they are generally beneficial to the measurement-counting regime and can serve as a useful guide for the development of new methods. In addition, the following conclusions can be made for the calculation of the dynamics for radon and its daughter product; for the registration of alpha-radiation: Tn and its daughters' contribution to a detector signal is approximately 80 % if 30 minutes counting and in 60 % if 60 minutes counting. For registration of  $\beta$ -particles and/or  $\gamma$ -rays the contribution, of Tn and its daughters in a detector signal is approximately 25 % if 30 minutes counting and in 15 % if 60 minutes counting. For registration of the number of ions, the contribution of Tn and its daughters in a detector signal is approximately 95 % in the first 10 minutes counting.

Supervisor: Doctor of Technical Sciences V.S. Yakovleva, Professor School of Nuclear Technology Engineering TPU.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ

А.К. Берикболов<sup>1</sup>, А.Д. Мисюкова<sup>1</sup>, С.А. Янковский<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет,  
ИШЭ, группа 5БМ11<sup>1</sup>, доцент НОЦ И.Н. Бутакова<sup>2</sup>

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов термической конверсии смесевых твердых топлив с учетом изменения их влагосодержания с получением трех полезных продуктов: углерод, жидкие углеводороды, синтез-газ. Применена методика приготовления топливных смесей, торфа с древесными отходами путем их смешения для термического разложения с последующим получением полезных продуктов. Эксперименты проводились при температуре  $560 \pm 2$  °С на экспериментальном стенде. Получены синтез-газ, твердый



остаток в виде шлама и жидкие углеводороды. Установлено, что при термическом разложении смеси торфа и древесных опилок в соотношении по массе ТО 25 % / ДО 75 % выход горючих компонент был наиболее высок.

### **Введение**

Запасы нефти и газа в мире постепенно сокращаются, вследствие чего переход к возобновляемым видам ресурсов для промышленности и энергетического комплекса является достаточно перспективным направлением развития. Под возобновляемым углеводородным сырьем обычно понимают различные виды биомассы [1]. Использование отходов переработки растительного сырья (древесных опилок, щепы, стружек) является жизнеспособной альтернативой нефти и потенциальным сырьем для термической переработки. Эффективное использование данных отходов для получения ценного сырья (газообразного топлива) является одной из важнейших задач для энергетиков на сегодняшний день [2]. Один из возможных вариантов решения этой задачи – переработка отходов методом пиролиза совместно с низкосортными видами топлив, например, торфом. Пиротопливо, получаемое по технологии пиролиза, пригодно для прямого сжигания в котлах и способно заменить некоторые невозобновляемые источники энергии [3]. Синтез-газ получаемый при пиролизе смесевых топлив может быть применим в двигателях внутреннего сгорания и в газовых турбинах. Жидкие углеводороды могут стать частичной заменой мазутному топливу. В связи с вышеизложенным переработка смесевых топлив методом пиролиза [4] является достаточно актуальным направлением исследований. Таким образом, разрабатываемая технология в комплексе позволит переработать растительные отходы в местах их возникновения совместно с низкокалорийными топливами в несколько видов полезных продуктов с высокой добавочной стоимостью.

Целью данной работы является исследование процессов термической конверсии смесевых твердых топлив на основе торфа и отходов лесопиления (с изменением доли последней в смеси до 50 %) с мониторингом одного из получаемых полезных продуктов синтез-газа.

### **Методика экспериментальных исследований**

Смесевое топливо было сформировано на основе торфа (Суховское месторождение, Россия), и отходов лесопиления (ООО «Дзержинский ЛПК», Россия).

Методика приготовления топливных компонентов для смеси осуществлялась в лабораторных условиях при температуре 293 К, давлении 101,3 кПа и влажности 75 %. Отходы деревообработки и торфа предварительно очищали от крупных включений и мусора, сушили в течение суток для удаления избыточной влаги при температуре 293 К. Для измельчения торфа и древесных опилок использовался лабораторный измельчитель Stegler LM-1000. Затем при помощи рассева лабораторного РЛ-1 и набора сит (ГОСТ Р 51568-99) отбиралась проба со средним размером частиц: для торфа менее 80 мкм, а для древесных опилок менее 200 мкм. Подготовка навесок топливных смесей осуществлялась при помощи аналитических весов ViBRA NT 84RCE (дискретность измерения –  $10^{-4}$  г), исходя из расчета массы готового состава и соответствующих массовых долей топливных компонент. Эксперименты проводились с разными пропорциями по массе торфа (ТО) и древесных опилок (ДО) в смеси: 1) ТО\_100 %; 2) ТО\_90 % / ДО\_10 %; 3) ТО\_75 % / ДО\_25 %; 4) ТО\_50 % / ДО\_50 %; 5) ТО\_25 % / ДО\_75 %; 6) ДО\_100 %. Для смешения топливных компонент и равномерного распределения частиц в смеси проводился процесс перемешивания в течение 7 минут шаровой барабанной мельнице. Полученная однородная смесь, подготовленная в разных пропорциях по массе, помещалась в тигель для эксперимента.

На рисунке 1 приведена схема экспериментального стенда, разработанного для исследования процессов пиролиза топливных композиций.

В первую очередь навеска массой 8 г взвешивалась на аналитических весах (15), после взвешивания помещалась в тигель (3), затем тигель крепили в нагревателе воздуха (1). Тигель с левой стороны крепился на металлический газоотводящий канал (8), и с правой стороны на термопару (4). С помощью нагнетателя воздуха (2), воздух подавался в оздухонагреватель (1), с помощью которого нагревался тигель с навеской до температуры 560°C внутри тигля. После достижения необходимой температуры процесс поддержания температуры осуществлялся до

прекращения формирования газовых компонент, которые прекращали регистрироваться газоанализатором (13). Для осуществления защиты датчиков газоанализатора сформирована система газоочистки от смол и твердых летучих частиц (11,12). Жидкие продукты пиролиза накапливались с помощью системы конденсации в охладителе (9). Проанализированные газовые компоненты после газоанализатора (13) выводились через вентиляцию (16). Принципиальная схема экспериментального стенда приведена на рисунке 1.



*Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда, предназначенного для исследования процессов пиролиза топливных композиций:*

*1 – нагреватель воздуха; 2 – нагнетатель воздуха; 3 – тигель с приготовленной топливной композицией; 4 – термопара; 5 – канал связи с электронным преобразователем сигнала термопары; 6 – электронный преобразователь сигнала термопары; 7 – канал передачи данных с преобразователя сигнала термопары к моноблоку; 8 – газоотводящий канал; 9 – конденсирующее устройство жидких углеводов; 10 – газоотводящий канал с системой очистки смол и мелкодисперсных частиц, находящийся в газовой среде; 11, 12 – фильтры очистки газа от пыли и смол; 13 – газоанализатор; 14 – моноблок; 15 – аналитические весы; 16 – вытяжная вентиляция*

### **Результаты экспериментальных исследований**

Анализ углеродного остатка показал существенное изменение веса диапазон изменений составил 28-30 % от исходной массы топливной навески. Типичные результаты исследования газовых компонент при разложении топливных смесей, приведены на рисунке 2.

Анализ рисунка 2 показал следующие результаты, повышение температуры пиролиза до 560 °С приводит к увеличению интенсивности выделения  $H_2$  (рисунок 2, б). Максимальную подынтегральную площадь показал анализ газов при разложении смеси топлив соотношении по массе равных 50 %, дальнейшее увеличение доли древесной компоненты в смеси не привело к улучшению синергетического эффекта.

На рисунке 2 г, д, наблюдается тот же синергетический эффект по увеличению выхода горючих компонент  $CO$  и  $CH_4$  их подынтегральные площади кривых для топливной смеси в соотношении компонент равных по массе существенно больше остальных смесевых топлив. В этом эксперименте при разложении карбоксильной и гуминовой кислоты в макромолекулярной структуре торфа образуется значительное содержание диоксида углерода, что является не совсем положительным для горючих компонент в составе газовой смеси. Однако основные источники  $CO$  обширны. К ним относится разложение фенольных гидроксильных и карбонильных групп, а также расщепление эфирных связей, окисгенированных гетероциклов и расщепление короткоцепочечных алифатических углеводов, которые также могут образовывать  $CO$ .

Анализ газовых компонент позволяет сделать вывод, что увеличение доли биомассы до 50 % в смеси приводит к существенному синергетическому эффекту формирования горючих газовых компонент, а дальнейшее увеличение доли последней в смеси этот эффект не усиливает, а наоборот даже его снижает, что позволяет сделать вывод, что состав смесевоего топлива на основе торфа и биомассы (отходы лесопиления) наиболее оптимален при соотношении компонент торф / древесина равных по массе.

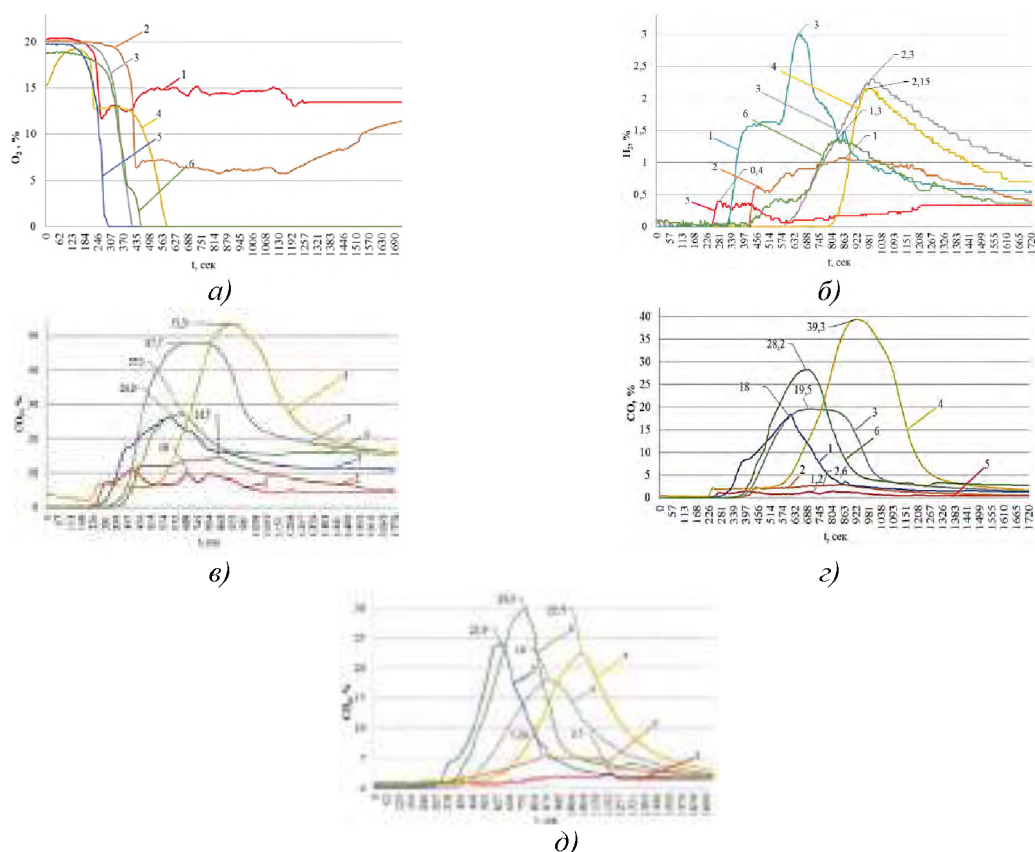


Рис. 2. Изменение зависимости объемных долей газов от времени термического разложения смесевых топлив при разных соотношениях их по массе:

$O_2$  (а),  $H_2$  (б),  $CO_2$  (в),  $CO$  (г),  $CH_4$  (д)

1 – торф\_100 %, древесина\_0 %; 2 – торф\_90 %, древесина\_10 %; 3 – торф\_75 %, древесина\_25 %; 4 – торф\_50 %, древесина\_50 %; 5 – торф\_25 %, древесина\_75 %; 6 – торф\_0 %, древесина\_100 %

## Заключение

На основании результатов выполненных экспериментальных исследований процессов термической конверсии смесевых твердых с учетом изменения соотношений топлив с получением трех полезных продуктов, можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение доли древесной биомассы до 50 % в составе смесевоего топлива на основе торфа способствует увеличению выделения горючих газов, в частности водорода, метана и оксида углерода;

2. Результаты непрерывного газового анализа показали, что увеличение скорости нагревания положительно сказывается на пиковой температуре, соответствующей максимальной скорости потери массы. На основе анализа экспериментальных исследований можно сделать вывод, что большое влияние на образование  $CH_4$  оказывает температура пиролиза. При более высоких температурах метиленовая группа, связанная с ароматическим соединением в макромолекулярных структурах торфа, может легче реагировать с водородом в образовании  $CH_4$ .

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Lavrenov V.A., Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A., "High Temperature". – 2016. – Т. 54. – No 6. С. 892-898.
2. Эффективность применения пиролизной технологии для получения альтернативного топлива из местных органических отходов / Г. Н. Узаков, Р. Т. Раббимов, Л. А. Алиярова, С. А. Рахимов // Молодой ученый. – 2014. – No 4. – С. 280-283. – URL: <https://moluch.ru/archive/63/9689/>.

3. Успехи и проблемы производства альтернативных источников топлива и химического сырья. Пиролиз биомассы / Д. Л. Рахманкулов, Ф. Ш. Вильданов, С. В. Николаева, С. В. Денисо // Уфимский государственный нефтяной технический университет. Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15. – No 2. – С. 17.
4. Li Y. [and others], "Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends: Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics" // Fuel. 2022. № PB (310). С. 122280.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2021-0008.

Научный руководитель: к.т.н. С.А. Янковский, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ИМИТИРОВАННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Тавадрос Мина Сами Булес  
Томский политехнический университет  
ИЯТШ, ОЭЭ, группа 0АМ1И

Процесс эксплуатации атомных электростанций, исследовательских реакторов и прочих объектов, чья деятельность связана с обращением радиоактивных материалов, сопровождается возникновением радиоактивных отходов [1]. Их утилизация (переработка) или захоронение традиционными методами (сжигание или захоронение под слоем почвы) без предварительной обработки запрещена международными требованиями по обращению с радиоактивными материалами [2]. Объясняется это тем, что в случае простого захоронения радиоактивных материалов возможно заражение почвы, грунтовых вод и, как следствие, увеличение объемов радиоактивных материалов [3]. Последние, в виде воды, зараженных растений могут быть употреблены в пищу животными, а впоследствии и человеком [4]. В результате чего возможно их радиационное заражение. В таком случае, возникает необходимость их утилизации с целью дальнейшего нераспространения радиоактивных веществ в окружающей среде. Одним из наиболее перспективных методов утилизации таких зараженных биологических материалов является способ высокотемпературной плазменной переработки [5].

Плазменная переработка материалов позволяет существенно снизить количество материала. А в случае применения такого метода для утилизации радиоактивных материалов возможно существенное сокращение их массы и объема. После этого их уже можно достаточно безопасно захоронить с учетом современных требований [6]. Но при этом, развитие и внедрение таких (плазменная переработка) новых технологий невозможно без фундаментальных исследований. Поэтому целью работы являются проведение экспериментальных исследований утилизации имитированных радиоактивных отходов в высокотемпературной плазме на примере биологического материала животного происхождения.

Экспериментальные исследования выполнены на уникальном оборудовании, позволяющим проводить экспериментальные исследования плазменной обработки материалов в широком диапазоне мощностей [7].

При проведении экспериментов в качестве имитированного зараженного радиоактивного материала использовалась мышечная масса крупного парнокопытного млекопитающего животного. Масса образцов составляла по 2 грамма.

Основные параметры плазменной переработки в тигле приведены в таблице 1. Все образцы обработаны в одном временном диапазоне 40 секунд удержания плазменной дуги над образцом и изменением тока с шагом 12,5 А от 50 до 100 А, установленных на источнике питания. Параметры тигля:

1. Высота – 30 мм. 2. Радиус – 30 мм. 3. Толщина стенок – 4 мм.

Параметры крышки для тигля:

1. Радиус – 30 мм. 2. Высота – 5 мм.

Толщина стержней: 10 мм анод и катод.

Таблица 1. Параметры процесса

Код эксп.	Вес электрода 1 (катода), гр		Вес электрода 2 (анода), гр		Вес тигля, гр		Вес крышки, гр		Вес исходного сырья, гр	Вес продукта, гр
	До	После	До	После	До	После	До	После		
1	8,9112	8,9108	13,5784	13,5213	11,5589	12,0682	4,0293	4,0317	2,0816	0,3760
2	8,8250	8,8130	13,4363	13,3348	11,6894	11,6134	4,0302	4,0205	2,0593	0,0620
3	8,7430	8,7549	13,1501	12,9163	11,5514	11,5517	4,0194	3,9659	2,0118	0,0145
4	8,6826	8,6638	12,7380	12,6045	11,3613	11,4093	3,9634	3,9347	2,0311	0,0882
5	8,6087	8,6236	12,4981	12,2388	11,3213	11,1761	3,9311	3,8790	2,0649	0,0227

Ниже на рисунке 1 показана графическая интерпретация результатов экспериментов.

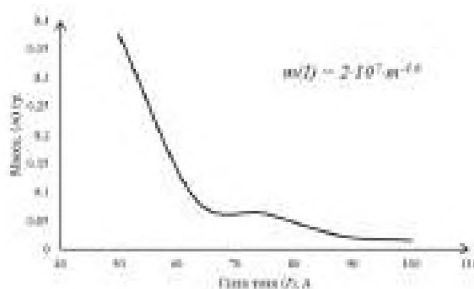


Рис. 1. Изменение массы образца

По результатам проведенных экспериментальных исследований утилизации имитированных радиоактивных отходов на примере образцов (начальной массой 2 грамма) мышечной массы крупного парнокопытного млекопитающего животного установлено, что при изменении силы тока от 50 до 100 А масса исходного образца снижается на 80 и 99%, соответственно. Полученное аппроксимационное выражение позволяет прогностически оценивать влияние изменения массы исследованного материала в условиях плазменной переработки.

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что применение метода плазменной утилизации радиоактивных материалов животного происхождения достаточно эффективен. Его использование на практике позволяет существенно сократить количество радиоактивных отходов такого типа для дальнейшего безопасного захоронения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. IAEA, 2011. Disposal of radioactive waste. Safety Standards Series, SSR-5 454–8.
2. J. Ahn, M.J. Apted. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste (second ed.), Elsevier (Woodhead), Cambridge (2017), p. 778.
3. T.E. Payne. Little Forest Legacy Site – Summary of Site History Until the Commencement of Waste Disposal in 1960 (ANSTO E-782): Institute for Environmental Research. Australian Nuclear Science and Technology Organisation (2015).
4. S.J. Birkinshaw, M.C. Thorne, P.L. Younger. Reference biospheres for post-closure performance assessment: inter-comparison of SHETRAN simulations and BIOMASS results. J. Radiol. Prot., 25 (2005) (2005), pp. 33-49.
5. E.S.P. Prado, F.S. Miranda, L.G. Araujo, G. Petraconi, M.R. Baldan, A. Essiptchouk, A.J. Potiens Jr. Experimental study on treatment of simulated radioactive waste by thermal plasma: Temporal evaluation of stable Co and Cs. Annals of Nuclear Energy. Volume 160, 15 September 2021, 108433.
6. BIOPROTA. BIOMASS 2020: Interim Report, vol. 6, IAEA MODARIA II working group (2018). ISSN 1402-3091, SKB R-18-02.

7. A.Ya. Pak, K.B. Larionov, E.N. Kolobova, K.V. Slyusarskiy, J. Bolatova, S.A. Yankovsky, V.O. Stoyanovskii, Yu.Z. Vassilyeva, V.E. Gubin. A novel approach of waste tires rubber utilization via ambient air direct current arc discharge plasma. Fuel Processing Technology. Volume 227, March 2022, 107111.

Научный руководитель: к.т.н. Д.В. Гвоздяков, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ВЫПОЛНЕННОГО НА ОСНОВЕ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ БИОМАССЫ

А.Ж. Калтаев<sup>1</sup>, К.Б. Ларионов<sup>1,2</sup>, В.Е. Губин<sup>1</sup>

Томский политехнический университет<sup>1</sup>

Кузбасский государственный технический университет<sup>2</sup>

ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова<sup>1</sup>, группа А1-46<sup>1</sup>

Биомасса является устойчивым возобновляемым ресурсом и может стать заменой ископаемого топлива [1]. Согласно данным [2] ежегодное количество получаемого электричество из биомассы за последние 20 лет возросло в 4 раза (рисунок 1). Учитывая постоянно растущее потребление электричества [3] применение биомассы в качестве топлива является перспективным.

Однако биомасса обладает рядом недостатков: высокая влажность, малая насыпная, энергетическая плотность и быстрое загнивание [4]. Перечисленные особенности затрудняют использование биомассы в качестве топлива. В настоящее время применяют не биомассу, а продукты её термической или химической конверсии. Термические методы конверсии биомассы такие как пиролиз, газификация, торрефикация и гидротермальное сжижение широко применяются для производства масла, полукокса и газа [5].

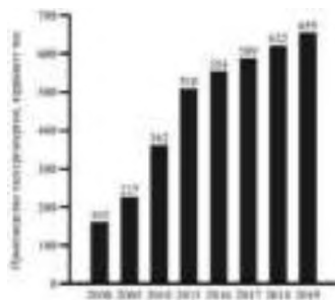


Рис. 1. Производство электроэнергии из биомассы во всем мире с 2000 по 2019 год [2]

“Сырое” масло, получаемое в процессе перечисленных методов, содержит пирогенетическую жидкость (ПЖ), которое негативно сказывается на свойствах масла [6]. К этим характеристикам относятся термическая нестабильность, низкая теплотворная способность из-за высокого содержания воды и фазовая нестабильность [7, 8]. Поэтому ПЖ можно рассматривать как отход термической обработки, который требует дальнейшего обращения.

ПЖ представляет собой смесь воды, органических и неорганических водорастворимых соединений с высокой концентрацией углерода и азота. Наиболее часто встречающимися веществами являются кислоты с короткой цепью, а также и фураны, фенолы, спирты и N-гетероциклические соединения [9, 10]. Учитывая высокие концентрации различных химических веществ, прямой сброс ПЖ в водоемы или в грунт запрещен, поскольку это может привести к загрязнению воды и эвтрофикации [5]. Существуют следующие методы утилизации

ПЖ: выпаривание, утилизация в составе с жидким или твердым топливом [11, 12]. Выпаривание по очевидным соображениям является экономически и энергетически невыгодным. Утилизация же с твердым топливом является как экономически, так и экологически выгодным [13].

Как отмечено авторами работы [14] состав лигноцеллюлозной биомассы влияет на состав конечных продуктов пиролиза. Авторы подчеркивают, что целлюлоза и гемицеллюлоза способствуют получению жидких продуктов пиролиза, а лигнин дает больший выход твердых продуктов. Влияние неорганических минеральных веществ оценить трудно, так как они зависят от условий роста, времени сбора урожая и от типа биомассы. Таким образом, влияние ПЖ полученной после пиролиза различной биомассы на характеристики зажигания и горения можно оценить только экспериментальным способом.

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования для получения характеристик зажигания и горения водоугольных суспензий на основе фильтр-кека и пироге-нетической жидкости, полученной при пиролизе различной лигниноцеллюлозной биомассы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering / G.W. Huber, S. Iborra, A. Corma // *Chemical Reviews*. – 2006. – V. 106. – No. 9. – P. 4044-4098.
2. Biomass electricity generation worldwide from 2000 to 2019. Statista. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/481743/biomass-electricity-production-worldwide/> (Дата обращения: 07.11.2022).
3. BP Statistical Review of World Energy // *British petroleum*. – 2021. – 60 p.
4. Сухоцкий А.Б., Фарафонов В.Н. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Минск: БГТУ, 2009. – 246 с.
5. Valorization of the aqueous phase produced from wet and dry thermochemical processing biomass: A review / L. Leng, L. Yang, J. Chen, Y. Hu, H. Li, H. Li, S. Jiang, H. Peng, X. Yuan, H. Huang // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 294. – P. 126238.
6. Separation of acid compounds for refining biomass pyrolysis oil / Z. GUO, S. WANG, Y. ZHU, Z. LUO, K. CEN // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. – 2009. – V. 37. – No. 1. – P. 49–52.
7. Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering / G.W. Huber, S. Iborra, A. Corma // *Chemical Reviews*. – 2006. – V. 106. – No. 9. – P. 4044-4098.
8. Biomass fast pyrolysis / A. Bridgewater // *Thermal Science*. – 2004. – V. 8. – No. 2. – P. 21- 50.
9. Use of microalgae to recycle nutrients in aqueous phase derived from hydrothermal liquefaction process / L. Leng, J. Li, Z. Wen, W. Zhou // *Bioresource Technology*. – 2018. – V. 256. – P. 529–542.
10. Chemical compositions and wastewater properties of aqueous phase (wastewater) produced from the hydrothermal treatment of wet biomass: A review / L. Leng, W. Zhou // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2018. – V. 40. – No. 22. – P. 2648-2659.
11. Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel / K.B. Larionov, D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A.Z. Kaltaev, A.A. Ulko, V.E. Gubin // *International Journal of Energy Research*. – 2021. – V. 45. – No. 10. – P. 14895-14909.
12. Emulsification of Water and Pyrolysis Oil by Sorbitol Derivative Surfactants / P. Kittipoomwong, M. Narasingha // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – V. 633- 634. – P. 537-540.
13. The influence of liquid plant additives on the anthropogenic gas emissions from the combustion of coal-water slurries / G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 242. – P. 31-41.

14. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters / T. Kan, V. Strezov, T.J. Evans // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 57. – P. 1126-1140.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008)).

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Е. Губин, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО СИНТЕЗА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ИЗ ВОЛЬФРАМОВОГО КОНЦЕНТРАТА РУДЫ**

А.И. Кокорина<sup>1</sup>, Ж. Болатова<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
<sup>1</sup>ИЯТШ, ОЭФ, 0Б91, <sup>2</sup>ИШИТР, А0-08

Карбид вольфрама WC характеризуется рядом перспективных физических и химических свойств: высокие твердость и износостойкость, высокая температура плавления, высокие электро- и теплопроводность, а также сопротивление коррозии и устойчивость к воздействию кислот и щелочей. Карбид вольфрама является перспективным носителем катализатора в реакциях получения водорода благодаря таким факторам, как повышение каталитической активности платины в контакте с WC, снижение энергии активации реакции и стоимости [1].

На данный момент актуальна проблема развития методов получения карбида вольфрама из руды, характеризующихся малым количеством стадий, в отличие от традиционных методов [2]. Одним из таких методов является электродуговой. В данной работе применяется перспективная модификация данного метода, отличающаяся отсутствием необходимости организации вакуума или защитной газовой среды в процессе синтеза [3].

Исходная руда содержала три основные фазы: шеелит  $\text{CaWO}_4$ , гюбнерит  $\text{MnWO}_4$  и ферберит  $\text{FeWO}_4$ . С целью уменьшения содержания железа была проведена магнитная сепарация, затем руду перемалывали. Данные рентгенофлуоресцентного анализа подтвердили уменьшение содержания железа и увеличение содержания вольфрама в руде в результате обработки.

Синтез карбида вольфрама WC из обработанной руды проводился на электродуговом реакторе с графитовыми электродами. Смесь исходных реагентов – обработанной руды и сибунита (сибирского углеродного носителя) – закладывали в полый катод, выполненный в форме тигля, в полости которого поджигался разряд. В процессе синтеза, согласно диаграмме состояний «вольфрам-углерод», достигаются условия для образования карбида вольфрама WC, так как температура в плазменном факеле составляет несколько тысяч градусов. При этом наблюдается интенсивное выделение угарного и углекислого газов, которые экранируют реакционный объем от кислорода воздуха. Благодаря данному явлению возможно реализовать электродуговой синтез в рассматриваемой системе, иницируя дуговой разряд в открытой воздушной среде.

В ходе данной работы были определены три параметра синтеза: соотношение масс исходных реагентов (обработанная руда и сибунит), ток и время. Соответственно, были проведены три серии экспериментов. Полученные порошки анализировали методом рентгеновской дифракции на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000s. Была построена зависимость фазового состава продукта синтеза от каждого из параметров.

В первой серии экспериментов изменяли соотношение масс сибунита и обработанной руды от 1:18,9 до 1:2,7, при этом были выбраны максимальные параметры тока  $I = 220$  А и времени  $t = 45$  с. В результате рентгенофазового анализа полученных образцов установлено,



что соотношение 1:4,1 обеспечивает наибольший выход карбида вольфрама WC. При меньшем соотношении доминируют фазы, содержащиеся в исходной руде, при большем возникает избыток графита.

Далее с целью уменьшения энергозатрат в процессе синтеза была проведена серия экспериментов с определенным ранее соотношением исходных реагентов и силой тока  $I = 220$  А, в которой изменяли время синтеза от  $t = 15$  с до  $t = 45$  с. Установлено, что время синтеза  $t = 45$  с обеспечивает наибольший выход карбида вольфрама WC и наименьшую долю фаз, содержащихся в исходной руде. При меньшем времени синтеза велика доля фаз, содержащихся в исходной руде.

В третьей серии экспериментов при уже определенном соотношении исходных реагентов и времени синтеза  $t = 45$  с изменяли силу тока от  $I = 50$  А до  $I = 220$  А. В результате рентгенофазового анализа полученных образцов установлено, что при силе тока  $I = 220$  А наблюдается наибольший выход карбида вольфрама WC и наименьшая доля фаз, содержащихся в исходной руде. Аналогично времени, при меньшей силе тока фазы, содержащиеся в исходной руде, имеют значительную долю в продукте синтеза.

Таким образом, было установлено, что соотношение исходных сибунита и руды, равное 1:4,1, время  $t = 45$  с и сила тока  $I = 220$  А обеспечивают наибольшую долю карбида вольфрама WC в результате электродугового синтеза в открытой воздушной среде из смеси обработанного вольфрамового концентрата руды и сибунита (рисунок 1).

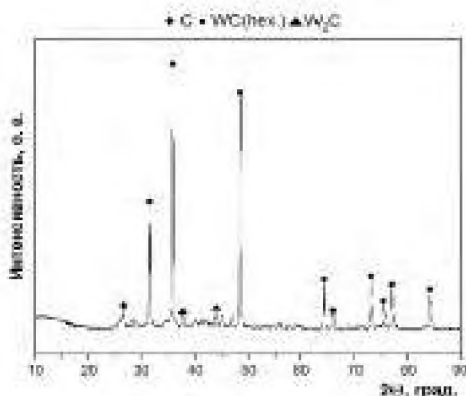


Рис. 1. Картина рентгеновской дифракции образца, полученного при определенных параметрах синтеза

## ЛИТЕРАТУРА

1. Role of tungsten carbide (WC) and its hybrids in electrochemical water splitting application- A comprehensive review / U. Sohail, E. Pervaiz, M. Ali, R. Khosa // FlatChem. – 2022. – V. 35. – P. 100404.
2. Single step synthesis of tungsten carbide (WC) nanoparticles from scheelite ore / H. Singh, O.P. Pandey // Ceramics International. – 2013. – Vol. 39. – № 6. – P. 6703-6706.
3. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge / A.Ya. Pak, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2020. – Vol. 93. – P. 105343.

Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2022-0018).

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, научный сотрудник НИЦ “Экоэнергетика 4.0” ИШЭ ТПУ.

# ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЕРЕРАБОТКА АСФАЛЬТЕНОВ В АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

П.В. Поваляев<sup>1</sup>, Е.В. Францина<sup>2</sup>, В.В. Аркаченкова<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Томский политехнический университет,

<sup>1,2,3</sup>Сургутский государственный университет

<sup>1</sup>ИШИТР, ОАР, А1-48, <sup>2</sup>ИШПР, ОХИ, научный сотрудник,

<sup>3</sup>ИЕиТН, аспирант кафедры химии

Асфальтены – наиболее тяжелые и высокомолекулярные компоненты сырой нефти, представляющие собой сложную смесь соединений, помимо нефти асфальтены также могут содержаться в углеродосодержащих материалах, например в угле [1, 2]. Скопления и отложения асфальтенов могут вызывать серьезные проблемы при разведке, добыче и химической переработке сырой нефти [1]. Отложения асфальтенов снижают продуктивность скважин (закупорка стволов скважин), а также загрязняют оборудование [3]. Асфальтены как побочный продукт добычи нефти имеет низкую рыночную стоимость, однако, известно о применении асфальтенов в дорожной промышленности, где данное соединение используется в качестве модификатора асфальта для высокомодульных асфальтобетонов [4]. Помимо утилизации асфальтенов, существует классификация их применения в различных отраслях промышленности: полимерная промышленность, синтез наноматериалов, электроника, эмульсии и интерфейсы [1]. Большие масштабы добычи нефти, и соответственно рост производства асфальтенов приводит к необходимости их утилизации. В большинстве случаев асфальтены утилизируются с использованием хвостохранилищ, что нередко вызывает экологические проблемы, в связи с чем возникла необходимость в поиске инновационных способов применения данного продукта или же его утилизации.

В предыдущих работах был исследован продукт плазменной переработки асфальтенов с получением углеродных наноструктур различной морфологии, а также определен оптимальный режим работы электродугового устройства для переработки асфальтенов [5]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по переработке асфальтенов различного происхождения в плазме дугового разряда в открытой воздушной среде, с получением продуктов синтеза в виде твердой фазы углерода, а также формированием газовой среды, состоящей из метана и водорода.

Плазменная переработка асфальтенов проводилась в безвакуумном электродуговом реакторе постоянного тока горизонтального типа. Максимальное значение тока в данной конфигурации реактора составляет 200 А с напряжением холостого хода 80 В. Графитовый тигель с двумя сквозными отверстиями под электроды использовался для загрузки перерабатываемых асфальтенов. Графитовые электроды, выполняющие роль анода и катода, в реакторе такого типа располагаются горизонтально, электроды закрепляются в токоведущих держателях, к которым подсоединены выходы источника тока. Держатель анода перемещается в зону реакции с использованием ручного привода, после замыкания электродов и образования разрядного промежутка происходит инициация дугового разряда в результате чего происходит высокотемпературная переработка асфальтенов.

Для обработки использовались асфальтены полученные с использованием технологии сольвентной деасфальтизации (SDA), а также асфальтены выделенные из битума кармальского месторождения с использованием SARA-анализа с последующей отмывкой. Асфальтены были измельчены в агатовой ступке до однородного состояния, после чего засыпались в графитовой тигель для дальнейшей переработки (масса загрузки 1 гр.). Воздействию дуговым разрядом асфальтены подвергались в течении 30 секунд, с силой тока на источнике питания 100 А. Режим переработки асфальтенов, как было указано выше, был определен в предыдущей работе [5]. Полученные образцы были проанализированы методом рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 7000 s,  $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ , регистрация и

анализ газовой среды в процессе обработки материала проводилась с помощью поточного газоанализатора Бонер Тест-1. На рисунке 1а представлены рентгеновские дифрактограммы продуктов, на рисунке 1б максимальная концентрация выделения метана и водорода в зависимости от типа перерабатываемого сырья.

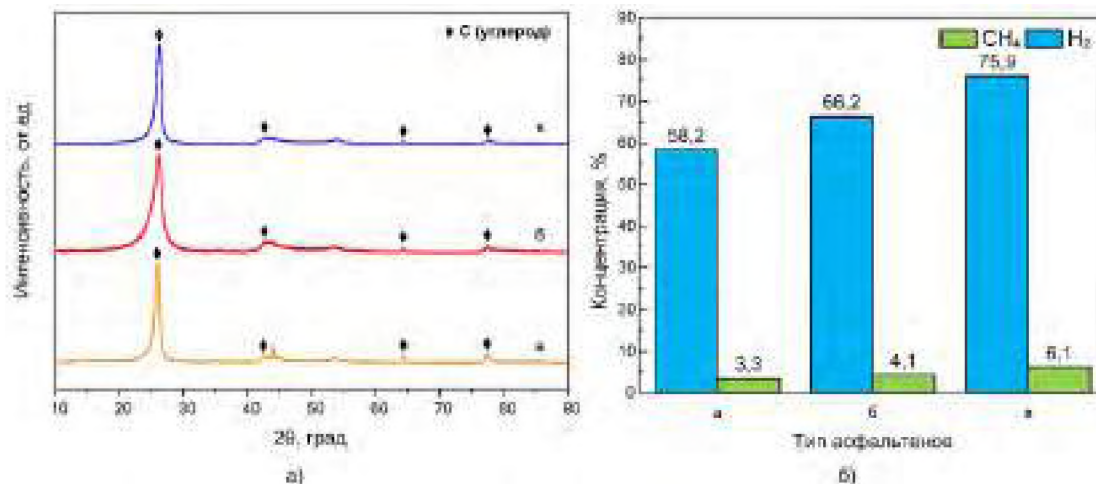


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы продуктов  
 а) рентгенограммы полученных углеродных материалов; б) максимальная концентрация метана и водорода в зависимости от типа исходного сырья

Данные, полученные в ходе экспериментов по переработке асфальтенов выделенных с использованием технологии SDA (б), а также асфальтены выделенные из битума кармальского месторождения с использованием SARA-анализа (в), сопоставлялись с результатами, полученными в процессе плазменного воздействия на асфальтены выделенные из битума природного происхождения (а). По результатам рентгеновской дифрактометрии полученные образцы имеют кристаллическую структуру, характерную для углеродных материалов с явно выраженным максимумом  $26^\circ$  на оси  $2\theta$ . Образец (б) имеет меньшую степень кристалличности, что может быть связано с неоднородностью перерабатываемого сырья. При анализе газовой среды, максимальный пик концентрации водорода и метана (75,9 % и 6,1 % соответственно) наблюдается у образца (в).

В результате проведенных экспериментальных исследований по переработке асфальтенов различного происхождения в плазме дугового разряда, была получена твердая фаза продукта. Полученный материал исследовался методом рентгеновской дифракции: продукт имеет характерные для графитоподобной структуры максимумы. При проведении анализа газовой среды подтверждено выделение водорода и метана, с разной концентрацией при различных типах асфальтенов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Kamkar M., Natale G. A review on novel applications of asphaltenes: A valuable waste // Fuel. Elsevier, 2021. Vol. 285. P. 119272.
2. Zhang J., Wei Q., Zhu B., Wang W., Li L., Su Y., Wang P., Yan Y., Li J., Li Z. Asphaltene aggregation and deposition in pipeline: Insight from multiscale simulation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Elsevier, 2022. Vol. 649. P. 129394.
3. Salehzadeh M., Husein M.M., Ghotbi C., Dabir B., Taghikhani V. In-depth characterization of light, medium and heavy oil asphaltenes as well as asphaltenes subfractions // Fuel. Elsevier, 2022. Vol. 324. P. 124525.
4. Ghassemirad A., Bala N., Hashemian L., Bayat A. Application of asphaltenes in high modulus asphalt concrete // Construction and Building Materials. Elsevier, 2021. Vol. 290. P. 123200.

5. Petrova Y.Y., Frantsina E.V., Grin'ko A.A., Pak A.Y., Arkachenkova V.V., Povalyaev P.V. Investigation of the process and products of plasma treatment of asphaltenes // Materials Today Communications. Elsevier, 2022. Vol. 33. P. 104669.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20016, <https://rscf.ru/project/22-13-20016/>.

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОГО ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

А.С. Горшков<sup>1,2</sup>, В.Е. Губин<sup>1</sup>, К.Б. Ларионов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет

Согласно данным Рослесхоза [1] в 2019 году на территории всех субъектов Российской Федерации было заготовлено около 218 млн. м<sup>3</sup> древесины, причем треть этого объема приходится на Сибирский федеральный округ. При среднем и медианном значениях для отдельных субъектов 2,6 млн. м<sup>3</sup> и 0,6 млн. м<sup>3</sup> соответственно. Данный показатель для Томской области составляет 6,5 млн. м<sup>3</sup>.

Благодаря каскадному использованию лесных ресурсов возможно оценить текущую и достижимую эффективность использования каждого конкретного вида продукта и вторсырья. Так, согласно, отчету Food and Agriculture Organization (FAO) [2] при производстве пиломатериалов 45–66 % объема круглого леса переходят в пиломатериал, около трети классифицируется как стружка и плита и примерно 10 % остается в качестве опилок.

Таким образом, оценочная величина ежегодного формирования отходов в форме опилок в нашем субъекте составляет около 1 млн. м<sup>3</sup>.

Несмотря на достаточно широкий спектр применения данного материала как в строительстве, так и в химической промышленности, часть этих ценных отходов не находят своего потребителя. Стоит отметить подход, при котором опилки используют в шихте с твердым топливом или в качестве материала для пиролиза.

В данной работе приведена оценка возможности совместного пиролиза опилок сосны и нескольких достаточно распространенных и в недостаточной мере используемых отходов – отработанных шин и полиэтилена. Данное решение обусловлено относительно высокой температурой разложения резины и полиэтилена, добавление опилок позволяет нивелировать теплофизические свойства резины и полиэтилена, и проводить процесс в низкотемпературной области. В тоже время согласно некоторым исследованиям [3, 4] совместный пиролиз биомассы и отработанных шин позволяет увеличить выход жидких органических продуктов пиролиза и увеличить долю полиароматических углеводородов и олефинов в получаемом масле. Кроме того, представлены результаты разложения полиэтилена (ПЭ) как самостоятельно, так и в составах с представленными выше образцами. Авторами работы [5] установлено, что реализация совместного пиролиза биомассы и пластика позволяет увеличить выход неконденсируемых продуктов и улучшает их качество.

В качестве исходных образцов использовались гранулят резины и ПЭ, опилки березы, измельченные до фракции менее 1 мм.

Для определения и качественной оценки синергетического эффекта совместного пиролиза с энергетической точки зрения необходимо иметь представление о процессе разложения исходных образцов и их смесей. Обоснованной является и оценка эффекта по величинам кажущейся энергии активации. Для решения этих задач применяется термический анализ.

Термический анализ выполнялся с использованием термогравиметрического анализатора STA 449 C Jupiter (Netzsch, Германия). Применялся неизотермический нагрев. Образец нагревался с постоянной скоростью 10 °С/мин в температурном диапазоне 25–800 °С. В целях обеспечения инертности процесса применялся защитный газ – аргон, который проходил через тигель с расходом 100 мл/мин.

С использованием полученных данных по изменению массы от температуры возможно определить константы формальной кинетики – предэкспонент (фактор частоты) и энергию активации. Предэкспонент характеризует частоту взаимодействия между молекулами, участвующих в определенной реакции. Кажущаяся энергия активации – минимально необходимое количество энергии молекулы для реализации взаимодействия. Для определения представленных констант использован однокоростной изоконверсионный метод Коатса-Рэдферна. Возможная форма записи, отражающая связь между скоростью реакции и энергией активации:

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T_{\alpha}^2}\right) = \ln\left[\left(\frac{AR}{wE}\right) \cdot \left(1 - \frac{2RT_{\alpha}}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT_{\alpha}}, \quad (1)$$

где  $A$  – предэкспонент [ $\text{с}^{-1}$ ];  $R$  – константа Больцмана [ $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ];  $w$  – скорость изменения массы [ $\text{масс.}\% \cdot \text{мин}^{-1}$ ];  $T_{\alpha}$  – температура, соответствующая степени конверсии  $\alpha$  [ $\text{К}$ ];  $E$  – энергия активации [ $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ];  $g(\alpha)$  – интегральный вид кинетической функции.

Кинетическая функция в интегральном виде:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)}, \quad (2)$$

где  $f(\alpha)$  – кинетическая функция.

Как и во многих иных кинетических методах используется аппроксимация линейной функцией выражения (1), определяются константы линейной функции и по их значениям рассчитываются значение энергии активации. Так как исследуемые образцы характеризуются многокомпонентным составом их ДТГ-профили имеют несколько рефлексов. Благодаря наличию этих пиков возможно детерминировать различные углеводороды, среди которых каучук, лигнин и т. д. [6]. Далее производится аппроксимация нормальным распределением для каждого из компонентов для расчета эффективной энергии активации отдельных компонентов образцов [7].

Был использован метода Малека [8] для выбора модели реакции (кинетической функции) компонентов. Суть данного метода заключается в графическом сопоставлении теоретического и экспериментального процессов разложения:

$$\frac{Y(\alpha)}{Y(0,5)} = \frac{f(\alpha) \cdot g(\alpha)}{f(0,5) \cdot g(0,5)} = \left(\frac{T}{T_{0,5}}\right) \frac{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)}{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{0,5}}, \quad (3)$$

где  $T$  – температура процесса разложения, соответствующая  $i$ -ой степени конверсии [ $\text{К}$ ];  $da/dt$  – скорость разложения, соответствующая  $i$ -ой степени конверсии [ $\text{мин}^{-1}$ ].

С использованием энергии активации и кинетической функции возможно определение величины предэкспонента. Для этого можно использовать уравнение Аррениуса в следующем виде:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \cdot f(\alpha). \quad (4)$$

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Объем заготовленной древесины по итогам 2019 года / Чуев А.В. // Федеральное агентство лесного хозяйства. 2020. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-WoodVolume> (дата обращения 05.11.2022).
2. Forest product conversion factors // FAO, ITTO and United Nations. 2020. URL: <https://doi.org/10.4060/ca7952en> (дата обращения 05.11.2022).
3. Co-pyrolysis of pine nut shells with scrap tires / S. Uçar, S. Karagöz // Fuel. – 2014. – V. 137. – P. 85-93.
4. Catalytic fast co-pyrolysis of bamboo sawdust and waste tire using a tandem reactor with cascade bubbling fluidized bed and fixed bed system / J. Wang, Z. Zhong, K. Ding, M. Li,

- N. Hao, X. Meng, R. Ruan, A. J. Ragauskas // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 180. – P. 60-71.
5. Study of the co-pyrolysis of biomass and plastic wastes / F. Paradela, F. Pinto, I. Gulyurtlu, I. Cabrita, N. Lapa // *Clean Technologies and Environmental Policy*. – 2009. – Т. 11. – №. 1. – С. 115-122.
  6. Особенности изучения термодеструкции твердых и жидких органических углеродсодержащих продуктов методом термогравиметрии / Е.С. Лыгина, А.Ф. Дмитрук, Л.Я. Галушко, С.Б. Любчик, В.Ф. Третьяков // *Химия твердого топлива*. – 2009. – № 3. – С. 58-74
  7. Co-pyrolysis of corn stover and waste tire: Pyrolysis behavior and kinetic study based on Fraser-Suzuki deconvolution procedure / G. Luo, W. Wang, W. Xie, Y. Tang, Y. Xu, K. Wang // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2022. – V. 168. – P.105743.
  8. Study on pyrolysis characteristics and kinetics of biomass and its components / H. Xie, Q. Yu, Q. Qin, H. Zhang, P. Li // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2013. – V. 5. – №. 1. – P. 013122.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008)).

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Е. Губин, доцент, НОЦ И.Н. Бутакова

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ИЗ КАМЕННОГО УГЛЯ И ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ НА УГОЛ РАСКРЫТИЯ ФАКЕЛА**

А.Д. Мисюкова<sup>1,2</sup>, С.А. Янковский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет,

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ22

### **Аннотация**

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов распыления смесевых топлив, сформированных на основе тощего угля и продуктов деревообработки (сосновых опилок). Применены две методики приготовления топливных смесей: первая – раздельный размол и последующее смешение в течении семи минут; вторая – формирование смесевых топлив методом совместного помола в шаровой барабанной мельнице в течение 18 часов. Установлено, что при распылении смеси угля и древесной биомассы в соотношении по массе 50 % / 50 %, сформированной совместно в течении длительного времени, угол раскрытия факела увеличивается на 11,6 %, по сравнению углом раскрытия факела топливной смеси, которая формировалась по первой методике в равном соотношении по массе исходных компонент.

### **Введение**

Совместное сжигание биомассы и угля на тепловых электрических станциях является недорогим и эффективным решением для сокращения выбросов диоксида углерода. Однако, широкое вовлечение мелкодисперсной биомассы в большую и малую энергетику на данный момент не является возможным по ряду причин, и одна из них – не разработана технология формирования топливных смесей перед подачей их в топку котлоагрегата [1]. Помол отходов деревопереработки достаточно трудоемкий процесс, так как лигноцеллюлозная биомасса имеет волокнистую структуру, которая достаточно хорошо сопротивляется измельчению при стандартных способах, например, в шаровой мельнице с круглыми мелющими телами. Снижение затрат на топливоприготовление в энергетике является одной из важнейших задач, а

решение наиболее эффективным способом измельчать и формировать смесевые топлива позволит увеличить экономическую привлекательность таких топливных композиций как уголь и биомасса в производстве тепла и электроэнергии. Вторая решаемая задача для совместного сжигания таких топливных смесей является их распыл. До сих пор нет решения об эффективной концентрации смесевых топлив, которые пригодны для совместного сжигания в горелочных устройствах котлоагрегатов. Эффективность распыления топлива во многом зависит от степени его помола и размера получаемой пыли [2]. Закон по сокращению выбросов азота (NOx) на угольных электростанциях способствовал внедрению горелок эффективность которых, позволяет существенно снизить при сжигании угольной пыли содержание окислов азота и работать с наиболее мелкодисперсными частицами угля [3]. При совместном сжигании биомассы и угля размер частиц, попадающих в горелку, определяется оборудованием для измельчения или способом смешения. Для стандартных горелок размер угля, должен составлять около 75 мкм [4], а для биомассы около 1 мм. Научное обоснование наиболее эффективного способа приготовления смесевых топлив и их совместного распыла является основной задачей, решаемой в настоящем исследовании.

Целью данной работы является установление эффективного угла раскрытия факела при распылении смесевых топлив, сформированных на основе каменного угля и отходов лесопиления при различных методиках топливоприготовления.

#### **Методика экспериментальных исследований**

Смесевое топливо было сформировано на основе каменного угля марки Тоший (Алардинское месторождение, Россия), и отходов лесопиления (ООО «Дзержинский ЛПК», Томск, Россия) по двум методикам.

Первая методика: кусковой уголь измельчали в лабораторной мельнице Stegler LM-1000 до фракции менее 200 мкм. Измельченный уголь просеивали через систему сит. Фракция частиц угля составляла менее 100 мкм. Отходы деревообработки предварительно очищали от коры и мусора, сушили в течение суток для удаления избыточной влаги при температуре 293 К, а затем также просеивали для выделения частиц фракцией менее 200 мкм. После измельчения и просеивания, уголь и биомасса смешивались в барабанно-шаровой мельнице совместно с мелющими телами в соотношении по массе 1:1 в течение семи минут.

Вторая методика: перед размолотом уголь и биомасса подсушивались с целью снижения их влажности до значения не более 5 %. После предварительного высушивания, оба компонента помещались в керамический барабан шаровой мельницы, который заполнялся топливом на 40 %, с целью достичь максимальной эффективности помола. Масса смеси, загружаемой в барабан, в общем составляла 100 грамм. Соответственно, для смеси угля и древесины 90 % / 10 %, масса угля составляла 90 грамм, а масса древесины – 10 грамм. Следом в барабан помещались мелющие тела (металлические шарики диаметром 15 мм). Соотношение массы смесевое топлива и мелющих тел составляло 1:1. Смесь угля и древесной биомассы совместно размалывалась в мельнице непрерывно в течение 18 часов. После измельчения, смесь просеивалась через сито с размером ячеек 100 мкм.

Топливные смеси, сформированные двумя методиками, исследовали на определение угла раскрытия факела в экспериментальном стенде, который представлен на рисунке 1.

Далее приведено описание типичного эксперимента с топливной композицией. Мелкодисперсная топливная смесь массой 20 грамм помещалась в бункер топлива, соединенный с распыляющей пневматической форсункой (2), установленной в специальном цилиндре, имитирующем топочное устройство (1), далее выполнялся распыл топлива при давлении 3 бара [6], давление создавалось с помощью насосной станции (5). Фотофиксация струи выполнялась высокоскоростной камерой (4) при подсвечивании области исследования лазерным импульсом (3). Каждый эксперимент проводился в течение 60 секунд. Этого времени было достаточно для формирования стабильной струи и создания нужного количества кадров для расчета угла раскрытия факела с высокой точностью.

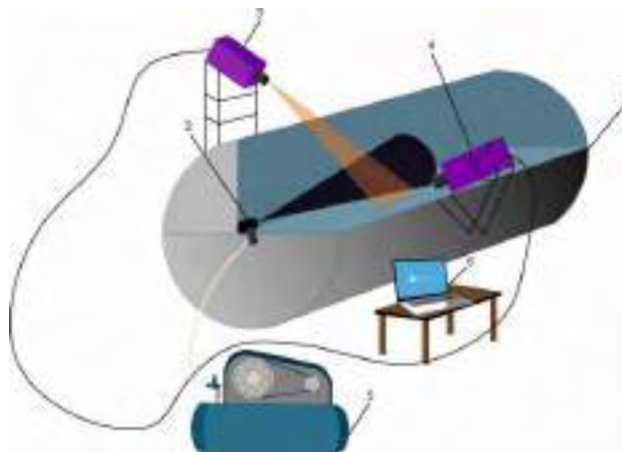


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда по исследованию характеристик распыла смесевых топлив:

1 – аэродинамический имитатор камеры сгорания; 2 – пневматическая форсунка с бочонком для подачи топлива; 3 – лазер; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – компрессор для нагнетания воздуха; 6 – ноутбук

### Результаты экспериментальных исследований

Типичные результаты экспериментальных исследований по распылению древесно-угольных смесей, приготовленных по первой методике, приведены на рисунке 2.



Рис. 2. Изменение угла раскрытия факела смесевых топлив, приготовленных при применении первой методики топливоприготовления и давлении равном 3 бара:

1 – уголь\_100 %, древесина\_0 %; 2 – уголь\_90 %, древесина\_10 %; 3 – уголь\_75 %, древесина\_25 %; 4 – уголь\_50 %, древесина\_50 %

Анализ угла раскрытия факела при распылении однородного угля, рисунок 2 (1), показал значение равное  $24,3^\circ$ . При увеличении доли древесной компоненты в смесевом топливе на 10 % угол раскрытия факела был установлен равным  $24,75^\circ$ , а при увеличении доли древесной компоненты в топливной смеси на 25 %, угол раскрытия факела увеличился на  $25,6^\circ$ , а при ее увеличении в топливе до 50 % – угол раскрытия факела увеличился на  $26,55^\circ$ . Увеличение угла раскрытия факела в смесевых топливах по отношению к углу раскрытия факела однородного угля, говорит о положительном влиянии древесной компоненты в смеси на характеристики распыления топлива в топке.

Аналогичным способом выполнены исследования со смесевыми топливами, сформированными на основе второй методики. На рисунке 3 приведены типичные результаты углов раскрытия факела при распылении однородного угля и топливных древесно-угольных смесей.





Рис. 3. Изменение угла раскрытия факела смесевых топлив приготовленных при применении второй методики топливоприготовления и давлении равном 3 бара:

1 – уголь\_100 %, древесина\_0 %; 2 – уголь\_90 %, древесина\_10 %; 3 – уголь\_75 %, древесина\_25 %; 4 – уголь\_50 %, древесина\_50 %

При распылении однородного угля (рисунок 3) анализ угла раскрытия факела показал значение равное 24,3°. При увеличении доли древесной компоненты в смесевом топливе на 10 % угол раскрытия факела установлен равным 24,8°, а при увеличении древесины в топливной смеси на 25 %, угол раскрытия факела увеличился до 26°. При увеличении доли древесины в смеси до 50 % угол раскрытия факела увеличился до 31,4° по сравнению с углом раскрытия факела однородного угля.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что совместное приготовление угля и биомассы приводит к существенному увеличению угла раскрытия факела при распылении смеси, по сравнению с топливом, приготовленным по первой методике, что в последствии приведет к увеличению эффективности сжигания таких смесевых топлив, за счет их более равномерного распределения по топке котлоагрегата.

#### **Заключение**

На основании результатов выполненных экспериментальных исследований по определению характеристик распыления сухого смесевоего топлива при применении двух методик топливоприготовления, можно сделать следующие выводы:

1. Добавление древесной биомассы в состав сухого топлива способствует увеличению угла раскрытия факела при распылении топлива в камере сгорания;
2. Угол раскрытия факела топливной смеси, приготовленной совместно, увеличивается по сравнению с углом раскрытия факела смесевых топлив, смешанных после отдельного измельчения. Для смеси угля и древесной биомассы в соотношении компонент равном 90 % / 10 % это изменение незначительно, и составило менее 0,05°. При соотношении этих же компонент равном 75 % / 25 %, угол раскрытия факела увеличился на 0,4°, а для смеси с равной концентрацией компонент, угол увеличился на 4,8°. При совместном помоле смеси в барабанно-шаровой мельнице в течение 18 часов, многогранные частицы угля способствуют более мелкому размалыванию волокнистой структуры древесины с натиранием в нее мелких частиц угольной пыли, что в последствии не только положительно влияет на процессы распыления, но и на процессы воспламенения таких углей.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. K. Savolainen, "Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers," Appl Energy, vol. 74, no. 3–4, pp. 369–381, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0306-2619(02)00193-9.
2. O. Williams et al., "Influence of mill type on densified biomass comminution," Appl Energy, vol. 182, pp. 219–231, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.08.111.
3. L. Suescún, E. Sanchez, M. Gómez, F. L. Garcia-Arias, and V. M. Núñez Zarantes, "Pulverised biomass and coal co-firing simulation using computational fluid dynamics: A numerical

- investigation into the aerodynamics of non-spherical particles and full scale combustion for pulverised fuel applications,” p. 53, 2012.
4. J. L. Afolabi, “The Performance of a Static Coal Classifier and Its Controlling Parameters,” Jun. 2012, Accessed: Oct. 14, 2022. [Online]. Available: /articles/thesis/The\_Performance\_of\_a\_Static\_Coal\_Classifier\_and\_Its\_Controlling\_Parameters/10107752/1.
  5. M. Mandø, L. Rosendahl, C. Yin, and H. Sørensen, “Pulverized straw combustion in a low-NO<sub>x</sub> multifuel burner: Modeling the transition from coal to straw,” *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 3051–3062, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.FUEL.2010.05.016.
  6. S. A. Yankovskiy and A. D. Misyukova, “INVESTIGATION OF COMPOSITE FUEL SPRAYING CHARACTERISTICS,” *International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований)*, no. №9 2022, pp. 70–74, 2022, doi: 10.17513/MJRFI.13443.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2021-0008.

Научный руководитель: к.т.н. С.А. Янковский, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ КАК ИСТОЧНИКА УГЛЕРОДА ДЛЯ СИНТЕЗА КАРБИДОВ**

А.А. Гумовская<sup>1</sup>, А.П. Корчагина<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ11<sup>1</sup>, группа 5БМ22<sup>2</sup>

Растущий спрос на материалы с уникальными свойствами для решения задач промышленности побуждает к развитию и изучению новых соединений. Одним из перспективных направлений развития современных материалов является высокотемпературная керамика. Одним из представителей семейства является карбид титана (TiC). Жаропрочность, тугоплавкость, высокая твердость, коррозионная стойкость, каталитическая активность и химическая инертность дают возможность использовать данный материал в передовых технологиях [1]. Карбид титана применяется в изготовлении конденсаторов с высокой плотностью энергии, селективных газовых фильтров для улавливания углекислого газа, датчиков газа, функциональной и конструкционной керамики и в фотокатализе [2–4]. Основными способами получения карбида титана являются карботермическое восстановление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, электровзрыв проводников, методы лазерной абляции и различные плазменные методы [4–6].

На сегодняшний день производство материалов на основе возобновляемого сырья интересно не только из-за экологических вопросов, но и благодаря новым свойствам таких материалов. Древесный уголь обладает ячеистой структурой, прекрасными механическими свойствами, прочностью и низкой плотностью [7, 8, 9]. Таким образом, использование древесины, как источника углерода для синтеза карбида титана, один из новых путей развития данного материала.

Известным подходом к получению порошков высокотемпературной керамики является электродуговой синтез. Плазма дугового разряда позволяет обеспечить в реакционной зоне высокие температуры, а реализация данного метода в открытой воздушной среде с достижением эффекта экранирования реакционного объема генерирующимся потоком газов диоксида и монооксида углерода позволяет отказаться от вакуумного оборудования и упростить устройство дугового реактора.

В качестве исходного сырья были взяты технически чистый титан и углерод, полученный пиролизом из органических отходов. Для получения биоуглерода использовалась навеска цедры помело. Образец взвешивали на аналитических весах VIBRA HT-224RCE и помещали

в термостойкий стальной контейнер (масса каждой навески составляла 300 гр.  $\pm$ 2 гр.). Термостойкий стальной контейнер с готовой смесью помещался в муфельную печь марки ПМ-1400. К термостойкому стальному контейнеру подводился патрубок для отвода газов, отвод газов осуществлялся через вентиляционную шахту. Нагрев температуры в печи осуществлялся со скоростью 20 °С/мин  $\pm$ 1 °С/мин до достижения заданного значения (600 °С) время выдержки составляло один астрономический час, далее поддержание температуры останавливалось, и терморегулируемая печь охлаждалась естественным путем до комнатной температуры. Полученный углерод из цедры помело извлекался, выполнялось его взвешивание. Образец углерода из цедры помело дополнительно измельчался на лабораторной мельнице LM-1000 (1000 гр.), Stegler, после измельчения углерод из цедры помело просеивался через сито 80 мкм. Полученный порошок углерода расфасовывался для дальнейших исследований.

Порошок биоуглерода смешивали с порошком титана в пропорции 1:4 в шаровой мельнице. После смешивания смесь порошков подвергается электродуговому воздействию. Была проведена серия экспериментов с изменением силы тока электродугового разряда. Каждый эксперимент длился 30 секунд. После синтеза каждый образец анализировался методом рентгеновской дифрактометрии (*Shimadzu XRD 7000s*, CuK $\alpha$ -излучение). Результаты анализа приведены на рисунке 1.

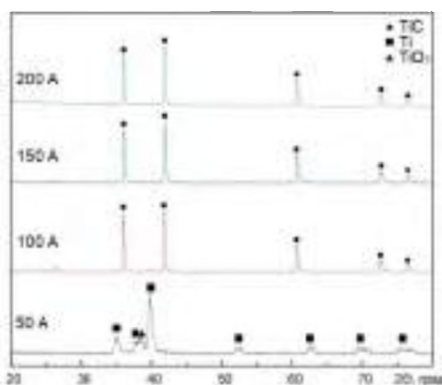


Рис. 1. Результаты рентгеновской дифрактометрии

В ходе анализа было выявлено, что при 30 с воздействия электродуговой плазмой исходный титан полностью переходит в кубическую фазу карбида титана с кристаллической решеткой типа NaCl только при силе тока 100 А и выше. При силе тока 50 А на картине рентгеновской дифрактометрии можно наблюдать дифракционные максимумы исходного титана и оксида титана.

По совокупности представленных данных можно сделать вывод о возможности электродугового синтеза карбида титана с кубической кристаллической решеткой с использованием биоуглерода, полученного пиролизом из цедры помело, в качестве источника углерода.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Phase equilibria, phases and compounds in the TiC system / Gusev A.I. // Russ. Chem. Rev. IOP Publishing, – 2002. – V. 71, No. 6. P. 439–463.
2. Synthesis and properties of 2D-titanium carbide MXene sheets towards electrochemical energy storage applications / Syamsai R. et al. // Ceram. Int. Elsevier, – 2017. – V. 43, No. 16. P. 13119-13126.
3. A long cycle life asymmetric supercapacitor based on advanced nickel-sulfide/titanium carbide (MXene) nanohybrid and MXene electrodes / Luo Y. et al. // J. Power Sources. Elsevier, – 2020. – V. 450. P. 227694.
4. Functionalized titanium carbide as novel catalyst support for Pd catalyzed electrochemical reaction/ Dong Q. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. Pergamon, – 2017. – V. 42, No. 5. P. 3206–3214.

5. Conductive two-dimensional titanium carbide ‘clay’ with high volumetric capacitance / Ghidui M. et al. // *Nature*. – 2014. – V. 516.
6. Two-dimensional titanium carbide electrode with large mass loading for supercapacitor / Lin S.Y., Zhang X. // *J. Power Sources*. Elsevier, – 2015. – V. 294. P. 354-359.
7. Wood-derived ultra-high temperature carbides and their composites: A review / Yu M., Zhang G., Saunders T. // *Ceram. Int*. Elsevier. – 2020. – V. 46. No. 5. P. 5536–5547.
8. Mechanical modelling of wood microstructure, an engineering approach / Astley R.J., Harrington J.J., Stol K.A. // *Trans. Inst. Prof. Eng. New Zeal. Electr. Eng. Sect.* – 1997. – V. 24. No. 1. P. 21-29.
9. Mechanical Properties of Wood/ Kretschmann D.E. // *Wood Handbook – Wood as an engineering material* – 2010. P. 49.

Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2022-0018).

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОФРАКЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

А.К. Пронин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А0-44

Среди всех источников энергии, используемых для выработки электроэнергии, наибольшую долю в настоящее время составляет уголь ( $\approx 37\%$ ). В последние годы наблюдается тренд на снижение доли угля в производстве электроэнергии, однако темп снижения довольно низкий (с 2007 по 2019 года доля угля сократилась на 3 %) [1]. Доминирующей технологией выработки электроэнергии из угля является сжигание пылевидного топлива. Поэтому улучшение экономических и экологических показателей работы пылеугольных котельных агрегатов ещё долгое время будет актуальной задачей.

Горение пылевидного твердого топлива является комплексным физико-химическим процессом. Поэтому зачастую воздействие на отдельные параметры топочного процесса с целью улучшения определенных эксплуатационных характеристик котельного агрегата приводит к ухудшению некоторых других. Например, широко применяемые технологии снижения выбросов  $\text{NO}_x$  путем снижения температурного уровня в топке либо снижения концентрации кислорода в зоне горения (впрыск влаги, ступенчатый ввод воздуха в топку, ступенчатый ввод топлива в топку и др.) создают опасность повышения потерь тепла с химическим и механическим недожогом, что понижает экономичность котельного агрегата [2]. В противоположность перечисленным технологиям, пофракционное сжигание пылеугольного топлива, которое заключается в разделении полифракционной пыли на фракции разного размера с последующим сжиганием их в различных условиях, имеет потенциал для одновременного снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и уменьшения потерь тепла с химическим и механическим недожогом [3].

Для оценки эффективности применения пофракционного сжигания пылеугольного топлива было проведено численное моделирование процесса горения пылеугольного топлива с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Моделирование проводилось для березовского угля (таблица 1) в топочной камере парового котла БКЗ-210-140Ф – с угловым расположением щелевых многопоточных горелок (рисунок 1).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав топлива

Теплотехнические характеристики				Элементный состав (% <sub>daf</sub> )				
W <sup>r</sup> (%)	A <sup>r</sup> (%)	V <sup>daf</sup> (%)	Q <sub>r</sub> <sup>r</sup> (МДж/кг)	C	H	N	S	O
33	4,7	48	15,5	70,95	4,98	0,64	0,32	23,11

Горение угольной пыли в топочной камере смоделировано как двухфазная турбулентная система течений, состоящая из газовой и твердой фаз. Для газовой фазы определение осредненных во времени уравнений сохранения движения, энергии и концентраций компонентов выполнены Эйлеровым подходом. Для твердой фазы траектории частиц были получены с помощью модели случайного блуждания частиц Лагранжевым подходом.

Остальные физические подмодели, включенные в численную модель, представлены в таблице 2 [4, 5].

Таблица 2. Численные модели

Физический процесс	Модель
Турбулентность	Реализуемая k-ε
Теплообмен излучением	Модель дискретных ординат и взаимодействие частиц с излучением
Выход летучих	Одностадийная модель по уравнению Аррениуса
Гомогенное горение с учетом влияния турбулентности	Комбинация кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря»
Гетерогенное горение	Диффузионно-кинетическая модель
Образование NO <sub>x</sub>	Термические и топливные

Тонкость измельчения топлива была задана распределением Розина-Раммлера. Значения параметров распределения взяты для мельницы-вентилятора с промышленных данных по работе на березовском угле [6]. Моделировалось 10 фракций угольной пыли (по 10 % массы в каждой) разного размера со средним размером частиц в этой фракции. Граничные условия для модели были взяты с промышленных данных по работе на березовском угле [7].

Моделирование проводилось для 3 вариантов.

1. Заводская компоновка горелок (рисунок 1), через каналы которых подавались все 10 фракций угольной пыли.
2. Горелки разделены по высоте пополам. Расстояние между верхним и нижним ярусами горелок 1 метр (рисунок 2а). В горелки верхнего яруса подавались 5 “мелких” фракций угольной пыли, а в горелки нижнего – 5 “крупных”.
3. Горелки разделены по высоте пополам. Расстояние между верхним и нижним ярусами горелок 2 метра (рисунок 2б). В горелки верхнего яруса подавались 5 “мелких” фракций угольной пыли, а в горелки нижнего – 5 “крупных”.

Результаты численного моделирования (степень выгорания коксового остатка и концентрация NO<sub>x</sub> на выходе из топки) для всех вариантов расчетов представлены в таблице 3.

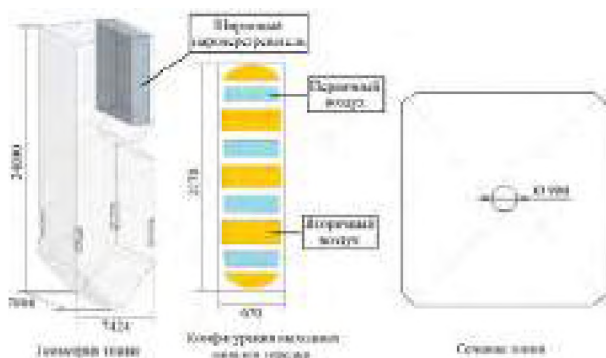


Рис. 1. Эскиз топочной камеры (размеры в мм)

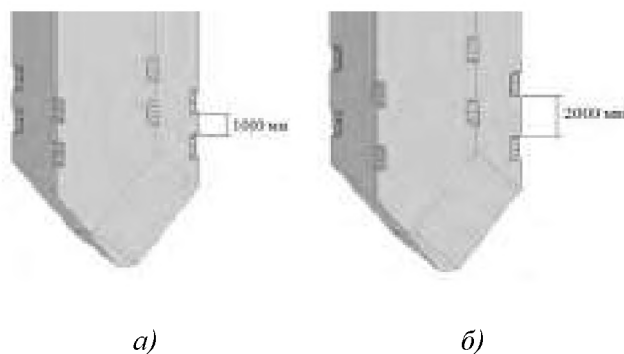


Рис. 2. Компоновка горелок для пофракционного сжигания угольной пыли

Таблица 3. Результаты расчетов

Вариант расчета	Степень выгорания коксового остатка, %	Концентрация NO <sub>x</sub> на выходе из топки, мг/м <sup>3</sup>
Заводская компоновка горелки со сжиганием полифракционной пыли	98,01	162
Расстояние между ярусами горелок 1 метр с разделением фракций по ярусам	99,44	151
Расстояние между ярусами горелок 2 метра с разделением фракций по ярусам	99,59	146

Из представленных результатов видно, что разделение полифракционной угольной пыли на “крупную” и “мелкую” фракции, с последующим введением их в топку на разной высоте приводит к увеличению степени выгорания коксового остатка на 1,43÷1,58 % и одновременному снижению концентрации NO<sub>x</sub> на выходе из топки на 6,8÷9,9 %. Таким образом применение пофракционного сжигания пылеугольного топлива может эффективно применяться для уменьшения потерь тепла с механическим недожогом и некоторого снижения выбросов NO<sub>x</sub>.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. IEA online data services. Renewables information // IEA. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> (дата обращения 10.11.2022).
2. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
3. Пронин А.К. Предпосылки для применения пофракционного сжигания пылеугольного топлива // Бутаковские чтения: материалы I Всероссийской с международным участием молодежной конференции. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – С. 317-320.
4. Ranade V.V., Gupta D.F. Computational modeling of pulverized coal fired boilers. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 288 p.
5. FLUENT Theory Guide, Version 17.2. – Canonsburg, PA, ANSYS, Inc., 2016. – 812 p.
6. Маршак Ю.Л., Сучков С.И., Дик Э.П., Рубин М.М., Гончаров А.И., Конопелько И.П. и др. Исследование сжигания малозольного березовского угля в низкотемпературной тангенциальной топочной камере // Теплоэнергетика – 1981. – № 7. – С. 9-14.
7. Маршак Ю.Л., Козлов С.Г., Дик Э.П., Сучков С.И., Слепухова В.А. Шлакование топочной камеры при сжигании березовского угля // Теплоэнергетика – 1980. – № 1. – С. 16-22.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.С. Заворин, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **МОДИФИКАТОР ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ**

А.В. Губин, К.Б. Ларионов  
Томский политехнический университет

На данный момент, несмотря на активное развитие возобновляемых источников энергии, в различных странах уголь является одним из основных дешевых и наиболее распространенных видов топлив. По данным ВР, потребление угля в 2021 году выросло более чем на 6 % [1]. Несмотря на рост спроса традиционных видов топлив, при их сжигании образуются вредные выбросы, которые пагубно влияют на окружающую среду. При сгорании топлива в избытке воздуха и при высоких температурах, создаются вредные продукты, такие как оксиды азота [2].

Каталитический способ сжигания топлив – наиболее эффективный. При таком способе, окисление топлива происходит на поверхности катализатора при относительно низкой температуре [3]. Существует способ каталитического сжигания, основанного на использовании оксидов металлов, а также их предшественников в виде солей. Действие катализаторов приводит к увеличению скорости реакции и увеличению выделения удельного количества тепла [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования изменения реакционной способности твердых топлив (антрацит и бурый уголь) с помощью предшественников оксидов металлов.

В качестве исследуемых образцов твердого топлива были использованы антрацит (А) и бурый уголь (ЗБ), предварительно измельченные и просеянные на ситах с размером ячейки менее 100 мкм. Далее на полученные порошки были нанесены добавки, предварительно растворенные в водноспиртовом растворе с объемным соотношением (воды/этиловый спирт) 50/50%. В качестве добавок были использованы: селитра техническая, нитрит натрия, нитрит азотнокислый и нитрат кальция. Массовая доля добавки к топливу составляла 5 %. После модифицирования образцов, полученная суспензия при температуре 80 °С выдерживалась до полного испарения водноспиртового раствора.

Исследование реакционной способности было выполнено с применением экспериментального стенда сжигания твердого топлива. Экспериментальный стенд состоит из следующих элементов: камера сгорания в виде терморегулируемой муфельной печи (Спутник, Россия) мощностью 2 кВт с цифровым регулятором температуры (погрешность измерения термодатчика  $\pm 3-5$  °С) объемом 0,003 м<sup>3</sup>; высокоскоростная видеокамера FASTCAM SA4 5 (Photron, США) с форматом изображения – 1024×1024 пикселей, частотой съемки – 250 кадров в секунду (параметры указаны для настоящей работы); дистанционно управляемый координатный механизм; поточный газоанализатор Тест-203 (БОНЭР, Россия).

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов. В терморегулируемой печи устанавливалась температура греющей среды  $T_g = 700$  °С. Далее топливная навеска массой  $\approx 0,1 \pm 0,01$  г помещалась с помощью цилиндрической формы на держатель координатного механизма, ход которого калибровался по заданной координате в центр камеры сгорания и приводился в действие с помощью РС. Держатель топливной навески был закреплен на трубку с внутренним диаметром 6 мм. Одновременно с началом движения трубки с топливной навеской в сторону камеры сгорания начиналась видеофиксация. Образующиеся в процессе горения газофазные продукты (СО, СО<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) проходили через трубку и анализировались с помощью поточного газоанализатора.

Изменение реакционной способности определялось с помощью параметра «время задержки зажигания», который был вычислен по результатам высокоскоростной видеосъемки процессов зажигания и горения исследуемых образцов. Определение данного параметра осуществлялось следующим образом: время задержки зажигания – интервал от момента входа держателя с топливной навеской в фокус камеры до начала образования видимого свечения поверхности топлива, что соответствовала началу процесса горения.

Результаты определения времени задержки зажигания исследуемых образцов представлены на рисунке 1.

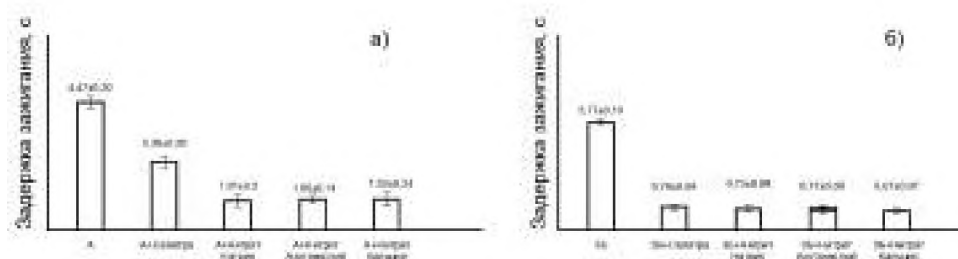


Рис. 1. Время задержки зажигания для исходных и модифицированных образцов: а) антрацита, б) бурого угля

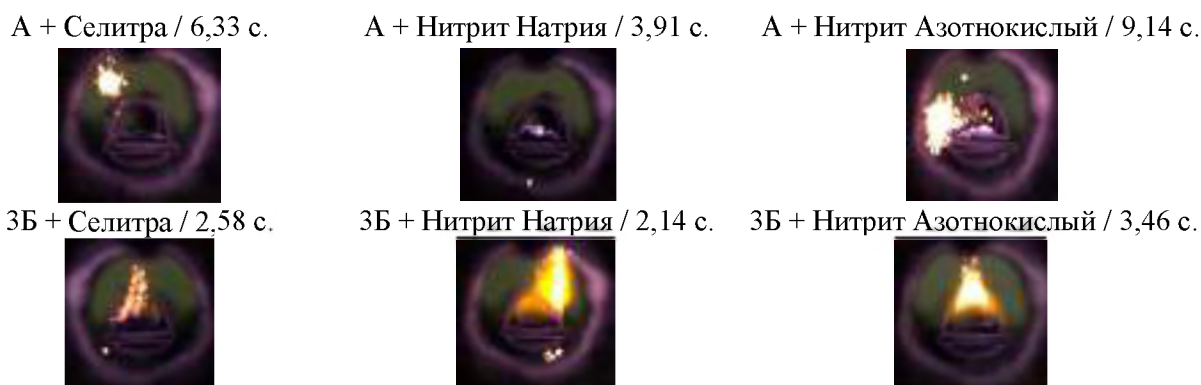


Рис. 2. Кадры высокоскоростной видеосъемки процесса горения модифицированных образцов твердого топлива, визуализирующие характерное образование микровзрывов

Результаты определения времени задержки зажигания, показали, что использование активирующих добавок способствуют к повышению реакционной способности твердого топлива. Наиболее ярко это выражено для образцов антрацита, которые имеют меньшее содержание летучих веществ и как следствие более высокую степень углефикации. Также процесс горения модифицированных образцов сопровождался с периодическим образованием микровзрывов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Statistical Review of World Energy. [Электронный ресурс]: ВР. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 13.11.2022).
2. Каталитическая система и способ восстановления  $\text{NO}_x$  / Мэйл Д.Л., Соловейчик Г.Л., Палматье Э.Л., Роша Т.Г., Ханку Д., Уорнер Г.Л., Редлайн Д.К., Будешейм Э.Д., Чен К., Баддл С.Т. // Джeneral элекрик компани. – 2009. – 18 с.
3. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы / Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.В. // Физика горения и взрыва. – 2015. – т.51. № 2. – 5-13 с.
4. КАТАЛИТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЕ БИОМАССЫ И ИСКОПАЕМЫХ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ / Мороз А.А. // Материалы 62-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – 2006. – 150-152 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-00091).

## **ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА, В КАЧЕСТВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТОПЛИВА НА ПРИМЕРЕ ТЭЦ АЧИНСКОГО ГЛИНОЗЕМНОГО КОМБИНАТА**

В.П. Лойко, Ю.С. Долгов, В.С. Мезенцева  
Сибирский федеральный университет  
ФЭ, ТЭС, группа ФЭ20-01Б, группа ФЭ19-01Б

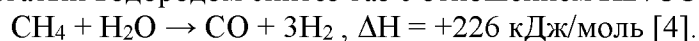
Актуальность работы обусловлена указом президента, в рамках которого одним из приоритетных направлений научно-технологического развития Российской Федерации является переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья [1]. Развитие в этом направлении также предусматривается на втором этапе Энергетической стратегии России, на период до



2035 года будет необходима структурная диверсификация, в рамках которой, в частности, углеродная энергетика должна дополниться неуглеродной [2].

В связи с этим, актуальным вопросом становится производство и потребление водорода, как неуглеродного и экологически чистого топлива в промышленных масштабах. Поэтому, при реконструкции тепловых электрических станций или производств, использующих газообразный водород в качестве топлива, понадобится установка, которая перерабатывает побочные продукты. В данной работе предлагается рассмотреть перспективность перевода котельного агрегата БКЗ-320-140 с угля марки 2Б Ирша-Бородинского разреза на водородное топливо на примере ТЭЦ Ачинского глиноземного комбината (ТЭЦ АГК).

Водород предлагается получать на установке, использующей метод паровой конверсии метана. Паровая конверсия метана – процесс термохимической регенерации, для которого является необходимым наличие метана и водяного пара [3]. Это эндотермический процесс, в котором получают богатый водородом синтез-газ с отношением  $H_2 / CO = 3$  по реакции



Метан, необходимый для реакции предлагается получать в виде сухого газа с АНПЗ. АНПЗ перерабатывает 7,15 млн. тонн нефти в год [5]. Доля сухого газа составляет 1,5 % от перерабатываемой нефти [6].

Водяной пар, необходимый для реакции предлагается получать с ТЭЦ АГК используя пар из промышленного отбора турбины ПТ-60-130. Исходя из данных о составе сухого газа [7] и химической реакции конверсии соотношение пар-метан для реакции составляет 1,26 тонн/час пара на 1 тонн/час метана. Паропроизводительность ТЭЦ АГК полностью обеспечит потребности реакции.

Основным продуктом реакции является водород, который мы сможем получить с помощью метода паровой конверсии, учитывая, что при температуре 700 °С и давлении 5 бар из 1 кг метана можно получить 3,55 кг водорода (рисунок 1) [8].

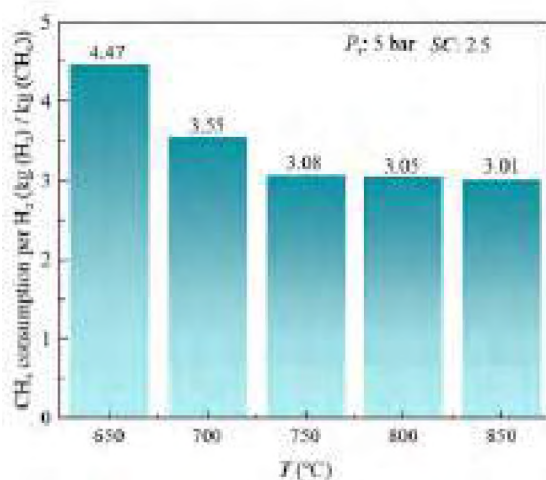


Рис. 1. Зависимость конверсии метана в водород от температуры реакции

Исходя из расхода угля марки 2Б Ирша-Бородинского разреза на котел БКЗ-320-140, можно произвести расчет эквивалентного расхода водорода на котел [9]. Результаты расчета расхода приведены в таблице 1.

Водорода, вырабатываемого с помощью установки паровой конверсии метана, хватит, чтобы полностью обеспечить один из котельных агрегатов ТЭЦ АГК необходимым для работы топливом. При переходе на экологически чистое топливо (водород) ТЭЦ АГК сможет сэкономить на плате за негативное воздействие на окружающую среду и уменьшении затрат на закупку угля. В таблице 2 приведены результаты расчета экономического эффекта при отказе от использования угля в качестве топлива для котла БКЗ-320-140 с учетом ставок платы за НВОС и выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух [10].

Таблица 1. Расчет эквивалентного расхода водорода на котел

Величина	Единица измерения	Формула	Значение
Производительность АНПЗ, $V_{\text{нефть}}$	кг/с	-	226,575
Расход сухого нефтяного газа, $V_{\text{ст}}$	кг/с	$V_{\text{ст}} = V_{\text{нефть}} * 0,015$	3,399
Максимальный расход водорода, получаемого с установки, $V_{\text{нуст}}$	кг/с	$V_{\text{нуст}} = V_{\text{ст}} * 3,38$	11,487
Расход бурого угля на котел, $V_{\text{угля}}$	кг/с	-	10,365
Эквивалентный расход водорода на котёл, $V_{\text{H}_2}$	кг/с	$V_{\text{H}} = V_{\text{угля}} * \frac{Q_{\text{H угля}}^{\text{P}}}{Q_{\text{H H}_2}^{\text{P}}}$	1,322
Необходимый расход сухого газа, $V_{\text{ст}}^{\text{необ}}$	кг/с	$V_{\text{ст}}^{\text{необ}} = \frac{V_{\text{H}}}{3,38}$	0,391
Расход пара на установку, $D$	кг/с	$D = V_{\text{ст}}^{\text{необ}} * 1,26$	0,493

Таблица 2. Ежегодные издержки на плату за вредные выбросы

Вредное вещество	Выброс, г/с	Плата, руб/т	Экономия, руб/год
Диоксид серы	36,75	45,4	52660
Оксиды азота	21,06	93,5	365400
Бензоапирен	$1,06 * 10^{-7}$	5472986,0	18,3
Золотые частицы в воздухе	8	15,1	3588
Зола и шлак	791	663,2	1655000
Итого			17060000

Из результатов таблицы можно заметить, что при выборе водорода как топлива для котельных агрегатов, экономия на платах за вредные выбросы составит порядка 17 млн. рублей в год.

Также следует заметить, что серьезную экономию принесет сокращение трат на закупку угля, поэтому с помощью данных о экономии на топливных издержках и издержках на плату за вредные выбросы можем оценить перспективность в виде срока окупаемости установки паровой конверсии метана. Результаты расчета срока окупаемости приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета срока окупаемости

Величина	Единица измерения	Результат
Ежегодные издержки на закупку угля на один котел	млн руб/год	349,3
Ежегодные издержки на плату за выбросы	млн руб/год	17,06
Суммарная ежегодная экономия	млн руб/год	366,36
Капитальные затраты на установку паровой конверсии метана	млн руб	716
Плата за использование пара с ТЭЦ	млн руб/год	23,76
Срок окупаемости с учетом дисконтированного дохода с нарастающим итогом NPV	год	3

### Заключение

Стоит обратить внимание что помимо затрат на покупку угля и платы за вредные выбросы в окружающую среду, станция сможет отказаться от части системы пылеприготовления, очистки дымовых газов и золошлакоудаления, а также увеличится срок службы котельного агрегата по причине отсутствия шлакования поверхностей нагрева.

В заключении, учитывая все данные, указанные выше, можно сделать вывод, что использование водорода, как экологически чистого топлива, на ТЭЦ АГК, получаемого при помощи установки паровой конверсии метана, является перспективным из-за своей экономичности, экологичности и эффективности.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Указ президента Российской Федерации от 01.12.2016 №642 «О стратегии научно технологического развития Российской Федерации».

2. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 №1523-р «Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года».
3. Нешпоренко, Е. Г. Горение и конверсия топлив в промышленных теплоэнергетических установках / Е. Г. Нешпоренко, С. В. Картавцев ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. – 63 с. – ISBN 978-5-9967-0942-7. – EDN YVCLUN.
4. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья / И. А. Макарян, И. В. Седов, А. В. Никитин, В. С. Арутюнов // Научный журнал Российского газового общества. – 2020. – № 1(24). – С. 50-68. – EDN YLLOQY.
5. Основные показатели работы Ачинского НПЗ. // Роснефть. URL: [https://anpz.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Pererabotka/anpz/Osnovnie\\_poказатели/](https://anpz.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Pererabotka/anpz/Osnovnie_poказатели/) (дата обращения 11.11.2022).
6. Установка ЭЛОУ-АТ. Материальный баланс блока АТ. // ProНПЗ. URL: <https://pronpz.ru/ustanovki/avt-6.html> (дата обращения 11.11.2022).
7. Muneeb Nawaz. Synthesis and Design of Demethaniser Flowsheets for Low Temperature Separation Processes: thesis for the degree of Doctor of Philosophy – Manchester, 2011, – P. 154.
8. Novel ways for hydrogen production based on methane steam and dry reforming integrated with carbon capture / Bosheng Su, Yilin Wang, Zhilong Xu, Wei Han, Hongguang Jin, Hongsheng Wang // Energy Conversion and Management. – 2022. – V. 270.
9. Куличкин, Алексей Павлович. Проект реконструкции Ачинской ТЭЦ : ВКР бакалавра : 13.03.01 / А. П. Куличкин. – Красноярск : СФУ, 2022.
10. Постановление Правительства РФ от 01.03.2022 №274 «О применении в 2022 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду».

Научный руководитель: к.т.н. Д.И. Карабарин, доцент СФУ.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛООВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Ф.Н. Закиров

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, ЭОС, группа ЭОм-1-22

Энергетические объекты в целом и теплоэнергетическое оборудование в частности принадлежат к значительно воздействующим на биосферу окружающей среды. Одной из причин влияния на биосферу является физическое воздействие акустического шума и вибрации теплового оборудования. Источниками акустического шума могут быть двигатели, насосы, компрессоры, трубы, системы вентиляции и трубопроводы с протекающим теплоносителем и т.п. Двигатели создают шум, который вызывается механическими вибрациями, работой систем охлаждения и выхлопов [1].

Поэтому обеспечение достаточной звукоизоляции является важным научно-техническим и экологическим вопросом сохранения акустической безопасности окружающей среды [2].

Методы снижения уровня звукового шума традиционно можно разделить на две группы: снижение за счет уменьшения акустического шума непосредственно на источнике и на пути распространения от источника.

В целях гашения акустического шума непосредственно на источнике применяют мероприятия, связанные с использованием всевозможных конструктивных решений, которые направлены на подавление возникающих вибраций на поверхности источника акустического шума. К примеру, такими мероприятиями могут быть балансировка частоты оборотов до 50 Гц

роторного турбоагрегата или снижение скоростей распространения рабочей среды в трубопроводах, которые являются причиной появления вибраций или звукового шум. Обычно, подобные мероприятия приводят к нарастанию массы и размеров оборудования.



Рис. 1. Зависимость звукоизоляции от звукопоглощения материалов

На сегодняшний день подобные методы снижения акустического шума менее применимы, так как при соблюдении правил создания и эксплуатации оборудования, для уменьшение его звукового воздействия уже не идет речь об улучшении плохо спроектированного или небрежно изготовленного оборудования.

Для достижения наибольшей защиты от акустического шума энергетических источников наиболее используемыми являются мероприятия по звукоизоляции и звукопоглощения.

Для звукоизоляции применяют кожухи и экраны для ограждения работающего оборудования, которые снижают уровень поступающего шума, заграждая путь акустическим волнам. В целях звукопоглощения используются материалы, имеющие свойства диссипации акустических волн, которые размещаются с внутренней стороны оболочки, экранов или стенок кожухов. Наибольшая эффективность достигается при совместном применении мероприятий звукоизоляции и звукопоглощения.

Помимо пассивных методов снижения уровня акустического шума и вибрации, также возможно применение активных методов. Активные методы основаны на принципе генерации акустического сигнала, которая противофазна исходному источнику шума. В таком случае, благодаря системе управления излучателями генерируется акустический сигнал, противофазный исходному звуковому шуму. Этот метод позволяет гасить акустические сигналы крупных энергетических объектов благодаря звукоизоляции и активной диссипации или путем активного подавления вибрации непосредственно на источнике шума [3].

Наиболее важное требование к материалам, используемым для звукопоглощения, характеризуется ее высокопористой структурой. Помимо этого, параметры структуры также влияют на эффективность звукопоглощающих характеристик, зависящих от типа наибольшего числа частоты акустических волн в исследуемом объекте.

Звукопоглощающие свойства материалов зависят от физического явления, которое происходит при гашении акустической волны пористой средой. Она заключается в том, что когда звук попадает на поверхность звукопоглощающего материала, находящийся в порах материала воздух, возбуждает собственные колебания, тем самым гася большую часть акустических колебаний. Гашение акустических колебаний сопровождается небольшим количеством выделения тепла, которая возникает из-за высокой степени концентрации и давления воздуха в пористой части материала. Тем самым, происходит преобразование кинетической энергии акустических колебаний в выделение тепла, далее рассеивающегося в окружающей среде.

Гибкая деформация оболочки изоляционного материала также способствует уменьшению энергии поступающих акустических колебаний. Подобный эффект наблюдается при пористости объемов изоляционных материалов, превышающих 78 %.

В целях звукоизоляции используют многослойные конструкции, характеристики материалов которых оказывают наибольшее сопротивление поступающим как ударным путем, так и по воздуху акустическим колебаниям.

Звукопоглощающие свойства ограждающих конструкций характеризуются тремя основными физическими явлениями:

- 1) их способностью отражать акустические волны, передающиеся по воздуху от наружного слоя;
- 2) количества проходящих через звукоизолирующий материал акустических волн;
- 3) количества рассеянного акустического колебания, преобразуемого путем деформации ограждающих конструкций оборудования и звукоизолирующих материалов.

Также, целях повышения отражения акустических волн наружными ограждающими конструкциями зданий теплоэнергетических систем традиционно применяют массивные конструкции, избегая каких-либо шероховатостей и дефектов.

Способность отражать ограждающими конструкциями зависит от коэффициента отражения

$$\beta = \frac{E_{отр}}{E_{пад}} < 1;$$

где  $E_{отр}$  и  $E_{пад}$  – соответственно падающая и отраженная звуковая энергия.

В теплоэнергетике традиционно в качестве меры тепловой и акустической защиты используют для изоляции пористо-волоконистые материалы из минеральной и стеклянной ваты, древесных волокон, засыпки из керамзита, шлака и т. п.

В целях уменьшения количества ударных и акустических шумов применим малый динамический модуль упругости звукоизоляционных материалов и наличие воздуха в порах. Это достигается за счет уменьшения интенсивности акустического воздействия путем деформации элементов оболочки звукоизоляционных материалов теплоэнергетического оборудования и в малой доле за счёт звукопоглощения [4].

Качество звукоизоляционной оболочки оценивают, рассчитывая их звукопроводность

$$\tau = \frac{E_{прош}}{E_{пад}} < 1;$$

где  $E_{прош}$  – прошедшая за преграду акустическая энергия. Динамический модуль упругости не должен превышать 15 МПа.

Подводя итог, можно сделать вывод, что звукоизоляция теплоэнергетического оборудования может быть решена несколькими методами, отличающимися своей стоимостью, эффективностью и материалами.

Проделанный анализ звукопоглощающих и звукоотражающих свойств материалов теплоэнергетического оборудования позволяет сделать вывод, что выбор материалов сводится к расчету виброизоляции оборудования, звукопоглощающих свойств оболочки и последующему монтажу. Применение подобных мероприятий уменьшают вибрационную и акустическую нагрузки на оборудование и окружающую среду.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тупов В.Б. Снижение шумового воздействия от оборудования в энергетике – М., 2004. – 285 с.
2. Жданов С.А., Разработка экологических инновационных технических устройств ослабления акустического «низкочастотного» излучения электротрансформаторной подстанции закрытого типа // Материалы докладов XI Международной молодежной научной технической конференции Тинчуринские чтения. – 2016. С. 294-295
3. Повышение эффективности звукоизоляции энергетического оборудования / А. В. Кириухин, С. П. Бобров, В. А. Таран, А. П. Железнов // Теплоэнергетика. – 2022. – Т. 12. – № 12. – С. 23-30.
4. Хакимуллин, Б. Р. Основные требования к звукопоглощающим и звукоизолирующим теплоизоляционным материалам / Научному прогрессу – творчество молодых. – 2021. – № 2. – С. 167-169.

Научный руководитель: к.х.н. А.В. Ахмеров, доцент КГЭУ.

# ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ. ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЧЕЛОВЕЧЕСТВО

М.М. Бейкенова

Сибирский государственный медицинский университет  
ЛФС, Лечебное дело, группа 1219

Производство и потребление энергии является неотъемлемой частью жизни человека в современном мире. Во всех промышленно развитых странах темпы развития энергетики опережали темпы развития других отраслей. По данным Международного энергетического агентства (IEA), U.S. Energy Information Administration (EIA) и Европейского агентства по окружающей среде (EEA) потребление энергии только на 2008 год составило 143,851 ПВт·ч.

Проблема настолько большого объема потребляемой и производимой энергии состоит в том, что энергетические предприятия весьма неблагоприятно воздействуют на окружающую среду. Они выделяют отходы и газы в атмосферу, потребляют ископаемые топлива, воду и наносят прочий вред экологии. К энергетическим загрязнениям относятся все виды энергии – механическая (разного рода шум, вибрации, ультразвук), тепловая, световая, электромагнитные поля, ионизирующие излучения и отходы самих производств.

В данном докладе рассматривается проблема влияния энергетических предприятий на гидросферу. Энергетика потребляет около 30 млрд. м<sup>3</sup>/год чистой воды, при том только 65–70 % ее «возвращается» с помощью водооборота.

Энергетика воздействует на водные источники на всех этапах производства энергии. В том числе, при добыче топлива. По данным ЮНЕСКО, при бурении скважины в море сбрасывается свыше 120 т. нефти, до 400 т. бурового шлама и тонны прочих отходов. Чаще всего нефтяными продуктами воду загрязняют мазутные теплоэлектростанции. Сточные воды систем гидрозолоулавливания, загрязненные взвешенными веществами, легко минерализуются. В них могут содержаться различные ядовитые элементы и их соединения (фтор, мышьяк, ртуть, ванадий). В водах, после химической промывки теплосилового оборудования, обнаруживаются примеси нескольких минеральных (соляная, серная, плавиковая), органических кислот (лимонная, щавелевая, бензойная, яблочная и др.), соли аммония, железа, меди, Трилон Б, гидразин, фтор и т. д.

Помимо системного загрязнения гидросферы энергетическими станциями нередки случаи аварий в процессе добычи ископаемых, последствия которых наносят ущерб водным ресурсам. Одной из крупнейших катастроф стал взрыв и последовавший за ним пожар на нефтяной платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе в апреле 2010 года. В результате разлива нефти было загрязнено 1770 километров побережья, погибла значительная часть животного мира: морские черепахи, птицы, рыбы, а также растения. Последствия этой катастрофы до сих пор наносят экологический вред гидросфере, ведь уже “исчезнувшая” нефть все еще возникает на поверхности воды в виде нефтяных пятен, что нарушают газообмен между атмосферой и гидросферой. В свою очередь, это приводит к нехватке кислорода для живых организмов, обитающих в этой области.

Подобное загрязнение сточных, грунтовых вод и, в целом, Мирового океана может вызывать серьезные последствия для экологии. Нарушаются и разрушаются целые экосистемы, так как водная флора и фауна не способна выжить в измененной среде обитания и либо мигрирует, либо погибает. Более того, данная проблема оказывает влияние на человеческую жизнь и здоровье. При попадании в организм загрязненной воды, она может вызывать у человека тяжелые последствия такие как аллергические реакции, отравления и т.п.

Помимо перечисленных выше факторов загрязнения воды, при эксплуатации ТЭС используется огромное ее количество. Она «участвует» в процессе выработки электроэнергии, причем не только на гидроэлектростанциях (ГЭС). Есть электростанции, которые используют воду для снижения температуры на производстве, забирая ее из водохранилищ, озер и рек,

а затем возвращая практически весь объем назад. Сбрасываемая вода на 8–10 °С горячее, чем на этапе забора. Из-за этого возникает так называемое тепловое загрязнение. С одной стороны, возникают благоприятные условия для размножения теплолюбивых организмов, предотвращаются зимние заморы рыбы, улучшается их кормовая база. С другой стороны, значительное развитие таких организмов, как водоросли, бактерии, простейшие, способствует снижению качества воды, угнетению развития некоторых видов водных животных. К тому же, с повышением температуры уменьшается растворимость кислорода в воде, увеличивается восприимчивость организмов к токсичным веществам. Такое изменение экосистемы влияет на окружающие водоемы поселения, для которых вымирание или исчезновение различных видов, например, рыб, вследствие изменения условий их обитания, может ударить по экономике (в случае, если вылавливаемая из водоема рыба продается) и вызвать голод (если рыба является основным источником пропитания населения).

Нередкое явление – строительство плотин на крупных ГЭС приводит к: увеличению риска затоплений в местностях, находящихся ниже по течению, и, как следствие, переселению людей из этих зон, истреблению большого количества разнообразных видов рыб, для которых эти плотины являются непроходимым препятствием на пути к нерестилищу, потере природных и искусственных экосистем (леса, пахотные земли), учащению землетрясений в горных и предгорных районах, изменению и даже разрушению ландшафтов. Забор воды электростанциями вредит природе во время засух или в регионах, где не хватает водных ресурсов.

Создание водохранилищ так же вызывает определенные изменения в природе. Каждый год в мире появляются сотни водохранилищ. Общая площадь этих искусственных водоемов на сегодняшний день составляет ~400 тыс. км<sup>2</sup>. Из-за чего повышается уровень грунтовых вод, что приводит к заболачиванию и подтоплению земель, коррозии берегов и оползням, изменяется микроклимат: повышается влажность воздуха, образуется туман, усиливаются ветра и т.п., изменяются условия обитания фауны в долине реки и перестраиваются фауна самого водотока, превращающегося из реки в водохранилище с замедленным водообменом, в результате чего меняются условия размножения и обитания различных водных организмов, особенно рыб. Благодаря чему, в свою очередь, организмы вынуждены мигрировать или, если условия становятся совершенно непригодными для жизни – они погибают. Что так же вредит и человечеству, ведь рыба, которая обитала в водоеме до его изменения, могла служить пропитанием или одной из сфер бизнеса в данном регионе. К тому же, подобный застой воды, при недостаточном отслеживании, может привести к образованию болот. Данный факт является неблагоприятным для населения, проживающего в районе водоема, потому что болото является местом обитания переносчиков возбудителей различных инфекционных заболеваний. Наиболее существенное последствие для водных ресурсов – изменение качества воды вследствие замедления стока, уменьшения самоочищающей способности, избыточного развития синезеленых водорослей, что так же приводит к изменению всей экосистемы в целом, миграции и вымиранию отдельных видов.

Обобщая всю собранную информацию, можно утвердить, что энергетические предприятия наносят существенный ущерб экологии, в том числе, гидросфере. Человечеству следует задуматься и принять меры для снижения уровня подобного негативного влияния. В этих целях возможно предпринять следующие мероприятия: использовать более экологически чистое топливо (солнечная, ветряная энергия и т.п.), осуществлять внимательный контроль за энергопроизводящими станциями во избежание аварий, уменьшать количество проектов по строительству плотин и водохранилищ и др.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. <https://astpartner.ru/new/new2/archives/17530>
2. Халиуллин, А.К., Салауров, В.Н. Основы промышленной экологии: Учебное пособие для вузов /А. К. Халиуллин, В. Н. Салауров. – Иркутск: Изд-во «Оттиск», 2002. – 268 с.

3. Безопасность жизнедеятельности / авт.-сост. И. Н. Кузнецов. – М.; Минск: Изд-во деловой и учеб. лит.: Амалфея, 2002. – 464 с.
4. <https://gigabaza.ru/doc/73518-p2.html>
5. <https://plus-one.ru/manual/2022/02/18/vliyanie-energetiki-na-ekologiyu>
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5\\_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D0%B8)

Научный руководитель: к.х.н. И.И. Иванов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**И.В. Введенский**

**Ивановский государственный энергетический университет  
ТЭФ, ПТЭ, группа 3-4**

С ростом населения Земли растет и его потребность в различных видах энергии. Развитие центрального отопления, горячего водоснабжения, рост электроэнергетики в быту привели к огромному росту потребления всех видов энергии. Лидирующее место в мире по выработке электроэнергии занимают тепловые электростанции (около 60 %). Так же часть энергии вырабатывается на гидроэлектростанциях – около 20 %, на атомных электростанциях – около 17 % и на геотермальных, приливных, солнечных, ветряных электростанциях – около 1 %.

Использование в теплоэнергетике во все возрастающем объеме ископаемое топливо, а также выбросы с уходящими газами вредных веществ в окружающую среду оказывает влияние на здоровье людей, воздействует на растения и животный мир, ухудшается качество продукции сельского хозяйства. Выбросы от крупных тепловых электростанций оказывают пагубное влияние на атмосферу (выбросы газов, твердых частиц приводят к кислотным дождям, фотохимическому смогу, разрушению озонового слоя Земли), на гидросферу (увеличивается потребление воды, происходят сбросы загрязненных и нагретых сточных вод в водоёмы), на литосферу (возрастает потребление полезных ископаемых, изменение ландшафта при размещении уловленной золы и шламов).

Среди вредных веществ, образующихся при сгорании угля, отдельного внимания заслуживает значительный выброс твердых частиц с дымовыми газами. Мелкие частицы золы попадают внутрь дыхательного тракта, приводя к оседанию в легких. Для предотвращения выброса большого количества золы в окружающую среду существует несколько способов оптимизации производства. Для удаления частиц золы из дымовых газов используются различного рода золоуловители (циклонные или инерционные, мокрые или сухие, электрофильтры и тканевые фильтры). Допустим, установка скрубберов (золоуловители мокрого типа) приводит к задержке 92–96 % твердых частиц, или установка электрофильтров, при которых количество улавливаемой золы составляет 96–99,9 %. Другим способом оптимизации производства электроэнергии можно назвать использование менее зольного топлива. Например, вместо бурого угля (зольность которого 10–40 %) использование каменного угля, такого как Донбасский (зольность 5–28 %), Канско-Ачинский (зольность 8–6 %). Кроме того, Канско-Ачинский уголь еще и малосернистый (в нем содержание серы не более 1 %).

Значителен масштаб загрязнения воздуха и выбросами оксида серы (IV), который раздражает верхние дыхательные пути, вызывая воспаление слизистых оболочек носоглотки, бронхов. Большие концентрации SO<sub>2</sub> являются причиной гибели хвойных лесов. А кислотные осадки, которые образуются в атмосфере в результате взаимодействия оксидов серы с водяными парами, приводят к закислению почвы и водоемов, что приводит к частичной гибели



флоры и фауны. Согласно расчётам, примерно 85 % диоксида серы выпадает на территории, где находится предприятие и в ближайших его окраинах в радиусе нескольких километров. По причине этого на ТЭС, расположенных в пределах города обязаны поддерживать технически достижимую минимальную концентрацию сернистого ангидрида в дымовых газах, снижая его выброс примерно на 60 % для котлов малой мощности и 90 % для котлов большой мощности [2]. Существует огромное количество методов по очистке дымовых газов от  $\text{SO}_2$ , основанных на избирательном поглощении диоксида серы природными (карбонаты кальция, доломит) и искусственными реагентами (гашёная/негашёная известь, оксид/гидроксид магния). Известь и известняк являются самыми доступными и экономичными реагентами, к тому же и хорошо очищают уходящие газ от  $\text{SO}_2$ , поэтому их чаще всего применяют в различных технологиях сероочистки. На крупных ТЭС для обработки больших объемов дымовых газов с высоким содержанием диоксида серы чаще всего для его улавливания используют мокроизвестняковый или мокроизвестковый способ улавливания в отдельно стоящих скрубберах. Этот способ достаточно экономичен, но имеет два существенных недостатка: первый – из-за снижения температуры уходящих газов ухудшается их рассеивание в атмосфере, который можно устранить, применив схемы с регенеративным подогревом уходящих дымовых газов; и второй недостаток – громоздкость сероулавливающих установок, что ограничивает их применение. Если на станции установлены электрофильтры, то наиболее целесообразно применить мокро-сухую известковую сероочистку, основанную на впрыске диспергированного известкового молока в газопровод перед электрофильтром для быстрого поглощения  $\text{SO}_2$ . Сухие продукты сероочистки вместе с золой улавливаются в электрофильтре и далее могут быть использованы в дорожном строительстве, при заполнении неудобиц.

Также для очистки выбросов от соединений серы применяются котлы с кипящим слоем. Эффективность удаления серы зависит от количества добавленного известняка. По зарубежным данным технология «кипящего слоя» позволяет на 80 % связать  $\text{SO}_2$  и на выходе из топки получать его концентрацию не более  $200 \text{ мг/м}^3$  [1]. Сдерживающим фактором здесь является некоторое усложнение конструкции котла за счет установки специальной воздухораспределительной решетки, организацией возврата золы, подводом известняка и др., а также повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных дутьевых вентиляторов для подачи воздуха в зону горения и создания кипящего слоя.

Ещё одним продуктом сгорания твёрдого топлива являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ). Наибольшую опасность оксиды азота представляют в виде активного компонента смога и в виде кислотных дождей. Уменьшение выбросов оксидов азота осуществляется при помощи использования эффективного оборудования, усовершенствования технологии сжигания топлива и с помощью каталитической нейтрализации  $\text{NO}_x$ . В частности, при сжигании топлива в котлах для снижения выброса  $\text{NO}$  применяется двухступенчатое сжигание, рециркуляция дымовых газов в зону горения, сжигание топлива при малых избытках воздуха, разработка новых типов горелок и т. п., например, правильная настройка топочного процесса приводит к снижению выбросов оксидов азота на 10–40 %, рециркуляция дымовых газов – до 30 %, использование малотоксичных горелок – на 30–60 %. Значимую роль при выборе наилучшего метода по снижению содержания оксидов азота в топочной камере играют мощность самого котла и вид используемого топлива (газообразное, жидкое, твердое).

Особое всестороннее воздействие в направлении по уменьшению вредных выбросов в атмосферу напрямую связано с разработкой и освоением котлов, которые сжигают топливо в «кипящем слое». Это способствует очистить газы от соединений серы на 75–85 % и в 1,5–2 раза сократить выход оксидов азота.

Также очень важной проблемой при эксплуатации ТЭС является выброс использованной воды в водоёмы. Так как для полного технологического цикла на станции используется огромное количество воды, которая необходима как для производства пара, так и для охлаждения определённых элементов оборудования. В прямоточной схеме после использования вода возвращается обратно в водоём. Эта вода вносит в используемый источник большое количество

теплоты, создает в водоёме тепловое загрязнение, в результате которого происходит вымирание водной флоры и фауны. Так же образуется усиленное парообразование на поверхности жидкости, увеличивается водорастворимость пород, и преобразуется микроклимат в отдельных районах. Существует несколько способов по предотвращению данного загрязнения. Одним из которых является использование в ходе эксплуатации ТЭС замкнутого цикла. Другой же способ заключается в понижении температуры сточной воды перед сбрасыванием в водоём. В свою очередь сброс сточных вод должен учитывать виды водопользования, поскольку не допускается сброс сточных вод в рыбоохранных зонах, рыбоохранных заповедных зонах и в зонах санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения.

Особую опасность для окружающей среды представляют золоотвалы, потому как вследствие пыления и инфильтрации загрязняют почву и грунтовые воды. Количество золошлаковых отходов зависит от зольности угля, его количества и КПД золоуловителей. На территориях, прилегающих к золошлакоотвалам, наблюдается повышенный радиационный фон, который связан с высоким содержанием тяжелых металлов (в том числе урана и тория) в продуктах сжигания – золошлаках. В результате строительства золошлакоотвалов, которые требуют огромных площадок (примерно 65–140 га), происходит вырубка лесов, изменение ландшафта, изъятие земельного сельскохозяйственного участка. На данный момент имеются проверенные технологии использования золы и золошлаков в производстве различных строительных материалов: шлакоблоков, бетона, глиноземного керамзита и др.

Также при эксплуатации тепловых электростанций имеют место шумовые загрязнения, которые у человека вызывают повышенную утомляемость, снижение умственной активности, понижение производительности труда, развитие желудочно-кишечных, сердечно-сосудистой и нервных заболеваний. Уровень воздействия шума на организм зависит от уровня его интенсивности, который измеряется в децибелах (дБ), и частоты (Гц). Продолжительное воздействие шума интенсивностью 80 дБ может привести к потере слуха. Уровень шума 50–60 дБ в дневное время или 30–40 дБ в ночное время оказывает негативное влияние на центральную нервную систему. Высокочастотные шумы (>1000 Гц) переносятся хуже, чем низкочастотные (<400 Гц). Инфразвук (4–12 Гц) даже при не длительном воздействии приводит к утомлению, чувству страха, головной боли, головокружению и др. Ультразвук (>20 000 Гц) вызывает нарушение деятельности нервной системы, изменение сосудистого давления и др. [1]. Для предотвращения или снижения уровня шума существует несколько способов оптимизации производства: предполагается использование конструкции пластинчатого одноступенчатого глушителя шума. Можно использовать на производстве и звукопоглощающие панели. Также можно использовать менее шумное более новое оборудование.

В мировом производстве электроэнергии так же участвуют гидроэлектростанции. ГЭС является более экологически выгодной станцией по сравнению с ТЭС. В ходе эксплуатации гидроэлектростанции не происходит какого-либо выброса вредных веществ в атмосферу, но в свою очередь происходит выброс в проходящий через него природный водоток. В результате строительства ГЭС, которая по идее представляет собой плотину, образуются водохранилища, большую часть которых составляют мелководья. Возникают они в случаях, когда ГЭС сооружают в равнинной местности, например, волжские ГЭС. Вода мелководий в результате постоянного нагрева солнца прогревается, что способствует образованию в водохранилище сине-зелёных водорослей, которые не используются и со временем начинают разрастаться, гнить и как следствие загрязнять воду и атмосферу. Строительство плотин сопровождается выходом речных вод из русла и затоплением близлежащих пойменных территорий, в результате чего теряется значительная часть плодородного слоя земли, оказывается дополнительное давление на грунт, изменяется структура берегов и их биологическое разнообразие. Так же хочется подчеркнуть, что высокогорные водохранилища являются опасными. Из-за землетрясений или оползней могут произойти крупные экологические бедствия.

Обобщая всё вышеизложенное, хочется напомнить, что в процессе производства тепловой и электрической энергии, также, как и при работе промышленных предприятий происхо-

дит выброс загрязняющих окружающую среду веществ. Из названных способов добычи тепловой и электрической энергии самым вредным для окружающей среды и человека можно смело назвать тепловые электрические станции, хотя и гидроэлектростанции также не являются более экологически чистыми. Так же существуют и другие способы по добыче энергии (атомные, ветряные, солнечные электростанции и т. п.), но наиболее востребованными, выгодными, легкодоступными, но в тоже время и самыми вредными для окружающей среды и человека, считаются ТЭС и ГЭС. Главной причиной, по которой альтернативные способы добычи энергии не стали настолько востребованными, является не постоянство природных явлений, когда в свою очередь тепловые и гидроэлектростанции могут функционировать в зависимости от условий окружающей природы. Для их эксплуатации требуется только наличие необходимого количества ресурсов (твердого топлива, воды). Однако в результате работы любой электростанции происходит, вырос вредных веществ в окружающую среду, будь то дымовые газы, шум, тепловые выбросы, выбросы в литосферу или гидросферу. Разумеется, существует огромное количество способов по снижению выбросов вредных веществ. Так же существует огромное разнообразие нормативных документов, в которых прописано предельно допустимое значение того или иного загрязнения. Соответственно любое производство или энергодобывающая промышленность должна стремиться соблюдать эти допустимые значения для сохранения окружающей человека природы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Пирогов, Н.А. Еремина: экология (экология теплоэнергетики). – Иваново: Изд-во ПресСто, 2010. – 184 с.
2. Большаков В.Н. Экология / В.Н. Большаков, В.В. Качак, В.Г. Коберниченко и др. // под. ред. Г.В. Тягумова, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Логос, 2005. – 504 с.

Научный руководитель: к.т.н. Н.Н. Ярунина, доцент кафедры ХХТЭ ИГЭУ.

## **СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА**

А.В. Кыргыз  
Сибирский федеральный университет  
ПИ, ФЭ, группа ФЭ-11М

Ежегодные лесные пожары приносят большие бедствия, а также вещественные утраты. Общая область возгораний достигает миллионы гектаров, а затраты оцениваются в миллиарды рублей. Вычислено, что годовые потери древесины практически такие же, как и объём вырубленного леса. В зоне пожаров страдает здоровье людей, в особенности люди имеющих заболевания лёгких и сердца, при этом выбросы загрязняющих веществ в атмосферу оценивается в сотни миллионов тонн. К сожалению, можно подтвердить, что лесной массив России подвергается настоящей угрозе исчезновения [1].

Трудная ситуация с лесными пожарами, в особенности в летний период времени, складывается в Республике Тыва.

На основании рассмотренных данных о лесопожарной ситуации в Республике Тыва (РТ) [2] нами составлен анализ факторов возгораний лесов (рисунок 1).

Естественно, то что службы МЧС принимают срочные меры реагирования. Таким образом, своевременность тушения лесных пожаров составила: в первые сутки – 58 (33,7 %); во вторые сутки – 34 (19,8 %); в третьи и более 3 суток – 80 (46,5 %), откуда следует вывод, что процедура тушения в реальных условиях занимает значительное время [2].



Рис. 1. Анализ факторов пожаров в Республике Тыва

Обстановка с пожарами остаётся крайне интенсивной. Можно привести пример, что по оперативной информации региональной диспетчерской службы лесного хозяйства на 00:00 мск 01.10.2022 г. в Республике Тыва лесные службы региона при поддержке сил ПДПС ФБУ «Авиалесоохрана» и ПДПС КГАУ «Красноярская база авиационной и наземной охраны лесов» за сутки ликвидировали четыре лесных пожара на площади, пройденной огнем и занимающей 860 га. Работы по ликвидации семи лесных пожаров продолжалась. По состоянию на 08:00 ч. 27.09.2022 года по данным Региональной диспетчерской службы на территориях лесного фонда Республики Тыва зафиксировано 14 лесных пожаров на общей площади 1586,3 га, из них 10 лесных пожаров на общей площади 1083,8 га, локализовано 4 лесных пожара на общей площади 502,5 га. При этом пожары, к сожалению, действуют в труднодоступной, горной местности.

В Тыве причиной 16-ти лесных пожаров, начиная с начала сезона 2021 г., являлся человеческий фактор.

Лесные пожары делятся на следующие виды: верховые, низовые, подземные (торфяной) [3]. Известны ключевые подходы, позволяющие справиться с ситуацией, а непосредственно: захлестывание, а также засыпка кромки пожара; использование воды и специальных огнетушащих составов; устройство заградительных полос; содействие технических мобильных средств; использование встречных палов. В трудных случаях применяется авиационная техника. В РТ довольно непростой рельеф местности, по этой причине в большей степени применяются способы захлестывания и в качестве основного огнетушащего вещества вода. Пожарные самолёты тоже находят применение, однако в случае труднодоступности зон.

Нами предлагается способ тушения пожаров лесных угодий с помощью аэролётов, с этой целью нами разрабатывается проект базы аэролётов для РТ.

Общий вид ангара для аэролётов представлен на рисунке 2.

При выборе месторасположения базы аэролётов мы придерживались следующих требований:

1. База обязана размещаться вблизи со столицей республики г. Кызылом на берегу р. Енисей.
2. Местность должна быть достаточно ровной, а также не подвергаться наводнениям.
3. Базу необходимо строить вдали от аэропорта и от горных массивов.

Нами выбрано место для создания базы, представленное на рисунке 3.

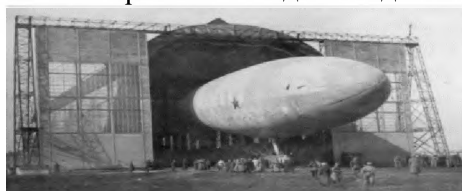


Рис. 2. Ангар на базе аэролетов



Рис. 3. Расположение базы в окрестностях г. Кызыла

Работа по формированию базы аэролётов продолжается.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Терещнев В. В. Пожарная тактика. Книга 5. Пожаротушение. Часть 4. Леса, торфяники, лесосклады : учеб. пособие / В. В. Терещнев. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. – 272 с.
2. Статистические сведения о чрезвычайных ситуациях, пожарах и их последствиях в Республике Тыва за 2020 год (дата обращения 27.10.2022)
3. <https://fireman.club/statyi-polzovateley/lesnyie-pozharyi-osnovnyie-vidyi-i-klassifikatsiya/> (дата обращения 01.11.2022)
4. <https://fireman.club/statyi-polzovateley/sposoby-obnaruzheniya-i-tusheniya-prirodnyx-pozharov/> (дата обращения 03.11.2022)

Научный руководитель: к.т.н. Т.А. Енютина, доцент ФЭПИ СФУ.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

И.В. Лурьев, И.И. Лурьева  
Международный университет нефти и газа  
ФНГ, КРЭНГМ, 2 NGKOU B

Разработка газовых месторождений и эксплуатация скважин являются сложными технологическими процессами, зависящими от природных условий залегания и состава углеводородов. Грамотное управление этими процессами заключается в использовании современных рациональных и эффективных технологий является одной из самых важных задач отрасли. Основными осложнениями при разработке газовых месторождений являются: наличие сероводорода в составе газа; низкая проницаемость и сложное строение продуктивных пластов; аномальные пластовые давления; обводнение газовых скважин и выпадение конденсата в стволе и в призабойной зоне скважин [5]. В этих условиях грамотное управление процессами разработки с помощью современных рациональных и эффективных технологий является одной из самых важных задач отрасли.

Анализ работ, посвященных условиям формирования и разработке месторождений, в составе которых содержится сероводород [2], позволяет отметить следующее: 90 % известных ныне сероводородсодержащих залежей природного газа приурочены к карбонатным отложениям; терригенные коллекторы не могут служить местом накопления сероводорода, так как они содержат значительное количество реакционно-активных форм металлов; сероводород образуется в верхнеюрском карбонатном комплексе, в остальных комплексах сероводородсодержащие залежи образуются за счёт перетока газа и выявлены случаи неравномерного распределения сероводорода в пределах одной залежи, что объясняется его нейтрализацией окисями металлов.

Опыт разработки газовых залежей с неоднородной по площади концентрацией сероводорода в пластовом газе (таких как, Демиргазык Балгуйы, Довлетабад) показал, что обычно на первом этапе осуществляют ускоренный ввод в разработку бессернистой зоны залежей, а разработка сернистой зоны задерживается до завершения строительства наземных сероочистных сооружений. В таких случаях появляется опасность избирательного прорыва сероводородсодержащего газа к забоям эксплуатационных скважин бессернистой зоны по наиболее высокопроницаемым и интенсивно дренируемым пропласткам, что приводит к необходимости дополнительной защиты оборудования от коррозии и строительства сероочистных установок в бессернистой зоне залежи. С.Н. Назаровым впервые в 1961 году был предложен, а затем усо-

вершенствован, способ очистки природных газов от сероводорода путем нагнетания сероводородсодержащего газа в пласт, содержащий достаточное количество природных поглотителей, таких как карбонаты кальция, магния, железа, окислы железа и других [4].

Одной из особенностей большинства газовых месторождений Восточного Туркменистана является содержание в составе природного газа сероводорода малых концентраций. К таким месторождениям относятся: Сакар, Газлыдепе, Багаджа, Гугуртли-ХV, Балгуйы и Демиргазык Балгуйы, Довлетабад и др. Несмотря на различия этих месторождений – равномерное или неравномерное распределение сероводорода по площади или разрезу месторождения, как правило, все они разрабатываются по традиционной схеме с очисткой газа от сероводорода на поверхности.

Для того чтобы создать новые технологии пластовой нейтрализации сероводорода, т. е. очистить природный газ от сероводорода малой концентрации, не извлекая его на поверхность, нами изучены физические основы фильтрации сероводородсодержащего природного газа в химически активной пористой среде. Содержание естественных физико-химических поглотителей (ФХП) сероводорода будет усиливать эффект его искусственной пластовой нейтрализации.

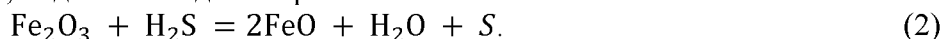
При фильтрации сероводородсодержащего газа в химически активной пористой среде происходит нейтрализация сероводорода и очистка природного газа. Поглотительная способность пласта может быть обеспечена за счёт естественных нейтрализаторов сероводорода, например, в скелете коллектора – окиси или закиси железа, гидроксидов щелочных металлов в остаточной воде и т. д. Процесс нейтрализации сероводорода естественными поглотителями практически нерегулируемый (можно лишь изменять направление фильтрации газа) и всецело зависит от количества естественных поглотителей и объёмов сероводородсодержащего газа. Причем, реакция сероводорода с естественными поглотителями, содержащимися в скелете породы, возможна лишь после растворения сероводорода в остаточной воде.

Независимо от технологии пластовой сероочистки встают задачи прогноза периода добычи очищенного от сероводорода природного газа, определения количества газа, очищенного естественными или искусственными поглотителями, необходимого количества ФХП и его концентрации.

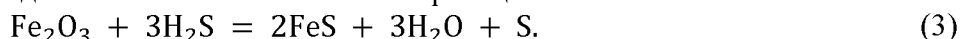
Если пласт-коллектор содержит закись и окись железа – естественные поглотители сероводорода, то нейтрализации сероводорода описывается следующими химическими реакциями. В результате реакции сероводорода с окисью железа образуется сульфид железа и вода:



Химическая реакция сероводорода с закисью железа идёт в две стадии. На первой стадии образуется окись железа, вода и свободная сера:



На второй стадии образовавшаяся окись железа реагирует с сероводородом. Результирующая реакция обеих стадий описывается химической реакцией:



Рассмотрим 3 фазы: газ (1), жидкость (2), твердая порода (3). Предполагается, что: массообмен происходит только между 1 и 2 фазами; химическая реакция происходит между 2 и 3 фазами или только во 2-й фазе, как это показано на рисунке 1.

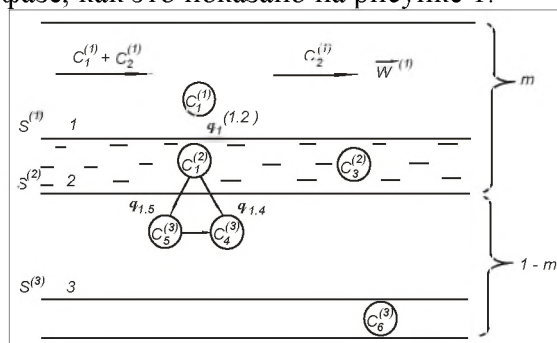


Рис. 1. Схема химической реакции сероводорода с естественными поглотителями

В первой (газовой) фазе:  $C_1^{(1)}$  – концентрация  $H_2S$ ;  $C_2^{(1)}$  – концентрация остальных газов. Причем:

$$C_1^{(1)} + C_2^{(1)} = 1. \quad (4)$$

В фазе 2 (жидкость, вода):  $C_1^{(2)}$  – концентрация  $H_2S$ ;  $C_3^{(2)}$  – концентрация всех остальных компонентов (вода). Причем:

$$C_1^{(2)} + C_3^{(2)} = 1. \quad (5)$$

В фазе 3 (твердая порода):  $C_4^{(3)}$  – концентрация  $FeO$ ;  $C_5^{(3)}$  – концентрации  $Fe_2O_3$ ;  $C_6^{(3)}$  – концентрация остальных компонентов. Аналогично:

$$C_4^{(3)} + C_5^{(3)} + C_6^{(3)} = 1. \quad (6)$$

Растворение сероводорода в воде происходит согласно закону:

$$q_1^{(1,2)} = \lambda_1 [\mu_1^{(1)} - \mu_1^{(2)}]. \quad (7)$$

Пренебрегаем растворением остальных газов в воде, поэтому  $q_2^{(1,2)} = 0$ . Кроме того, количество сероводорода, растворившегося в жидкой фазе ( $q_1^{(2,1)}$ ) в единицу времени равно количеству сероводорода, «ушедшему» из газовой фазы ( $q_1^{(1,2)}$ ) за то же время, но с обратным знаком, то есть

$$q_1^{(2,1)} = -q_1^{(1,2)}. \quad (8)$$

Скорости приведенных химических реакций:

$$q_{1,4} = h_{1,4} C_1^{(2)} C_4^{(3)},$$

$$q_{1,5} = h_{1,5} C_1^{(2)} C_5^{(3)},$$

где  $h_{1,4}$  – константа скорости химической реакции между 1 (сероводородом, концентрацией  $C_1^{(2)}$ , растворенным в водной фазе 2) и 4 (оксидом железа, концентрацией  $C_4^{(3)}$  в породе – фазе 3);  $h_{1,5}$  – константа скорости химической реакции между 1 ( $H_2S$ ) и 5 ( $Fe_2O_3$ ), концентрацией  $C_5^{(3)}$ , в породе – фазе 3).

Баланс веществ в первой фазе:

– баланс сероводорода:

$$\frac{\partial}{\partial t} [mS^{(1)} \rho^{(1)} C_1^{(1)}] + \text{div} [\rho^{(1)} \vec{w}^{(1)} C_1^{(1)}] = -q_1^{(1,2)}; \quad (9)$$

– баланс остальных компонентов (природного газа)

$$\frac{\partial}{\partial t} [mS^{(1)} \rho^{(1)} C_2^{(1)}] + \text{div} [\rho^{(1)} \vec{w}^{(1)} C_2^{(1)}] = 0. \quad (10)$$

Баланс веществ во второй фазе (воде):

– баланс сероводорода

$$\frac{\partial}{\partial t} [mS^{(2)} \rho^{(2)} C_1^{(2)}] + \text{div} [\rho^{(2)} \vec{w}^{(2)} C_1^{(2)}] = -M_1(q_{1,4} + q_{1,5}) + q_1^{(1,2)}; \quad (11)$$

– баланс остальных веществ (воды)

$$\frac{\partial}{\partial t} [mS^{(2)} \rho^{(2)} C_3^{(2)}] + \text{div} [\rho^{(2)} \vec{w}^{(2)} C_3^{(2)}] = M_3(q_{1,4} + q_{1,5}). \quad (12)$$

Здесь:  $M_1$  – молекулярная масса  $H_2S$ ;  $M_3$  – молекулярная масса  $H_2O$ .

Баланс веществ в третьей фазе (породе):

– баланс  $FeO$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - m)S^{(3)} \rho^{(3)} C_4^{(3)}] = -M_4 q_{1,4} + 2M_4 q_{1,5}; \quad (13)$$

– баланс  $Fe_2O_3$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - m)S^{(3)} \rho^{(3)} C_5^{(3)}] = M_5 q_{1,5}; \quad (14)$$

– баланс остальных компонентов в твердой фазе (породе)

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - m)S^{(3)} \rho^{(3)} C_6^{(3)}] = 0. \quad (15)$$

Здесь:  $M_4$  – молекулярная масса  $FeO$ ;  $M_5$  – молекулярная масса  $Fe_2O_3$ ;  $S^{(3)}$  – доля породы, участвующей в химических реакциях.

Результаты исследования физических основ процессов, происходящих при фильтрации сероводородсодержащего природного газа в химически активной пористой среде позволят создать регулируемые технологии пластовой нейтрализации сероводорода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батыров С.Ш., Алехин С.Н., Амурский Г.И. и др. Сырьевая база газохимических комплексов Восточной Туркмении (геологические предпосылки). – Ашхабад: Госплан ТССР, ТуркмениНТИ, 1983. – 51 с.
2. Лурьева И.И. Разработка газовых месторождений с малым содержанием сероводорода // Моделирование процессов разработки газовых месторождений и прикладные задачи газогидродинамики. – Ашхабад: Ылым, 1998. – С. 94-101.
3. Многомерная и многокомпонентная фильтрация: Справочное пособие. / С.Н.Закиров, Б.Е. Сомов, В.Я. Гордон и др. – М.: Недра, 1988. – 335 с.
4. Способ добычи малосернистого газа: авторское свидетельство СССР, No SU 617581, заявл. 15.06.1976; опубл. 30.07.1978. Бюл. No 28. – 3 с.
5. Lurýewa I.I. Gaz kánlerini we ulanyş guýularyny işläp geçmekdäki kynçylyklary we olary çözmegini ýollary // Nebitgaz pudagy ösüş ýolunda. Makalalar ýygundy (NGI-niň işleri, 11-nji goýberiliş). – Aşgabat: TDNG, 2015. – S. 339-346.

Научный руководитель: д.т.н. И.И. Лурьева, зав.лаб. НИИ природного газа ГК «Туркменгаз».

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ТОПЛИВНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

М.Ю. Левченко<sup>1</sup>, В.Е. Губин<sup>2</sup>, Ю.А. Омельчук<sup>1</sup>  
Севастопольский государственный университет  
ИЯЭиП, группа ХКТ/б-19-1-о<sup>1</sup>, доцент, к.т.н., кафедра ПТУ<sup>2</sup>

Производство топлива и энергии – это неотъемлемая часть поддержания жизни целой цивилизации. Однако объекты производств, в том числе и объекты топливно-энергетического комплекса, в своем техпроцессе выделяют вредные и парниковые газы, в том числе и CO<sub>2</sub>. На сегодняшний день проблема парниковых газов, в частности двуокиси углерода, и изменение климата встала как никогда остро. По оценкам IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage выбросы CO<sub>2</sub> различных стационарных производств составляют 13468 млн тонн в год [1]. Из них 10539 млн тонн приходится на энергетику, что составляет около 78 % от всех выбросов CO<sub>2</sub> на производстве (рисунок 1).

Поэтому был создан проект CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage), который включает в себя пакет мер по декарбонизации производств, в том числе и объектов энергетики. Технологическая цепочка технологии состоит из пяти основных компонентов [2]:

- выявление источника CO<sub>2</sub>,
- выделение(улавливание) CO<sub>2</sub>,
- очистка и сжатие CO<sub>2</sub>,
- транспортировка CO<sub>2</sub>,
- хранение или использование CO<sub>2</sub>,

Выявление источников CO<sub>2</sub>.

Пока еще не существует согласованной на национальном или международном уровне классификации источников, однако The Center for Low Carbon Futures классифицировал источники CO<sub>2</sub> в зависимости от концентрации выбросов углекислого газа [3]:

- высокая концентрация >90 %,



- концентрация выше среднего 50–90 %,
- средняя концентрация 20–50 %,
- низкая концентрация <20 %.

Выделение (улавливание) CO<sub>2</sub>.

Процессы улавливания(выделения) CO<sub>2</sub> можно разделить на четыре категории (рисунок 2).

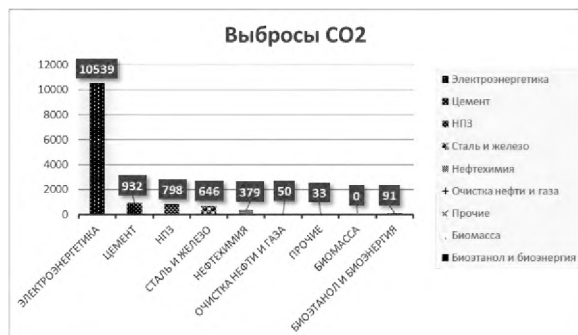


Рис. 1. Выбросы CO<sub>2</sub>



Рис. 2. Процессы улавливания CO<sub>2</sub>

После сжигания – CO<sub>2</sub> удаляется из дымовых газов после сгорания ископаемого топлива. Этот метод экономически целесообразен на электростанциях [4].

Перед сжиганием – топливо в процессе реагирует с паром и воздухом или кислородом и образует смесь газов которая называется синтез-газ (смесь CO и H<sub>2</sub>). После чего CO преобразуется в CO<sub>2</sub> и отделяется от смеси, а оставшийся водород можно использовать как топливо. Данный метод экономически целесообразен на электростанциях на базе IGCC и в промышленных процессах [5].

Кислородное сжигание – технически это не является технологией улавливания CO<sub>2</sub>, однако при сжигании топлива в среде, обогащенной кислородом, образуются дымовые газы, которые, в основном, состоят из CO<sub>2</sub> и воды, вследствие чего углекислоту легче улавливать [6].

Промышленная сепарация – технологический процесс при котором отделяется CO<sub>2</sub>.

Так же стоит отметить технологию прямого улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха (DAC). В данной технологии используются вентиляторы, которые пропускают воздух через фильтр для получения потока чистого CO<sub>2</sub> [7].

Очистка и сжатие CO<sub>2</sub>

Существуют различные способы очистки CO<sub>2</sub>, их выбор зависит от предполагаемого применения в качестве полезного продукта. Хорошо отработаны следующие методы:

- ректификационная очистка по насосной схеме,
- адсорбционная осушка и очистка,
- адсорбционно-ректификационная очистка.

CO<sub>2</sub> высокого давления получают чаще всего путём сжатия до давления конденсации, при одновременном охлаждении водой. Низкотемпературную углекислоту, являющейся основной формой диоксида углерода для промышленного потребления, чаще всего получают по циклу высокого давления путём трехступенчатого охлаждения и дросселирования в специальных установках.

Транспортировка CO<sub>2</sub>

Перемещать улавливаемый CO<sub>2</sub> можно несколькими способами:

- перевозка по суше,
- перевозка по морю,
- транспортировка через трубопровод.

Хранение или использование CO<sub>2</sub>.

Хранить CO<sub>2</sub> можно как в земле, так и в море.

Особенности геологического хранения.

Хранится CO<sub>2</sub> так же, как и нефть, газ или другие углеводороды – в природных резервуарах под землей. Хранение CO<sub>2</sub> включает в себя закачку захваченного газа в геологическую формацию из пористой породы, которая перекрывается непроницаемой горной породой, предотвращающей миграцию вверх и дальнейшую утечку CO<sub>2</sub> [8]. Существует несколько типов резервуаров для хранения CO<sub>2</sub> [9]:

- минерализованные водоносные пласты,
- остаточное удерживание в порах и группах пор,
- минеральное удерживание,
- истощенные или частично истощенные нефтегазовые коллекторы,
- базальтовые формации,
- хранение гидратов CO<sub>2</sub> под землей,
- геотермальные системы на основе CO<sub>2</sub>.

Особенности океанического хранения

Океаническое хранение – это альтернативная стратегия хранения CO<sub>2</sub>, которая заключается в закачке двуокиси углерода в глубокие океанические воды (порядка 4-5 км) при которой CO<sub>2</sub> остается изолированным от атмосферы в течении сотен лет.

Полезное использование CO<sub>2</sub>

Полезное использование углерода – это широкий термин, который характеризует множество путей использования CO<sub>2</sub> (в некоторых случаях CO) для переработки или производства экономически ценных продуктов и услуг.

Выделяют две группы технологий полезного использования – это традиционные и нетрадиционные [10].

К традиционным относят:

- технологии использования CO<sub>2</sub> в химической промышленности,
- производство топлива,
- производство бетонных строительных материалов,
- увеличение нефтеотдачи нефтесодержащих пластов.

В химической промышленности очень развито производство удобрений с помощью CO<sub>2</sub>. Так же с помощью CO<sub>2</sub> производят такие виды топлив как этанол, метан, диметилэтер, а также топлива на основе реакции Фишера-Тропша.

К нетрадиционным относят:

- биоэнергетика со связыванием и хранением углерода (BECCS),
- геоинженерные подходы,
- лесоводство.

BECCS включает в себя биологический захват атмосферного CO<sub>2</sub> путем фотосинтеза и создание биомассы для производства энергии. Так же к геоинженерным подходам относится выветривание CO<sub>2</sub>, которое использует растворение природных или искусственных минералов с целью удаление углекислоты из атмосферы.

### **Вывод**

Большие выбросы CO<sub>2</sub> вызывают обеспокоенность, однако на сегодняшний день уже принимаются меры по декарбонизации производств, но технологии еще несовершенны и требуют дальнейших исследований и испытаний. Однако CCUS требуется государственная поддержка, так как технологии по улавливанию и хранению CO<sub>2</sub> имеют низкую доходность, они крайне непривлекательны для инвесторов. Поэтому для успешной декарбонизации производств требуется удешевление технологий и повышение мощности захвата CO<sub>2</sub>.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Специальный доклад МГЭИК Улавливание и хранение двуокиси углерода Резюме для лиц, определяющих политику Доклад рабочей группы III МГЭИК и Техническое резюме Доклад, принятый рабочей группой III МГЭИК, но утвержденных в общем виде Редакторы: Б. Метц, О. Д. Хелен де Конинк, М. Лоос, Л. Мейер, 2005

2. Carbon Capture, Use And Storage (CCUS) / Official website UNECE, 2022.
3. Carbon Capture and Utilization in the Green Economy: Using CO<sub>2</sub> to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials / The Centre for Low Carbon Futures, July 2011.
4. Climate Technology Centre and Network (CTCN)
5. Bhadola, V. Patel, S. Potdar, S. Mallick. Technology Scouting - Carbon Capture: From Today's to Novel Technologies / Concawe, September 2020.
6. Oxyfuel Combustion / Official website ScienceDirect, 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/oxyfuel-combustion>
7. K. Lebling, N. McQueen, M. Pisciotta, J. Wilcox. Direct Air Capture: Resource Considerations and Costs for Carbon Removal / WRI, 2021
8. The Global Status of CCS Report 2020 / The Global CCS Institute, March 2020. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCSReport-English.pdf>.
9. Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage, CCUS in Clean Energy Transitions / IEA, September 2020.
10. C. Hepburn, E. Adlen, J. Beddington. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal / Nature 575, 87–97, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Е. Губин, зав.каф. ПТУ СевГУ.

## **БИОУГОЛЬ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

А.А. Слоновская, Л.М. Хайнак  
Тюменский государственный университет  
Х-БИО

Агропромышленный комплекс представляет собой многоотраслевую систему с огромным экономическим потенциалом. Мировой прирост населения приводит к увеличению объема агропромышленной продукции, а значит и к повышению объемов образующихся отходов: по данным Росстата [1] за 2021 год в области сельского хозяйства было накоплено 50,6 тысяч тонн отходов. Таким образом, агрокомплекс является одним из самых отходоёмких производств, что влечет за собой ряд экологических проблем, таких как выбросы парниковых газов при гниении, загрязнение грунтовых вод, эрозия почв, уменьшение плодородия и др. [2].

Предотвращение загрязнения окружающей среды и эффективное использование вторично переработанных отходов – одно из ключевых решений экологических проблем данной отрасли. Возможность извлечения экономической выгоды делает из отхода сырье. Таким образом, отходы агропромышленного комплекса могут быть рассмотрены в качестве сырья в случае их использования для получения тепловой и электрической энергии, прямого использования после переработки в сельском хозяйстве и других областях.

На данный момент самыми распространенными способами обращения с такого рода отходами является вывоз на поля и их добавление к почве в качестве удобрения, компостирование, утилизация биоэнергетическими методами [3]. Последний способ рассматривается как наиболее эффективный с позиции полной переработки исходного сырья и получения полезных продуктов с добавленной стоимостью. Одним из таких процессов утилизации отходов является пиролиз – высокотемпературное воздействие на исходное органическое сырье в отсутствие кислорода. Продуктами данной термохимической реакции являются смолы, генераторный газ и биоуголь. Пиролизные смолы могут выступать в качестве химического сырья для производства фенолформальдегидной смолы, древесной омыленной смолы, пленкообразующих материалов и др. [4], газ – для производства тепловой или электрической энергии [5].

Биоуголь в свою очередь имеет довольно широкий спектр применений. В первую очередь, за счет высокого содержания углерода (около 65–90 %) и большой площади поверхности применяется в химических реакциях фильтрации или очистки, удалении неприятных запахов, и также адсорбции, являясь заменителем активированного угля [5].

Одно из самых важных преимуществ биоугля – это положительное влияние на продуктивность и урожайность сельскохозяйственных культур, которое подтверждается рядом научных статей и исследований [6]. Также проводят связь между добавлением биоугля в почву и ее улучшением способность удерживать воду, уменьшением кислотности почвы, удержанием питательных веществ и почвенной биоты [7]. Помимо прочего внесение в сельскохозяйственные почвы мелиорантов на основе биоугля, изъятых из углеродного цикла, рассматривается как один из наиболее перспективных путей связывания и хранения CO<sub>2</sub> [9].

Таким образом, вовлечение отходов агропромышленного комплекса в цикл переработки может нести на себе сразу 2 положительные функции: 1) утилизация источников парниковых газов с целью снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и генерация из них энергетически ценных видов продукции; 2) получение биоугольных мелиорантов, способствующих восстановлению сельскохозяйственных земель и повышению их плодородия, а также долгосрочному депонированию углерода и изъятию его из углеродного цикла. Кроме того, несомненным преимуществом биоугля является возможность его экономической реализации. Так, на сегодняшний день объем потребления биоугля в целом в России составляет около 370 тыс. т в год и реализуется в основном через торговые сети, супермаркеты, гипермаркеты (около 50 % от ежегодного объема продаж) и маркетплейсы [10]. В таблице 1 представлены данные анализа рынка биоуглей на территории Российской Федерации с позиции оценки их области применения и средней стоимости за килограмм или литр.

Таблица 1. Анализ рынка биоуглей на маркетплейсах

Наименование	Применение	Стоимость	Название производителя
Агрохимия	Уголь активированный для растений. Биостимулятор. Используется в качестве удобрения, для поддержания водного баланса грунта, обеспечения доступа кислорода к корневой системе, увеличения содержания органического вещества, нормализуется pH почвы, также применим для обработки срезов растений, для борьбы с грибковыми заболеваниями, против плесени в цветочном горшке.	96 ₽ за 1 кг	Березняк
		67 ₽ за 1 литр	Березняк
		2304 ₽ за 1 кг	Рецепты дедушки Никиты
		680 ₽ за 1 кг	SHANCOAL
		148 ₽ за 1 литр	Florizel, Россия
		204 ₽ за 1 литр	Фермерское хозяйство Ивановское, Россия
		648 ₽ за 1 литр	Сады Аурики, Россия
		351 ₽ за 1 кг	Grow Light, Россия
		73 ₽ за 1 литр	Копатыч, Россия
		78 ₽ за 1 кг	БиоУголь, Россия
		675 ₽ за 1 кг	Termalika, Россия
		327 ₽ за 1 кг	Green Garden Pro, Россия
		1000 ₽ за 1 кг	Зеленый дом, Россия
415 ₽ за 1 кг	Зри в корень, Россия		
309 ₽ за 1 кг	EffectBio, Россия		
Топливо для мангала	Брикетированный уголь отличается отсутствием характерного запаха и дыма, выделяемого при горении. Обладает низкой зольностью. Сниженный расход 1 кг угля заменяет не менее 3 кг обычного кускового угля [11].	120 ₽ за 1 кг	ООО Сибирский биоуголь, Россия
		200 ₽ за 1 кг	Арт-Пикник, Россия
Твердый уголь для кальянов	Бездымный кальянный уголь на основе древесного волокна. Без запаха, не влияет на вкус.	385 ₽ за 1 кг	ООО Сибирский биоуголь, Россия
		370 ₽ за 1 кг	SHANCOAL

Результаты анализа рынка свидетельствуют о том, что набирает популярность применение биоуголей в качестве почвенных мелиорантов для повышения производительности земель. Основной ресурсной базой для их производства является такое сырье как: древесина

различных пород (береза, сосна), скорлупа грецких и кедровых орехов. Потребителей привлекает органическое происхождение данного удобрения и его экологическая безопасность. Однако это отражается на их высокой удельной стоимости: за 1 килограмм – 546 рублей, за 1 литр – 267 рублей.

Таким образом, биоуголь является товаром с высокой добавленной стоимостью, следовательно, его получение из разного рода органических отходов, в частности из отходов агропромышленного комплекса, в результате термохимического преобразования можно считать экономически целесообразным и использовать для покрытия затрат на сам процесс переработки.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 8.11.2022).
2. Андрейченко А.В. Идеология обращения с отходами в АПК: национальные и глобальные изменения URL: <https://cyberleninka.ru/article> (дата обращения 8.11.2022).
3. Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК: справочник. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 50-71с.
4. С.А. Забелкин, Г.М. Файзрахманова, Л.Н.Герке, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров. Синтез химических продуктов с использованием древесной пиролизной жидкости. – Лесной вестник, 2012.
5. Biochar: An Overview S. Woolley, B. Hallowell URL: <https://biomasscontrols.com> (дата обращения 09.11.2022).
6. Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду». ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, 2020 г., 104 с.
7. Peng, X., Ye, L. L., Wang, C. H., Zhou, H., & Sun, B. Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*, 2011, p. 159-166.
8. Zhao, S., Huang, B., Ye, X., Shu, X., & Jia, X. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product. *Fuel*, 2014, p. 52-62.
9. Сидорова К.И. Разработка технико-экономической модели улавливания CO<sup>2</sup> для энергетического сектора / К.И. Сидорова // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 12. – С. 20-25.).
10. Конфисахор А. Новый prospect. URL: <https://newprospect.ru/news/articles> (дата обращения 8.11.2022).
11. Официальный сайт Сибирский биоуголь URL: <https://coal.bio> (дата обращения 09.11.2022).

Работа выполнена в рамках программы развития Тюменского государственного университета (программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»).

Научный руководитель: к.т.н. И.И. Шаненков, зав.лаб. РТТПБ ТюмГУ.

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. БАЙКАЛЬСКА

А.Н. Петрова<sup>1</sup>, Д.Н. Карамов<sup>2</sup>, Е.В. Самаркина<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
ИЭ, группа аЭСК-21<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭТ<sup>2</sup>,  
к.т.н., доцент кафедры ТЭ<sup>3</sup>

В 2022 г. Президент РФ на XXV Петербургском международном экономическом форуме дал отдельное поручение Правительству РФ, Правительству Иркутской области и ВЭБ.РФ об утверждении и финансировании мероприятий программы социально-экономического развития Байкальского муниципального образования до 2040 года [1]. Это подразумевает под собой, что необходимо утвердить программу, содержащую мероприятия по модернизации городской среды и системы коммунальной инфраструктуры с применением современных экологических стандартов, а также по повышению его транспортной доступности. Владимир Путин поставил задачу комплексного развития города Байкальска. «Необходимо не только ликвидировать накопленный вред природе от деятельности Байкальского БЦБК, но и вывести город на принципиально иной уровень жизни, сделать его визитной карточкой российского экологического туризма. Проект должен быть реализован с привлечением самых передовых технологий и экологически чистых источников энергии» [2].

В настоящее время, Байкальск – это город, который расположен на побережье священного озера Байкал, с населением 12500 человек, рисунок 1. Город обеспечивает теплом угольная ТЭЦ остановленного в 2013 году Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). После остановки предприятия ТЭЦ была передана муниципалитету. Данная ТЭЦ работает на угле, физически и морально устарела, котельное оборудование не соответствует современным экологическим и техническим требованиям. Кроме этого, в таком же состоянии находятся и инженерные сети. Таким образом, износ теплоэлектроцентрали превышает 70 %, а главный корпус может обрушиться в любой момент.

Учитывая вышеперечисленные проблемы, предлагается рассмотреть вопрос потенциала солнечной энергетики для г. Байкальска, чтобы использовать солнечные коллекторы для горячего водоснабжения потребителей в рассматриваемом городе. Гелиоустановка – это современный способ получения и последующего применения тепловой энергии от солнца. Солнечная энергетика относится к «экологически чистой», она не производит опасных отходов в процессе использования. Город Байкальск находится на территории, где продолжительность солнечного сияния составляет более 2000 часов в год, рисунок 1.

Для анализа солнечной инсоляции по месяцам, были взяты исходные данные прямой и рассеянной солнечной радиации из трёх различных источников:

- данные NASA POWER;
- данные многолетних метеорологических рядов;
- данные из научно-прикладного справочника по климату.

Проведя расчет с использованием исходных данных NASA POWER, среднегодовой уровень инсоляции для данного города получился 3,12 кВт·ч/м<sup>2</sup>, максимальный уровень инсоляции приходится на июнь и июль и достигает 5,18 кВт·ч/м<sup>2</sup>, что показано на рисунке 2.

В случае использования методики расчета солнечной радиации, описанной в [5], были получены следующие результаты солнечной инсоляции. С использования многолетних метеорологических рядов за 15 лет был найден типичный метеорологический год [5]. В результате расчетов была получена следующая характеристика, представленная на рисунке 3. Среднегодовой уровень инсоляции равен 3,38 кВт·ч/м<sup>2</sup>, максимальный уровень инсоляции приходится на середину июля и достигает 5,83 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Рассчитав среднегодовой уровень инсоляции по табличным данным прямой и рассеянной солнечной радиации из [4], получилось среднее значение 3,49 кВт·ч/м<sup>2</sup>, а максимальный

уровень инсоляции приходится аналогично на середину июля и достигает  $6,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ , что показано на рисунке 4.



Рис. 1. Продолжительность солнечного сияния в РФ и расположение г. Байкальска

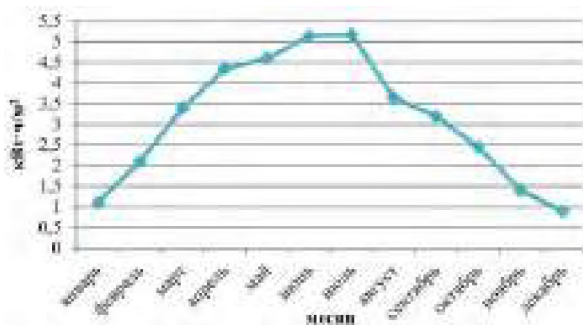


Рис. 2. Усредненное значение солнечного излучения (инсоляции) за сутки по месяцам за 2021 г. ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день), данные агентства NASA POWER

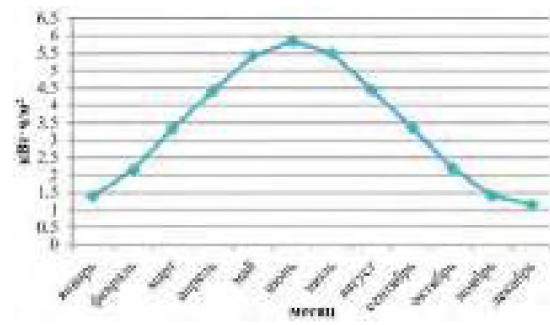


Рис. 3. Усредненное значение солнечного излучения (инсоляции) за сутки по месяцам ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день), данные из [5]

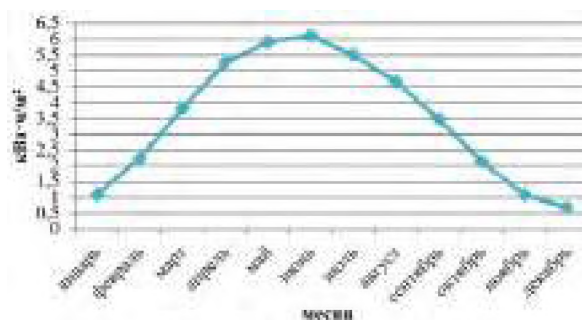


Рис. 4. Усредненное значение солнечного излучения (инсоляции) за сутки по месяцам ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день), данные справочника по климату СССР

Анализ солнечной инсоляции по месяцам в г. Байкальске показал, что эффективная работа солнечных гелиоустановок длится с апреля до первой половины сентября [3]. В этот период мощность солнечного излучения наиболее эффективна для работы гелиосистемы с максимальным коэффициентом полезного действия.

Одним из главных показателей, влияющих на эффективность солнечных коллекторов, является угол по отношению к солнечному излучению. Максимальная эффективность достигается при перпендикулярном падении лучей солнца. Но из-за того, что положение солнца меняется в зависимости от времени суток и в зависимости от времени года, найти такой угол

достаточно сложно. Поэтому, принято брать средние значения угла наклона равные широте местности. Географические координаты г. Байкальска – 51°31'02" с. ш. и 104°09'22" в. д. Поэтому, оптимальный угол наклона солнечных коллекторов в г. Байкальске будет 51 градус.

Таким образом, использование гелиоустановок – это хороший способ не только экономии, но и вклада в защиту экологии. Байкальск, являясь регионом юго-восточной Сибири, имеет приемлемый уровень потенциала солнечной энергии. Так как продолжительность солнечного сияния превышает более 2000 часов в год, это позволит максимально эффективно использовать солнечный потенциал, обеспечивая потребности жителей за счет экологически чистого возобновляемого источника энергии, не создавая выбросов парниковых газов в атмосферу на территории Байкальского региона.

Территория Байкальска, на 70 процентов состоит из частных индивидуальных жилых домов, следовательно, Байкальск можно рассматривать как город, где использование солнечных коллекторов будет эффективным способом энергоснабжения частных потребителей. Анализ распределения мощности солнечного излучения из трёх источников позволил сделать выводы, что наиболее оптимально применять солнечные коллекторы в г. Байкальске с апреля по середину сентября, например, для летнего горячего водоснабжения.

Таким образом, использование солнечной энергетики у отдельных потребителей может существенно повысить качество жизни населения в г. Байкальске.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Байкальск. РФ. // Новости. URL: [https://байкальск.рф/news/vladimir-putin-dal-poruchenie-realizovat-programmu-razvitiya-bay/?ysc\\_lid=19b21r7zhd877359980](https://байкальск.рф/news/vladimir-putin-dal-poruchenie-realizovat-programmu-razvitiya-bay/?ysc_lid=19b21r7zhd877359980) (дата обращения 10.09.2022).
2. Байкальск. РФ. // Новости. URL: <https://байкальск.рф/news/prezident-rossii-otmetil-vazhnost-razvitiya-baykalska-i-likvidats/> (дата обращения 10.09.2022).
3. Prediction Of Worldwide Energy Resource. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 10.09.2022).
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, Многолетние данные // Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Белорусское респ. упр. по гидрометеорологии и контролю природной среды. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 605 с.
5. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28-38.

Научный руководитель: к.т.н. Д.Н. Карамов, доцент ИЭ ИРНИТУ, к.т.н. Е.В. Самаркина доцент ИЭ ИРНИТУ.



# БЕНЗАПИРЕН В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.Д. Гуляев

Московский энергетический институт  
ИЭТЭ, ИЭиОТ, ЭЛ-18-19

Российская Федерация занимает 6 место в мире по добыче угля, согласно данным транснациональной нефтяной компании British Petroleum [1]. Лидирующим регионом по добыче угля является Кузбасс. Он располагается в месте соприкосновения Западно-Сибирской низменности и Алтайско-Саянской горной системы [2]. На его территории производится добыча более, чем 50 % угля, добываемого в стране [3]. Так за 2021 год добыча в регионе составила 241,4 млн т.

В Кемеровской области эксплуатируются 13 тепловых электростанций общей мощностью 5516,3 МВт, из которых 11 используют уголь в качестве основного топлива.

Это влияет на экологическую обстановку области. По данным министерства природных ресурсов и экологии Кузбасса в двух крупнейших городах региона на протяжении практически 20 лет концентрация бензапирена превышает ПДК (рисунки 1, 2) [4].

В очередной раз лидерство по случаям высокого загрязнения атмосферного воздуха досталось городу Новокузнецку, где в 7 случаях было отмечено превышение допустимой концентрации загрязнителя более чем в 50 раз. Основным загрязняющим веществом выступает бенз(а)пирен [5].

Бензапирен является веществом первого класса опасности, которое способно накапливаться и вызывать доброкачественные и злокачественные образования в теле человека, а также проблемы с генами у его потомства. Температура плавления составляет около 179 °С. Выделяется данный канцероген в основном при сжигании твёрдого или жидкого топлива. В человеческий организм он может попадать в основном через пищеварительный тракт и органы дыхания, а затем разноситься по организму через кровь [6].

Бензапирен является продуктом термического недожога и выделяется в атмосферный воздух при работе тепловых электростанций, предприятий химической и металлургической промышленности. Свой вклад также вносит автомобильный транспорт.

Опасность тонкодисперсных частиц заключается в том, что они не задерживаются при прохождении через дыхательные пути человека, попадают в лёгкие, кровь. При этом, если промышленную золу не уловили, она может попадать в организм человека вместе с бензапиреном, адсорбированном в ней.

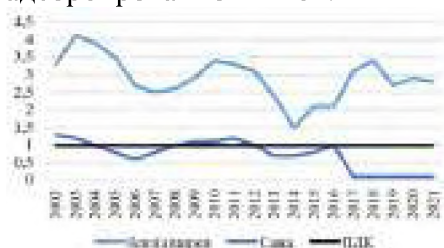


Рис. 1. Среднегодовые концентрации бензапирена в г. Кемерово, доли ПДК



Рис. 2. Среднегодовые концентрации бензапирена в г. Новокузнецке, доли ПДК

Долгое время смертность от онкологических заболеваний стабильно входит в тройку лидеров среди причин смертности населения в Кемеровской, однако в сравнении с 2009 годом смертность от новообразований стала занимать второе место [7].

С сентября 2023 года Кемерово будет участвовать в эксперименте по квотированию выбросов загрязняющих веществ с целью предотвращения негативного воздействия на здоровье населения города [8]. При финансовой помощи федерального центра будут приняты меры для

снижения выбросов в атмосферный воздух с целью их снижения вдвое к 2030 году по сравнению с 2020.

Для уменьшения выбросов бензапирена в атмосферный воздух на ТЭС нами предложены следующие мероприятия:

1) Использование ультрафиолетового излучения.

Для реализации данного метода необходимо отходящие газы облучить ультрафиолетовым излучением электрического разряда при наличии озона и воды, причём последняя находится либо в жидком, либо в парообразном состоянии. Для получения озона проводят облучение воздуха, который подаётся в камеру предварительного воздействия. Температура самих выбросов должна составлять от 0 до 250 градусов, что вполне реализуемо на ТЭС, а облучение газов проводят в спектральном диапазоне длин волн 290–430 нм [9].

2) Увеличение степени улавливания золоуловителей.

Может быть реализовано благодаря адсорбции бензапирена на мелких частицах угольной золы. Пока продукты сгорания проходят по тракту котла, они охлаждаются, и образуются золы и сажа, на поверхности частиц, которых идут процессы конденсации паров бензапирена. При этом, из-за большой удельной поверхности золы с  $pm\ 2.5$  процесс адсорбции происходит в основном на них. Поэтому необходимо не просто увеличение степени улавливания частиц, а повышение эффективности улавливания мелких фракций золы. Кроме того, следует принимать во внимание то, что большая часть бензапирена вместе с уловленной летучей золой поступает в золоотвалы. При этом повторно загрязняется почва и поверхностные воды [10].

Также стоит учитывать, что после котла температура отходящих газов составляет около 120 °С и тогда бензапирен, который не адсорбировался, присутствует в твёрдом состоянии и улавливается золоуловителями.

В целом более предпочтительно из экономических соображений модернизация методов пылеулавливания на предприятиях Кузбасса в соответствии с проведением эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на основе сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Statistical Review of World Energy – all data, 1965-2021 // British Petroleum. 1908. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil-gas-and-coal-trade.html> (дата обращения: 08.11.2022).
2. Трофимов С.С. Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области / С.С. Трофимов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1975. – 300 с.
3. Доклад о ходе реализации в 2021 году мероприятий Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года от 01.06.2022 № СМ-7541/12.
4. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2021 году.
5. В 50 раз выше нормы: названы города России - «лидеры» по загрязнению воздуха // Маяк. 2022. URL: [https://mayak.sbor.ru/news/sreda\\_obitaniya/v\\_50\\_raz\\_vyshe\\_normy\\_nazvany\\_goroda\\_rossii\\_lidery\\_po\\_zagryazneniyu\\_vozdukha/](https://mayak.sbor.ru/news/sreda_obitaniya/v_50_raz_vyshe_normy_nazvany_goroda_rossii_lidery_po_zagryazneniyu_vozdukha/) (дата обращения: 10.11.2022).
6. Ba Q, Li J, Huang C, Qiu H, Li J, Chu R, Zhang W, Xie D, Wu Y, Wang H. 2015. Effects of benzo[a]pyrene exposure on human hepatocellular carcinoma cell angiogenesis, metastasis, and NF- $\kappa$ B signaling. *Environ Health Perspect* 123:246–254.
7. Постановление правительства Кемеровской области от 27.06.2019 № 385 об утверждении региональной программы “Борьба с онкологическими заболеваниями на 2019-2024 годы”.
8. Распоряжение Правительства РФ от 7 июля 2022 г. № 1852-р «Об утверждении перечня городских поселений и городских округов с высоким и очень высоким загрязнением

атмосферного воздуха, дополнительно относящихся к территориям эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) в атмосферный воздух на основе сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха.

9. Патент № 2636717 Российская Федерация, МПК В01D 53/00. Способ очистки газовых выбросов от полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена: № 2015152540: заявл. 08.12.2015: опубл. 27.11.2017 / М. С. Иваницкий; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ").
10. Аничков С.Н. 1.4. Снижение выбросов соединений ванадия и бенз(а)пирена / С.Н. Аничков, В.П. Глебов // Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / Под общей редакцией В.Я. Путилова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 78-86.

Научный руководитель: к.т.н. Н.В. Озерова, доцент МЭИ.

## **THE ROLE OF HYDROGEN ENERGY IN THE TRANSITION TO LOW CARBON ENERGY**

R.J. Komekov, G.T. Garayev, G. A. Ishangulyyev  
International Oil and Gas University named after Yagshygeldi Kakayev,  
Oil and Gas faculty

The project of the "Road Map" for the years 2022–2023 on the development of international cooperation in the field of hydrogen energy of Turkmenistan has been developed. The document, based on international initiatives promoting Turkmenistan in the field of energy, includes a wide range of strategic goals and measures related to the establishment and strengthening of international cooperation on hydrogen energy, the creation of an export-oriented national hydrogen energy industry operating on the basis of modern technologies and equipped with high-level specialists. In recent years, the worldwide increase in activities associated with the transition to low-carbon energy and hydrogen fuel will change the structure of energy demand in the future.

In the storage of electricity and its transportation over long distances, various difficulties arise. But when using electricity derived from hydrogen, storage and transportation are greatly simplified. This method of using hydrogen as fuel for the future is more efficient than renewable energy sources such as wind and solar, which are often season and location dependent. The main advantage of hydrogen is the provision of infrastructure for local energy production. Which means self-sufficient and independent energy production by any state, without the need to rely on external energy suppliers. Thus, our children will be able not to worry about energy resources for many generations.

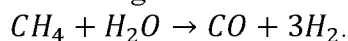
Hydrogen raw materials can be obtained from a huge number of substances, including sewage and water, biofuels, natural gas, oil, and there are enough of them on our planet. It's safe to say that we'll never run out of hydrogen, which means we'll have energy for everyone now and far into the future.

The industrial production of hydrogen is an integral part of hydrogen energy, the first link in the life cycle of hydrogen consumption. Hydrogen practically does not occur in its pure form on Earth and must be extracted from other compounds using various chemical methods. The global structure of hydrogen production is divided into three main sources: the first is coal processing, which accounts for 18 % of the total production; the second is hydrogen obtained from renewable energy sources, mainly from water electrolysis (4 %); the third is the processing of natural gas and oil, which is 78 % [1]. To date, the most cost-effective and cost-effective is the production of hydrogen from

hydrocarbon feedstock. It is possible to reduce the level of carbon emissions in industrial sectors due to hydrogen obtained using low-carbon technologies, for this it is possible to use technologies for capturing and storing carbon dioxide, as well as electrolysis of water, "primarily using the energy of nuclear, hydro, wind and solar energy." If we conditionally divide hydrogen depending on the method of its production and the amount of carbon emissions, we get four main colors. Produced from natural gas, hydrogen is called "blue", in this process carbon dioxide is accumulated in special storage facilities. "Green" hydrogen is called hydrogen produced from renewable energy sources, which is the cleanest. The resulting hydrogen in nuclear energy is called "red", and the most harmful technology for producing hydrogen, in which emissions go directly into the atmosphere, is called "gray" hydrogen [2]. The cost of "green" hydrogen is about \$10 per kg; "blue" and "yellow" hydrogen are several times cheaper than "green" – from \$ 2 per kilogram.

Hydrogen production can be concentrated in centralized large enterprises, which reduces the cost of production, but requires additional costs for the delivery of hydrogen-to-hydrogen filling stations. Another option is small-scale production directly at specially equipped hydrogen filling stations. In 2019, 75 million tons of hydrogen are consumed in the world, mainly in oil refining and ammonia production. Of these, more than 3/4 is produced from natural gas, for which more than 205 billion m<sup>3</sup> of gas is consumed. Almost everything else is made from coal. About 0,1 % (~100 thousand tons) is produced by electrolysis. During the production of hydrogen, ~830 million tons of CO<sub>2</sub> are released into the atmosphere. The cost of hydrogen from natural gas is estimated at 1,5– 3 dollars per 1 kg. Hydrogen can be used as a fuel in many applications, from batteries to spacecraft. Examples of this are hydrogen batteries; cars, planes, helicopters on hydrogen fuel; metallurgy, moving from coal to hydrogen, etc.

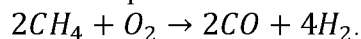
**Production of hydrogen from natural gas:** Steam reforming at 1000 °C:



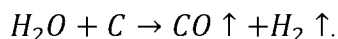
Hydrogen can be obtained in different purity: 95–98 % or extra pure. Depending on the further use, hydrogen is produced under various pressures: from 1,0 to 4,2 MPa. The raw material (natural gas or light oil fractions) is heated to 350–400 °C in a convective furnace or heat exchanger and enters the desulfurization apparatus. The converted gas from the furnace is cooled in the recovery furnace, where steam of the required parameters is produced. After the stages of high-temperature and low-temperature conversion of CO, the gas is fed to the adsorption of CO<sub>2</sub> and then to the methanation of residual oxides. The result is hydrogen of 95–98,5 % purity containing 1–5 % methane and traces of CO and CO<sub>2</sub>.

In the event that it is required to obtain highly pure hydrogen, the unit is supplemented with a section for the adsorption separation of the converted gas. In contrast to the previous scheme, the CO conversion here is single-stage. The gas mixture containing H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O and a small amount of CO is cooled to remove water and sent to adsorption apparatuses filled with zeolites. All impurities are adsorbed in one stage at ambient temperature. The result is hydrogen with a purity of 99,99 %. The pressure of the resulting hydrogen is 1,5–2,0 MPa.

Catalytic oxidation with oxygen is also possible:

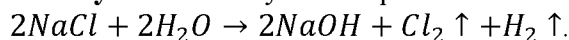


**Production of hydrogen from coal:** Passing water vapor over hot coal at a temperature of about 1000 °C:

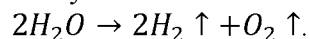


The oldest way to produce hydrogen. The cost of the process is \$2–\$2,5 per kilogram of hydrogen. In the future, the price may be reduced to \$1,50, including delivery and storage [3].

**Hydrogen production by electrolysis:** Electrolysis of aqueous solutions of salts:



Electrolysis of aqueous solutions of hydroxides of active metals (mainly potassium hydroxide).



In addition, there is an industrial technology for the electrolysis of chemically pure water, without the use of any additives. In fact, the device is a reversible fuel cell with a solid polymer membrane [4].

Despite the huge advantage in the energy sector, even large oil and gas companies are starting to invest in this direction. Despite the fact that the share of these companies in investments in renewable energy sources is not yet so large, the world's majors predict the transformation of oil and gas companies and their participation in projects to reduce carbon emissions. For comparison, we can give such an example, the total investment in the exploration and production of hydrocarbons around the world in 2020 amounted to 328 billion US dollars, which is 32 % less compared to the previous year. Today we can confidently say that hydrogen is the fuel for the future. Providing the needs of humanity in energy, as well as a complete transition to the “decarbonization” of world energy.

The initiatives put forward by Turkmenistan are aimed at creating new principles of global energy security, universal access to inexpensive and reliable energy sources and a balance between production goals and environmental protection objectives. One of the solutions could be the development of a UN Strategy for the Development of Low-Carbon Energy and the creation of a Roadmap for the Development of Hydrogen Energy under the auspices of the UN. Therefore, in January 2022, Turkmenistan approved the Roadmap for the development of international cooperation of Turkmenistan in the field of hydrogen energy for 2022–2023. Hydrogen energy will serve as an alternative way of monetizing the "blue fuel" of Turkmenistan. "Hydrogen Energy Center" has opened at the International Oil and Gas University named after Yagshageldi Kakayev. This center has great importance in training high-level specialists in the field of hydrogen energy in the country.

#### LITERATURE:

1. Прорывные технологии в энергетике / под ред. Я. В. Ренькас // Наука в России. – 2005. – № 6. – С. 44-46.
2. Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика - пути развития / Н. Н. Пономарев-Степной, А. Я. Столяревский // Энергия: Экон., техн., экол. – 2004. – № 1. – С. 3-9.
3. Deng Z.-Y. Hydrogen-generation materials for portable applications / Z.-Y. Deng, M.F. Ferreira José, Y. Sakka // J. Amer. Ceram. Soc. – 2008. – Vol. 91, № 12. – P. 3825-3834.
4. Little M. Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage / M. Little, M. Thomson, D. Infield // Int. J. Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32, № 10-11. – P. 1582-1588.

Scientific adviser: P.H. Annalyuev, lecturer, International Oil and Gas University named after Yagshygeldi Kakayev.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННОЙ КОФЕЙНОЙ ГУЩИ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА**

Н.А. Демидов

Омский государственный университет путей сообщения  
ИЭТСЭ, ТЭ, группа 40ж

В текущий момент в мире все более актуально использование экологически чистого биотоплива. Такое топливо можно использовать для подогрева жилищ, движения автотранспорта и освещения.

Ежегодно производят около 7 миллиардов кг кофе. И каждый день в мире выпивают порядка 3,5 миллиарда чашек этого напитка.

Кофейная гуща – наиболее примечательные отходы индустрии. Ее получают при производстве растворимого кофе, а также после приготовления напитка в кофемолке или дома. Из 1 г молотого кофе получится около 0,91 г отработанной гущи. Таким образом мы имеем около

6,3 миллиардов килограмм возможного топлива, которое в основном вывозится на свалки что негативно воздействует на экологию.

В данной статье предлагается оценить качественные характеристики кофейной гуши как топлива.

Для проведения опыта была взята проба (рисунок 1) из кофе машины. Затем проба была разделена по стаканчикам [1].

После проводится взвешивается с точностью до 0,001 г. В дальнейшем определяется содержание влаги в топливе.

Стаканчики с навесками кофе помещают в заранее нагретый до 110–115 °С сушильную печь и выдерживают 55–65 мин.



Рис. 1. Фото заготовленной пробы перед опытами

В течение всего времени сушки стаканчики должны оставаться полуоткрытыми. После просушки, стаканчики с топливом изымают из печи и охлаждают сначала на воздухе в течение 3 минут, после – в эксикаторе до температуры окружающей среды.

Рабочую влажность топлива рассчитаем по формуле:

$$W^{(p)} = \frac{G_1^{(n)} - G_2^{(n)}}{G_1^{(n)}} 100 \%, \quad (1)$$

где  $G_1^{(n)}$ ,  $G_2^{(n)}$  – масса топлива перед просушкой и после контрольной просушки,

$$W^{(p)} = \frac{7,328 - 3,102}{7,328} 100 \% = 57,7 \%. \quad (2)$$

Что бы рассчитать качественные характеристики исследуемого топлива, нужно из взятой пробы, после того как были взяты навески для определения рабочей влаги [4], изготовить пробу для исследования.

Для этого оставшееся топливо исследуемой пробы всыпают на противень слоем толщиной 12 мм, высушивают в сушильной печи при температуре (55±5) °С в течение 3 ч.

Все высушенное топливо измельчают в ступе, до фракции сито с ячейками 0,22×0,22 миллиметра, и перемешивают.

Аналитическую влагу определим по формуле:

$$W^{(a)} = \frac{G_1^{(a)} - G_2^{(a)}}{G_1^{(a)}} 100 \%, \quad (3)$$

где  $G_1^{(a)}$ ,  $G_2^{(a)}$  – масса топлива исследуемой пробы до просушки и после контрольного просушивания,

$$W^{(a)} = \frac{2,028 - 1,822}{2,028} 100 \% = 10,2 \%. \quad (4)$$

Далее определим зольность топлива. Для этого лодочки устанавливают в прогретую до 310 °С печь. Затем закрываем дверь, и постепенно в течение 1,5–2 часов повышают температуру в печи до 810–835 °С. При таком температурном режиме образовавшийся остаток золы прокалывают 2–2,5 ч в закрытой печи, затем лодочки с остатком золы (рисунок 2) вынимают из печи, охлаждая вначале на открытом воздухе 10 минут, после – в эксикаторе до температуры окружающей среды и проводят взвешивание [3].



а)



б)

Рис. 2. Взвешивание пробы:  
а) до озоления; б) после озоления

Зольность исследуемой пробы топлива рассчитаем по формуле:

$$A^{(a)} = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $M_2$  – масса остатка золы после прокалики;  $M_1$  – масса исследуемой пробы до озоления (без тары),

$$A^{(a)} = \frac{0,007}{0,991} \cdot 100 \% = 0,7 \%. \quad (6)$$

Определим по формуле зольность топлива при перерасчете на рабочий состав:

$$A^{(p)} = A^{(a)} \cdot \frac{100 - W^{(p)}}{100 - W^{(a)}}, \quad (7)$$

$$A^{(p)} = 0,706 \cdot \frac{100 - 57,669}{100 - 10,158} = 0,3 \%. \quad (8)$$

Ценность топлива в плане содержащийся в нем калорийной ценности оценивают характеристикой, называемой: «удельная теплота сгорания топлива» [2], она является количеством тепловой энергии, выделяемой после полного сгорания единицы топлива.

Экспериментальное определение теплоты сгорания твердого топлива заключается в сжигании его части (около грамма) в среде сжатого кислорода в калориметрической установке (рисунок 3) и в измерении тепла, выделившегося при этом.



Рис. 3. Калориметрическая установка

В начальном периоде совершают шесть отсчетов по шкале термометра через 1,5 минуты. Проведя первое снятие показателей с точностью до 0,001 °С, вместе с этим включают секундомер. После шестого отсчета замыкают цепь, что приводит к воспламенению топлива, продолжают снимать показатели с точностью до 0,001 °С.

Основной период будет считаться завершенным, после того как наступит равновесие с окружающей средой, выраженное равномерным изменением температуры. Основной период продолжается 8–10 минут (15–19 отсчетов).

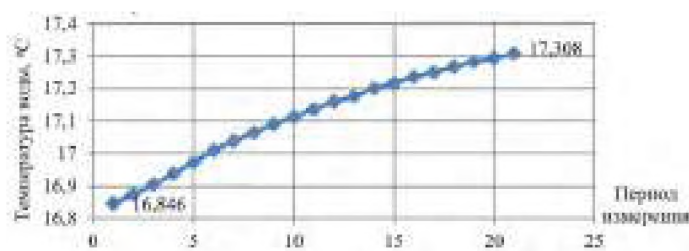


Рис. 4. Изменение температуры воды в калориметрической установке

Теплота сгорания топлива для исследуемой пробы вычислим по формуле:

$$Q_6^{(a)} = \frac{KH[(t_k + h_k) - (t_0 + h_0) + \Delta t] - M_{\text{п}} Q_{\text{п}}}{M_{\text{т}}}, \quad (9)$$

где  $K$  – теплоемкость применяемого калориметра, кДж/°С;  $H$  – фактическое деление шкалы термометра, °С/дел.;  $t_0$  и  $t_k$  – первая и последняя замеренная температура основного периода, деления;  $h_0$  и  $h_k$  – поправка на точность термометра при  $t_0$  и  $t_k$ , деления;  $\Delta t$  – поправка на утечку тепла из калориметра во внешнюю среду, деления;  $Q_{\text{п}}$  – количество теплоты выделившееся при сгорании проволоки, Дж/кг;  $M_{\text{п}}$  – масса проволоки (запальной), кг;  $M_{\text{т}}$  – масса исследуемого биотоплива, кг.

$$Q_6^{(a)} = \frac{14,4 \cdot 1[(17,3 + 0) - (16,8 + 0) + 0,012] - 0,000001 \cdot 3140}{0,000975} = 7,5 \text{ МДж/кг.} \quad (10)$$

Исходя из результатов проделанных расчетов (величина теплоты сгорания несколько ниже, чем у сухого дерева – 10 МДж/кг [5]) можно сделать вывод о том, что кофейную гущу допускается применять в качестве топлива. Для использования требуется подсушка и переработка в гранулы или же в бруски, покрытые воском (рисунок 5). Покрытие воском требуется для предотвращения насыщения влагой так как высушенная кофейная гуща обладает высокой гигроскопичностью.



Рис. 5. Пример изготовленных кофейных брусков

В Европе отработанные отходы собираются и доставляются на завод в Кембриджшире, где производится кофейные бруски и пеллеты промышленным образом [6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 10742-71. Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методика отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. Москва: Изд-во стандартов, 2002.
2. ГОСТ 147-2013. топливо твердое минеральное. определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. Москва: Стандартинформ, 2014.
3. ГОСТ Р 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определения зольности. Москва: Стандартинформ, 2019.
4. ГОСТ 9516-92. Уголь. Метод прямого весового определения влаги в аналитической пробе. Москва: Изд-во стандартов, 1993.
5. Пеллеты – современный экологически чистый вид биотоплива / А.И. Полищук, А.В. Рубинская // Брянский государственный инженерно-технологический университет. Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2011. – No 29. – С. 108–111.
6. Компания bio-bean : официальный сайт : URL: <https://www.bio-bean.com/> (дата обращения 11.11.2022).

Научный руководитель: А.С. Гусаров, ст. пр. ИЭТСЭ ТЭ ОмГУПС.

## **ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА ПОСЛЕ РЕКУЛЬТИВАЦИИ**

К.А. Краевой  
Московский энергетический институт  
ИЭТЭ, ИЭиОТ, группа Э-01М-22

Около 3 % добываемой нефти попадает окружающую среду на этапах ее добычи, транспортировки, хранения и распределения. В результате загрязнения нефтью и ее продуктами первую очередь страдает почва, происходит ее эрозия. Если в почве содержится 10–15 % нефти, то прекращается жизнедеятельность почвенной микрофлоры, Нефтяные разливы не только усугубляют проблемы загрязнения окружающей среды, но также очень сильно влияют



на животный и растительный мир. В зависимости от целевого назначения и дальнейшего разрешенного использования почв существуют методы для ликвидации разных по объему и характеру загрязнений [1].

На территории Ямало-Ненецкого автономного округа был обследован участок с разливами нефтепродуктов в пределах Комсомольского нефтяного месторождения, эксплуатируемого организацией «РН Пурнефтегаз». Общая площадь месторождения составляет 1368,91 км<sup>2</sup>. Суммарная площадь загрязненных участков месторождения составила 0,016476 км<sup>2</sup> (1,6476 га).

Несмотря на тот факт, что почвы в ЯНАО содержат довольно маленькое количество гумуса, он очень важен в развитии растительного покрова, который, в свою очередь, является основным источником ресурсов не только для представителей животного мира, но и людей. Такие огромные и частые загрязнения почв нефтепродуктами вызывают нарушения в биологических цепочках, и в дальнейшем ведут к миграции или даже к вымиранию видов.

Поскольку загрязненные нефтепродуктами почвы являются маломощными, расположенными в сложных климатических условиях многолетней мерзлоты, то рекультивацию нужно производить комплексную, состоящую из трех этапов: подготовительного, технического и биологического.

Биологический этап рекультивации земель состоит из обработки поверхности почвы биоцеллюлозами для дальнейшего ускорения разложения нефтепродуктов, а также внесения минеральных удобрений с последующим посевом смеси многолетних трав. Используемые нами клевер луговой и овсяница луговая для биологического этапа рекультивации, не только устойчивы к прорастанию на загрязненных нефтепродуктами почвах, но и обладают высокой степенью поглощения CO<sub>2</sub> [2].

Почвы являются главным резервуаром для стока углерода во всем мире и больше половины запасов углерода содержатся в них. Почвенное органическое вещество имеет свойство практически мгновенно реагировать на смену биоклиматической обстановки в данной местности. Запасы органического углерода в почвах являются фактором возможной эмиссии углекислого газа в атмосферу. По причине влияния глобальных изменений климата и иных факторов, таких как антропогенные или природные, происходит изменение минерализации ОВ и скоростей процессов гумификации в почвах.

По причине отсутствия численного значения нормирования предельно допустимой концентрации нефтепродуктов в почве для оценки степени загрязнения почвы нефтепродуктами было использовано отношение углерода к азоту (C/N), определяющее обогащенность органическим веществом. В таблице 1 отображено, что на загрязненных участках почвы превышение этого показателя в 5 раз в сравнении с эталонными почвами данного региона. Способность к трансформации азота показывает отношение C к N. Трансформация углеводородов нефти в почвах протекает медленно и малоактивно по причине крайне низкой обеспеченности земель азотом [3].

Таблица 1. Содержание углерода в почве [3]

Глубина, см	C <sub>общ.</sub> , % фоновой почвы	C/N фоновой почвы	C <sub>общ.</sub> , % нефтезагрязненных почв	C/N нефтезагрязненных почв
0–5	20,06	28,5	5,83	61,4
5–10	0,47	16,3	4,75	104,6
10–30	0,28	18,1	5,82	61,4

Одним из способов сокращения выбросов и поглощения CO<sub>2</sub> является рекультивация нефтезагрязненных земель. Поглощение CO<sub>2</sub> осуществляется за счет увеличения уровня почвенного углерода и снижении темпов его потерь в результате дыхания и эрозии почвы. Для этого необходимы три этапа рекультивации, в частности, посадка многолетних трав.

Для оценки изменений запасов углерода в пулах биомассы и почвы при выполнении рекультивационных работ воспользуемся формулой [4]:

$$\Delta C_{\text{конверсия}} = \Delta C_{\text{биомасса}} + \Delta C_{\text{почва}},$$

где  $\Delta C_{\text{конверсия}}$  – суммарное изменение в запасах углерода в углеродных пулах биомассы и

почвы на рекультивированных землях; тонны С/год;  $\Delta C_{\text{биомасса}}$  – изменение в запасах углерода в пуле биомассы на рекультивированных землях; тонны С/год;  $\Delta C_{\text{почва}}$  – изменение в запасах углерода в пуле почвы на рекультивированных землях; тонны С/год.

При количественной оценке изменений запасов углерода в пулах биомассы и почвы согласно методике [4] учитывалось поглощение почвой тундры, естественной фитомассой, и фитомассой выбранных высаженных многолетних трав. Поглощение фитомассой клевера и освяницы луговой было взято как среднее значение. Исходя из данных таблицы 2 нами было рассчитано поглощение  $\text{CO}_2$  для рекультивируемых нефтезагрязнённых почв.

Таблица 2. Характеристика пулов (резервуаров) углерода в тундре [5]

Резервуар		Среднее содержание углерода, кг С/м <sup>2</sup>
Фитомасса	Естественная	0,7-1,0
	Многолетних трав	8,01-15,75
Почва		29,5-39,5

По результатам расчетов  $\Delta C_{\text{конверсии}}$  составило 86,052 тонн С/год для выбранного участка площадью 1,6476 га.

Рекультивируемые нефтезагрязненные участки почв можно рассматривать как возможный резервуар для аккумуляции углерода многолетними травами, поступающего в атмосферу в результате сжигания традиционных видов топлива и возникновения техногенных аварий.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горобцова Н.С. Любская О.Г Сравнительный анализ препаратов для очистки грунтов от нефтешламов // Журнал «Успехи современной науки» 2018 г. – 2 с.
2. Мазиров И.М. Функционально-экологическая оценка доминирующих потоков и пулов углерода в представительных полевых агроэкосистемах с окультуренными дерново-подзолистыми почвами Центрального региона России: дис. канд. биол. наук: 03.02.08 / Мазиров Илья Михайлович; науч. рук. И.И. Васенев; РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. – Москва, 2016 – 164 с.
3. Краевой К.А., Озерова Н.В. Рекультивация нефтезагрязненных земель в Ямало-Ненецком автономном округе // Сборник материалов шестой всероссийской студенческой конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология», г. Казань, 24-26 мая 2022 г.
4. Приказ министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».
5. Пастухов, А.В. Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы / А.В. Пастухов, Д.А. Каверин // Почвоведение. – 2013. – № 9. – с. 1084-1094.

Научный руководитель: к.т.н. Озерова Н.В., доцент ИЭиОТ.

# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ

А.Н. Быкова, С.А. Шмидт

Томский университет систем управления и радиоэлектроники  
РКФ, РЭТЭМ, группа 239-3

В настоящие дни дезинфекция воздуха при помощи ультрафиолетового обеззараживания является самым безопасным способом очищения воздуха как для людей, так и для животных.

Метод дезинфекции УФ источниками излучения основан на способности излучения с длинами волн менее 315 нм приводит к фотохимическим реакциям в структуре молекул ДНК и РНК, следствием чего является их необратимым повреждением. Современные технологии сделали возможным создать мощные УФ источники излучения, которые в настоящее время применяются как в промышленных, так и в бытовых системах очистки воздуха. В первую очередь такие системы используются, где большое количество людей (вокзалы, аэропорты), в медицинских учреждениях.

Бактерицидный рециркулятор – это устройство, способное обеззараживать воздух в помещении с помощью ультрафиолетового излучения путем рециркуляции воздуха. Такой прибор может уничтожить присутствующие в воздухе бактерии, микроорганизмы и вирусы. Он используется для профилактики вирусных инфекций, которые передаются воздушно-капельным путем.

Зависимость бактерицидной эффективности в относительных единицах  $S_{\text{лотн.}}$  от длины волны излучения  $\lambda$  (таблица 1).

Таблица 1. Зависимость бактерицидной эффективности

$\lambda$ , нм	$S_{\text{лотн.}}$	$\lambda$ , нм	$S_{\text{лотн.}}$
205	0,0000	260	0,950
210	0,009	265	1,000
215	0,066	270	0,980
220	0,160	275	0,900
225	0,260	280	0,760
230	0,360	285	0,540
235	0,460	290	0,330
240	0,560	295	0,150
245	0,660	300	0,030
250	0,760	305	0,006
255	0,860	310	0,001
		315	0,0000

По этим данным максимум бактерицидного действия приходится на длину волны 265 нм (рисунок 1).

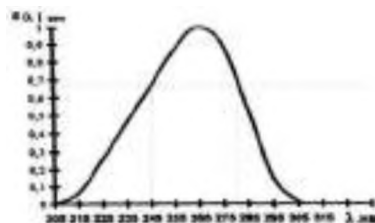


Рис. 1. Кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности ультрафиолетового излучения

Исходя из данных, указанных выше, для данного устройства нам понадобятся ультрафиолетовые светодиоды, излучающие в коротковолновом UV-C-спектре, который, будучи частью солнечного спектра, обычно задерживается атмосферой Земли.

Данное излучение используется для обеззараживания применительно к вирусам, бактериям, грибкам и клещам путём разрушения нуклеиновых кислот и нарушения цепочек ДНК/РНК у микробов. Конкретнее понадобятся светодиоды с длиной волны излучения от 260 до 275 нм.

Комплектация данного бактерицидного рециркулятора:

- UVC-светодиоды;
- Пластмассовый корпус, изнутри покрытый металлическим напылением;
- Светодиодная лента;
- Шнур питания;
- Вытяжной вентилятор;
- Крепления и подставка.

Пластмассовый корпус, выбранный для рециркулятора, имеет как достоинства, так и недостатки.

Одними из достоинств этих корпусов являются:

–Доступная и низкая цена самого исходного материала, что позволяет снизить стоимость самого устройства;

–Малая плотность пластика, которая дает возможность минимизировать вес прибора.

К недостаткам следует отнести:

–Невысокая влагозащита, обусловленная способностью поглощения молекул воды, которая вызывает растрескивание корпуса при сжатии-расширении накопившейся в микропорах воды;

–Ненадёжность соединений пластмассовых и металлических деталей, вызванная разницей коэффициентов теплового расширения (КТР) этих материалов;

–Плохой теплоотвод, по сравнению с керамическими и металлическими корпусами.

Таким образом, данное изделие для дезинфекции воздуха является очень актуальным в наше время. Подбрав правильные составляющие устройства можно значительно повысить его эффективность работы и снизить стоимость его производства. Также преимуществом такого технического решения является то, что его можно безопасно использовать в присутствии людей для обеззараживания воздуха в помещении.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент на полезную модель № 204740 U1 Российская Федерация, МПК А61L 2/10, А61L 2/24, А61L 2/28. Устройство для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением : № 2020135049 : заявл. 27.10.2020 : опубл. 08.06.2021 / В. С. Солдаткин, Т. С. Михальченко, А. О. Шардина, Л. Ш. Юлдашова ; заявитель ФГБОУ ВО ТУСУР. С. 5-6.
2. Патент на полезную модель № 195810 U1 Российская Федерация, МПК F21V 14/00. Светоизлучающий диод: № 2019130932: заявл. 27.09.2019: опубл. 05.02.2020 / М. В. Андреева, А. А. Вилисов, Е. С. Ганская [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО (ТУСУР). С. 3-4.
3. Патент на полезную модель № 192891 U1 Российская Федерация, МПК А01G 7/04. Светодиодный облучатель : № 2019115062 : заявл. 16.05.2019 : опубл. 04.10.2019 / К. Н. Афонин, А. А. Вилисов, Е. Г. Незнамова [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО ТУСУР. С. 4.
4. Руководство Р 3.5.1904-04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях», Минздрав России, Москва, 2015. 46 с.
5. СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», Минстрой России, Москва, 2016. 104 с.

Научный руководитель: к.т.н. В.С. Солдаткин, доцент РКФ РЭТЭМ ТУСУР.

# AN ECOLOGICAL APPROACH TO SUSTAINABLE ELECTRICITY PRODUCTION

S.N. Pechnikova

Donetsk national technical university,  
the Faculty of Intelligence Robotics and Electrotechnology, LPE Department

**Key words:** energy carriers, electrical energy generation, refuse derived fuel, coal-fired power plant, recycling, cost-effective, environmentally friendly, advantages, solar panels.

**Abstract:** this article is relevant due to the fact that for the time being, one of the major tasks, the humanity has been facing for the last several decades, lies in protecting the environment and mitigating all the risks associated with a negative impact on it. Such energy carriers as gas, oil fuel and coal have been gradually substituted with different energy carriers for electrical energy generation. In the present article, the possibility of using refuse derived fuel (RDF) is offered and advantages gained from this are highlighted.

RDF can be used for producing electrical energy which makes the process cost-effective and environmentally friendly.

It is widely known that sustainable recycling of raw materials has been a global environmental, economic and political issue since the Basel Convention of 1989. Since then, the various international treaties that ensue from it have been organizing action on the part concerning the use and the marketing of recyclable waste. In this logic, refuse derived fuel (RDF) products can be used to deliver energy in large quantities. It is a pure recycling that is useful for all if it is conducted in the drastic standards in force.

Therefore, on the basis of the win-win partnership it is possible to install electric power plants with the latest evolutionary standards. The thermal source will come from RDF technology.

The recycling of consumer products has become a major economic issue [1]. The resources of our planet are not extensible. It has become a major topic for the entire international community. As a result, all these treaties on CO<sub>2</sub> reduction (Geneva in 1979, Intergovernmental Panel on Climate Change in 1988, Basel in 1989, Rio in 1992, Kyoto in 1997 and COP21 in Paris).

On the other hand, the management of these recycled products generates a new economy. Everyone must embark on this new approach, and talking in a synthetic way about the energy product from recycling is of a paramount importance: the refuse derived fuel for a thermal power plant will produce sustainable electricity (and potable water to).

Thus, oil savings will be realized to ensure the extension of oil reserves. Indeed, not using oil or gas to produce electricity is synonymous with anticipation for the future.

RDF consists largely of combustible components of such wastes as non-recyclable plastics (not including PVC), paper cardboard, labels, and other corrugated materials. These fractions are separated by different processing steps, such as screening, air classification, ballistic separation, separation of ferrous and non-ferrous materials, glass, stones and other foreign materials and shredding into a uniform grain size (25 mm), in order to produce a homogeneous material.

RDF can be used in a variety of ways to produce electricity. It can be used alongside traditional sources of fuel in coal power plants. Like in Europe, RDF can be used in the cement kiln industry, where the strict standards of the Waste Incineration Directive are met. RDF can also be fed into plasma arc gasification modules and pyrolysis plants where the RDF is capable of being combusted cleanly or in compliance with the Kyoto Protocol. The total quantities of RDF used in Europe in dedicated waste to energy installations, in power generating plants, district heating plants and industrial processes such as paper mills and cement kilns has been estimated to amount to more than 4 million tons per year since 2008. The quantities of RDF burnt are expected to increase in the future with planned increased capacity for RDF utilization mainly in the western countries.

The Russian Federation has been facing a big problem associated with utilization and processing of RDF. So, employing RDF as an energy carrier for the further electrical energy production could solve several crucial problems as follows: to process RDF in a safety manner, mitigate the risks for nature and secure the production of a cheap and environmentally friendly electrical energy.

The careful selection of the treatment processes is of a primary importance both from the economical and the environmental point of view. It is worth mentioning that over the last years, an interest to biogas has been significantly growing. The potential for electrical energy production could be the RDF of the big industrial companies specialized in food product making. The energy recovery can be obtained in the form of waste-to-energy or production of waste derived fuels from the remaining waste fraction. In this way, physical resources are protected since paper, metals, glass, plastics that can be recovered from waste return in the production lines demanding less resources and energy for their process, while the energy recovery provides the industrial, commercial and domestic consumers with electricity and heat, and at the same time the volume of wastes to be treated is minimized

The combustible material may be used in its processed or compressed form into bricks or pellets (less than 25 mm and the moisture content of which must be less than 15 % for optimum combustion in the industrial furnaces which will burn each pellet in 17/18 seconds at 1200 °C. So, the next power plants will use the RDF as fuel. The operating principle is identical to the use of oil, gas or coal. Specific adjustment of the burners of the combustion chamber is adapted for this easy process. This thermal power plant has the RDF instead of coal or fuel simply [2].

RDF is cheap. Bulk carriers can be used to transport RDF to the relevant ports from where RDF will be delivered to the coal-fired power plants.

When it comes to green energy, such environmentally friendly power sources as solar plants or solar panels should also be mentioned. These panels are capable of covering the electrical energy demands of small industrial companies full-fledged, which is successfully implemented at a canning factory in Armenia. State-of-the-art double-sided solar panels operate on the reflected sunlight and produce 270 kW. This allows the company to reduce its electricity costs by 80 %. Installing solar panels is cost-effective. In the winter, the electrical energy produced by these panels is normally consumed and in the summer, solar panels produce the electrical energy in the excessive quantities, which could be monetized by selling a redundant electrical power quantity to the relevant legal entities. The only disadvantage of solar panels lies in the unstable power generation and depends of the time of a day and season. Solar panels employ the sunlight but not the sun energy, which enables to use them in cloudy weather however in this case, the quantity of the produced electrical energy reduces but this does not deprive solar panels of their advantages after all. In those regions where gas infrastructure development is prevented by some serious obstacles, one of the most efficient ways to eliminate domestic problems is to install solar panels. Moreover, laying gas pipes is very expensive and installing solar panels is much cheaper. The sun is the most stable power source and for example, in fifty years it will be possible to get the electrical energy per one square meter in the same quantities we have now hitting two critical targets by that – reducing the electricity costs and harmful impact on the environment.

### **Conclusions**

Employing RDF for producing electrical energy will enable to eliminate a potential problem of toxic emissions. Through using RDF, it will be possible to get the electrical energy generation process as a cost-effective one and reduce the expenditures of the power generation sector. RDF will also secure a stable and cheap heating of the apartment blocks and various social facilities.

As for solar panels, it should be taken on board that they should not necessarily be employed by the industrial companies only. They can be installed by physical persons on the roofs of their private houses or apartment blocks and effectively used for domestic purposes.

The world has been changing and being involved in the changes is a must.

## LITERATURE:

1. Afanasyeva E.A., Kislyakova M.D. The Key Problems of Energy Sector [electronic source] : Electronic Journal : The Young Scientist (2017), No.40, P.1-4 : URL: <https://moluch.ru/archive/174/45823/>
2. Power and Energy Systems : an International Journal : Volume 143 (2020).

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА

Д.Э. Пронина

Российский государственный университет нефти и газа

Известно, что результатом сжигания различных видов топлива в котлах на промышленных предприятиях являются выбросы многих загрязняющих окружающую среду веществ. Доминирующими из них принято считать азот, монооксид углерода, оксид азота, летучие органические соединения и оксид серы [1].

Выбросы вредных веществ прямо или косвенно влияют на жизнедеятельность людей, животных и растений. Проанализировав статистические данные, был сделан вывод о том, что сам по себе оксид азота не может принести вред человеку. Однако данные выбросы принято считать экологической проблемой в связи с тем, что именно они, вступая в реакцию с диоксидом серы, являются источником образования кислотных дождей. То есть контактируя с атмосферой наблюдается окисление, в следствие которого образуются азотная и серная кислота. В свою очередь, кислоты, растворяясь в каплях воды в облаках, могут попасть на поверхность земли в виде тумана, кислотных дождей или же снега в холодное время года.

Кислотные дожди являются причиной разрушения зданий и сооружений, окисления почвы, а также нарушения экологического баланса водоемов. Стоит отметить, что наиболее сильное негативное влияние оказывается именно на гидросферу. Воздействие может быть, как косвенным, так и прямым.

Примером прямого влияния на экосистему водоемов может служить гибель или отравление морских жителей в связи с попаданием вредных веществ в воду. Косвенное воздействие на экосистему водоемов проявляется в разрушении донных известняковых и других пород.

Итак, контролированием уровня выбросов в атмосферный воздух при сжигании топлива можно добиться снижения воздействия вредных веществ на окружающую среду. В особенности, контролируя выбросы, можно повлиять, а в частности, снизить количество кислотных дождей, выпадающих на поверхность земли.

В процессе горения результатом реакции окисления атмосферного азота свободным кислородом являются термические оксиды азота, которые, в свою очередь, составляют подавляющее большинство оксидов азота, которые образуются при сжигании различных масел и газов.

Вообще выбросы оксида азота из котлов при сжигании топлива зависят от различных факторов. Принято считать, что количество азота в топливе и температура пламени являются факторами, наиболее значимыми для количества выбросов оксида азота. Менее важными факторами, влияющими на образование оксида азота, являются температура воздуха при горении, а также уровень избыточного воздуха. То есть на повышение уровня выбросов влияет большее количество азота, содержащееся в топливе.

Существует два метода контролирования выбросов оксидов азота в атмосферный воздух:

- Методы контроля выбросов во время сжигания;
- Методы контролирования выбросов после сжигания.

Методы контроля после сжигания устраняют выбросы оксида азота после их образования. В отличие от этого, методы контроля во время сжигания предотвращают образование и накопление оксида азота в процессе горения.

Методы контроля выбросов во время сжигания считаются более дешевыми по сравнению с методами контролирования выбросов после сжигания.

Селективное некаталитическое восстановление является одним из методов контроля выбросов после сжигания топлива. Восстановитель оксида азота, например, чаще используют мочевины или аммиак, впрыскивается в выхлопные газы котла в диапазоне температур 750–870 °С [2].

В выхлопных газах оксид азота с помощью мочевины или аммиака расщепляется на атмосферный азот и воду. Селективное некаталитическое восстановление может снизить количество оксида азота до 70 %. Несмотря на достоинства данного метода, у него имеется весомый недостаток, заключающийся в том, что на промышленных котлах данную технологию очень сложно применять. Объясняется это тем, что впрыск аммиака в дымовые газы должен производиться при определенной температуре. Исходя из этого, применение селективного некаталитического восстановления к котлам на промышленных предприятиях является более чем нецелесообразным.

Существует еще один метод контроля уровня оксида азота после сжигания топлива – селективное каталитическое восстановление (СКВ). Метод заключается в том, что в присутствии катализатора происходит впрыскивание аммиака в выхлопные газы котла.

Таким образом, при более низких температурах выхлопных газов катализатор будет позволять аммиаку снижать уровень оксида азота. В этом и есть главное отличие от метода селективного некаталитического восстановления, когда температура выхлопных газов должна быть в диапазоне 750–870 °С. Метод селективного каталитического восстановления применим тогда, когда температура выхлопных газов, в зависимости от используемого катализатора, колеблется в диапазоне от 260 °С до 650 °С [2].

Снижение содержания оксида азота до 90 % является несомненным преимуществом метода селективного каталитического восстановления. Однако у данного метода также имеется и значительный недостаток, заключающийся в том, что метод чрезвычайно дорогой в использовании и очень редко оправдывается с экономической точки зрения.

Итак, что касается методов контроля снижения, то их суть заключается в снижении выбросов оксида азота за счет ограничения количества образования оксида азота непосредственно в самом процессе горения топлива. Принято считать, что достичь этого можно за счет понижения температуры пламени. Достоинством этих методов является то, что они намного экономичнее, чем методы после сжигания. Поэтому именно этими методами пользуются чаще всего в промышленных котлах, где требуется контроль выбросов вредных веществ.

Для обеспечения полного сжигания котлам приходится работать с избытком воздуха, это связано с фактором безопасности. Известно, что уровень избыточного воздуха непосредственно влияет на образование оксида азота. Повышение уровня избытка воздуха приводит к увеличению образования оксида азота. Этот процесс связан с тем, что избыток азота и кислорода в воздухе для горения объединяются и образуют термический оксид азота. А сжигание с более низким уровнем избытка воздуха включает в себя ограничение количества воздуха в избытке, который поступает уже непосредственно в процессе горения. Это необходимо для того, чтобы создать ограничение количества дополнительного азота и кислорода, который будет поступать в пламя. Достижение такого ограничения можно за счет самой конструкции горелки.

Именно такое сжигание приводит к снижению содержания оксида азота до 10 % при сжигании природного газа. Изменение горелки для контроля уровня выбросов оксида азота для создания большего пламени заключается в модификации конструкции стандартной горелки. Как раз на понижение температуры пламени и термического образования оксида азота влияет увеличение пламени. Все это ведет к общему снижению выбросов оксида азота.

За счет простой конструкции эта технология применяется к большинству видов котлов. При сжигании мазута и природного газа наблюдается наиболее эффективность технологии.



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Скалкин Ф.В., Канаев А.А., Копп И.З. Энергетика и окружающая среда. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 250 с
2. Кулиш О.Н., Кужеватов С.А., Орлова М.Н., Запорожский К.И. "Сокращение выбросов оксидов азота в атмосферу с дымовыми газами технологических печей НПЗ" // Материалы научно-практической конференции "Актуальные задачи нефтеперерабатывающего и нефтехимического комплекса", – 2018 г., с. 30-31;

Научный руководитель: к.т.н. Орлова М.Е., доцент РГУ нефти и газа.

## ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Н.А. Терешин

Московский энергетический институт  
ИЭТЭ, ИЭиОТ, группа Эл-18м-22

Ежегодное накопление осадков сточных вод в мире составляет более 3,5 млрд тонн [1]. Долгое время сложно было привести количественные и качественные показатели огромного количества тонн осадков сточных вод к безопасным значениям по санитарно-гигиеническим требованиям для дальнейшего использования в сельском хозяйстве, производстве строительных материалов и в качестве топлива для теплоэлектроэнергетики. В настоящее время разрабатываются и применяются новые способы доведения осадка до состояния, соответствующее санитарным нормам. Их используют на протяжении нескольких лет на предприятиях по переработке осадков сточных вод.

Одним из таких методов утилизации осадков сточных вод является пиролиз (рисунок 1) – процесс термической утилизации осадка сточных вод с отсутствием кислорода, путем высокотемпературного нагрева до 700 °С, который способствует разложению органических компонентов. Метод пиролиза входит в список наилучших доступных технологий из ИТС 10-2019 [2]. Основным конечным продуктом переработки при помощи пиролиза является синтез-газ. Цена подобной установки составляет 20 млн. руб. [3].

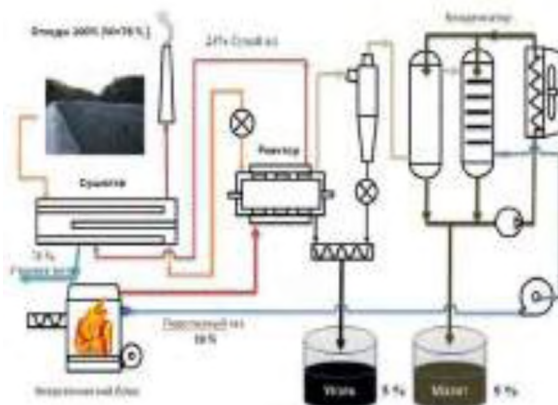


Рис. 1. Технологическая схема пиролиза

В реакторе окислы металлов отделяются от осадков сточных вод и отправляются в резервуар в качестве чистого шлака. Пиролизу подвергаются только органические составляющие осадков сточных вод, из-за чего выбросы в атмосферу не содержат токсичных веществ, в отличие от прямого сжигания.

Одна такая установка способна перерабатывать 17520 тонн осадков сточных вод в год [4]. Из которых в год образуется 1752 тонн синтез-газа, 1577 тонн мазута, 876 тонн угля и 4205 тонн шлака. Срок окупаемости данной установки составляет 3 года [5].

Чистый шлак можно использовать в качестве минерального наполнителя для получения тротуарной плитки, либо для использования в дорожно-строительных работах.

Синтез-газ можно использовать для получения электроэнергии вместо использования ископаемого топлива, что поспособствует снижению эмиссии парниковых газов до 2,5 кг CO<sub>2</sub>-экв/кг у.т. [6], при этом не снижая производительность топлива.

Как показал климатический отчет всемирной метеорологической организации (2021 г.) – из-за большого роста в атмосфере парниковых газов уровень воды в мировом океане с 1995-ого года вырос на 10 см, где только с 2015–2020 уровень вырос с 7 до 10 см. Также из-за парниковых газов всё чаще стали происходить опасные погодные явления, которые наносят огромные экономические ущербы на миллиарды долларов и забирают много человеческих жизней [7].

Для решения проблем, связанных с парниковым эффектом Правительство РФ ввело федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов”. Этот закон предусматривает создание и ведение реестра выбросов парниковых газов, который включает в себя различные организации и количество выбросов парниковых газов этих организаций. Также правительство РФ разрабатывает различные климатические проекты, один из которых вводит понятие – углеродные единицы. Под углеродной единицей подразумевается значение 1 т CO<sub>2</sub>-экв сокращения, предотвращения или увеличения поглощения парниковых газов. Стоимость одной углеродной единицы предлагается назначить равной 2000 руб. [8].

Таким образом, при использовании синтез-газа предприятие сможет предотвратить 4,38 т CO<sub>2</sub>-экв в год, что сможет принести дополнительную прибыль в размере 8760 руб. Однако сами выплаты будут произведены, если предприятие откроет свой счёт в реестре за 18000 руб. [8]. Более 2-х лет понадобится, чтобы окупить открытие счёта в реестре. Для того, чтобы предприятие было заинтересовано участвовать в этом климатическом проекте необходимы изменения, например, повышение стоимости 1 углеродной единицы до 4500 руб., либо создание отдельных штрафов для предприятия свыше 9000 руб.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Утилизация иловых осадков // siv-blog URL: <https://siv-blog.com/utilizatsiya-ilovyh-osadkov/#i-7> (дата обращения: 21.11.2022).
2. ИТС 10-2019 “Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов”.
3. Грачёв Андрей. Установка для термохимической конверсии биомассы в топливо и биоуголь // Международная конференция «Энергия из биомассы». – Москва: ИАА "ИНФОБИО", 2017.
4. Пиролиз иловых осадков // ECO-OMEGA URL: <https://www.eco-omega.ru/piroliz> (дата обращения: 21.11.22).
5. Установка для эффективной переработки отходов // ЭЛП ГРУПП URL: <https://energolesprom.ru> (дата обращения: 21.11.22).
6. Федоров С. С. Оценка снижения эмиссии парниковых газов при использовании процессов пиролиза биомассы // Днепр: Национальная металлургическая академия Украины, 2008.
7. Клещёв Олег. Климат планеты бьёт антирекорды: Metro узнало, почему ученые встревожены // Metro. – 2022. – 19.05.
8. Углеродное регулирование на территории РФ // VEGAS LEX, 28.02.22.

Научный руководитель: к.т.н. Озерова Н.В., доцент ИЭиОТ МЭИ.

# РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.С. Соловской

Алтайский государственный технический университет  
ЭФ, ЭПБ, группа ОТМехЭ-12

Современное общество характеризуется постоянным внедрением новых технологий, которые связаны с использованием в определенной ситуации энергии электромагнитного поля (ЭМП). Появление новых технологий определяется расширением используемого аналогом частотного диапазона, создающие новые ситуации взаимодействия ЭМП с биологическими объектами [1]. Так, например, технология 5G функционирует в диапазоне миллиметровых волн (30–300 ГГц), позволяющая использовать огромное количество маломощных передатчиков, многие из которых предназначены для использования вблизи биологических объектов. Единственной признанной опасностью радиочастотной энергии в указанном диапазоне частот является тепловой нагрев [2, 3].

Отечественные нормативно-правовые документы, определяющие предельно допустимые уровни электромагнитного излучения (СанПиН), не учитывают возникновения теплового воздействия на биологические объекты. Международные стандарты электромагнитной безопасности (стандарты IEEE, ICNIRP) устанавливают различные дозиметрические характеристики поглощенной энергии электромагнитного поля [2, 3].

Стандартной мерой воздействия радиочастотной энергии является удельная поглощенная мощность (SAR). Однако неблагоприятное воздействие радиочастотной энергии в значительной степени зависит от локального повышения температуры, а не от поглощенной мощности в каком-либо конкретном объеме. Переход от рассмотрения удельной поглощенной мощности к рассмотрению изменений температуры требует понимания механизмов переноса тепла в биологических тканях [3].

Согласно [2, 3], радиочастотный нагрев биологических тканей связан с уравнением биотепла Пеннеса

$$k\nabla^2 T - \rho^2 C_{m_b} T + \rho SAR = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $k$  – теплопроводность биологической ткани, Вт/(м·К);  $T$  – повышение температуры ткани выше базовой температуры (т. е. выше температуры, предшествующей радиочастотному воздействию), °С;  $\rho$  – плотность биологической ткани, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость биологической ткани, Дж/(кг·К);  $m_b$  – объемная скорость перфузии крови, м<sup>3</sup>/(с·кг).

Значения, используемые в уравнении биотепла Пеннеса, являются значениями термического анализа, которые используются для оценки радиочастотного воздействия без дальнейших изменений. Исследования, связанные с изучением нагрева биологических тканей, используют изолированные граничные условия, т. к. скорость передачи тепла от микроволнового воздействия в более глубокие слои биологических тканей будет значительно ниже скорости потери тепла от тканей к окружающей среде, описываемые выражением [2, 3]

$$k \frac{\partial T}{\partial z} > h(T_{sur} - T_{air}), \quad (2)$$

где  $\partial T/\partial z$  – температурный градиент, К/м;  $h$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);  $T_{sur}$  – температура поверхности биологической ткани, К;  $T_{air}$  – температура окружающей среды, К.

Удельная поглощенная мощность в уравнении биотепла Пеннеса в соответствии [2, 3] принимает вид

$$SAR = \frac{\text{ППЭ} T_{tr}}{\rho L} e^{-z/L}, \quad (3)$$

где ППЭ – плотность потока энергии, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{tr}$  – коэффициент передачи электромагнитной энергии в биологические ткани;  $L$  – глубина проникновения энергии ЭМП в биологическую ткань, мм.

Для определения изменения температуры биологических объектов используются модели, характеризующиеся тепловым откликом одномерной модели. Тепловой отклик модели определяется временными шкалами, представляющие перенос тепла посредством перфузии крови и теплопроводности [2, 3]

$$\tau_1 = 1/m_b \rho \approx 500 \text{ секунд}; \tau_2 = L^2/\alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности ( $9,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

При наличии кровообращения ( $m_b > 0$ ) температура поверхности биологической ткани ( $T_{sur}$ ) стремится к установившемуся значению ( $T_{ss}$ ), которое определяется удельной поглощенной мощностью на поверхности и эффективной тепловой постоянной времени  $\tau_{eff}$  [3]

$$T_{ss} = \frac{SAR_0}{C} \tau_{eff} = \frac{SAR_0}{C} \frac{\tau_2 - \sqrt{\tau_1 \tau_2}}{\tau_2 / \tau_1 - 1}, \quad (5)$$

С учетом растущими вычислительными ресурсами компьютерного моделирования, предусматриваются различные способы визуализации степени нагрева биологических тканей. Так, на рисунке 1 представлено распределение температуры нагрева головы человека в условиях воздействия микроволнового электромагнитного излучения [4].

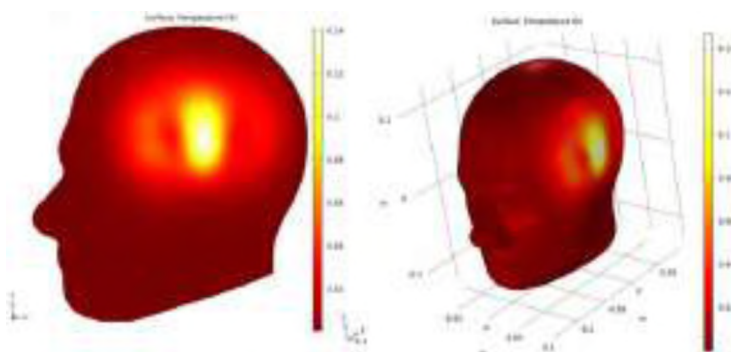


Рис. 1. Распределение температуры нагрева головы человека

Применение уравнений биотепла Пеннеса и теплопроводности целесообразны при синтезе теплового отклика биологической ткани на радиочастотное воздействие в широких диапазонах. Однако, в Российской Федерации контролируемые параметры электромагнитного поля показывают лишь пространственное распространение ЭМП. Таким образом, необходимо усовершенствовать подходы к контролю электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Валенко, А. С. Нормы электромагнитной безопасности в Российской Федерации и за рубежом / А. С. Валенко // Молодая наука Сибири. – 2020. – № 3(9). – С. 320-327.
2. Foster, K. R. Thermal Response of Human Skin to Microwave Energy: A Critical Review / K. R. Foster, M. C. Ziskin, Q. Balzano // Health Physics. – 2016. – Vol. 111. – No 6. – P. 528-541. – DOI 10.1097/HP.0000000000000571.
3. Foster, K. R. Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines / K. R. Foster, R. Glaser // Health Physics. – 2007. – Vol. 92. – No 6. – P. 609-620. – DOI 10.1097/01.HP.0000262572.64418.38.
4. Соловской, А. С. Визуализация степени нагрева биологических тканей в условиях воздействия микроволнового электромагнитного излучения / А. С. Соловской // Экологические проблемы региона и пути их разрешения : Материалы XVI Международной научно-практической конференции, Омск, 12–13 мая 2022 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 120-124.

Научный руководитель: д.т.н. Е.В. Титов, профессор ЭПБ ЭФ АлтГТУ.

# ОЦЕНКА НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.А. Баранов<sup>1</sup>, А.С. Соловской<sup>2</sup>  
Алтайский государственный технический университет  
ЭФ, ЭПБ<sup>1,2</sup>, группа Э-12<sup>1</sup>, группа ОТМехЭ-12<sup>2</sup>

С развитием научно-технического прогресса человек все больше взаимодействует с электрическими устройствами, которые в свою очередь излучают электромагнитное поле. Большая часть приборов, окружающая человека, незаменима в быту. Самым распространенным устройством, без которого человеку невозможно представить свою жизнь является мобильный телефон [1]. Так, в ходе различных отечественных и зарубежных исследований [2, 3] было выяснено, что источник электромагнитного излучения (ЭМИ) находится очень близко к биологическим тканям человека, поэтому при использовании мобильного телефона, а особенно при разговоре, наблюдается локальный нагрев головы человека. Более того, характер излучения и поведение ЭМП сильно зависят от сложной геометрии тела человека, расположения в закрытом или полузакрытом помещении, положения рук пользователя [3]. В связи с этим необходимо изучить влияние электромагнитного поля (ЭМП) мобильного телефона на биологические объекты.

Влияния излучения мобильного телефона на биологические объекты рассматривались в исследованиях [2, 3]. Так, значения удельной поглощенной мощности на частотах 900 и 1800 МГц могут значительно изменяться при изменении положения мобильного телефона. Другое исследование подчеркивает возможное влияние положения руки на значения поглощенной мощности. Однако, влияние мобильного телефона на биологические объекты связано не только с уровнем удельной поглощенной мощности, но и с локальным нагревом тканей [2].

В настоящее время оценка нагрева биологических тканей при воздействии ЭМП проводится на основе компьютерного моделирования. Например, проводились исследования повышения температуры в тканях в результате радиочастотного воздействия мобильного телефона, расположенного на расстоянии 1 мм и 10 мм от неоднородной 3D-модели человека с разным положением рук (положение 1 – частичное соприкосновение пальцев руки с мобильным телефоном, положение 2 – полное соприкосновение ладони с мобильным телефоном) на частотах 900, 1900 и 3700 МГц [4]. Распределение напряженности электрического поля в указанных случаях характеризуется распространением в исследуемом пространстве, однако часть поглощается биологическим объектом [3, 4]. В таблице 1 представлены значения повышения температуры от частоты и положения рук [4].

Таблица 1. Зависимость нагрева биологических тканей от расстояния и частоты излучающего источника

Положение	Частота (МГц) и расстояние (S) между излучающим объектом и объектом облучения (мм)					
	900 (S = 1)	900 (S = 10)	1900 (S = 1)	1900 (S = 10)	3700 (S = 1)	3700 (S = 10)
Без учета положения	0,90	1,41	1,35	0,82	1,37	0,54
Положение руки 1	0,97	0,43	1,21	0,62	1,25	0,46
Положение руки 2	0,73	0,20	1,13	0,74	0,94	0,12

При удерживании мобильного телефона ладонью (положение руки 2) уровень удельной поглощенной мощности и повышение температуры ниже, чем при удерживании телефона пальцами (положение руки 1) [4]. Объясняется это тем, что большая часть энергии ЭМП поглощается ладонями и лишь малая часть энергии достигает головы человека. Температура также зависит от расстояния между моделью и мобильным телефоном. В частности, эти значения выше при приближении источника излучения рукой к голове (на 1 мм), чем на расстоянии 10 мм от нее. На рисунке 1 представлены значения температуры нагрева биологических тканей от частоты на расстоянии 10 мм от излучающего источника [4].

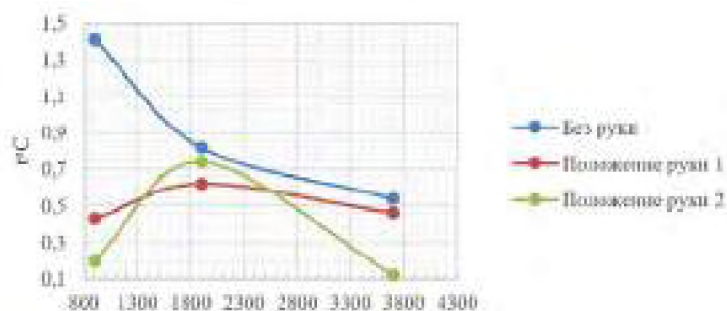


Рис. 1. Нагрев биологических тканей

Проведенные исследования [2–4] подчеркивают возможность локального нагрева биологических тканей от мобильного телефона, зависящие от положения рук, характеристик излучающего источника и расстояния. Для контроля электромагнитной обстановки необходимо рассматривать возможность нагрева биологических объектов. Ключевым параметром для оценки возможного нагрева является удельная поглощенная энергия (SA) [3]. Однако, в Российской Федерации контроль параметров ЭМП осуществляется в исследуемом пространстве без учета поглощения энергии ЭМП биологическим объектом. Таким образом, необходимо усовершенствовать существующие подходы к контролю электромагнитной обстановки не только с учетом удельной поглощенной энергии, но и с учетом удельной поглощенной мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Соловской, А. С. Оценка изменения удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии от расстояния и изменения угла наклона излучающего источника / А. С. Соловской // Россия молодая : Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 21417.1-21417.4.
2. Solomin, E. Analysis of the Cell Phone Influence on the Human Body during Voice Control / E. Solomin, A. Ibrahim, E. Sirotkin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 03–04 октября 2018 года. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 8602924. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602924.
3. Meenu, L. A survey on heating effects of electromagnetic radiation on human body / L. Meenu, S. Aiswarya, S. K. Menon // Proceedings of the 2020 International Conference on Computing, Communication and Security, ICCCS 2020, Bihar, 14–16 октября 2020 года. – Bihar, 2020. – P. 9277399. – DOI 10.1109/ICCCS49678.2020.9277399.
4. EM exposure study on an inhomogeneous human model considering different hand positions / V. Jeladze, M. Tsverava, T. Nozadze, V. Tabatadze, M. Prishvin, R. Zaridze // 2016 XXIst International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – 2016. – P. 9-12. – DOI 10.1109/DIPED.2016.7772197.

Научный руководитель: д.т.н. Е.В. Титов, профессор ЭПБ ЭФ АлтГТУ.

# КЛЮЧЕВЫЕ ТРЕНДЫ ESG-СТРАТЕГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

А.С. Добровольская  
Московский энергетический институт  
ИЭТЭ, ИЭиОТ, группа ЭЛ-18м-21

На сегодняшний день в мире широкую популярность набирает тренд на раскрытие нефинансовой отчетности организации и следование ESG-повестке (Environmental, Social, Governance, или ESG). Под ESG принято понимать концепцию развития компании, которая строится на ответственном отношении к экологии, высоких стандартах корпоративного управления, а также социальном развитии. Принципы устойчивого развития коммерческой деятельности впервые были сформулированы и вынесены на всеобщее обсуждение в 2004 году генеральным секретарем ООН Кофи Аннаном и к 2022 г. успели набрать популярность среди множества компаний по всему миру и в России, в частности.

Несмотря на то, что распространение принципов ESG в России лишь набирает обороты в сравнении с другими странами, за последние годы в нашей стране все же наблюдается значительный рост интереса к повестке устойчивого развития. В условиях глобального экологического кризиса все большее внимание уделяется аспектам ESG в вопросах снижения антропогенного воздействия на окружающую среду и разработки новых и совершенствования уже существующих технологических решений. Для энергетической области данная повестка является широко востребованной, поскольку развитие мероприятий и усовершенствование технологий, направленных на снижение углеродного следа, способствуют переходу к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, и как следствие, улучшению экологической ситуации в стране.

Ежегодно наблюдается все большее число упоминаний ESG в российских СМИ, проводится значительное число форумов по данной тематике с привлечением опытных экспертов. Рост интереса к ESG можно также наблюдать по количеству нововведений в рамках данной повестки, которые произошли за прошедший год. К ним относятся значительное развитие сектора финансирования ESG, создание подкомитета и экспертного совета по устойчивому развитию и "зеленому" финансированию Комитетом Государственной Думы, распространение ESG-рейтингов среди отечественных рейтинговых агентств, создание консалтинговых агентств по данной тематике, а также утверждение ESG-альянса среди крупных российских компаний и многие другие нововведения [1].

Однако в связи с осложнением геополитической ситуации в текущем году встает вопрос актуальности ESG-повестки в РФ. Для анализа дальнейшего разрастания трендов устойчивого развития сравним драйверы становления повестки в нашей стране до введения санкций и на текущий момент времени.

Основными факторами роста спроса на ESG служили внутренняя регуляторная повестка, финансовый и товарные рынки, а также поведение и ожидания покупателей. При этом стоит отметить, что, уровень благосостояния граждан в государстве напрямую влияет на интерес к факторам ESG. В связи с чем для России, которая является развивающейся страной, последний фактор проигрывает по актуальности. До введения санкций основными драйверами развития в нашей стране служили финансовые и товарные рынки. Российские компании динамично привлекали инвесторов западных стран, которые в свою очередь способствовали положительным изменениям в нефинансовой отчетности компаний. Профильному регулированию также способствовало активное участие в товарных рынках и необходимость подстраиваться под трансграничное углеродное регулирование и "Зеленую сделку" ЕС.

Ввод санкций против России привел к потере финансирования и ограничил выход на товарные рынки недружественных стран Запада. Одним из вариантов пересмотра сложив-

шейся ситуации является расширение и перепрофилирование российских компаний на Восток [2]. Ежегодный рост числа компаний стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), Ближнего Востока и ЮАР, подписывающих документ ООН об устойчивом развитии, свидетельствует о активном внедрении принципов ESG.

С каждым годом в странах Азии все большее распространение набирают различные формы регулирования и внедрения ESG повестки В Индии на текущий момент уже запущена международная платформа устойчивого развития, а корпоративная и социальная ответственность для организаций стала общепринятой. Для Китая принципы устойчивого развития входят в 14-тую пятилетнюю национальную программу, что объясняет активный рост инвестирования в ESG на местных фондовых биржах. Создание национальной системы торговли выбросами, а также развитие проекта по постепенному внедрению общей таксономии устойчивого развития свидетельствуют о развитии регуляторного поля. В настоящее время более половины компаний азиатского региона разработали и внедрили ESG-стратегии в свою деятельность.

Большинство бирж данных регионов являются членами Инициативы ООН по устойчивым фондовым биржам, что говорит о расширении направления ESG и фокусировании на экологических аспектах деятельности компаний, их корпоративном управлении и соблюдении требований условий труда. Все большее число бирж азиатского региона переходят от рекомендательного к принудительному характеру раскрытия нефинансовой информации. При этом порядка 50 % крупнейших бирж стан Азии в обязательной форме требуют раскрытия нефинансовой отчетности, согласно исследованию, произведенному по заказу Национального ESG Альянса [3].

Россия уже активно сотрудничает со странами Востока, и увеличенный в 2022 году объем экспорта минерально-сырьевых ресурсов, мясной, масложировой и фармацевтической продукции является тому подтверждением [4]. Возможность нахождения инвесторов в рамках ESG на Гонконгской, Бомбейской и Индийских биржах затрудняет лишь более жесткие требования к нефинансовой отчетности со стороны данных стран. Для успешной переориентации российского бизнеса на Восток, компаниям будет необходимо иметь собственные цели по уменьшению антропогенного воздействия, которые будут осуществляться в кратчайшие сроки. Еще одним возможным барьером для выхода на новые торговые рынки является существенная конкуренция, которая обусловлена наличием внушительного числа как местных, так и западных компаний, удовлетворяющих спрос на экологичность производимой продукции.

По прогнозам аналитиков, для закрепления российских компаний на рынках стран АТР, потребуется порядка 3–4 лет [5]. Однако для этого отечественным компаниям просто необходимо ввести ряд нововведений в производство собственной продукции и адаптироваться к новым условиям в отношении следования принципам ESG. Улучшение экологической составляющей ESG повестки в большей степени должно достигаться за счет непосредственного внедрения современных технологий производства, использования нового оборудования и улучшения работы по переработке отходов. При этом для обеспечения долгосрочной конкурентоспособности российских компаний на рынках стран АТР должно внимание необходимо уделять вопросам снижения углеродоемкости энергетической отрасли.

Уход многих западных компаний с российского рынка и разрыв с ними технологических связей также усложняет один из важнейших аспектов ESG, а именно, снижение целевого показателя выбросов углерода и ставит под вопрос устойчивое развитие чистых технологий в России. При этом недостаточность трансформации российских компаний в рамках экологической составляющей ESG можно объяснить неверным фокусом компаний, которые воспринимают данное направление скорее, как филантропию, не принимая в расчет тот уровень ответственности и безотлагательности, который необходим на данном этапе развития повестки в России. В связи с геополитической ситуацией в мире, остро встает вопрос равного доступа к технологическим решениям для улучшения экологических показателей внутри стран, поэтому для России важно искать и разрабатывать собственные технологии и решения внутри государства. Отсутствие сильной базы НИОКР в направлении «зеленых» технологий и обострение



ограничений на их передачу России, указывает на необходимость разработки экологически чистых технологий.

В сложившихся условиях в стране можно также спрогнозировать развитие внутренней регуляторной базы в рамках устойчивого развития, которая подкрепляется принятыми в нашей стране национальными проектами и принятием Парижского соглашения по климату. Для дальнейшего роста и регулирования ESG-стратегий России необходимо пересмотреть не только внешние, но и внутренние драйверы развития. На данный момент в России только зарождается введение добровольной отчетности по выбросам парниковых газов. Одним из возможных вариантов дальнейшего развития устойчивого развития в России является использование таких политических инструментов, как введение собственного трансграничного углеродного налога, который может служить еще одним инструментом стимулирования сокращения выбросов, в частности и для энергетической отрасли.

В России продолжает развиваться внутренняя повестка ESG. Так, согласно поручению президента, до 1 января 2023 г. в России должны быть составлены собственные критерии отнесения инвестиционных проектов к числу проектов, соответствующих ESG повестке, а также предложены меры господдержки данных проектов [6]. Выступающий в роли регулятора ESG Банк России также разработал специальную рабочую группу, определяющую стратегическую повестку. В настоящий момент один из ведущих банков ПАО Сбербанк является активным драйвером развития ESG в России и рассматривает возможность предоставления субсидирования ставки по ESG-кредитам, а также облегчению выдачи ссуд компаниям с высоким рейтингом ESG [7].

В отечественную практику также постепенно вводятся инструменты, способствующие достижению целей устойчивого развития, такие как "зеленые" кредиты и вклады, социальные и "зеленые" облигации. Государственные организации в России стали активно финансировать региональные проекты, связанные с производствами замкнутого цикла по средствам "зеленых" облигаций, что в свою очередь способствует развитию повестки устойчивого развития во всех регионах страны.

Можно говорить о том, что при должной адаптации к отечественной повестке зарубежных инструментов ESG-финансирования и укреплении уже существующих инициатив и подходов, в России будет наблюдаться дальнейший спрос на инвестирование проектов, соответствующих принципам устойчивого развития.

Несмотря на все санкционные риски и давления, которые существуют на данный момент, законодательство Российской Федерации в области экологии по-прежнему продолжает функционировать и совершенствоваться, способствуя улучшению не только экологической ситуации в стране, но и развитию ESG повестки. На момент 2022 г. в России уже приняты законы об обращении с вторичными ресурсами и их вовлечении в хозяйственный оборот, а также о стимулировании использования отходов недропользования, которые призваны стимулировать промышленное использование отходов и улучшению экологической ситуации в стране. Правительством также утверждена Федеральная научно-техническая программа в области экологического развития до 2030 г., а также намечена стратегия социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Все эти меры направлены на развитие энергетической отрасли государства, а также ее ESG-трансформации.

Находясь в крайней точке неустойчивости в мире, инструментом, который позволит в дальнейшем двигаться и развиваться является непосредственный язык коммуникаций с потребителем ESG. Важно осознавать, что непосредственно наличие потребителя способствует развитию ESG повестки, поэтому для нашей страны так важно повсеместно распространять принципы устойчивого развития и активно доносить их до граждан. При этом должное внимание также необходимо уделять инфраструктуре и инструментам регулирования повестки устойчивого развития. Несмотря на все изменения, происходящие в экономике и геополитике, Россия продолжает оставаться неизолированным государством со своими внешними международ-

ными связями. Текущая политическая ситуация в России, как и любой кризисный момент, является не только периодом трудностей и преодоления, но и отличной возможностью для роста и развития таких факторов, как ESG.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ESG-повестка как коммуникационный тренд в России: проверка на хрупкость в условиях неопределенности / Е.Б. Курганова // Учетные записки Новгородского государственного университета. – 2022. – № 4 (43). – С. 384-388.
2. Перспективы развития ESG-финансирования как инновационного подхода к привлечению ресурсов компаниями России / Е.Ю. Васильева, Ю.Ю. Бакрунов // Управленческий учет. – 2022. – № 4. – С. 544-551.
3. Открывая новые горизонты: ESG-повестка в Азиатско-Тихоокеанском регионе и на Ближнем Востоке: [Электронный ресурс] // Ascor. URL: [https://asros.ru/upload/iblock/f14/18k35hcrp27w4pcy64msnmbrhsguhfak/Korotetskiy\\_22.09\\_Prezentatsiya-\\_ESG.pdf](https://asros.ru/upload/iblock/f14/18k35hcrp27w4pcy64msnmbrhsguhfak/Korotetskiy_22.09_Prezentatsiya-_ESG.pdf) (дата обращения 03.11.2022).
4. Изменения в экспорте и импорте РФ в 2022 году: влияние санкций на международную торговлю: [Электронный ресурс] // Delovoy Profit. URL: [https://delprof.ru/upload/iblock/d56/Analitika\\_DELOVOY-PROFIL\\_Mezhdunarodnaya-torgovlya.pdf](https://delprof.ru/upload/iblock/d56/Analitika_DELOVOY-PROFIL_Mezhdunarodnaya-torgovlya.pdf) (дата обращения 03.11.2022).
5. Поворот на Восток: ESG-аспекты выхода на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона: [Электронный ресурс] // Sber.pro. URL: <https://sber.pro/publication/povorot-na-vostok-esg-aspekty-vykhoda-na-rynki-aziatsko-tikhookeanskogo-regiona?ysclid=1a615dyt9199576774> (дата обращения 04.11.2022).
6. Перечень поручений по итогам встречи с членами Общероссийской общественной организации «Деловая Россия» (утв. Президентом РФ 26 апреля 2022 г. № Пр-740): [Электронный ресурс] // Президент России. URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/68298> (дата обращения 03.11.2022).
7. Тенденции развития ESG-инвестирования в России / Кушпаева Г.С., Баянова Д.С., Комольцева А.П. // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – №51. – С. 1090-1096.

Научный руководитель: к.г.н. М.С. Хвостова, доцент ИЭиОТ МЭИ.

## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД МОДИФИЦИРОВАННЫМ ДИОКСИДОМ ТИТАНА

А.М. Кривошеева<sup>1</sup>, М.Г. Волкова<sup>2</sup>  
Южный федеральный университет  
Химический факультет<sup>1,2</sup>, ОНХ<sup>1,2</sup>,  
группа с-о-21ХФ-04.05.01.01-о1<sup>1</sup>, а-о-20ХФ-04.06.01.06-о1<sup>2</sup>

Одной из важнейших проблем промышленности, в том числе энергетической отрасли, является очистка сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества, в том числе фенолы и нефтепродукты. Загрязненные сточные воды при попадании в водоемы оказывают негативное влияние на состояние водных объектов, водные организмы и здоровье человека. Также загрязняющие химические вещества приводят к изменению состава природных вод и влияют на ее санитарное состояние. Одним из эффективных и безопасных способов очистки является фотокатализ.

Диоксид титана – неорганическое вещество, обладающее высокими фотокаталитическими свойствами. Его модификация – анатаз часто используется для деградации органических загрязнителей воды. Но применение частиц диоксида титана ограничено тем, что TiO<sub>2</sub>

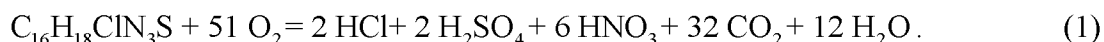
проявляет фотокаталиическую активность только при облучении ультрафиолетовым (УФ) излучением с длиной волны менее 400 нм. Для расширения возможностей, а именно использования солнечного света для активации фотокатализатора, используется введение катионов других металлов в диоксид титана, что позволяет уменьшить ширину запрещенной зоны материала.

Одной из перспективных модифицирующих добавок является ион ванадия (5+). Образцы  $\text{TiO}_2$ , модифицированные ванадием, были объектом работ, в которых описаны подготовка и характеристика, спектроскопические особенности, динамика захвата переноса заряда и фотокаталитическое поведение [1, 2]. Облучение видимым светом  $\text{TiO}_2$ , легированного ванадием, приводило к увеличению его фотокаталитической активности. Тем не менее, при облучении ультрафиолетовым светом сообщалось о сниженной фотокаталитической активности с V-легированным  $\text{TiO}_2$  в то время, как другие исследователи показали, что легирование ванадием усиливает фотокаталитическую активность  $\text{TiO}_2$  [1]. В результате литературного обзора были получены неоднозначные данные. Поэтому целью нашей работы было провести синтез и исследование фотокаталитических свойств наноразмерного порошкового катализатора V- $\text{TiO}_2$ .

Наноразмерный порошок  $\text{TiO}_2$  получали золь-гель методом. Синтез был проведен по методике, описанной в работе [3]. Высушивали полученный гель  $\text{TiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  в сушильном шкафу при температуре 100 °С. Термическую обработку «гидроксида титана» проводили в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 2 часов.

Полученные материалы были изучены методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ARLX'TRA, Thermo ARL. Согласно результатам РФА основной фазой полученного материала является каталитически активная анатазная модификация  $\text{TiO}_2$  (рисунок 1). Расчеты по формуле Шеррера показали, что средний размер частиц синтезированного материала – 15 нм.

Фотокаталитические свойства были оценены по реакции фотодеградации модельного органического загрязнителя – метиленового синего (МС) при активации ультрафиолетовым (УФ) или видимым светом:



Контроль концентрации МС после фотокатализа проводили спектрофотометрически на спектрофотометре КФК-2МП. Степень очистки раствора рассчитывали, как отношение разложившегося МС к исходному его содержанию. Показано, что синтезированный материал обладает достаточно высокой фотокаталитической активностью: за 45 минут облучения УФ светом удается добиться полного разложения красителя, тогда как коммерческий фотокатализатор Degussa P25 за это же время приводит к разложению только 60 % МС (рисунок 2а). В видимой области спектра также удалось показать высокие результаты: за 120 минут активации видимым светом происходит практически полное (на 80 %) разложение МС (рисунок 2б).

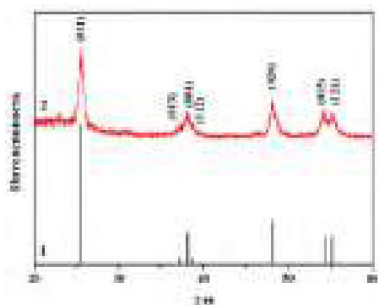


Рис. 1. Рентгенограмма исследуемого материала

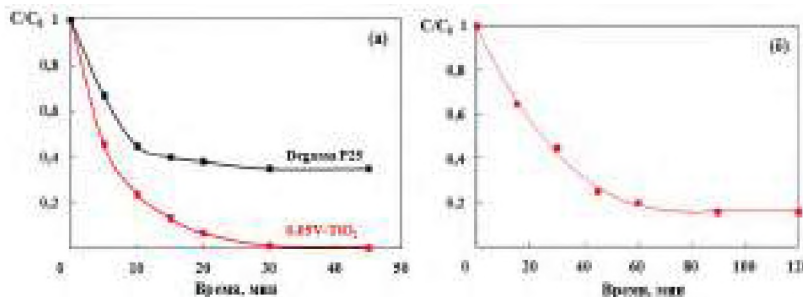


Рис. 2. Разложение МС под действием УФ (а) или видимого (б) излучения

Таким образом, полученные материалы на основе диоксида титана, модифицированного ионами ванадия, окристаллизованы в фазе анатаза, проявляют фотокаталитическую активность как при активации УФ-излучением, так и видимым светом, что позволяет рекомендовать их для фотокаталитической очистки сточных вод.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Highly active V–TiO<sub>2</sub> for photocatalytic degradation of methyl orange / S. Liu, T. Xie, Z. Chen, J. Wu // Applied Surface Science. – 2009. – V. 255. – № 20. – P. 8587-8592.
2. Study on Preparation and Photocatalytic Activity of V-Doping Mixed Crystalline Phase TiO<sub>2</sub> Powders / F. Peng, Q. Lai, J. Zhong // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – V. 774. – № 1. – P. 012041.
3. Effect of synthesis conditions on the photocatalytic activity of titanium dioxide nanomaterials / E.M. Bayan, T.G. Lupeiko, L.E. Pustovaya, A.G. Fedorenko // Nanotechnologies in Russia. – 2017. – V. 12. – № 5. – P. 269-275.

Научный руководитель: к.т.н. Е.М. Баян, доцент ХФ ЮФУ.

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СТАНЦИЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРО МОБИЛЕЙ КАК СПОСОБ ЗАБОТЫ ОБ ЭКОЛОГИИ

А.А. Никифорович, Р.С. Зарипова  
Казанский государственный технический университет

**Аннотация:** В настоящее время тема экологии становится популярной и актуальной. Использование тренажеров-генераторов электроэнергии поможет не только сэкономить огромные суммы денежных средств на потребление энергии, но и принесёт пользу для природы.

**Ключевые слова:** тренажер, генератор, фитнес, сетевая компания, ТЭЦ, спорт, электричество, электромобили, экология, энергия, элемент питания.

В настоящее время социальные и экологические последствия экономического роста становятся все более очевидными. Экологическая ситуация на нашей планете с каждым годом ухудшается. Поэтому важнейшей задачей человечества на данном этапе развития является поиск более устойчивого и рационального способа производить, потреблять и существовать. То есть концепция устойчивого развития и все вытекающие из нее идеи становятся всё более и более актуальной. Данная концепция находит свое применение в стратегии «зеленого» маркетинга, где требуется постоянный поиск баланса между экономическим ростом и защитой окружающей среды.

Изучая работу компаний различных отраслей, большой интерес вызвала работа сетевой компании [1]. В частности, её станции быстрой зарядки электромобилей, использующие в своей работе электричество, поставляемое от станций ТЭЦ, которые в свою очередь работают на мазуте, природном газе и угле, а также их работа сопровождается вредными выбросами в атмосферу. Был поставлен вопрос – можно ли поставлять электричество более экологичным способом?

Решая этот вопрос, возникла следующая идея: использовать энтузиазм людей, которые занимаются в спортзалах [2]. На мировом рынке с 2013 года существуют тренажеры, которые преобразуют кинетическую энергию человека в электрическую [3]. Мы предлагаем сетевой компании сделать обычный фитнес-центр, но использовать в нём тренажеры, которые подключаются к станциям зарядки электромобилей. А клиентами зала станут люди, которых беспокоят проблемы окружающей среды и которые решат таким образом помочь природе и решить экологические задачи.

Проанализируем благоприятное влияние такого спорткомплекса на компанию по системе ESG. Рассматривая экологический сегмент, мы замечаем, что спорткомплекс является не только источником альтернативной энергии, но и центром для поддержки здоровья населе-

ния. Со стороны социального сегмента компании предлагается предоставлять своим сотрудникам абонемент на поход в такой фитнес-центр, тем самым предоставляя не только способ взаимодействия с коллегами вне работы, но и возможность развития тела [4].

Рассмотрим более подробно данный проект. Компания Sport Art уже разработала тренажёры, которые способны вырабатывать электричество. Сейчас в связи с санкциями цена на такие тренажёры порядком возросла [5]. Тем самым создались условия, когда необходимо разработать аналоги и запустить их в массовое производство [6]. Задумка такого фитнес-центра в том, что тренажёры, которые в нём находятся, подключаются к аккумуляторам, накапливающим электроэнергию. Эти аккумуляторы подключены к станциям зарядки электромобилей. Таким образом человек может крутить педали на электротренажёре, а его кинетическая энергия будет накапливаться и через какое-то время поступать в электромобиль.

Перейдём на язык цифр. Тренажёр вырабатывает около 200 Ватт в час. В среднем тренажёр работает 8 часов в день. В фитнес-центре порядка 20 тренажеров. Электромобиль примерно требует для зарядки 40 кВт. Зал тренажёров вырабатывает 32 кВт в день. Уже сейчас в России количество электромобилей насчитывает 12290 штук. На каждые 100 км пути требуется около 30 кВт/ч.

У данного предложения имеются положительные стороны. Энергия, вырабатываемая людьми будет накапливаться в аккумуляторах и поставляться в станции зарядки электромобилей, тем самым частично заменяя энергию, которую поставляют с ТЭЦ. Таким образом, разработка не только увеличит ESG-показатели сетевой компании, но и положительно будет влиять на экологию и здоровье населения. Учитывая популяризацию электрозаправок и прогнозы на 2024 год, данный проект можно использовать не только в отношении одной компании, но и массово.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Силкина О.Ю., Зарипова Р.С. "Зелёная экономика" как современный способ развития / Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2022. №3 (29). С.43-45.
2. Никитина У.О., Зарипова Р.С. Влияние гаджетов на физическую активность студентов / Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2019. Т. 11. № 3-2. С. 50-53.
3. Басаргин В.Я., Зарипова Р.С., Пырнова О.А. Влияние цифровых технологий на урбанизацию / Цифровая культура открытых городов: материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург. 2018. С. 13-15.
4. Сиразева А.Л., Зарипова Р.С. Экологическая эффективность производства из различных источников сырья / Бутаковские чтения. Сборник материалов I Всероссийской с международным участием молодежной конференции. Томск, 2021. С. 404-408.
5. Антипова Т.С., Зарипова Р.С. Основные направления импортозамещения в сфере информационных технологий в условиях санкций / Инновационное развитие экономики. Будущее России: материалы и доклады VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2019. С. 142-145.
6. Зарипова Р.С., Алемасов Е.П. Применение алгоритмов и программных приложений в спорте / Физическая культура, спорт, туризм: наука, образование, информационные технологии: материалы Всероссийской с международным участием заочной научно-практической конференции. Казань, 2022. С. 486-490.

# ПРОЕКТ СОДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ВОДОРОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В Г. НАХОДКА

Д.В. Артюшенко  
Северный (Арктический) федеральный университет  
ВШЭНиГ, ТиГ, 111112

Водородная энергетика входит в число «зеленых технологий», которые направлены на улучшение качества окружающей среды и способствуют защите здоровья человека. С развитием водородной энергетики связывают возможности уменьшения антропогенного воздействия на парниковый эффект. При использовании водорода не возникает эмиссии углекислого газа, поэтому он является экологически дружелюбным энергоносителем [1].

Основными целями нашей работы являются: создание потенциально рабочей модели водородного города и уменьшение углеродного следа до минимальных показателей.

Для выполнения поставленной цели мы должны были решить ряд технических задач, таких как выбор объекта, технологии, проектирование инфраструктуры и производственных линий. Реализация проекта будет осуществляться в три этапа. Особенностью проекта является создание водородной инфраструктуры на базе существующей нефтегазовой.

Для реализации проекта были проанализированы различные типы производства водорода и на основе технико-экономических показателей были выбраны пиролиз метана и, в долгосрочной перспективе, электролиз воды.

Для получения водорода в процессе пиролиза метана требуется большое количество природного газа, чтобы удовлетворить потребительские нужды жителей города Находка. Наиболее подходящим вариантом является использование газа, поставляющегося с Киренского месторождения.

Также мы сравнили 2 вида генерации электрической энергии. Технико-экономический анализ показал, что затраты на постройку электростанции на топливных элементах в несколько раз больше, чем перевод ТЭС на смесь водорода и природного газа. Но такая технология имеет несколько ключевых преимуществ:

- 1) Нет выбросов  $\text{CO}_2$ ;
- 2) Высокая эффективность (60 % и выше);
- 3) Энергия топлива переходит напрямую из химической в электрическую.

Добытый с Киринского месторождения природный газ, поступает на установку комплексной подготовки газа, где он проходит обработку. Далее путем пиролиза метана газ преобразуется в водород. Как побочный продукт получаем  $\text{CO}_2$ , который можно использовать в производстве удобрений, на заводе в г. Находка. Полученный водород отправляется на ЭС, где преобразуется в ЭЭ. Параллельно этому мы наращиваем мощность вырабатываемую ВЭИ.



Рис. 1. Типы производства водорода



Рис. 2. Схема производства водорода

Немаловажным аспектом нашего проекта является экологическая составляющая. Одним из таких аспектов является использование водорода как источника энергии, что позволяет значительно снизить выбросы углекислого газа. Это позволит нам добиться углеродной нейтральности. Построив электростанцию в г. Находка, мы сможем повысить устойчивость электрической сети.

В ходе реализованного проекта нам удалось достичь каждой из поставленных целей, кроме того, наша работа соответствует современным веяниям в развитии энергетического комплекса как России, так и всего мира.

Также на базе САФУ им. М.В. Ломоносова был создан макет завода по производству водородной энергии. Подразумевалось использование еще недостроенной Кольской ВЭС в качестве источника электроэнергии для выработки водорода, а также Бабоненоковского месторождения в качестве источника воды для электролиза.



Рис. 3. Экологичность производства



Рис. 4. Макет кластера по производству водорода

В настоящее время большую актуальность получили вопросы поисков экологически чистого энергоносителя, высокоэффективного и дешевого. Это вещество должно быть неисчерпаемым как ресурс и легкодоступным. Источник энергии необходим не только для развития человечества, но и для самого существования на планете [2]. Россия в ближайшем будущем может стать основной страной по производству водорода.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Белугин, М. В. Водородная энергетика как экологически чистая альтернатива традиционной энергетике / М. В. Белугин // Горизонты биофармацевтики : сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической молодежной конференции, Курск, 28 июня 2019 года / Курский государственный медицинский университет. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2019. – С. 49-51.
2. Макаров, Д. С. Водород как альтернативный источник энергии в промышленности / Д. С. Макаров // Инновационная экономика. – 2017. – № 1 (10). – С. 9.

Научный руководитель: Чурбанов А.Л., ст. преп. кафедры ЭЭиЭТ, САФУ.

### **Пятая секция. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ**

#### **ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН**

Е.А. Масалина

Томский политехнический университет

ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ17

При работе скважин добычи нефти или промышленной и питьевой воды происходит их износ – на поверхности не обсаженных скважин в горных породах могут появляться повреждения – каверны – полости неправильной или округлой формы. В скважинах, оборудованных обсадными колоннами, каверны появляются при работе скважин длительное время (рисунок 1).

Для увеличения срока службы скважины, для предотвращения ее обрушения каверны заделывают.

В скважины различного типа иногда попадают посторонние предметы (рисунок 2).



Рис. 1. Повреждение колонны



Рис. 2. Посторонний предмет в скважине

Для исключения загрязнения колонн и скважин с питьевой водой необходимо посторонние предметы из скважин удалить, которые предварительно необходимо обнаружить. Для контроля технического состояния скважин, их ремонта, извлечения посторонних предметов из скважин применяются каротажные подъемники, оборудованные специальными устройствами, обеспечивающие выполнение следующих операций:

- визуальный контроль или видеосъемку технического состояния скважин;
- захват посторонних предметов;
- подъем извлекаемого объекта на поверхность.

В настоящее время современный каротажный подъемник состоит, как правило, из трех основных частей. В первую очередь, конечно, электропривод лебедки и редуктор, а также барабан намотки грузонесущего кабеля и электропривод кабелеукладчика.

Для регулирования скорости каротажного подъемника не требуется широкого диапазона, поэтому он принимается меньшим или равным 1:10. Как следствие, для электропривода применяется скалярное управление с компенсацией момента и скольжения.

Электропривод каротажного подъемника должен стопориться, как в обсаженных (дополнительный ствол перекрыт колонной), так и в необсаженных (дополнительный ствол не перекрыт колонной) скважинах, в случае, когда скважинный прибор застревает в скважинах. В случае стопорения электропривода каротажного подъемника недопустимы сбои в работе или выход из строя электрооборудования, а также обрыв грузонесущего кабеля.

В каналах регулирования частоты и напряжения применяется обратная связь по току статора, чтобы ограничить момент асинхронного двигателя в скалярных электроприводах допустимым значением. Учитывая все вышеизложенное, на рисунке 3 представлена функциональная схема, отражающая структуру системы управления асинхронным электроприводом с частотным скалярным управлением, предназначенного для управления каротажным подъемником [2].

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: ЗИ – задатчик интенсивности; ПЧН – преобразователь характеристика частота – напряжение; РОТ – ПИД-регулятор ограничения тока; ПКП – прямой координатный преобразователь; ПКО – преобразователь координат обратный; КС, КМ – компенсаторы скольжения и момента в цепи положительной обратной связи.

Для ограничения пускового тока скалярного электропривода применяется задатчик интенсивности линейного или  $S$  – образного типа. Блок ПЧН формирует закон регулирования скалярного управления, который определяется характером нагрузки на валу асинхронного двигателя.

В программной среде *MatLab* была составлена имитационная модель асинхронного электропривода со скалярным управлением. Моделирование данного электропривода проводилось с учетом широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты. Модель позволяет проводить исследования для двигателей любой мощности. В данной статье исследования проводились для асинхронного двигателя типа RA200LB6, имеющим следующие технические данные: номинальная мощность  $P_H = 22$  кВт, номинальная частота вращения  $n_0 = 1000$  об/мин; номинальный фазный ток  $I_{1H} = 44$  А.





# ГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ГИБРИДНЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ – ГАЗОВАЯ ТУРБИНА

Ф.Р. Гайнутдинов<sup>1</sup>, Д.А. Базин<sup>2</sup>

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, ХВ, ВЭМ-1-22<sup>1</sup>, ИТЭ, ХВ, МФЭа-1-22<sup>2</sup>

Одним из способов повышения эффективности традиционной генерации тепло- и электроэнергии является применение гибридных энергоустановок топливный элемент (ТЭ) – газовая турбина (ГТ). Для внедрения таких установок необходимо иметь инструмент для прогнозирования энергетической эффективности гибридных систем, например, на моделях, способных оценить обобщенные технико-экономические показатели в конкретных климатических условиях с учетом возможных нагрузок.

Применяя алгоритмы расчета схем ТЭ/ГТ, определяющие показатели работы электрохимического генератора (ЭХГ) и газотурбиной установки (ГТУ), производство тепловой и электроэнергии будет экономически эффективным и конкурентоспособным с другими технологиями производства электроэнергии [1]. Для прогнозирования энергетической эффективности генерации энергии создается компьютерная модель для расчета тепловых схем, позволяющая проводить комплексную оптимизацию структуры и параметров гибридных энергоустановок на водороде.

На сегодняшний день патентные исследования по способам генерации энергии в гибридных энергоустановках, различающиеся ТЭ, взаимным расположением компонентов системы, продолжают вызывать научный интерес. Главной проблемой остается внедрение в практику лучших по КПД и экономической целесообразности разработанных энергоустановок и оценка их конкурентоспособности на энергетическом рынке. На рисунке 1 изображен один из вариантов гибридного цикла генерации энергии.

Экспериментальные данные показывают низкую эффективность гибридной установки на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), по сравнению с системами, работающими на метане, этаноле, метаноле, аммиаке. Тем не менее, учитывая перспективность водородного топлива, представляется важным оптимизация ТОТЭ, работающих на водороде и гибридациях их в энергоустановках для производства тепловой и электрической энергии [2].

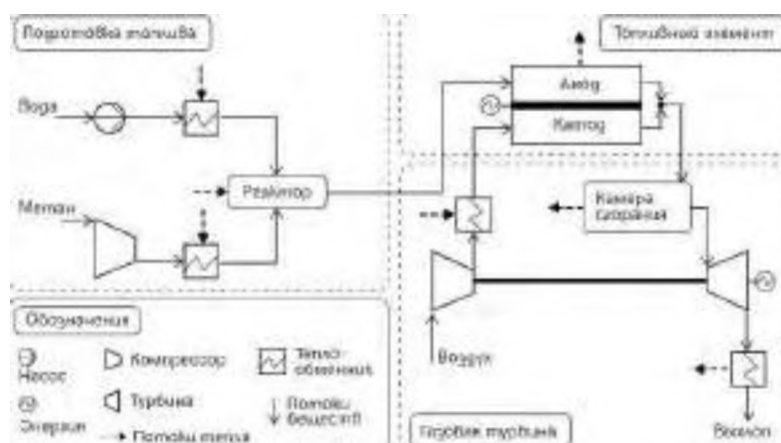


Рис. 1. Вариант гибридизации топливного элемента и газовой турбины

При использовании водородного топлива в газовых турбинах возникают определенные проблемы: высокая теплота сгорания, высокие скорости распространения пламени; высокие температуры в камере сгорания; охрупчивание трубопроводов и вспомогательного оборудования системы топливоподготовки [3]. Не стоит забывать и о экономических факторах: в

настоящее время рентабельность таких установок под вопросом, так как нет массового производства и внедрения данного типа установок.

Выбор варианта, анализ возможных схем ТЭ/ГТ, обладающих лучшим соотношением КПД и конструктивной реализуемостью, актуальная прикладная задача. При расчете КПД учитывается электрическая мощность ЭХГ; электрическая мощность ГТУ и теплота топлива, подводимого в ЭХГ и ГТУ. Структурная оптимизация технологических схем, оптимизация режимов работы ТЭ и ГТУ позволит на перспективу реализовывать эффективные модели гибридных энергоустановок по генерации тепловой и электрической энергии [4]. Наиболее оптимальные характеристики наблюдались при использовании ТОТЭ мощностью 9,3 МВт при общей выходной мощности 18,9 МВт [5]. Для не прямой связи оптимальные характеристики достигаются при использовании топлива 60 %, рециркуляции анодов 65,3 % и мольном соотношении кислород/метан ТОТЭ, равном 3,41 (избыток воздуха 70 %) [5].

Цель оптимизации состоит в том, чтобы найти размер ТОТЭ, который минимизирует стоимость жизненного цикла на единицу энергии [6]. Эффективность, общая выходная мощность и стоимость энергии представлены в зависимости от мощности ТОТЭ на рисунке 2. Как и ожидалось, мощность установки увеличивается линейно по мере увеличения топливного элемента, поскольку ГТ поддерживает примерно постоянную выходную мощность [6].

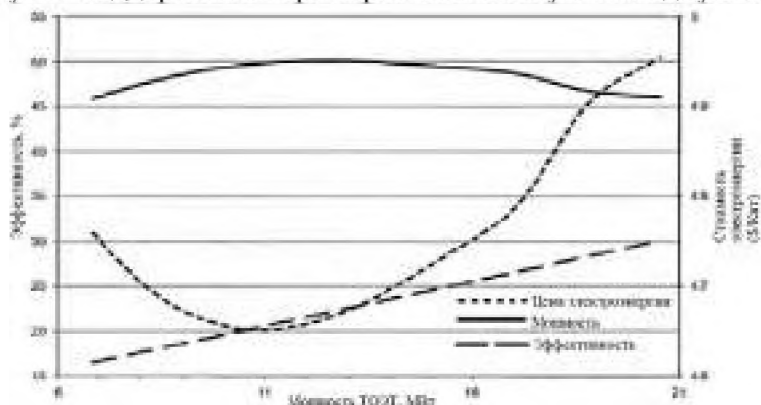


Рис. 2. Мощность, эффективность и стоимость энергии в зависимости от мощности ТОТЭ (напряжение элемента = 0,5 В, рециркуляция анода = 0,6, соотношение кислород/метан = 4)

В результате исследований зарубежных учёных [6] оказалось, что анализы чувствительности также показывают, что для гибридных установок ТОТЭ-ГТ с не прямой связью предпочтительнее использовать ТОТЭ при напряжении ячейки 0,5 В, использовать низкие скорости потока воздуха (100% избыток кислорода) и 60% рециркуляцию анодов.

Тренд-технического развития в области энергетики и промышленности в сторону низкоуглеродной экономики определяет актуальность разработок гибридных энергоустановок на водороде. Энергетические технологии на основе топливных элементов важное направление развития малой энергетики, обеспечивающее экологичность.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Родионов, В. Г. Энергетика: Проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – Москва: ЭНАС, 2010. – 352 с.
2. Седнин, В.А. Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов / В.А. Седнин, А.А. Чичко // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 6. – С. 87-97.
3. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Витвиненко, П.С. Пветков, М.В. Мвойников, Г.В. Гуслаев // Записки Горного института. 2020. № 244. – С. 428-438.

4. Арбеков, А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, В.Л. Иванов, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев, В.Д.Моляков, М.И. Осипов, И.Г. Суровцев, Н.И. Троицкий .– Москва: МГТУ им. Баумана, 2017. – 678 с.
5. Denver F.Cheddie International Journal of Hydrogen Energy / Volume 36, Issue 2, January 2011, Pages 1702-1709.
6. Denver F.Cheddie, Renique Murray Journal of Power Sources / Volume 195, Issue 24, 15 December 2010, Pages 8134-8140.

Научный руководитель: д.х.н. Н.Д. Чичирова, профессор АТЭС ИТЭ КГЭУ, к.х.н. Д.Ф. Гайнутдинова, доцент ХВ ИТЭ КГЭУ.

## **МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

А.С. Кукушкин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-42

Бумажно-пропитанная изоляция одна из самых распространенных видов изоляций кабельных линий на все классы напряжений, которая обладает высокими диэлектрическими свойствами. Однако имеет такие недостатки, как: тяжелый и низкопроизводительный процесс изготовления, ограничения при монтаже и прокладке таких линий, а металлическая оболочка значительно утяжеляет вес изделия.

Эти недостатки устраняются использованием в качестве изоляции кабелей полимерных материалов. Полимеры – это высокомолекулярные соединения, состоящие из длинных молекул, образованных многократным повторением мономерных звеньев.

Разрушение полимерных материалов под воздействием электрического поля сопровождается проводящим каналом, который располагается между электродами.

Степень дефекта данной конструкции можно определить по характеристике частичных разрядов, которые наиболее опасны при переменном и импульсном напряжении.

Пробой диэлектрика, возникающий при появлении дендрита – ветвистого побега, который развивается от одного электрода к другому, характерен при долгом воздействии напряжения на полимерную изоляцию. Вид типичного дендрита приведен на рисунке 1 [1].

Дендрит зарождается инжектированием объемного заряда, который возникает при локальном увеличении напряженности поля, механических повреждениях, водном триинге, либо накоплением такого заряда при приложении постоянного напряжения.



*Рис. 1. Срез изоляции полиэтиленового кабеля с дендритом*

Заряд накапливается в зонных структурах в которых много ловушечных уровней, где застревают электроны.

Определение этих зон с накопленным зарядом не представляем возможным, так как это происходит на молекулярном уровне, поэтому диагностика в полимерной изоляции сводится к определению есть ли дендрит или нет.

Нарушение целостности материала, которое возникает при появлении дендрита характеризуется рядом факторов: частичные разряды, акустические и тепловые эффекты и др. Дальнейшее развитие дендритов в полимерной изоляции происходит из-за воздействия ЧР на каналы дендрита, что является ключевым и взаимосвязанным моментом для определения остаточного ресурса изоляционного материала.

С учетом ранее известных выполненных исследований объективными и достоверными диагностическими методами контроля рабочего состояния полимерной изоляции, находящихся в эксплуатации, являются: тепловизионная (инфракрасная) дефектоскопия; акустическая дефектоскопия; электромагнитный; электрический.

Тепловизионный контроль оборудования основан на регистрации инфракрасного излучения от нагретых частей изоляции вследствие зарождения дендритов. Недостатками метода являются низкая точность измерения и сложность использования в реальных условиях (интенсивные осадки, солнечные лучи, ветер и т. д.).

Для определения ЧР акустическим методом используются сверхчувствительные микрофоны, которые улавливают звуковые волны, расположенные в диапазоне частот выше порога слышимости. Данный метод является дистанционным и позволяет располагать датчики и сенсоры в устройствах открытой конструкции, например, ячейках КРУ и шинопроводах, однако для определения ЧР малой интенсивности, чувствительности метода может не хватить.

При возникновении ЧР в небольшом объеме, пробой происходит очень быстро со скачком напряжения за наносекунду. Такие короткие аномалии могут быть обнаружены СВЧ-датчиками по колебаниям электромагнитных волн на частотах 300 МГц – 3 ГГц. Важно разместить датчики в наиболее подходящем месте, чтобы измерения были непрерывными и достаточно точными для практического применения. Недостатком метода являются электромагнитные волны, излучаемые от другого оборудования, что не позволяет получить точную оценку ЧР.

Электрический метод позволяет снимать наибольшее количество параметров ЧР и дает возможность всесторонне изучить объект исследования. Но данный способ требует прямого контакта измерительных приборов с объектом измерения, что делает его не самым удобным.

Анализ электромагнитных импульсов ЧР является самым информативным способом оценки состояния полимерной изоляции, однако стохастический характер самих ЧР не позволяет получить точных результатов. Поэтому разработка новых методов обнаружения ЧР в полимерной изоляции является актуальной задачей.

#### **Экспериментальное исследование обнаружения ЧР в высоковольтной изоляции с помощью внешних прямоугольных импульсов.**

Данный подход предполагает подачу импульса на часть высоковольтной изоляции через конденсатор связи, содержащий ячейку с ЧР. В экспериментах применялись импульсы длительностью 520 наносекунд. Элемент, имитирующий ЧР, представлял фрагмент полиэтиленовой изоляции с искусственной порой внутри диаметром 1 мм. Напряжение 6 кВ подавалось на ячейку от испытательного трансформатора. Таким образом, был организован ЧР в поре остаточной атмосферы в полиэтилене. Возникновение и горение ЧР контролировалось визуально. Блок-схема экспериментов по диагностике ЧР внешним наносекундным импульсом представлена на рисунке 2.

Схема эксперимента: генератор импульсов генерирует зондирующий импульс наносекундной длительности, который подается на детекторную ячейку. Осциллограф измеряет зондирующий импульс, подаваемый на ячейку. Сначала зондирующий импульс длительностью 520 нс подается на ячейку без ЧР. Затем в схему помещается ячейка с ЧР.

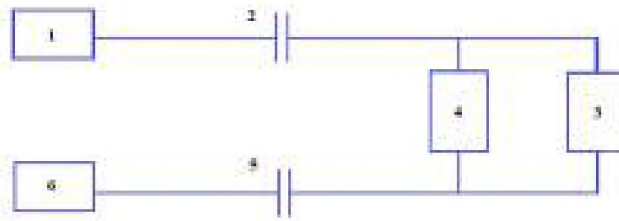


Рис. 2. Блок-схема экспериментов:

1 – генератор зондирующих импульсов наносекундной длительности, 2, 5 – конденсаторы связи, 3 – высоковольтный трансформатор, 4 – ячейка с частичным разрядом, 6 – осциллограф Tektronix TDS 1012

Конденсаторы связи обеспечивают безопасность работы генератора импульсов и осциллографа [2]. Форма волны импульса, подаваемого на ячейку без ЧР, показана на рисунке 3а. Та же ситуация с ЧР в виде поры в полимерной изоляции показана на рисунке 3б

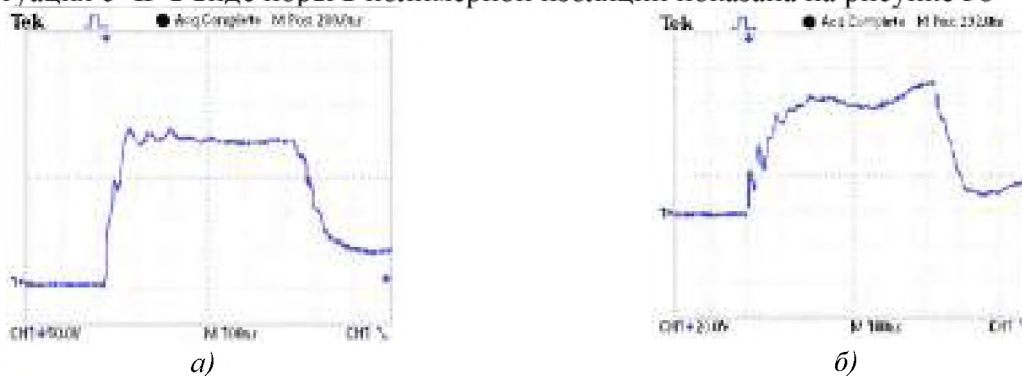


Рис. 3. Форма волны импульса длительностью 520 нс

а) частичный разряд отсутствует, б) наличие частичного разряда в поре полиэтилена

Таким образом, на основании результатов экспериментов, изложенных выше, можно заключить, что метод импульсного зондирования, успешно применяемый для диагностики обмоток трансформаторов, может выступить в качестве удачной альтернативы традиционным методам обнаружения ЧР. Один из путей такого подхода подача на обследуемый участок изоляции импульса квазипрямоугольной формы, генерируемый специальным генератором. Этот путь диагностики частичного разряда основан на технологии последовательного импульсного дефектографирования, применяемой для контроля состояния обмоток трансформатора. Последовательное сравнение наносекундных импульсов позволяет контролировать наличие частичного разряда на обследуемом участке высоковольтной изоляции. Применение предложенной технологии может быть реализовано в рабочем режиме без снятия напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
2. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse / V.Lavrionovich, A. Mytnikov, Li Hongda // Resource-Efficient Technologies. – 2016. – V. 2. – № 3. – P. 111–117.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ГРОЗООТМЕТЧИК

В.С. Федоров

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А15

Согласно данным статистики значительное количество электроустановок повреждается в результате грозовых явлений в летнее время [1]. Грозовые перенапряжения по времени воздействия очень кратковременные, но обладают огромной кратностью и являются очень опасными для оборудования любого класса напряжения. В 21-м веке, в условиях цифровизации энергетики и внедрения микропроцессорной противоаварийной автоматики, особенно актуальна защита оборудования от импульсных перенапряжений и электромагнитных волн, вызванных сильными атмосферными разрядами.

Одним из условий решения поставленной задачи является возможность прогнозирования приближения грозы и определения вероятности возникновения удара молнии. Приборы, способные регистрировать возникновение молний, называются грозоотметчиками. Первый грозоотметчик был сконструирован русским ученым А.С. Поповым в 1895 г. [2].

В данной работе была поставлена цель – сконструировать, собрать и испытать прибор грозоотметчик, обладающий лучшими характеристиками, чем известные прототипы [3]. Собранный грозоотметчик относится к электрическому типу и реагирует на изменение напряженности электрического поля от примерно 100 В/м при хорошей погоде до 30 кВ/м перед грозой. Напряженность электрического поля возникает при перемещении и нейтрализации зарядов в облаках при ударе молний. В функции прибора входит определение приближения грозового фронта и определение вероятности удара молнии. С помощью данного прибора можно выполнять различные исследования, например, изучать механизмы возникновения атмосферных разрядов и предшествующих им явлений.

На рисунке 1 представлена блок-схема прибора.

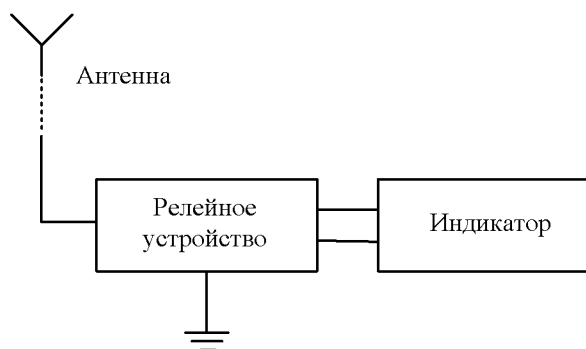


Рис 1. Блок-схема грозоотметчика

Электрический грозоотметчик включает в себя антенну, которая принимает сигнал от молнии, релейное устройство, срабатывающее от него и индикатор, фиксирующий появление сигнала. Благодаря отказу от устаревших детекторов электромагнитных волн удалось значительно повысить чувствительность и стабильность прибора, что очень важно в режиме автономной работы. Перечислим наиболее значимые характеристики прибора: напряжение питания  $U=3,5$  В, ток потребления в режиме ожидания  $I = 2$  мА, максимальная частота срабатывания – 3 импульса в секунду. Эффективный радиус прибора для регистрации гроз составляет 8 км. Наружная антенна ХS1 выполнена из медного изолированного провода. Чувствительность прибора увеличивается при увеличении длины антенны. Как показали испытания, грозоотметчик способен фиксировать даже небольшие атмосферные токи при хорошей погоде.

На рисунке 2 представлена принципиальная электрическая схема прибора.

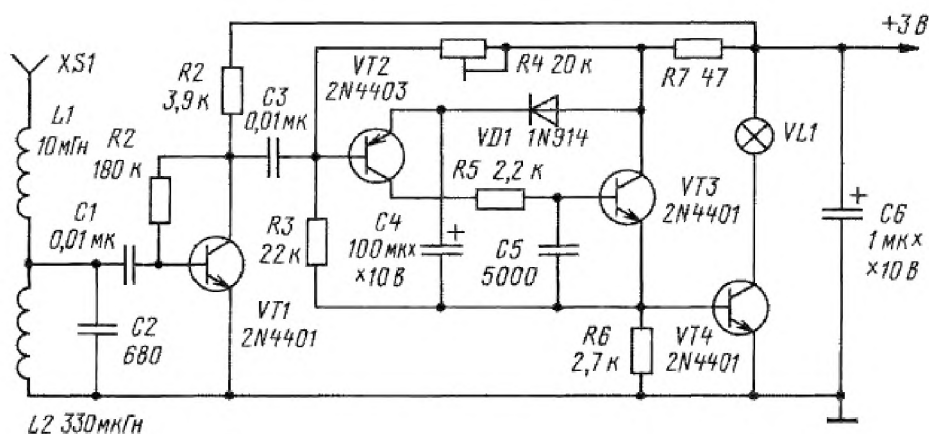


Рис 2. Принципиальная электрическая схема грозоотметчика

Сконструированный грозоотметчик имеет небольшие размеры (22x12x13 см) и массу (1 кг). Кроме того, прибор обладает высокой энергоэффективностью, то есть может быть использован, как мобильное устройство участниками исследовательских экспедиций. Разработанный прибор чувствителен как к импульсным напряжениям, так и к линейным. При условии наличия самописца его функциональные возможности расширяются и позволяют производить анализы зафиксированных графиков.

В системах электроснабжения нефтегазодобывающих предприятий довольно часто фиксируются случаи аварийного отключения одних и тех же линий в течение нескольких лет во время летней грозовой активности. Такие отключения приводят к значительным убыткам. Грозоотметчик целесообразно использовать на стадии проектирования систем электроснабжения, выявляя места, в которые молнии ударяют чаще всего. Грозоотметчики позволяют определять координату места удара молнии и оперативно устранять неисправности в электросетях.

Данная версия прибора предназначена для исследовательских целей. В дальнейшем планируется на основании данных, полученных при его испытаниях, разработать более совершенный прибор для использования в метеорологических службах.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Малахова Т.В. и др. Грозовые явления и защита систем электроснабжения от атмосферных перенапряжений. – Текст: электронный // Cyberleninka. – 2017. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/grozovye-yavleniya-i-zaschita-sistem-elektrosnabzheniya-ot-atmosfernyh-perenapryazheniy> (дата обращения 12.11.2022).
2. Грозоотметчик. – Текст: электронный // Википедия. – 2018. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Грозоотметчик> (дата обращения 22.11.2022).
3. Грозоотметчик. – Текст: электронный // Radiopolyus. – 2022. – URL: <http://radiopolyus.ru/neobychnye-sxemy/189-grozootmetchik> (дата обращения 22.11.2022).

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.В. Шестакова, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.



# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕМОНТАЖА ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Э. Риф<sup>1</sup>, В.Е. Губин<sup>2</sup>

Томский политехнический университет<sup>1</sup>

ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5071<sup>1</sup>

Севастопольский государственный университет, доцент<sup>2</sup>

Россия вступила в новую эру в области ядерной энергетики. Этот этап, с одной стороны, связан с проектированием и строительством новых типов атомных электростанций, таких как станции с реактором на быстрых нейтронах (БРЕСТ-ОД-300), наземные атомные станции малой мощности на базе реакторной установки РИТМ-200 и многие другие проекты, реализуемые ГК «Росатом». С другой стороны, существует тенденция к выводу из эксплуатации энергоблоков, которые отработали свой проектный ресурс или их эксплуатация становится нецелесообразной с точки зрения экономики, экологии или политики. Вывод из эксплуатации сопровождается рядом вопросов, связанных с безопасным демонтажем, дезактивацией, утилизацией и хранением радиоактивных материалов. Наиболее тщательного подхода требует демонтаж графитовой кладки при выводе из эксплуатации уран-графитовых реакторов (УГР) [1].

В мире на данный момент существует более 100 разных типов УГР – энергетических, промышленных и исследовательских. Вывод из эксплуатации реакторов с графитовым замедлителем неизменно связан с большим количеством радиоактивных отходов в виде фрагментов графитовой кладки. Во всем мире существует более 250 000 тонн материала, включая графитовые замедлители и отражатели, поэтому графит становится основным потоком отходов, с которым необходимо бороться. После долгого облучения в реакторе графит не приобретает таких свойств, которые могли бы создать ему область полезного применения, поэтому он относится к категории твердых радиоактивных отходов среднего или высокого уровня активности. Основные проблемы, связанные с графитом, возникают из-за больших объемов, требующих утилизации, длительного периода полураспада основных радионуклидов и специфических свойств графита, таких как накопление энергии Вигнера, взрывоопасность графитовой пыли и потенциальный выброс радиоактивных газов [2].

В настоящее время существуют разные подходы к демонтажу уран-графитовых реакторов, однако нет реализованных или утвержденных проектов. Проект по демонтажу латиноамериканской атомной электростанции наиболее сформирован, однако при предлагаемом извлечении графитовых блоков таким образом, создаются большие напряжения внутри каналов, что может привести к разрушению графитового блока [2]. Необходимо разработать такую концепцию устройства, чтобы напряжения в материале были минимальными, а блоки извлекались наиболее целостными с уменьшением возможного образования графитовой пыли. Также процесс демонтажа реакторной установки сопряжен с дозовыми нагрузками порядка 2-50 Зв/ч. Поэтому комплекс по демонтажу оборудования должен позволить исключить присутствие персонала при проведении работ.

В настоящей работе предлагает робототехнический комплекс для захвата графитовых блоков из кладки, который позволит проводить работы без непосредственного контакта персонала с оборудованием. Кроме того, данная технология должна сократить негативное разрушающее воздействие на блоки, что позволит минимизировать выход радиоактивной пыли. Для анализа риска разрушения блоков проведено имитационное 3D-моделирование, которое позволило оценить разрушающее воздействие на графитовые блоки.

На данном этапе создана 3D-модель устройства захвата графитового блока, анимированы процессы захвата и поднятия блока, проведен анализ напряжений в самом графитовом блоке и в устройстве.

Устройство захвата состоит головки 1, которая содержит полый внутренний вал 2 с пазами. В нижнюю часть внутреннего вала 2 вставлена полая втулка 3. Втулка 3 прижимает к

торцу внутреннего вала 2 закругленные концы кулачков 4, расположенных по окружности под углом 90 градусов относительно друг друга. Пазы внутреннего вала 2 и головки 1 образуют направляющие кулачков 4. В исходном положении все кулачки 4 находятся в пазах внутреннего вала 2 и головки 1. Форма втулки 3 обеспечивает возможность отклонения кулачков 4 по направляющим пазам, что обеспечивает выход концов кулачков 4 из головки 1. При движении вниз внутреннего вала 2 кулачки 4 скользят по направляющим пазам головки 1. Происходит захват выбранного графитового блока снизу без нажима на внутреннюю поверхность отверстия в блоке. Жесткая фиксация в раздвижном положении обеспечивается прижимной гайкой 5. Такой вариант захвата графитового блока позволяет исключить образование продольных трещин и разрушение графитового блока при его перемещении (рисунок 1).

На рисунке 2 приведены напряжения в графитовом блоке. Как можно заметить, максимальные напряжения составляют 1,9 МПа, что относительно немного, и не приведет к разрушению графита.

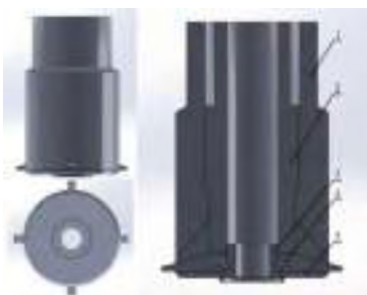


Рис. 1. Устройство захвата графитовых блоков

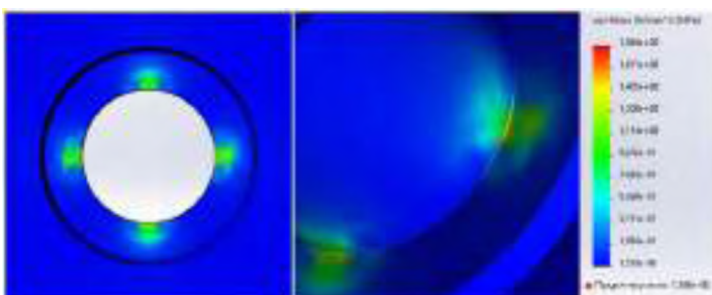


Рис. 2. Симуляция напряжений в графитовом блоке

На рисунке 3 представлены напряжения в кулачках устройства. Максимальные напряжения составляют 17,4 МПа, что не приведет к разрушению и деформации устройства захвата.

На рисунке 4 представлены 2 этапа взаимодействия устройства и графитового блока при его извлечении из кладки.

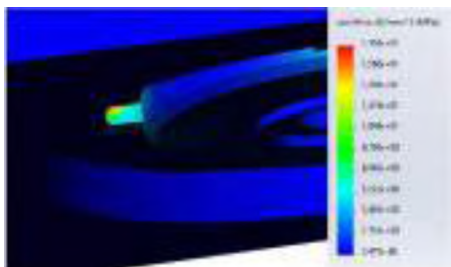


Рис. 3. Симуляция напряжений в кулачках устройства



Рис. 4. Этапы взаимодействия устройства и графитового блока (слева – кулачки в сжатом состоянии внутри корпуса устройства, справа – произведен захват кулачками графитового блока)

Таким образом, по результатам 3D-моделирования и симуляции процессов можно отметить, что данное решение, во-первых, позволяет исключить присутствие персонала при проведении демонтажа (дистанционное управление устройством), во-вторых, минимизирует риски разрушения графита и выхода графитовой пыли, что является актуальным требованием при процессах вывода из эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Бодров О.В., Кузнецов В.Н., Муратов О.Э., Талевлин А.А. Обращение с графитом при выводе из эксплуатации реакторов РБМК// [http://decommission.ru/wp-content/uploads/2020/03/Grafit\\_16.03.2020\\_рус.pdf](http://decommission.ru/wp-content/uploads/2020/03/Grafit_16.03.2020_рус.pdf)
2. Giuseppe Canzone, Rosa Lo Frano, Marco Sumini, Francesco Troiani. Dismantling of the graphite pile of Latina NPP: Characterization and handling/removal equipment for single brick or multi-bricks// *Progress in Nuclear Energy*. 2016. 93, 146-154

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Е. Губин, зав.каф. ПТУ, СевГУ.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАБОТУ ЗАМКНУТОЙ ГТУ С ВОДОРОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Н.В. Стецов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова, группа 5091

Энергоблоки с высокотемпературными гелийохлаждаемыми реакторами имеют большую перспективу в силу ряда достоинств, в том числе – возможности работы совместно с установкой, генерирующей водород по наиболее эффективной в настоящее время технологии высокотемпературного электролиза.

Данный метод производства водорода обладает многими преимуществами: отсутствие необходимости очищать водород после выработки («зелёный» водород), получение большого количества водорода примерно 1,5 кг  $H_2$  из 17 кг пара. Тенденция к потреблению и производству водорода в настоящее время сильно растут (рисунок 1). Цели данного сектора энергетики зафиксированы в ключевом отраслевом документе стратегического планирования – актуализированной Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [1].

Нами выбрана наиболее привлекательная одноконтурная схема энергоблока (рисунок 2), Гелий на выходе из активной зоны реактора поступает в парогенератор, где отдает часть теплоты на генерацию высокоперегретого пара для электролизной установки. Далее гелий работает в замкнутом газотурбинном цикле с регенерацией теплоты.

Целью работы является исследование влияния управляемых при проектировании параметров (степени повышения давления в компрессоре, степени регенерации) на тепловую эффективность энергоблока и его основные характеристики. Особый интерес представляют зависимости КПД, расходов и количества производимого пара для установки.

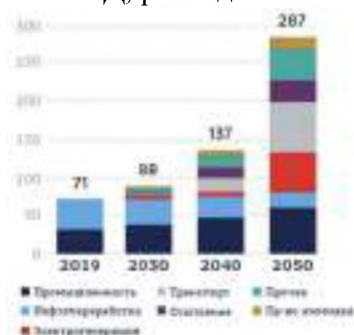


Рис. 1. Прогноз потребления водорода по сегментам экономики в мире, млн т/г

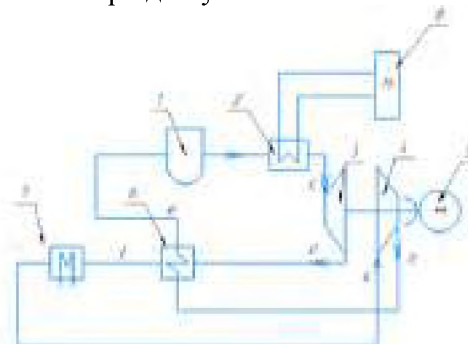


Рис. 2. Схема ГТУ с водородным комплексом и регенерацией теплоты:

1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – турбина,  
4 – компрессор, 5 – генератор, 6 – регенеративный  
подогреватель, 7 – охладитель, 8 – электролизёр

Исследование включает 2 серии расчетов: в первой управляемым параметром являлась степень повышения давления в компрессоре, во второй серии – степень регенерации.

Для получения достаточно высокой экономичности ГТУ температура гелия на входе в газовую турбину принята 1123 К. Температура гелия на выходе из реактора принята максимальной по условиям обеспечения работоспособности материалов активной зоны, равной 1223 К. Давление гелия на входе в компрессор принято равным 3,0 МПа. Тепловая мощность реактора равна 200 МВт. Значения внутренних относительных КПД: компрессора – 0,84, турбины – 0,87. Приняты параметры пара, генерируемого для электролизной установки: давление 1 МПа, температура 800 °С. Исследование работы схемы производилось на базе простой ГТУ с регенерацией теплоты [2].

В первой серии варианты расчеты проводились в диапазоне изменения степени повышения давления в компрессоре от 1,6 до 3,0 при постоянном значении температурного напора на горячем конце регенератора  $\Delta T=10$  К. Потери давления в регенераторе по стороне высокого давления приняты 1,5 %, по стороне низкого давления – 2 %.

Установлено (рисунки 3 и 4), что с уменьшением степени повышения давления  $\epsilon$  КПД и коэффициент полезной работы ГТУ значительно возрастают (в 1,4–1,5 раза), что объясняется ростом степени регенерации (рисунок 5), а также меньшим приростом работы компрессора по отношению к приросту работы турбины.

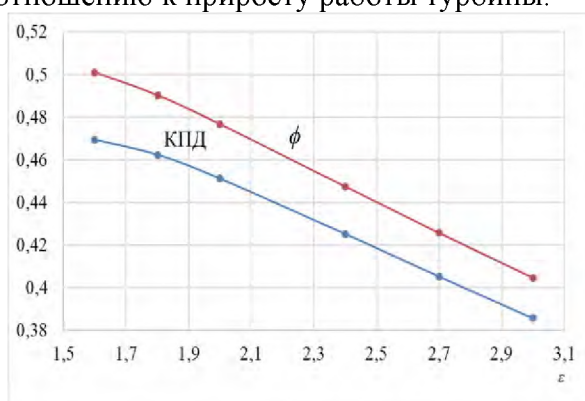


Рис. 3. Зависимость КПД ГТУ и коэффициента полезной работы от степени повышения давления

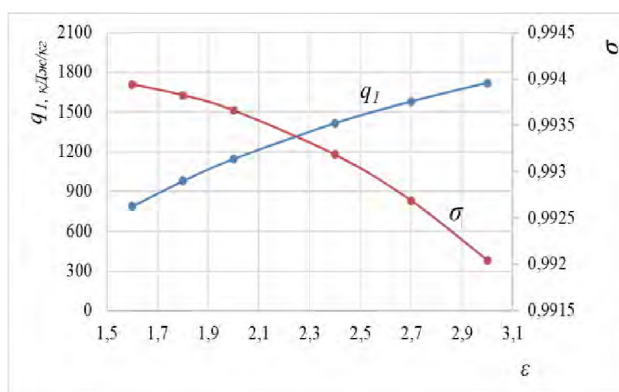


Рис. 4. Зависимость степени регенерации и удельной подведённой удельной теплоты от степени повышения давления

Из-за роста степени регенерации растет температура гелия на входе в реактор, поэтому при уменьшении степени повышения давления сокращается количество удельной подведённой теплоты (рисунок 5).

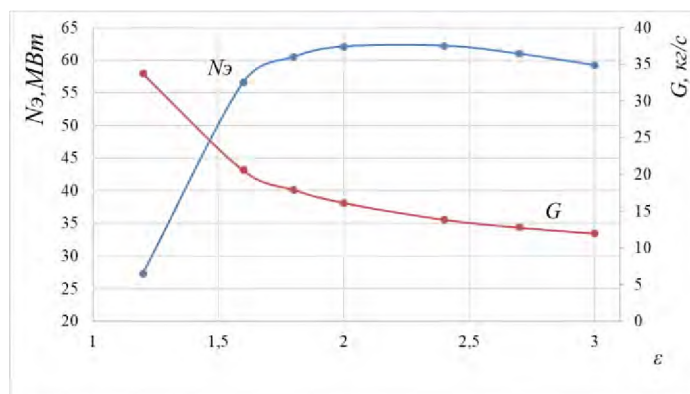


Рис. 5. Влияние степени повышения давления на электрическую мощность энергоблока и на расход пара

Электрическая мощность энергоблока  $N_{э}$  в значительном диапазоне снижения степени повышения давления остается практически неизменной на уровне 60 МВт (рисунок 4), но при достижении  $\varepsilon \approx 1,6 N_{э}$  резко падает более чем в 2 раза. Такая зависимость объясняется тем, что на участке снижения  $\varepsilon=3 \dots 1,6$  уменьшение теплоперепада турбины компенсируется ростом расхода гелия, так как сокращение удельной теплоты при постоянной тепловой мощности реактора приводит к росту расхода теплоносителя.

Установлено, что при тепловой мощности реактора 200 МВт в рассмотренном диапазоне снижения степени повышения давления расход теплоносителя растет от 63,2 до 105,4 кг/с.

Расход пара на установку высокотемпературного электролиза, генерирующую водород, растет вследствие роста расхода гелия (рисунок 4). Это позволяет получить большее количество водорода.

Во второй серии расчеты проведены для степени повышения давления 2,4. Диапазон изменения степени регенерации принят от 0,4 до 0,977. Результаты представлены на рисунках 6–8.

Зависимость КПД и электрической мощности ГТУ почти прямо пропорциональны степени регенерации, КПД возрастает в 2 раза (рисунки 6 и 7).

Удельная подведенная теплота обратно пропорциональна степени регенерации (рисунок 8). Это объясняется повышением температуры гелия на входе в реактор при увеличении степени регенерации.

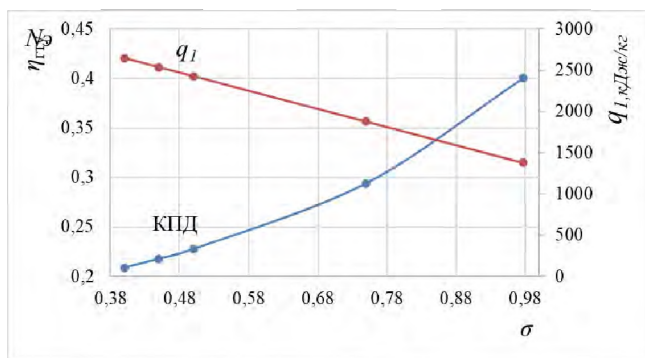


Рис. 6. Зависимость КПД ГТУ и удельной подведенной теплоты от степени регенерации

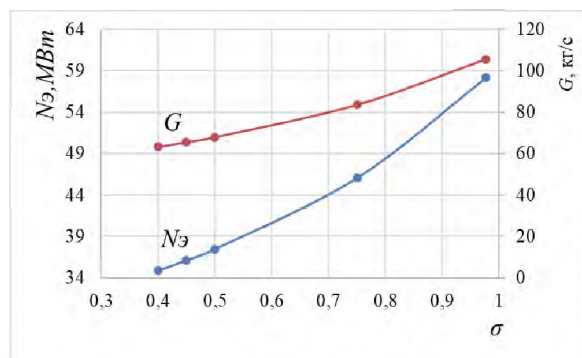


Рис. 7. Зависимость электрической мощности и расхода гелия от степени регенерации

Увеличение расхода гелия с ростом степени регенерации (рисунок 6) увеличивает размеры оборудования, но при этом растет расход генерируемого пара (рисунок 7), так как принят неизменным перепад температур гелия на пароперегревателе.

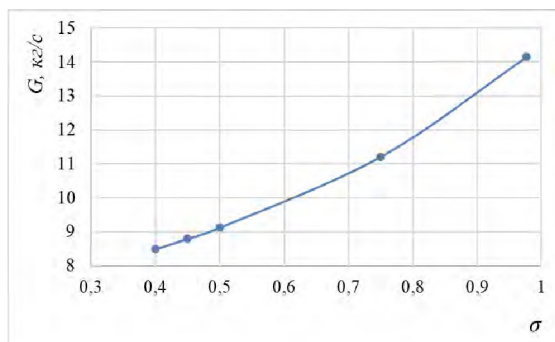


Рис. 8. Зависимость расхода пара от степени регенерации

В целом установлено, что для ГТУ с учетом технических соображений ограничены величины: значение степени повышения давления ГТУ – 2,4, значение степени регенерации – 0,997.

КПД одноконтурного энергоблока с гелийохлаждаемым реактором в комплексе с установкой генерации водорода по технологии высокотемпературного электролиза водородным комплексом может достигать 45 %.

В дальнейшем планируется провести анализ влияния изменения потерь давления в регенераторе на характеристики энергоблока. Для окончательного выбора значений управляемых параметров необходимо учесть стоимостные показатели и провести технико-экономические расчеты по критериям приведенных затрат или чистого дисконтированного дохода.

#### **Экономический эффект**

К 2030 г. ожидается падение стоимости электролизеров на 30–40 %, что сделает электролиз на АЭС перспективной технологией для развития в России: минимальные выбросы при относительно невысокой цене. Плановые показатели экспорта водорода из РФ к 2035 году: 2–12 млн.т [3]. Возможности производства водорода данной установкой, следующие: из 17 кг высокопотенциального пара мы получаем примерно 1,5 кг водорода пищевого качества.

Средняя стоимость 1 кг водорода, произведенного методом высокотемпературного электролиза на рынке: 2,5 доллара США [4]. Так как в час установка производит примерно 50760 кг пара, соответственно 4478 кг водорода мы можем получить. В денежных единицах: 11197 долларов США.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. <https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/documents/11/10/1920/document-66308.pdf?ysclid=laz95usaff150745693>
2. Паровые и газовые турбины для электростанций [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний ; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — Загл. с тит. экрана.
3. otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti-masshtabov-polucheniya-vodoroda-razlichnymi-metodami (2).pdf

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.М. Антонова, доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МОЩНОСТЬЮ ДО 110 МВт**

Г.С. Кузяков<sup>1</sup>, Н.М. Космынина<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, группа 5А91<sup>1</sup>, ОЭЭ<sup>2</sup>

Турбогенераторы – преобладающий вид генерирующего оборудования, на долю которого приходится около 80 % от мирового объема производства электроэнергии. Это один из сложнейших видов электрических машин, в которых решаются взаимосвязанные проблемы мощности, размеров, характеристик, нагрева охлаждения и прочности устройства. Несмотря на то, что технологии развиваются и потери становятся все меньше, проблема нагревания частей электрооборудования остается актуальной. На рисунке 1 показана установка одного из турбогенераторов, изготовленным НПО «Элсиб» в машинном зале электростанции [1].

Охлаждение можно производить воздухом, водородом, водой, маслом. Отвод теплоты может осуществляться от проводников обмотки по каналам, расположенным внутри пазов, или косвенно от поверхности ротора и статора. То есть при непосредственном охлаждении охлаждающая среда соприкасается с проводниками обмоток, а при косвенном – нет. Эти системы охлаждения имеют условное буквенное обозначение, применяемое в паспортных данных генераторов [2].



Рис. 1. Турбогенератор типа ТВФ-110

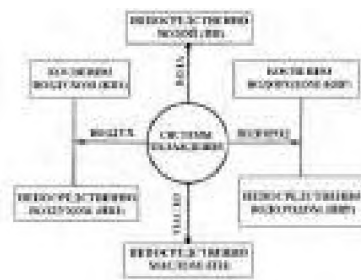


Рис. 2. Системы охлаждения генераторов

Проведя анализ охлаждающих сред можно сделать вывод, что у каждой из сред есть как свои преимущества, так и недостатки. Например, водородная среда имеет в 1,51 раз больший коэффициент теплопередачи, чем воздушная, а её теплопроводность больше в 7 раз. Но в то же время водород, смешиваясь с воздухом в генераторе может образовывать взрывоопасную смесь. Из этого следует, что для применения водородного охлаждения требуется высокая газоплотность корпуса, что увеличивает экономические затраты. В генераторах с жидкостным охлаждением используют дистиллированную воду, либо масло. Их теплоотводящая способность выше, чем у водорода, что позволяет увеличить мощность не увеличивая размеры.

Анализ систем охлаждения турбогенераторов до 110 МВт, находящихся в эксплуатации, приведен в таблице 1 [3, 4].

Таблица 1. Охлаждение частей турбогенератора

Тип турбогенератора	Система охлаждения
Т-6-2У3	воздушное
Т-12-2У3	воздушное
Т-20-2У3	воздушное
ТВС-32У3	водородное
ТВС-32Т3	водородное
ТВФ-63-2ЕУ3	водородное
ТВФ-63-2У3	водородное
ТВФ-63-2У3	водородное
ТВФ-110-2ЕУ3	водородное

Из приведенных данных можно сделать следующий вывод: В настоящее время в России на долю турбогенераторов мощностью до 110 МВт приходится около 60 % от общего количества. Водородное и водо-водородное охлаждение, которое имеет значительные преимущества, на практике уступает турбогенераторам с полным воздушным охлаждением, ввиду сравнительно небольших экономических затрат и простоте в эксплуатации, а также низкой пожароопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. НПО «ЭЛСИБ» ПАО // url: <https://elsib.ru/ru/turbogenerator/> (дата обращения 10.11.2022)
2. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие/ Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 5-е изд., стер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 608 с.
3. Электрооборудование электрических станций и подстанций.: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 10-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
4. «Каталоги и справочники по электротехнике» 01.01.2010 г. / Информэлектро. – Москва, 2010. – 199 с

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Н.М. Космынина, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Е.И. Гордынский<sup>1</sup>, И.С. Ефремов<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет<sup>1,2</sup>  
ИШЭ, ОЭЭ<sup>1,2</sup>, группа 5АМ18<sup>1</sup>, группа 5АМ28<sup>2</sup>

С каждым годом увеличиваются объемы добычи нефти. Увеличение срока службы и бесперебойной работы нефтепогружных установок является приоритетной задачей нефтедобывающей отрасли. Питание нефтепогружных насосов осуществляется с помощью нефтепогружного кабеля (НПК). Изоляция НПК может выполняться из следующих материалов (согласно ГОСТ 51777): пленка полиимидно-фторопластовая; лаковая (эмалевая) изоляция; полиэтилен высокой плотности (П); полиэтилен высокой плотности вулканизированный (Пв); композиции полипропилена, сополимеры и блок-сополимеры пропилена (Пп); резины на основе этиленпропиленового каучука (Э); фторополимеры (Ф); термоэластопласты (Т). Обеспечивается плотное прилегание изоляции к жиле, отсутствие инородных включений и пор, а на поверхности изоляции трещин, вмятин и утолщений.

В приоритетах при выборе кабеля является рабочий температурный диапазон, износостойкость, срок службы кабеля и т. д. Для улучшения этих характеристик применяют различные методы, один из которых является фторирование, сульфирование, хлорирование. Этот способ является одним из современных и перспективных [1, 2].

В работе проведена сравнительная оценка свойств изоляции макетных образцов изолированных жил НПК до и после модифицирования. Было оценено изменение пробивного напряжения и электрофизических свойств (сопротивление, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) образцов 3 типов изоляции.

Образцы изолированы блок-сополимером этилена с пропиленом (БСПЭ). БСПЭ представляет собой композиционный, модифицированный материал, на основе полимер пропилен, в который определенным образом был добавлен этилен. За счет этой модификации увеличилась температурная устойчивость (как к высоким, так и к низким температурам), прочность, долговечность материала. Улучшилась стабильность и эластичность материала, а также стойкость к механическим воздействиям, таким как сжатие, излом и растяжение. Для БСПЭ отмечается стабильность в работе, при воздействии температуры до 140 °С, а также устойчивость к длительным температурным воздействиям, устойчивость к воздействию химических веществ и растворителей. Благодаря таким свойствам БСПЭ получил широкое применение в качестве электроизоляционного материала в кабельной промышленности [3].

Определение пробивного напряжения изоляции образцов проводилось на высоковольтной установке. Результаты эксперимента показали: после модифицирования пробивное напряжение образцов тип 1 и 3 осталось на исходном уровне, а у образца тип 2 увеличилось примерно на 15 % (общий вид образцов приведен на рисунке 1а).

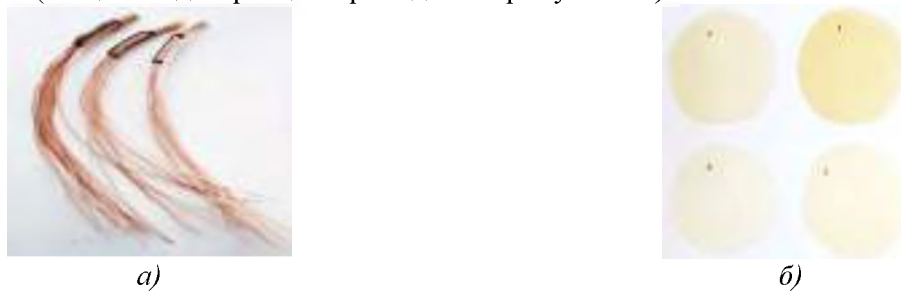


Рис. 1. Общий вид макетных образцов



Одновременно с проведением экспериментов по определению пробивных напряжений макетных образцов, был произведен сравнительный анализ электрофизических свойств изоляционного материала блок-сополимера этилена с пропиленом (рисунок 1б).

Электрофизические характеристики определялись с помощью лабораторной установки «Изучение удельных электрических сопротивлений твердых диэлектриков», в комплект которой входил: LCR-7816-цифровой прецизионный измеритель RLC параметров и термостат, с помощью которого устанавливались определенные температуры. В термостате, во время проведения экспериментов, автоматически поддерживалась температура образца диэлектрика. Диэлектрик устанавливался в приемную кассету с электродами (рисунок 2), подключался к измерительной схеме, при этом предварительно устанавливалась требуемая температура.

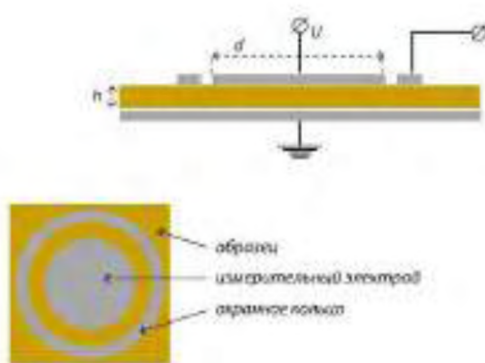


Рис. 2. Схема электродов при определении электрофизических характеристик:  
d-диаметр измерительного электрода, h- толщина образца

Определялись значения емкости  $C$  при частоте  $f = 1$  кГц, угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  при  $f = 100$  кГц, объемного сопротивления  $R_v$ , в температурном диапазоне от 15–115 °С. По результатам измерений и с учетом геометрических размеров образца и электродов, был произведен расчет удельного сопротивления  $\rho_v$ .

Отмечено повышение величины объемного сопротивления и  $tg\delta$  образцов.

**Выводы:** Отработана методика испытаний на определение пробивного напряжения макетных образцов и электрофизических свойств изоляции. Определены характеристики образцов в исходном состоянии и после модифицирования: объемное сопротивление, удельное сопротивление, емкость, угол диэлектрических потерь. Результаты работы станут отправной точкой для дальнейших исследований изменения свойств изоляции с учетом воздействующих факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Электропроводность термоэластопластов, модифицированных газообразным фтором/ Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Назаров В.Г., Сапего Ю.А.// Каучук и резина. – 2016. – № 3. – С. 13-16.
2. Новые антикоррозийные и износостойкие покрытия для деталей нефтегазового оборудования и трубопроводов/ Чуйко А.Г., Чуйко К.А., Чуйко А.А., Швецов А.Ю.// Коррозия территории нефтегаз. – 2008. – №2 (10). – С. 30-33.
3. Синтез блок-сополимеров пропилена и этилена на каталитической системе iv поколения в суспензии/ А.А. Трубоченко, Е.П. Мещеряков, Е.О. Коваль, Э.А. Майер в // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319. – № 3. – С. 162–166.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.П. Леонов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ; Е.В. Старцева, ст. преп. ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ОРГАНИЗАЦИЯ ОСВЕЩЕНИЯ АВТОДОРОГИ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ БГЭС И РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЯ ПО УСТАНОВКЕ ОПОР ОСВЕЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

П.В. Юдин, В.Ш. Николаевич  
Братский государственный университет  
ФЭиА, КЭ, группа ЭП-19

Освещение автодороги играет важную роль с точки зрения безопасности водителей, пешеходов и животных. Несмотря на то, что интенсивность движения в ночной период значительно ниже, чем в светлое время суток, но более 60 % ДТП происходит на неосвещенной дороге. Повышенная опасность при движении транспортного средства появляется в результате плохой видимости дороги, ослаблении контроля за движением, повышения усталости, постоянной ослепляемости от встречных машин. Именно поэтому необходимо качественно организовывать проектирование автомобильных дорог, как сложный комплекс по инженерному исследованию с учетом ГОСТ и требований охраны окружающей среды.

В настоящее время на определенном участке трассы А33 1 Братск-Усть-Кут, идущей по правобережному земляному участку Братской ГЭС с координатами места «56.277772, 101.799959» протяженностью 4593 м отсутствует какое-либо освещение и технические средства дорожного движения для ориентира краев дороги.

В работе представлены результаты исследований, связанных с организацией освещения автодороги правобережной плотины Братской гидроэлектростанции (БГЭС), с применением возобновляемых источников энергии и установкой опор в условиях гидротехнического сооружения с определением технико-экономических показателей.

Реализация систем освещения в настоящее время связана с двумя проблемами:

- 1) Со стороны верхнего бьефа располагается кабель связи ПАО «Ростелеком», что требует согласования при реализации проекта;
- 2) Со стороны нижнего бьефа в некоторых местах имеется низкая стойкость откоса (рисунок 1).

Для достижения поставленной цели, в работе были решены следующие задачи:

- 1) Выбор оптимального места размещения осветительных опор;
- 2) Определение варианта, при котором, освещенности дорожного полотна должна соответствовать требованиям ГОСТ [1,2];
- 3) Расчёт технико-экономических показателей;
- 4) Оценка возможности использования возобновляемые источники электроэнергии.

## 1. Размещение опор освещения

Для реализации данной задачи были изучены варианты размещения:

• Сторона нижнего бьефа находится у самого основания края откоса, где расположено на небольшом промежутке барьерное ограждение (рисунок 1). Согласно ПУЭ, расстояние от края барьерного ограждения и опоры освещения должно быть не менее 1 м, а в местах отсутствующего барьера расстояние принимается не менее 1,75 м [1]. В результате чего, на отметке пикетов 38,5–42,5 нет возможности установки столбов освещения. Данная сторона не подходит для решение поставленной задачи.

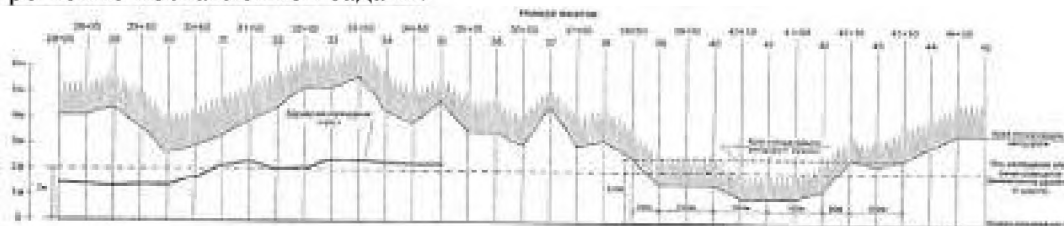


Рис. 1. План откоса правобережной плотины Братской ГЭС

- С помощью технического задания на разработку проектной и рабочей документации по объекту «Модернизация ливнеотводящей системы левобережной, правобережной грунтовой плотины с обустройством пешеходных дорожек и освещения правобережной грунтовой плотины» можно установить опоры на стороне верхнего бьефа, непосредственно на железобетонное полотно за пешеходной дорожкой. Также будет учитываться охранная зона кабеля «Ростелеком» без ущерба откоса верхнего бьефа.

## 2. Выбор осветительных опор

Предлагаемый вариант предусматривает установку 4,5 м опоры с круглым основанием в виде стальной трубы, а также квадратным кронштейном. Данная опора не углубляется в землю, а прикручивается болтами к бетонной площадке. Предполагается размещение опоры на расстоянии 2 метра от края проезжей части и в 13,5 метров друг от друга (рисунок 2).

В работе приведен расчёт уровня освещённости дорожного полотна с помощью программы DIALux (рисунок 3), на основании которого освещенность дорожного покрытия было не менее 8 лк, что соответствует ГОСТу 33.176 [3]. При этом стоимость одной опоры составляет 35907 руб., а светильника 67688 руб. Общее количество на весь участок – 340 штук. [2]

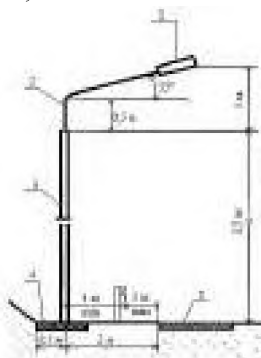


Рис. 2. Осветительная опора:  
1 – светильник Uragan Road;  
2 – квадратный кронштейн;  
3 – круглая опора; 4 – бетонная площадка;  
5 – автодорога

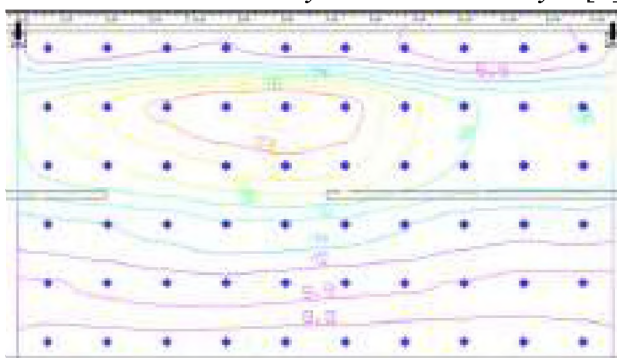


Рис. 3. Результаты расчета программы DIALux для автодорожного покрытия

## 3. Питание осветительных приборов

Для обеспечения электроэнергией светильников было рассмотрено два варианта с разными источниками питания: солнечными панелями и подключением к трансформатору собственных нужд (ТСН) [4].

Использование солнечных панелей. На первый взгляд является одним из самых перспективных и технико-экономических решением. Однако, при установке выбранных солнечных панелей на опоры, вырабатываемая ими энергия, будет меньше потребляемой.

Данный результат получен для каждого сезона года с использованием солнечных панелей SIM550-24-10BB-PERC (Twin Power) и вырабатываемой мощностью 550 Вт, а также светильниками Uragan Road мощностью 300 Вт (рисунок 4).

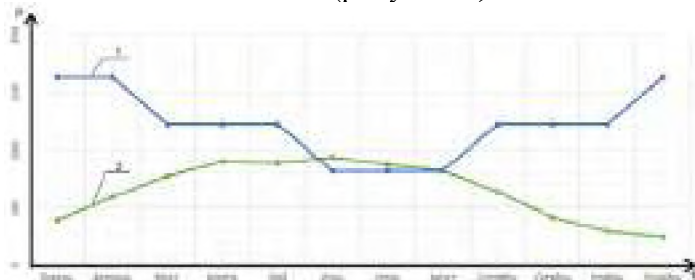


Рис. 4. График зависимости мощности (P) от месяца (M):  
1 – мощность, потребляемая светильниками; 2 – вырабатываемая панелями мощность

Второй вариант электроснабжения предполагает подключение системы освещения к системе собственных нужд станции. Питание поступает от секции №64 бетонной плотины, находящаяся на отметке 361м от уровня моря, которая, в свою очередь запитывается от трансформатора собственных нужд №62. Номинальная мощность приведенного трансформатора равна 250 кВ\*А, что позволяет обеспечить электроэнергией все осветительные опоры.

#### 4. Определение технико-экономических показателей

При разработке проектной документации, важным показателем является статический критерий приведенных затрат, на основании которого можно подсчитать итоговую стоимость проекта.

$$Z = E_H \cdot K + И, \quad (1)$$

где  $Z$  – приведенные затраты;  $E_H = 0,12$  – коэффициент эффективности капитальных вложений;  $K$  – капитальные вложения в строительство системы освещения, руб.;  $И$  – ежегодные эксплуатационные издержки, руб.;

На основании известных данных были произведены расчеты:

а) Определение капитальных вложений

$$K = (K_0 + K_{св}) \cdot n, \quad (2)$$

где  $K_0$  – затраты на опору, руб.;  $K_{св}$  – затраты на светильник, руб.;  $n$  – количество опор со светильниками

$$K = (35907 + 67688) \cdot 340 = 35222300 \text{ руб.}$$

б) Расчёт ежегодных эксплуатационных издержек

$$И = A_{св} \cdot C_{св}, \quad (3)$$

где  $A_{св}$  – отчисления на покупку запасных светильников каждый год, шт,  $C_{св}$  – стоимость светильника, руб.

Учитывая средний срок службы светильника равным – 6 лет, качество осветительных приборов 340 шт, можно найти среднее количество вышедших из работы в течении года светильников равные 57 шт., тогда:

$$И = 57 \cdot 67688 = 3858216 \text{ руб.}$$

в) Значения приведенных затрат:

$$Z = 0,12 \cdot 35222300 + 3858216 = 8084892 \text{ руб.}$$

Приведем также цены за потребление электроэнергии и зарезервированную мощность от собственных нужд. Для этого произведем следующие расчеты:

г) Суммарная стоимость за электроэнергию

$$C_э = C'_э \cdot S_{\Sigma} \cdot T_{год}, \quad (4)$$

где  $C'_э = 0,86$  – стоимость электроэнергии в рублях за кВт/ч;  $S_{\Sigma}$  – суммарная мощность всех установленных светильников в кВт;  $T_{год}$  – годовой ресурс работы осветительных приборов в час (среднее значение длительности по временам года)

$$S_{\Sigma} = P \cdot n \quad (5)$$

где  $P = 0,3$  – мощность одного светильника кВт;  $n$  – количество светильников

$$S_{\Sigma} = 0,3 \cdot 340 = 102 \text{ кВт/ч},$$

$$T_{год} = t_з + t_в + t_л + t_о, \quad (6)$$

где  $t_з$ ,  $t_в$ ,  $t_л$ ,  $t_о$  – среднее значение работы осветительных приборов в каждое время года (зима, весна, лето, осень), часов

$$T_{год} = 1530 + 920 + 644 + 1274 = 4368 \text{ час},$$

$$C_э = 0,86 \cdot 102 \cdot 4368 = 383160 \text{ руб.}$$

д) Стоимость резервирования мощности от ТСН. Зная, что 1 МВт в месяц стоит 750000 рублей, можно подсчитать стоимость для нашей суммарной мощности:

$$C_{м(св)} = \frac{C_p \cdot S_{\Sigma}}{P_p}, \quad (5)$$

где  $C_{м(св)}$  – стоимость зарезервированной мощности для светильников, руб.;  $C_p = 750000$  – цена резервирования за 1 МВт, руб.;  $P_p = 10^6$  – исходная мощность, Вт

$$C_{м(св)} = \frac{750000 \cdot 102000}{10^6} = 76500 \text{ руб.}$$

Тогда за год будет:

$$C_{\text{год(св)}} = 76500 * 12 = 918000 \text{ руб.}$$

Опираясь на данные, которые были получены ранее, можно подсчитать итоговую стоимость реализации системы освещения автодороги БГЭС:

$$C_{\Sigma} = 3 + C_{\text{э}} + C_{\text{год(св)}}, \quad (6)$$
$$C_{\Sigma} = 8084892 + 383160 + 918000 = 9386052 \text{ руб.}$$

### 5. Расчетная нагрузка на опору

Для подготовки бетонной площадки, на которой будут устанавливаться опоры освещения следует рассчитать массу всей системы освещения. Для этого введем следующие значения:

$$M_{\Sigma} = m_{\text{св}} + m_{\text{о}} + m_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где  $M_{\Sigma}$  – суммарная нагрузка опоры, кг;  $m_{\text{св}}$  – масса светильника, кг;  $m_{\text{о}}$  – масса основной опоры, кг;  $m_{\text{кр}}$  – масса кронштейна, кг

$$M_{\Sigma} = 12,8 + 110,285 + 22,304 = 145,389 \text{ кг.}$$

Таким образом, для обеспечения безопасности водителей и пешеходов были разработаны основные технические решения, соответствующие заданным требованиям. В настоящее время работа по освещению автодороги находится на стадии разработки.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. ПУЭ: Глава 6.3. Наружное освещение. URL: <https://etp-perm.ru/el/pue/razdel-6.-elektricheskoe-osveshhenie/pue-glava-6.3.-naruzhnoe-osveshhenie> (дата обращения 10.11.2022).
2. Емцев А.Н., Карпова К.А. Электрическое освещение: Учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – 138 с.
3. ГОСТ 33176. Дороги общего пользования. Горизонтальная освещенность от искусственного освещения. Технические требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200119493?marker>. (дата обращения: 10.11.2022).
4. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость. – М.: Лесная страна, 2007. – 120 с.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Струмеляк, доцент КЭ ФЭиА БрГУ.

## EFFECT OF REPLACEMENT OF CONDENSER TUBES ON CHARACTERISTICS OF NPP WITH VVER-800 REACTOR

Khalifa<sup>1</sup>, K. V. Slyusarskiy<sup>2</sup>  
Tomsk polytechnic university  
ISHE, Butakov research center<sup>2</sup>, 5071<sup>1</sup>

Right now, energy is one of the essential elements, which are needed for social and economic development [1]. In recent decades, populace development and financial advancement in numerous nations have quickened the development of fossil fuel utilization [2]. As a result, there was a genuine risk to the environment – worldwide warming [3]. Subsequently, in order to ensure the environment, it is fundamental to optimize the vitality structure to be able to guarantee the possibility of getting clean vitality and at the same time not have a negative effect on the financial development of nations, their advancement and well-being [4]. In comparison with conventional carbon vitality, atomic vitality is considered to be clean and relatively reasonable, conjointly plays an imperative part in lessening emissions of hazardous substances into the environment, which mitigates the impacts of global warming [5]. At the same time, it should be noted that at traditional nuclear power plants, condensers are used to condensate steam to water. In the process of their operation, if a nuclear power plant is located

in hot countries, it requires high heat transfer coefficient. The solution to this problem is the use of materials which have high heat transfer properties or decreasing of the thickness of the tube or some modification of its surface. Therefore the purpose of the work is to study the effect of replacement of condenser tubes on characteristics of NPP with VVER-800 reactor.

Condenser of NPP is basically shell-and-tube heat exchanger with steam flowing into intertubular space, while cooling water flows inside tube (figure 1). The condenser operation principle is based on creating vacuum due to phase transition of steam and corresponding sharp decrease in its volume. The heat rejection from condenser is realized using cooling water circulating through heat exchange tubes. The major factors, affecting this process are initial temperature of cooling water (which is determined majorly by climate and cooling water treatment system configuration), flow rate of cooling water and underheating. While the first two are determined by cooling water treatment system, the latter is determined purely by heat transfer surface area and intensity of heat transfer. The major ways of enhancing condenser performance without significantly increasing its cost, include promoting conductive heat transfer through heat exchange tubes and increasing convective heat transfer from both sides of cooling water and steam. Both these methods were considered in current study.

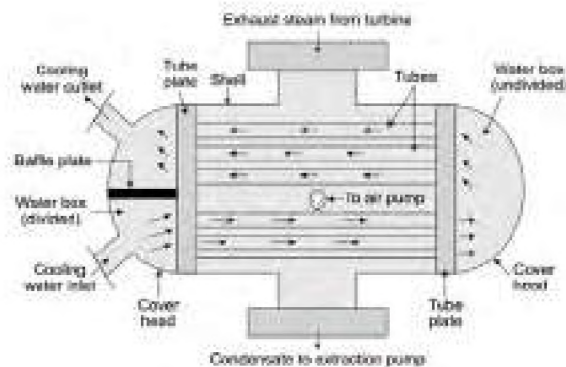


Fig. 1. Schematic diagram of Condenser

The initial data used for the calculation are presented in table 1.

The brief literature review revealed, that there are four major steel types, which could be used for tubes of condenser: stainless steel, titanium alloy, cupronickel and aluminum. The most effective method of improving convective heat transfer in conditions of condensing steam is to modify tube surface. However, modification methods for different materials are also different. Review of scientific literature revealed following methods and corresponding enhancing effects for all abovementioned tube types – table 2.

Table 1. Initial data for basic mode of NPP operation

Name	Symbol	Value
Exhaust steam flow per condenser	$G_{c1}$ , kg/s	343,04
Condenser pressure	$p_c$ , MPa	0,0055
Number of tube-side passes for cooling water	$z$	2
Coolant temperature at the inlet to the condenser	$t_{w1}$ , °C	20
Coolant temperature at the outlet to the condenser	$t_{w2}$ , °C	29,2
Speed of the cooling water in the tubes of the condenser	$w_w$ , m/s	2,2
Inner diameter of condenser tube	$d_{in}$ , mm	27

The required thickness of tubes of different material was calculated using following equation:

$$\delta = \frac{p \cdot d}{2 \cdot [\sigma] + d}$$

here  $p$  – pressure of cooling water in tubes (was chosen to be equal to 5 bar), MPa;  $d$  – diameter of tube (was chosen as standard value equal to 16 mm), mm;  $[\sigma]$  – creep strength of chosen tube material, MPa.

The overall heat transfer coefficient was calculated as:

$$k = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1},$$

here  $\alpha_1/\alpha_2$  – convective heat transfer coefficient from cooling water to tube/from tube to steam,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\lambda$  – conductivity of tube material,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ .

Table 2. Surface modification methods and enhancing effect for all tube materials

	Stainless steal	Titanium alloy	Cupronickel alloy	Aluminum
Coating method	Sandblasting	Initiated chemical vapor deposition (ICVD)	Self-assembled monolayers (SAM)	Etching
Heat transfer coefficient enhancement	HTC enhanced by 44 % [6]	HTC increased 4-8 times [6]	HTC increased 14 times for copper-nickel tubes [6]	HTC enhanced by 25 % [6]
Coating method	Sandblasting			
Heat transfer enhancement	HTC enhanced by 102 % [6]			
Coating method	Etching			
Heat transfer enhancement	HTC enhanced by 15 % [6]			

The subcooling of steam then was calculated as:

$$\delta t = \frac{\Delta t_w}{\exp\left(\frac{3,6k}{c_p m d_c}\right) - 1},$$

here  $c_p$  – heat capacity of water,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $m$  – cooling ratio (was assumed to be 55);  $d_c$  – condenser specific heat load,  $kg/(m^2 \cdot s)$ .

Thus the saturation temperature in condenser at all studied modes was determined as:

$$t'_{sc} = t_{w2} + \delta t,$$

here  $t_{w2}$  – temperature of cooling water on the outlet of condenser,  $^\circ C$ .

Then the saturation pressure  $p$  was determined for this temperature using steam tables.

Additional power of the turbine due to decreasing pressure was calculated as:

$$\Delta N_{add} = G_{c1} \cdot (h''_c - h'''_c)$$

here  $h''_c/h'''_c$  – enthalpy of steam on the outlet of turbine in basic/new mode of condenser,  $kJ/kg$ .

Obtained calculation results for different tube materials and modification methods are presented in table 3.

Table 3. Results of enhancing heat transfer coefficient on pressure and additional electric power of NPP

Stainless steal		Titanium alloy		Cupronickel alloy		Aluminium	
$p$ , kPa	$N_{add}$ , kW	$p$ , kPa	$N_{add}$ , kW	$p$ , kPa	$N_{add}$ , kW	$p$ , kPa	$N_{add}$ , kW
5,23	549,22	4,70	1284,76	4,61	1590,67	4,98	346,82
5,07	896,69	4,62	1485,39				
5,38	235,75						

It could be seen, that the lowest pressure of steam – 4,61 kPa – in condenser obtained for cupronickel alloy modified by self-assembled monolayer. Still, application of copper at NPP is undesirable due to scaling formation, so the next best option – titanium alloy modified by initiated chemical vapor deposition could be recommended. While the cost of this solution is unclear, additional 1,6 MW of power will generate approximately at least 12,8 million rubles annually, which will likely cover all corresponding costs.

## LITERATURE:

1. Türkoğlu S.P., Kardoğan P.S.Ö. The role and importance of energy efficiency for sustainable development of the countries // Lect. Notes Civ. Eng. 2018. Vol. 7, № July. P. 53-60.
2. Panennungi M. et al. Analysis of issues development in Asia-Pacific economic cooperation // Asia-Pacific Soc. Sci. Rev. 2014. Vol. 14, № 1. P. 1-20.
3. Karmaker A.K. et al. Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh // J. Clean. Prod. 2020. Vol. 244, № September.
4. International Atomic Energy Agency. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants // Saf. Fundam. 2010. Vol. No. SSG-4. P. 108.
5. Lee V.R., Wilkerson M. Data use by middle and secondary students in the digital age: A status report and future prospects. Commissioned Paper for the National Academies of Engineering, and Medicine, Board on Science Education, Committee on Science Investigations and Engineering // Comm. Pap. Natl. Acad. Sci. Eng. Med. Board Sci. Educ. Comm. Sci. Investig. Eng. Des. Grades 6-12. 2018. № January. P. 1-43.
6. Ho D., Seon H. International Journal of Heat and Mass Transfer A comprehensive review on micro / nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 178. P. 121601.

Scientific supervisor: Candidate of Physical and Mathematical Sciences K.V. Slyusarskiy, Associate Professor REC I.N.Butakova of the ISHE TPU.

## **ОСОБЕННОСТИ УДАЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ СКВАЖИН ПХГ В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ**

А.Г. Гелдимурадов, С.Д. Агалыев  
Международный университет нефти и газа

Как известно, наиболее обоснованным техническим решением [2] для нивелирования сезонной неравномерности потребления природного газа, является строительство и эксплуатация подземных хранилищ (ПХГ).

Для оценки неравномерности газопотребления в Туркменистане и необходимых резервных объёмов, были проанализированы показатели добычи и потребления газа в течение пяти лет. Коэффициент неравномерности общего потребления природного газа по Туркменистану, с учетом экспорта, меняется в пределах 0,82–1,3. Самая большая разница коэффициента неравномерности по месяцам приходится на систему жилищно-коммунального хозяйства, т. к. объем газа, используемый для отопления домов и других сооружений, в соответствии с сезоном меняется в широких пределах. Периодами коэффициент неравномерности потребления газа в жилищно-коммунальном хозяйстве, в отличие от других систем газопотребления, меняется в пределах 0,4–1,9.

Практически во всех странах, богатых природным газом, имеются ПХГ. Они строятся в выработанных нефтяных и газовых месторождениях, искусственно созданных соляных пещерах, природных полостях и пещерах, в водоносных пластах и в пустотах, образованных тепловыми методами в условиях вечной мерзлоты.

Цель нашей работы – обосновать преимущества строительства ПХГ в Туркменистане в водоносных структурах и сформулировать некоторые особенности эксплуатации скважин ПХГ.

Авторами [1] исследовался вопрос создания ПХГ в соляных полостях Туркменистана. Однако здесь, в первую очередь, встаёт необходимость решения экологических проблем, связанных с использованием соли, которая будет добываться для создания соляной полости.

Особенностью газовых месторождений Туркменистана является залегание на глубине около 3000 м [3]. По опыту создания ПХГ в выработанных пластах, глубина их залегания



составляет обычно не более 1300 м. Кроме того, выработанные месторождения имеют устаревшую инфраструктуру, качество цементного камня вокруг скважин вряд ли будет отвечать требованиям герметичности скважин и пластов. Нефтяные месторождения залегают на меньшей глубине, однако, они расположены в основном на западе Туркменистана, где имеющиеся запасы природного газа успешно используются на внутреннее газопотребление, а излишки – на экспорт и переработку. Кроме того, при проектировании ПХГ в истощенных месторождениях тщательным образом следует изучать вопросы технического состояния скважин всех категорий, характер устойчивости пласта от разрушения для выбора способа заканчивания скважины и забойного оборудования, режим разработки залежи и характер обводнения пласта.

Несмотря на то, что истощенное месторождение может быть достаточно изучено, до начала строительства ПХГ потребуются выполнение работ по доразведке площади, состоянию покрышек и техническому состоянию имеющихся скважин. Как правило, аномально низкое пластовое давление истощенных пластов делает практически невозможным или сильно ограничивает использование применяемых в настоящее время технологий бурения скважин. Так как при организации ПХГ фонд скважин, кроме эксплуатационных, должен включать нагнетательные, контрольные и наблюдательные скважины, это ставит под сомнение экономическую целесообразность создания ПХГ в истощенных месторождениях. Перечисленные аргументы ограничивают возможность создания ПХГ в выработанных нефтяных и газовых месторождениях Туркменистана.

В настоящее время наиболее приемлемым вариантом для создания ПХГ в Туркменистане является его строительство в водоносной структуре.

Исследования водоносных структур Март и Восточный Одемерген, пригодных для создания ПХГ, позволили получить результаты, удовлетворяющие необходимым критериям: они залегают на небольшой глубине, расположены недалеко от крупных газовых месторождений и трассы магистральных газопроводов; объем газа, который может вмещать ловушка, составляет порядка 5 млрд.м<sup>3</sup>; водоносный пласт имеет хорошие непроницаемые покрышки в кровле и подошве.

Характерной особенностью ПХГ в водоносных пластах являются пластовые потери газа, которые могут быть вызваны следующими причинами: перетоки газа в вышележащие горизонты; уход газа за пределы ловушки – «пассивный» буфер; внутрислоевые потери; насыщение низкопроницаемых коллекторов; защемление газа водой; «переходная» зона залежей; растворение газа в воде; обводнение эксплуатационных скважин в связи с высокими темпами отбора газа и, с другой стороны, высокой активностью и кратностью водонапорной системы.

Еще не начав строительство ПХГ, мы считаем целесообразным не только тщательно изучить геологическое строение геологической структуры, но и быть готовыми к эксплуатации газовых скважин в условиях обводнения.

Основными этапами работы ПХГ являются [2]: закачка буферного газа, который невозможно будет извлечь обратно; циклически повторяющиеся закачка и отбор активного объема газа. В связи с этим, использование газлифтных способов эксплуатации обводненных скважин ПХГ потребует еще больших объемов газа, который должен играть вспомогательную роль и не будет входить в активно используемый объем. Применение различных видов насосов для удаления жидкости также не зарекомендовало себя как эффективная технология эксплуатации газовых скважин. Использование поверхностно-активных веществ для удаления жидкости из газовых скважин также является затратной технологией: имеются ограничения, связанные с минерализацией пластовой воды и температурой; требуется использование дополнительных химических реагентов, образующих устойчивую пену. В связи с этим считаем, что наиболее перспективным направлением развития технологий эксплуатации скважин ПХГ в водоносных структурах является оптимизация их конструкции: применение различных диспергаторов потока, выбор оптимальных диаметров лифтовых труб. В этом направлении в настоящее время ведется активная работа.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабаев А.Г., Гаврильчева Л.Г. Соляно-ангидритовая формация верхней юры и нефтегазоносность нижележащей карбонатной толщи Средней Азии. – Ташкент: ФАН, 1986. – 109 с.
2. Басарыгин Ю.М. Теория и практика создания подземных хранилищ газа. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2012. – 518 с.
3. Гельдимурадов А.Г. Особенности создания подземных хранилищ газа в условиях Туркменистана. // Проблемы освоения пустынь. – 2020. – № 3-4. – С. 86-88.

Научный руководитель: д.т.н. А.Г. Гелдимурадов, доцент кафедры РЭНГМ МУНГ.

## ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ 35 КВ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Р.И. Рамазанова

Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, ЭС, группа ИЭСм-1-22

С постоянным развитием и урбанизацией городов Российской Федерации, нам приходится постепенно заменять линии электропередач, которые широко используются во всех городских энергосистемах. Это связано с увеличением срока службы кабелей и их старением, износом, соответственно, увеличивается количество неисправностей и повреждений. Появляется актуальная проблема, как именно и каким способом будет более эффективно оценить рабочее состояние кабеля. Именно поэтому мы рассмотрели современный вид диагностики кабельных линий с помощью прибора CPDA-15 и CPDA-60 [1].

Благодаря программе, по которой проводится анализ, отражаются частичные разряды и электрические параметры, отражающие характеристики состояние кабеля в процессе эксплуатации. В соответствии с полученными электрическими характеристиками мы видим кривые состояния работы кабеля, по которым можем привести выводы и отчет, а также рекомендации по дальнейшей эксплуатации [1, 2].

Приборы, с которого были получены данные, относятся к марке CPDA. Его конструкция представлена на рисунке 1. Они предназначены для диагностики состояния высоковольтной изоляции кабельных линий методом регистрации частичных разрядов в кабельных линиях. В рамках этой статьи рассматривается силовой кабель АПвВнг(В)-LS 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Исследуемый тип кабеля широко применяется при стационарной прокладке для передачи электроэнергии в кабельных сооружениях и производственных помещениях. Изоляция из сшитого полиэтилена сечением 35 мм, количество жил – 1, рассчитанная на напряжение 35 кВ.

Классическая схема установки представлена на рисунке 2, в нее входят основные элементы: катушка индуктивности L, кабельная линия CL, высоковольтный источник HV, контактор K.



Рис. 1. Конструкция прибора CPDA-30

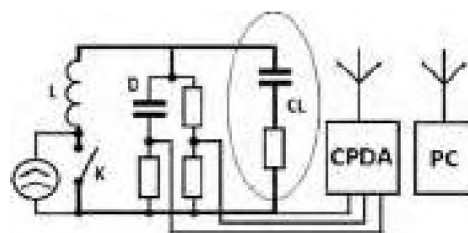


Рис. 2. Схема установки

Мы рассмотрели кабельную линию АПвВнг(В)-LS были сняты по 10 единиц измерения с помощью прибора в каждой фазе (А, В, С). Далее была сформирована выборка для анализа из полученных замеров. По результатам обработки мы получили рефлектограмму на рисунке 3.

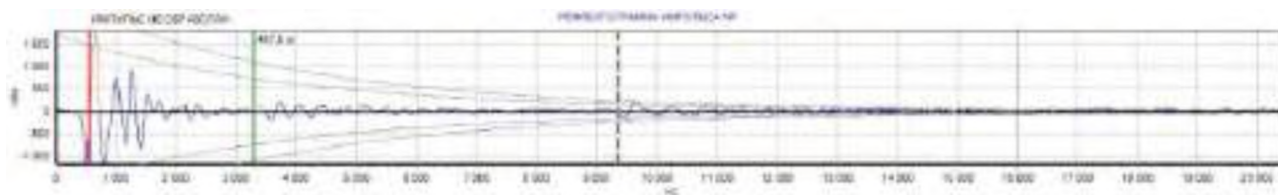


Рис. 3. Рефлектограмма импульса ЧР исследуемого кабеля

На ней хорошо можно увидеть отраженный сигнал, который говорит нам о том, что волновое сопротивление отличается от среднего параметра. А если у нас присутствуют несоответствия, то могут появляться отраженные сигналы, что в будущем могут повлиять на передачу сигналов, соответственно, вызвать потери в кабельной линии.

На рисунке 4 видно, что основная часть исследуемых импульсов частичного разряда приходится на отметку 660 метров. Значит именно в этой зоне происходит развитие скрытого дефекта. Возможно, в изоляции присутствуют пузыри газовые, увлажнение или другое.

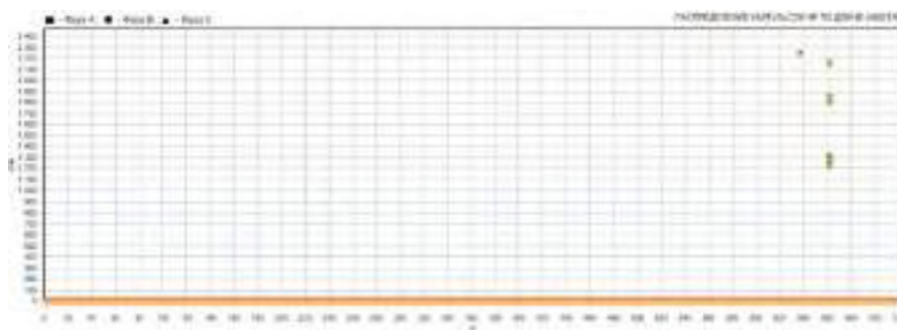


Рис. 4. Распределение импульсов ЧР по длине кабеля

Очень важно на ранних стадиях определить развитие дефекта в кабельной линии, чтобы оно не перешло в критический. Аварийный дефект в будущем может проявляться в виде дуговых и искровых разрядов [3].

Проанализировав амплитудно-фазовое распределение можно выявить, что все частичные разряды находится в диапазоне от 1200 пК до 7000 пК. Следовательно, диагностику кабельной линии следует провести не позже чем через один год. Обычно, такой дефект устраняется таким способом: вырезание поврежденной части изоляции из сшитого полиэтилена и замена его на новую [4].

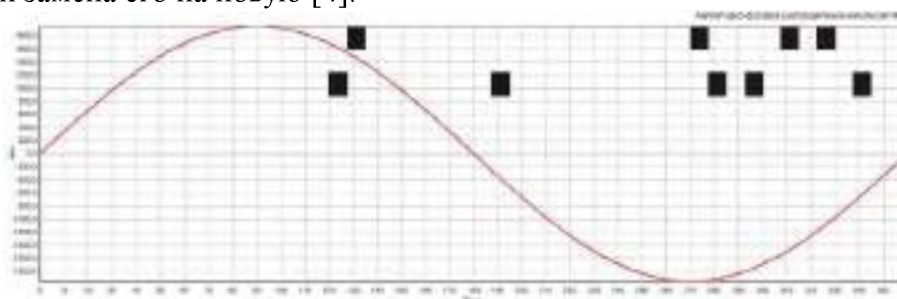


Рис. 5. Амплитудно-фазовое распределение импульсов ЧР

Обычно выделяют 5 основных типов повреждений у кабельных линий из сшитого полиэтилена:

- Внешняя изоляция. Данный тип повреждения часто возникает в результате несоблю-

дения технологии прокладки кабеля. Также может быть сильной износ и естественное старение кабеля.

- Внутренняя изоляция. Данные повреждения связаны с нарушениями правил самой эксплуатации. Или старение внутренней изоляции.
- Механические повреждения защитного экрана кабеля.
- Кабельная жила.
- Заводские дефекты кабеля при производстве [4, 5].

Метод диагностики приборами марки CPDA относится к неразрушающему методу, который нацелен на получение параметров линии, его технический характеристик. Результаты о состоянии кабеля выявляем, не повреждая его, также мы сможем сделать прогноз об оставшемся сроке службы или понять, в какой промежуток времени необходимо осуществить ремонт. Данные о состоянии высоковольтной изоляции кабельных линий получаем путем анализа графиков, где регистрируются появления частичных разрядов, возникающих под действием переменного напряжения [6, 7].

Таким образом, изучив конструкцию прибора CPDA, выявив особенности силового кабеля, проанализировав данные с помощью программы, мы смогли выявить область развития дефекта в кабеле АПВВнг(В)-LS 35 кВ и дать рекомендации по его дальнейшему обслуживанию. Убедились, что данный метод измерения частичных разрядов в КЛ является эффективным для выявления проблемных зон. Метод является неразрушающим, он не травмирует изоляцию и не сокращает ресурс кабелей и муфт.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Привалов В. В. Диагностика оборудования кабельных линий электропередач: учеб. пособие / Привалов В. В. – Изд. 1-е, – Москва : Директ-Медиа, 2015. – 60 с.
2. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ: сайт <http://market.elec.ru/nomer/19/diagnostics-cable> (дата обращения 17.11.2022) Текст: электронный.
3. Балашов А. И. Кабели и провода. Основы кабельной техники /А. И. Балашов – Москва: – Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.
4. Таджикибаев А. И. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей: учеб. пособие / В. А. Канискин, А. А. Пушачев – Изд. 1-е – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2007. – 173 с.
5. «CPDA» Система контроля изоляции кабельных линий/ Руководство по эксплуатации.: сайт: URL: <https://dimrus.ru/cpda.html> (дата обращения: 16.11.2022) – Текст: электронный.
6. Нетребко С.А., Сазыкин В.Г. Техническое состояние городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ: Материалы XV всероссийской научно-технической конференции «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства». – Дивноморск, 2012. – 56 с.
7. Степанов, В.М. Методы местонахождения повреждённых участков кабельных линий напряжением 35-500 кВ / В.М. Степанов, П.А. Борисов. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып.3. – Ч.5. – 94-97 с.

Научный руководитель: к.т.н. Ю. Н. Зацаринная, доцент КГЭУ.

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ МАССИВНОГО РОТОРА ИЗ СТАЛИ С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

А.Б. Раднаев, Б.С. Доржиева  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А0-28

В настоящее время из-за низких энергетических показателей в рабочих режимах асинхронные двигатели с массивным ротором имеют ограниченное распространение.

Несмотря на ухудшение энергетических характеристик, двигатели с массивным ротором из стали с высокой электропроводностью и низкой магнитной проводимостью может найти широкое применение, в приводах где предъявляются требования к механической прочности ротора (высокооборотным машинам), а высокие пусковые показатели дают возможность применять такие решения в тяговых двигателях [1].

Другими преимуществами ротора такого типа являются простота в изготовлении, что способствует повышению технологичности конструкции, и высокая надежность ротора (отсутствие паяных соединений и термомеханических напряжений), экономичность [2].

Расчет АД с массивным ротором выполнен методом численного моделирования. В качестве материала для ротора рассматривались стали типа CF-25, CF-8.

Основной несущий материал массивного ротора (рисунок 1) состоит из вала из стали Ст-3, на поверхности которого размещена гильза из сплава обладающей высокой электропроводностью.

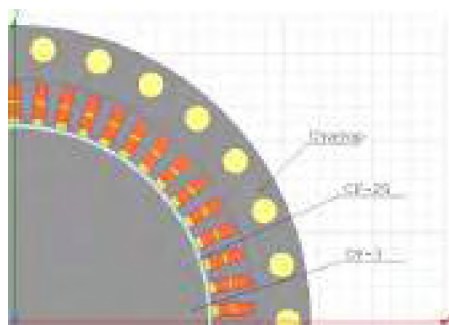


Рис. 1. Модель АД с массивным ротором

Результаты моделирования при различной ширине гильзы приведены в таблицу 1.

Таблица 1. Характеристики двигателя при различной толщине гильзы

bk, мм	$I_{\phi}$ , А	$\cos\phi$	M, кН·м	n, об/мин	Потери в роторе, кВт	$s$ , %
20	495,4	0,702	2,71	983	13,3	1,7
17,5	484,9	0,717	2,71	982,2	13,1	1,78
15	476,4	0,729	2,71	981	12,9	1,9
12,5	470,6	0,737	2,71	979,2	13	2,08
10	466,6	0,74	2,71	976,8	13,4	2,32
7,5	466,8	0,738	2,7	973,2	14,1	2,68
5	473,7	0,729	2,7	967,4	15,5	3,26

С целью улучшения рабочих характеристик иногда внешнюю поверхность массивного стального ротора покрывают медью, применяют медные кольца, прикрепленные к торцевым поверхностям массивного ротора [2]. Дополнительно выполнен расчет асинхронного двигателя с массивным ротором с покрытием поверхности ротора слоем меди. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Сравнение двигателя с короткозамкнутым ротором и его аналогом с применением гильзы из высокопроводящего сплава и с покрытием поверхности ротора слоем меди при сопоставимых скольжениях (при ширине кольца 15 мм) приведено в таблице 3.

Таблица 2. Характеристики двигателя с омедненным ротором

bk, мм	I <sub>ф</sub> , А	cosφ, о.е.	M, кН·м	n, об/мин	Потери в роторе, кВт	s, %
5	531,2	0,646	2,7	987,2	14,8	1,28
3,5	501,6	0,683	2,7	983,8	16,6	1,62
2	484,3	0,71	2,7	977,1	22,1	2,29

Таблица 3. Сравнительные данные

Параметр	Короткозамкнутый ротор	Массивный ротор с высокопроводящей гильзой	Массивный ротор с омеднением
Коэффициент мощности, о.е.	0,86	0,73	0,7
Ток статора, А	394	476,4	484
Сумма потерь в роторе, кВт	8	12,9	16,6
Кратность пускового момента, о.е.	1,2	1,7	–
Кратность пускового тока, о.е.	5,4	4,6	–

Применение массивного ротора приводит к ухудшению энергетических характеристик в сравнении с короткозамкнутым ротором – снижению коэффициента мощности двигателя, увеличению потерь в обмотке статора и суммарных потерь в роторе, в то же время двигатель с массивным ротором обладает лучшими пусковыми характеристиками.

Исходя из результатов расчета массивного ротора с медным цилиндром на поверхности, приведённых в таблице 3, применение стали с высокой электропроводностью является более предпочтительным по всем показателям.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Нейман Л. Р.: поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – Ленинград; Москва: Изд-во Госэнергоиздат, 1949. – 190 с.
2. Куцевалов В.М: вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – Москва; Ленинград: Изд-во Энергия, 1966. – 304 с.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.Г. Гарганеев, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ ANSYS MAXWELL

Б.С. Доржиева, А.Б. Раднаев  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А0-28

Сложность аналитических исследований процессов, протекающих в электрических машинах, обусловлена одновременным изменением нескольких факторов. Большую роль играет нелинейность кривой намагничивания, зависимость параметром машины от нагрузки, появление вихревых токов в массивных элементах, взаимное влияние электромагнитных и механических процессов [1].

В настоящее время для исследования электрических машин широко используется численное моделирование. Моделирование, основанное на расчете электромагнитных, силовых и других полевых задач методом конечных элементов (МКЭ), при условии корректной постановки задачи отличается высокой точностью, быстрой скоростью вычисления и наглядным представлением результатов.

Рассмотрим разработку модели электрической машины на примере турбогенератора. В работе приведены результаты конечно-элементного моделирования турбогенератора в среде ANSYS MAXWELL.

В таблице 1 приведены номинальные данные турбогенератора.

Таблица 1. Номинальные данные турбогенератора

Наименование	Значение
Номинальная активная мощность, МВт	350
Номинальная полная мощность, кВА	411,765
Номинальный коэффициент мощности, о.е.	0,85
Число фаз	3
Частота питающей сети, Гц	50
Частота вращения ротора, об/мин	3000
Номинальное напряжение, кВ	20

Исходными данными для построения модели служат размеры активной зоны и обмоточные данные статора и ротора. Сердечник статора турбогенератора выполнен из шихтованной электротехнической стали. Ротор выполняется из стальной поковки. Обмотка статора – трехфазная, двухслойная, с укороченным шагом. Обмотка ротора выполняется из полосовой меди [2].

Для аналитического расчета в ANSYS MAXWELL встроен пакет RMXprt, из которого можно получить двух- или трехмерную модель (Maxwell 2D или Maxwell 3D). Аналогичным образом была построена двухмерная модель турбогенератора. На рисунке 1 в качестве примера решения полевой задачи показано распределение магнитной индукции в поперечном разрезе машины.

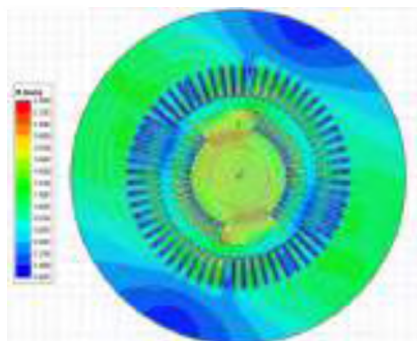


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в поперечном разрезе турбогенератора в номинальном режиме



Рис. 2. Гармонический состав выходного напряжения генератора

Получены высокие значения индукции в роторе и коронках зубцов статора, что может привести к увеличению потерь и нагреву участков магнитопровода, в связи с чем необходима оптимизация размеров активной зоны или применение схемы охлаждения, обеспечивающей эффективный отвод тепла.

В качестве результатов могут быть выбраны графики напряжений, токов, моментов, мощностей, индуктивностей, потоков. Результаты также могут быть представлены и в табличном виде, например, гармонический состав выходного напряжения генератора (рисунок 2).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учебное пособие для вузов / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; Под ред. Гольдберга О.Д. – Москва: Высшая школа, 2001. – 512 с.
2. Турбогенераторы : монография / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. – Ленинград: Ленинградское отделение издательства «Энергия», 1967. – 894 с.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.Г. Гарганеев, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

И.Н. Хамидуллин, С.Ю. Маслов  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, ПЭ-2-19

Активное развитие науки и техники на протяжении прошлого столетия привело к созданию множества различных электрических приборов и устройств, нашедших применение во всех сферах человеческой жизни. Для работы данных приборов и устройств необходима электрическая энергия, которая вырабатывается на электрических станциях, и благодаря линиям электропередачи передается на большие расстояния в города, в которых преобразуясь попадает к конечным потребителям. Перебои с подачей электрической энергии могут негативно сказаться как на повседневной жизни людей, так и на работу различных заводов и производств. Поэтому одной из важнейших задач компаний распределительного электросетевого комплекса, становится обеспечение надежного энергоснабжения потребителей. Наибольшая опасность возникает в осенний зимний период, когда происходит гололедообразование на высоковольтных линиях электропередачи на проводах ВЛ 0,4–6–10 кВ.

Гололедо-изморозевые отложения (ГИО), представляют серьезную опасность и могут вызывать:

- опасное сближение проводов и тросов в результате их провисания при образовании гололеда;
- раскачивание проводов, которое приводит к коротким замыканиям между проводами и тросами, некоторых случаях непосредственно к повреждениям линейной арматуры и креплений;
- механическую перегрузку тросов и проводов, приводящую непосредственно к их обрыву;
- разрушение опор из-за обрыва проводов и тросов вызванной образованием от гололеда.

Специально для борьбы с ГИО была разработана мобильная система плавки гололеда, работающая совместно с системой мониторинга гололедообразования (СМГ), и устройством сбора и преобразования данных (УСПД).

В систему мониторинга входят различные датчики, позволяющие получать сведения о температуре провода и окружающей среды, угле провиса провода и протекающем токе, а также благодаря модулю радиосвязи обеспечивается беспроводное соединение с устройством обработки данных (рисунки 1, 2).



Рис. 1. Датчик СМГ



Рис. 2. Датчик СМГ установленный на провод ВЛ

УСПД собирает данные с 10 датчиков СМГ, преобразует их и передает на устройство диспетчеризации по беспроводному каналу связи. В зависимости от полученных данных дис-



петчер осуществляющий мониторинг может подачей сигналов в блок управляемых выпрямителей, своевременно решить проблему гололедообразования, путем нагрева соответствующей части линии.

Блок схема системы автоматизированного контроля и устранения ГИО на ВЛЭП представлена на рисинке 3.



Рис. 3. Блок-схема работы системы автоматизированного контроля и устранения гололедообразования на воздушных линиях электропередачи

В самом датчик находится из два трансформатора, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, которые состоят из катушек с намотанными медными проводами и съёмными сердечниками, представляющими половинки полого цилиндра, благодаря такой конструкции разработанный датчик можно с легкостью монтировать на ВЛЭП. Так как вокруг проводника при протекании тока образуется электромагнитное поле, Трансформатор, установленный на линии, собирает эту энергию и преобразует для питания внутренней платы. Из этого вытекает существенное достоинство разработанного устройства, отсутствие необходимости под зарядкой от внешних устройств, к тому же отпадает необходимость в частом их обслуживании. Датчик закрепляется на линии при помощи четырех болтов, находящихся на корпусе.

**Вывод:** таким образом в качестве решения ключевой проблемы, возникающей при эксплуатации высоковольтных линиях электропередач, выступает возможность организации своевременного удаления гололедоизморозевых отложений (ГИО) на проводах ВЛ 0,4– 6– 10 кВ. Для борьбы с ГИО существует мобильная система плавки гололеда, которая работает совместно с системой мониторинга гололедообразования (СМГ).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ярославский Данил Александрович, Садыков Марат Фердинантович, Конов Андрей Борисович, Иванов Дмитрий Алексеевич, Горячев Михаил Петрович, Ямбаева Татьяна Геннадьевна Методика мониторинга гололедных отложений на проводах ВЛ с учетом разрегулировки линейной арматуры // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №5-6.
2. Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация». В 3 т. Т. 1. Электроэнергетика и электроника: матер. конф. (Казань, 28–29 апреля 2020 г.) / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. – 636 с.
3. Стороженко Дмитрий Юрьевич, Рыжков Александр Викторович Совершенствование методики применения устройств встроенной диагностики контактной сети // Известия Транссиба. 2016. №4

Научный руководитель: профессор, д.т.н. М.Ф. Садыков, профессор КГЭУ.

# РАССМОТРЕНИЕ АВТОНОМНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

И.Н. Хамидуллин, С.Ю. Маслов  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, ПЭ-2-19

В современном обществе электрическая энергия используется во всех сферах человеческой деятельности, от привычных для нас бытовых приборов и устройств до специализированных промышленных машин. Электрическая энергия передается на дальние расстояния при помощи воздушных линий электропередач (ВЛЭП). В связи с этим наиболее важным для распределительного электросетевого комплекса является создание условий для бесперебойной передачи электрической энергии, а значит и в эффективном обследовании состоянии линии и активном обслуживании при обнаружении проблем на них. Однако в связи с их протяженностью и в некоторых случаях труднодоступностью, воздушные линии могут находиться в болотистой местности, в лесонасаждении, а также перекинуты между противоположными берегами рек, что делает их анализ достаточно трудным и не эффективным. Поэтому для таких целей более целесообразно использовать автономные роботизированные комплексы, которые уменьшают опасность непосредственного осмотра, а также более эффективны в не доступных для человека местах.

Для множества стран идея с созданием таких комплексов стала достаточно актуальной, что привело к их активной разработке. Рассмотрим некоторые из них. Первым в нашем списке идет робот из США LineRanger, представленный на рисунке 1.



*Рис. 1. LineRanger*



*Рис. 2. Канадский робот LineScout*

Разработанный комплекс имеет по две пары двигателей, расположенных по бокам, благодаря чему способен беспрепятственно перемещаться по линии, тепловизор, цифровую камеру способную изменять угол наклона, а также помогающую диспетчеру управлять самим роботом.

Ключевыми недостатками робота является необходимость наличия двух проводов для перемещения, а также персонала для его установки.

Вторым достойным внимания роботизированным комплексом является LineScout, разработанный в канадском институте Hydro-Québec представленный на рисунке 2.

Причиной его создания стал обрыв значимой воздушной линии, из-за образования обильного слоя льда, что привело к нарушению подачи электрической энергии.

В отличие от аналогов данный робот способен закручивать и раскручивать различные крепления, убирать снег с проводов, а также при наличии убирать с линии различный мусор. Так же в нем присутствует GPS и ряд камер, позволяющих получать данные в реальном времени. А также специальный джойстик, при помощи которого диспетчер на основании данных с камер, может дистанционно управлять роботом.

Третьим достойным внимания является отечественный робот, Канатоход, представленный на рисунке 3, выполнен на базе квадрокоптера, к которому присоединены различные датчики.

В него входят тепловизор, датчик чрезвычайных ситуаций, система дистанционного контроля. Он служит для облета воздушных линий, однако здесь и проявляется его существенный недостаток сбор данных возможен только при хороших погодных условиях, т. к. при сильном ветре управление данным комплексом становится затруднительным, и в некоторых случаях невозможным.

Проанализировать данные разработки, на базе ФГБОУ ВО КГЭУ был разработан, опытный образец роботизированного комплекса, для обследования воздушных линий, представленный на рисунке 4.



Рис. 3. Канатоход



Рис. 4. Экспериментальная модель робота

Планируется что робот будет выполнять следующие задачи:

- удалённое управление платформой;
- система автоматического подъёма на провод ВЛ;
- электромагнитная/ультразвуковая диагностика изоляторов на ВЛ;
- магнитный контроль состояния стального сердечника при наличии;
- построение трёхмерных моделей окружающих объектов;
- инфракрасная съёмка;
- автоматизированный процесс обработки данных;
- борьба с гололёдно-изморозевыми отложениями плотностью не более  $0,3 \text{ кг/м}^3$ .

3D модель планируемого результата представлена на рисунке 5.

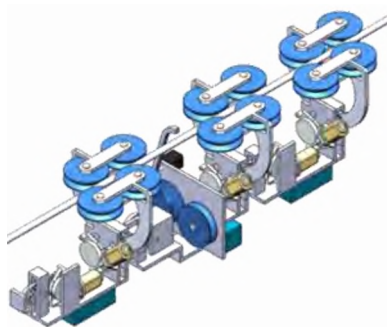


Рис. 5. 3D модель роботизированного комплекса

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф. Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19(3-4):69-79. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-69-79>
2. Федоров О.В., Семёнов А.С., Егоров А.Н., Хубиева В.М. Технико-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества

- электроэнергии на объектах горных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016;(9-10):91-97. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-91-97>
3. Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(3):97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106>
  4. Примеры использования роботов в энергетике [Электронный ресурс] <http://elektrik.info/main/news/1188-ispolzovanie-robotov-v-energetike.html>

Научный руководитель: профессор, д.т.н. М.Ф. Садыков, профессор КГЭУ.

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КАСКАДА ГЭС В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА**

А.В. Сидорова, С.В. Митрофанов  
Новосибирский государственный технический университет  
Факультет энергетики, кафедра ЭлСт, СЭС

**Аннотация.** В статье рассмотрена задача создания модели каскада Кубанских ГЭС в программном комплексе Matlab Simulink с целью анализа возможных водно-энергетических режимов работы гидроузла. Решение данной задачи позволит повысить эффективность работы гидроэлектростанций и надежность водоснабжения потребителей водохозяйственного комплекса, зависящих от режима работы каскада. Разработанная модель каскада ГЭС позволяет смоделировать аварийный режим с целью определения устойчивости модели к различным возмущениям, времени восстановления, граничных параметров нормальной работы.

В статье приведён обзор публикаций, посвященных проблематике и существующим методам моделирования каскада ГЭС. Первая часть статьи содержит описание объекта исследования, создание имитационной модели ГЭС, водно-энергетических блоков и описание алгоритма их функционирования. Вторая часть статьи содержит моделирование аварийного режима, анализ регулирующей способности бассейна суточного регулирования и определение целесообразности проектирования холостого водосброса рассматриваемой ГЭС. В заключительной части содержатся основные выводы, полученные в результате моделирования и обоснованность применения модели при исследовании режимов работы ГЭС.

### **Введение**

Одной из особенностей гидроэлектростанций (ГЭС) является то, что они могут работать в каскаде, то есть быть построены на одной реке. При комплексном использовании водных ресурсов каскадные схемы позволяют в полном объеме освоить энергетический потенциал рассматриваемого региона. Наличие водохранилища в каскаде ГЭС обеспечивает регулирование всех нижерасположенных ГЭС каскада, увеличивая энергетические показатели, а также повышение гарантированной водоотдачи потребителям на нижерасположенном участке реки. Эффективное управление каскадом ГЭС невозможно без учёта в полной мере факторов о специфике их работы, например, о характере связи ступеней каскада между собой, связаны гидрологически, гидравлически, водохозяйственно, а также электрически [1]. Отсутствие той или иной связи между моделями, описывающими гидрологический и энергетический режим каскада ГЭС, приводит к неправильному планированию режима работы станций.

В настоящее время проблемы управления каскадом ГЭС рассматриваются с разных сторон. Например, авторы [2] уделяют внимание оптимизации емкости водохранилищ с точки зрения рационального распределения водных ресурсов в нормальных и аварийных условиях. В ряде работ рассматривается процесс оптимизации с учетом режимов работы гидроагрегата,

ограничений электростанции и энергосистемы на основе традиционных методов [3, 4] и методов искусственного интеллекта [5]. Однако предложенные варианты математических моделей каскадов ГЭС не учитывают в полной мере гидрологических связей каскада.

Одним из вариантов решения задачи поиска оптимального управления режимами каскада ГЭС с учётом всех связей и ограничений является – имитационное моделирование. Имитационная модель позволяет заменить натурные эксперименты, «воспроизвести», «проиграть» и проанализировать множество состояний, скорректировать планирование режимов работы. Применению данного способа в задачах гидроэнергетики посвящено достаточно много научных работ. В частности, имитационные модели используются для моделирования водно-энергетических режимов крупных каскадов [6, 7] и отдельных ГЭС [8].

Формирование имитационной модели, учитывающей совокупность гидрологических и энергетических взаимосвязей каскада ГЭС, способной также воспроизводить аварийный режим, позволит повысить качество принимаемых решений при планировании работы ГЭС, даст возможность определить устойчивость модели к различным возмущениям, позволит определить время, необходимое на восстановление нормального режима, а также его граничные параметры.

### 1. Имитационная модель ГЭС

В качестве объекта исследования рассматривается каскад Кубанских ГЭС. В каскаде 4 гидроэлектростанции (ГЭС-1 – ГЭС-4), 1 гидроаккумулирующая станция (ГАЭС-1), 7 шлюзов, регулирующих подачу воды для обеспечения водохозяйственных нужд (ШР1-ШР7).

Все водохранилища рассматриваемого каскада являются водохранилищами суточного регулирования, следовательно, длительность расчётного интервала будет составлять 24 часа.

Модель каскада ГЭС состоит из блоков, моделирующих график естественной приточности, расчётных блоков ГЭС, а также регулирующих шлюзов с учётом времени добегания волны между створами данных гидротехнических объектов. Изображение модели представлено на рисунке 1.

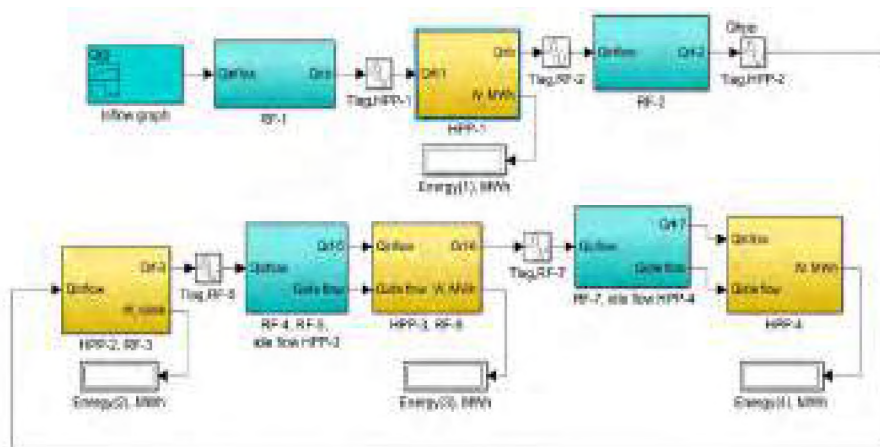


Рис. 1. Модель каскада ГЭС

В блок «График приточности» задаётся значение расхода воды, подступающего к створу ШР-1. Это значение может задаваться любым в зависимости от решаемой задачи. Значение расхода воды, поступающей к блоку «ГЭС-1», после учёта потерь, используется в блоке расчёта мощности ГЭС, а также в блоке баланса расходов верхнего бьефа. При превышении значения этого расхода пропускной способности станции или при превышении отметки верхнего бьефа более допустимой, излишки воды пропускаются через холостой водосброс в нижний бьеф. В блок расчёта мощности ГЭС поступает значение расхода через агрегаты и величина напора на ГЭС. В расчётном блоке «ГЭС-2», от значения расхода в верхнем бьефе ГЭС-2 отнимаются потери на фильтрацию и расход через агрегаты ГЭС-2. Дальнейший расчёт аналогичен расчёту в блоке «ГЭС-1».

В результате моделирования получены суточные графики мощности станций и графики сработки-наполнения водохранилищ рассматриваемого каскада ГЭС. Для валидации модели,

полученные графики сработки наполнения бассейнов суточного регулирования (БСР) ГЭС-2 и ГЭС-3 сравнивались с фактическими значениями. Результаты приведены на рисунках 2–3.

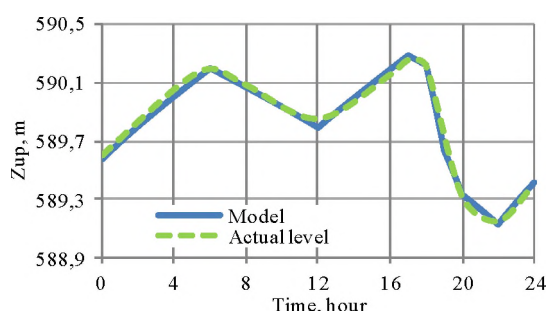


Рис. 2. График сработки-наполнения БСР ГЭС-2

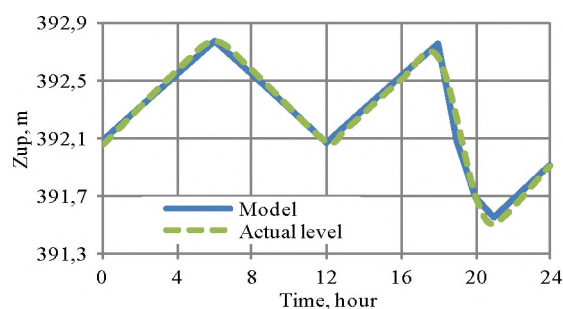


Рис. 3. График сработки-наполнения БСР ГЭС-4

Полученные значения позволяют сделать вывод высокой точности расчетной модели.

## 2. Моделирование аварийного режима ГЭС

Разработанная модель каскада ГЭС позволяет рассмотреть также аварийные режимы работы каскада. В качестве примера была рассмотрена проблема отсутствия холостого водосброса на ГЭС-2.

В нормальном режиме работы станция ГЭС-2 позволяет пропускать максимальный расход воды, протекающий по каналу при работе ГЭС с номинальной нагрузкой. При этом регулирующей способности выравнивающего водохранилища ГЭС-2 достаточно для обеспечения нормального режима работы как станции, так и канала после створа ШР-3. Но возможны режимы, при которых пропускная способность ГЭС-2 может уменьшиться, вследствие аварийного останова агрегата.

При переполнении БСР необходимо уменьшить поступающий к ГЭС-2 расход, оперируя холостым водосбросом станции ГАЭС и включением имеющихся в распоряжении агрегатов ГАЭС в генераторном режиме, либо в режиме холостого хода. Однако, станции каскада расположены на значительном расстоянии друг от друга и время добегания волны от станции ГАЭС до ГЭС-2 составляет более 8 часов. В этом случае способ сдерживания аварийных расходов заключается в регулирующей способности бассейна суточного регулирования ГЭС-2 в возможности малого повышения уровня воды в канале на участке от ГАЭС до ГЭС-2.

Канал работает в нормальном режиме. Отметка перед ШР-1, ГЭС-1 и ШР-2 соответствует отметке НПУ для каждого из расчётных створов. При условии, что один агрегат станции ГЭС-2 находится в ремонте и не участвует в пропуске аварийных расходов,  $Q_{max, ГЭС-2} = 138 \text{ м}^3/\text{с}$ . В случае аварийного отключения одного из агрегатов станции ГЭС-2, пропускная способность станции становится меньше поступающего к станции расхода. Для ликвидации аварийного режима открывается холостой водосброс ГАЭС, уменьшая поступающий к ШР-1 поток воды.

Способность сдерживания аварийного расхода определяется регулирующей способностью БСР ГЭС-2. В модели рассмотрены различные начальные уровни объёмов воды для определения критического объёма водохранилища. Результаты приведены на рисунках 4– 5.

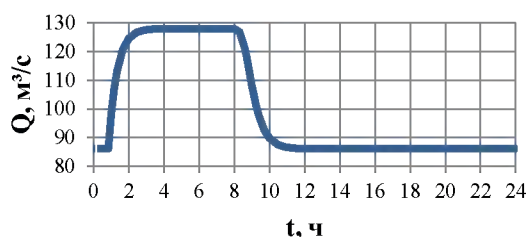


Рис. 4. График изменения расхода воды в верхнем бьефе ГЭС-2

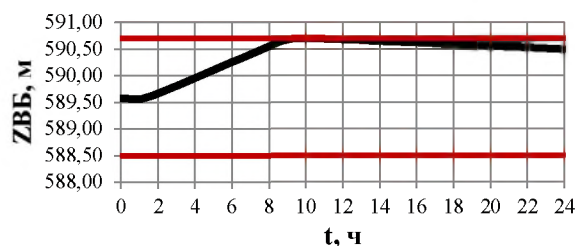


Рис. 5. График изменения уровня верхнего бьефа ГЭС-2

## Заключение

Разработанная модель описывает гидрологические взаимосвязи между гидроэлектростанциями, работающими в каскаде. Модель учитывает емкость водохранилища каждой станции, влияние потока воды с вышележащих ГЭС на нижележащие, а также время задержки потока воды. Это позволяет перейти от независимого анализа ГЭС к комплексной модели каскада ГЭС, позволяющей оптимизировать режимы работы. Представленный алгоритм подробно описывает процесс расчета параметров рабочего режима, ошибка моделирования составляет менее 1 %.

Моделирование аварийного режима показало, что в створе ГЭС-2 возможны режимы, при которых появляется вероятность переполнения БСР, что обосновывает необходимость строительства в створе станции холостого водосброса для пропусков аварийных расходов.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. A.I. Khalyasmaa, S.A. Eroshenko, A.Y. Arestova, S.V. Mitrofanov, A.G. Rusina, A. Kolesnikov, The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020), “Integrating GIS technologies in hydro power plant cascade simulation model”, vol. 191, pp. 1-6, 2020.
2. J. Chen, P.A. Zhong, M.L. Wang, F.L. Zhu, X.Y. Wan, Y. Zhang, “A risk-based model for real-time flood control operation of a cascade reservoir system under emergency conditions”, vol. 10 (2), 2018.
3. B. Bou-Fakhreddine, S. Abou-Chakra, I. Mougharbel, A. Faye, Y. Pollet, International Conference on Renewable Energies for Developing countries (REDEC 2016), “Short-Term Hydro Generation Scheduling Of Cascade Plants Operating On Litani River Project – Lebanon”, pp. 1-6, 2016.
4. M. S. Fakhar, S. Liaquat, S. A. R. Kashif, A. Rasool, M. Khizer, M. A. Iqbal, S. Padmanaban, IEEE Access, “Conventional and metaheuristic optimization algorithms for solving short term hydrothermal scheduling problem: A review”, vol. 9, 2021.
5. L. Bao, Y. Shen, P. Miao, W. Li, International Conference on Information and Automation, “Recurrent neural network for solving the short-term hydrothermal scheduling problem”, pp. 2388-2393, 2015.
6. Yu.S. Datsenko, V.V. Puklakov, Water resources, “Simulation modeling of the hydroecological regime of the Nizhnekamsk reservoir“, vol. 47 (5), pp. 515-522, 2020.
7. A. Khalyasmaa, S. Eroshenko, S. Mitrofanov, A. Rusina, A. Arestova, A. Sidorova, The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020), “Development of a simulation model of HPPs chain operation“, vol. 19.
8. C. Zhang, M. Yang, J. Li, IET Generation, Transmission & Distribution, “Detailed modelling and parameters optimization analysis on governing system of hydro-turbine generator unit“, vol. 12(5), pp. 1045-1051, 2018.

Научный руководитель: доцент, д.т.н. А.Г. Русина, декан ФЭН НГТУ.

# ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Сидорова

Новосибирский государственный технический университет  
Факультет энергетики, кафедра ЭлСт

**Аннотация.** Энергосистемы относятся к разряду сложных технологических комплексов для обеспечения надежного и безопасного функционирования которых необходимо проводить техническое обслуживание и ремонт. Принятие решения о виде и объеме работ принимается компаниями по результатам оценивания технического (эксплуатационного) состояния оборудования, для которого используется специальный показатель – индекс технического состояния (далее – ИТС). Расчет данного показателя основывается на Методике, утвержденной приказом Минэнерго РФ [1]. В данной статье рассчитывается ИТС линейного объекта 220 кВ, нарушение работы которого приводит к возмущениям и аварийным ситуациям. На основании полученных результатов предложены пути оптимизации эксплуатационного состояния линейного объекта за счет проведения мероприятий по восстановлению и реконструкции, их сравнение и расчет прогноза вероятности отказа линейного объекта через пять лет.

## Введение

Прогнозирование жизненных циклов и долговечности оборудования основано на теории физического и морального износа, в зависимости от ее стратегии жизненный цикл имеет различную протяженность. В статье рассматриваются два основных процесса, связанных с продлением срока эксплуатации – это восстановление и реконструкция, необходимость которых определяется по результатам расчета ИТС каждой рассматриваемой единицы оборудования [1]. В статье приводится комплексная оценка состояния линейного объекта, так называемое оценивание его функционального состояния. Основа оценивания – это декомпозиция, включающая функциональные и конструкционные узлы, а также агрегирование состояния их элементов.

Подход в Методике [2] основан не только на декомпозиции и агрегировании, но и на вводе единой шкалы состояний линейного объекта с количество-качественных уровней  $n$  с целью перехода от конструкции и функций к интегральным оценкам. Первым шагом методики выполняется функциональная декомпозиция определением функции линейного объекта, как ТУ, которой является передача электрической энергии с упорядоченной записью функций. Далее производится декомпозиция конструкции, чтобы отразить конструктивно-функциональные связи, а также как они влияют на состояние узлов.

Имея декомпозицию составляем матрицу функционально-конструкционных связей линейного объекта. Матрица состоит из уровней декомпозиции всех элементов линейного объекта и их функций для которых вводится некоторая шкала состояний, называемая «классами состояний», в которой в зависимости от качественного уровня состояния присваивается значение от нуля до ста (ноль – состояние функционального отказа элемента, сто – идеальное, наилучшее состояние элемента). Нижний уровень содержит однозначное соответствие между дефектами, выявленных в результате осмотров, диагностики, и классами состояний с целью идентификации состояния элементов. Сформированные списки дефектов и классы состояний элементов линейного объекта позволяют произвести оценку состояния его агрегированных элементов (конструкционных узлов и групп обобщенных элементов). Использование такого подхода, в части применения функционально-конструкционной декомпозиции и методики агрегирования позволяет рационально и максимально эффективно проводить оценку и распределять работы по восстановлению не только линейного объекта, но и любой другой единицы оборудования.



## 1. Расчет ИТС линейного объекта

Линейный объект 220 кВ смонтирован на 10 железобетонных опорах типа ПБ220-1 и проходит в сложных условиях горной местности. Год ввода в эксплуатацию – 1970. Предполагается, что при сходе селевого потока произошло одинаковое повреждение всех 10 опор, в результате которого эксплуатация линейного объекта невозможна, существуют риски полного прекращения электроснабжения потребителей в результате излома и падения опор.

Согласно Приложению 2 Методики [1] выявленные дефекты имеют балльные оценки:

- сверхнормативный срок службы опоры – «2»;
- нестойкое загрязнение изоляции – «3»;
- коррозионный износ 50 % несущих элементов траверс – «2»;
- разрушение, потеря несущей способности стойки опоры – «0»;
- смещение/осыпание грунта фундамента оттяжки – «2».

Линейный объект состоит из функциональных узлов (далее – ФУ) – сегментов, состоящих из опор и пролетов. Оценки групп параметров состояния определяются балльной оценкой параметра (минимальной), входящего в данную группу, при условии, что иные дефекты на опоре отсутствуют и балльная оценка функциональных узлов в группах параметров принимается равной максимальной – «4».

Таблица 1. Группы параметров и весовые коэффициенты ФУ «Опора»

Группы параметров ФУ «Опора»	Оценка	Весовые коэффициенты
Общие параметры	2	0,084
Состояние изоляции и арматуры	3	0,471
Критические параметры изоляции и арматуры	4	0,008
Состояние опоры/портала	2	0,345
Критические параметры опоры	0	0,008
Состояние фундамента	2	0,084

Расчет ИТС опоры производится согласно формуле (1):

$$ИТС = 100 \cdot \frac{\sum i \cdot (KB_i \cdot ОГП_i)}{4}, \quad (1)$$

где  $KB_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -ой группы параметров ТС;  $ОГП_i$  – минимальная балльная оценка для  $i$ -ой группы параметров ТС элементов сегмента линейного объекта.

При использовании весовых коэффициентов ИТС ФУ «Опора» составляет 61,77. ФУ «Пролет» не имеет дефектов, следовательно, балльная оценка всех групп принимается равной «4». Предположим, что линейный объект состоит из одного сегмента, следовательно, определив его ИТС, будет определена ИТС всему линейному объекту по формуле (1). При использовании весовых коэффициентов ФУ «Опора», ФУ «Пролет» из таблицы 2 и их оценки состояния, ИТС линейного объекта составляет 85,05.

Таблица 2. Весовые коэффициенты для ФУ «Пролет»

Группы параметров ФУ «Пролет»	Весовые коэффициенты
Общие параметры	0,060
Состояние фазных проводов	0,242
Критические параметры фазного провода/габариты	0,004
Состояние грозотроса	0,061
Состояние трассы	0,242

Так как ИТС ФУ «Опора» и ИТС линейного объекта превышает значение «26», а балльная оценка параметра «Разрушение, потеря несущей способности стойкости опоры» равна «0», ИТС ФУ «Опора» и ИТС линейного объекта присваиваются значения «26». Согласно Методике [1], опоры и линейный объект находятся в неудовлетворительном состоянии. Для перехода в работоспособное состояние возможны такие воздействия как капитальный ремонт или реконструкция.

## 2. Оптимизации эксплуатационного процесса линейного объекта

*Капитальный ремонт с восстановлением существующих опор.* Комплекс мероприятий, направленный на поддержание или восстановление заводских показателей и параметров линейного объекта, отдельных её элементов называется капитальным ремонтом (далее – КР). При его проведении изношенные элементы подлежат ремонту или замене [3]. Предположим, что при восстановлении устраняются только критические дефекты, тогда балльные оценки распределяются следующим образом:

- сверхнормативный срок службы опоры – «2»;
- нестойкое загрязнение изоляции – «3»;
- коррозионный износ 50 % несущих элементов траверс – «2»;
- разрушение, потеря несущей способности стойки опоры – «4»;
- смещение / осыпание грунта фундамента оттяжки – «4».

ИТС ФУ «Опора» составляет 66,78. ИТС линейного объекта – 87.

*Реконструкция с заменой опор.* Реконструкция представляет собой комплекс работ по переустройству объекта, а также изменения его конструктивного исполнения. Реконструкции в том числе подлежат и линейные объекты, которые имеют неудовлетворительное состояние конструкций вследствие выработки нормативного срока службы, стихийных природных явлений [2, 3]. Предположим, что при реконструкции устраняются все дефекты путем замены железобетонных опор типа ПБ220-1 на анкерные металлические опоры типа У220-1. Тогда все балльные оценки принимаются «4». ИТС ФУ «Опора» и ИТС линейного объекта составляют 100.

## 3. Прогноз вероятности отказа линейного объекта через пять лет

Для сравнения мероприятий по восстановлению и реконструкции необходимо рассчитать прогноз вероятности отказа линейного объекта через 5 лет в соответствии с [4] по формуле (2):

$$p_{\phi}(t) = (1 - y(t)) \cdot k_n, \quad (2)$$

где  $k_n$  – отношение ИТС до выполнения технических мероприятий по восстановлению и ИТС сегмента после выполнения указанных мероприятий;  $y_n(t)$  – прогноз изменения ИТС линейного объекта, рассчитываемый по формуле (3):

$$y_n(t) = (1 - 0,03 \cdot t) \cdot \frac{\sum OI\Gamma i \cdot k_{vi}}{4}, \quad (3)$$

где  $OI\Gamma i$  – оценка (балл)  $i$ -ой группы параметров ТС сегмента;  $k_{vi}$  – весовой коэффициент для  $i$ -ой группы параметров рассматриваемого сегмента;  $t$  – продолжительность (время) прогнозирования, принимаемое равным 5 лет.

При весовых коэффициентах, принятых в таблицах 1 и 2 прогноз изменения ИТС линейного объекта после капитального ремонта – 0,73, после реконструкции – 0,85. Прогноз вероятности отказа линейного объекта после ремонта составляет 0,077, после реконструкции – 0,039.

В соответствии с [4] ремонт опоры линейного объекта в виде заделки 1 м<sup>2</sup> трещин и выбоин на стойке в ценах по состоянию на составит 539,63 рубля с учетом стоимости материалов, замена стойки составит в 3665,81 рублей без учета стоимости новой опоры.

### Заключение

В данной статье рассмотрена оптимизация эксплуатационного состояния линейного объекта 220 кВ, проводимая в процессе КР и реконструкции после схода селевого потока на базе оценки ее технического состояния с помощью метода функциональной декомпозиции. КР линейного объекта 220 кВ приводит к повышению ИТС ФУ «Опора» до 66,78, что соответствует удовлетворительному техническому состоянию. ИТС линейного объекта повышается до 87, что соответствует очень хорошему техническому состоянию, при этом остаются не устраненными дефекты на траверсах и изоляторах линейного объекта. Прогноз вероятности отказа линейного объекта через пять лет составляет 0,077. Реконструкция линейного объекта с устранением всех дефектов повышает уровень ИТС ФУ «Опора» и линейного объекта до 100, что

соответствует очень хорошему ТС. Прогноз вероятности отказа через 5 лет составляет 0,039, что 2 раза меньше, чем при КР. Реконструкция позволяет достичь более высоких показателей технического состояния и уменьшения прогноза вероятности отказа, что сокращает затраты эксплуатирующего персонала, позволяя оптимизировать режимы работы оборудования и системы. При этом КР требует меньшего количества экономических затрат. Вид технического воздействия и его объем на оборудование для оптимизации его эксплуатационного состояния должен осуществляться в зависимости от существующих производственных условий и требований к режиму дальнейшей работы с учетом комплексного подхода ко всему оборудованию на балансе предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утвержденной приказом Минэнерго РФ от 26.07.2017 № 676 с изменениями, внесенными приказом Минэнерго РФ от 17.03.2020 № 192.
2. Эксплуатация высоковольтных электрических сетей. Модели оценки состояния оборудования и оптимизации ремонтно-восстановительных процессов: Учеб. пособие / А.Г. Фишов, В.Г. Горевой, А.Н. Евстафьев и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 118 с.
3. РД 153-34.3-20.409-99. Руководящие указания об определении понятий и отнесении видов работ и мероприятий в электрических сетях отрасли «электроэнергетика» к новому строительству, расширению, реконструкции и техническому перевооружению. Москва, 2000.
4. Приказ Министерства энергетики РФ от 19 февраля 2019 г. № 123. Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа.
5. СО 153-34.20.814 (ВУЕР-ВЛ-2000) Ведомственные укрупненные единичные расценки (ВУЕР) на ремонт и техническое обслуживание электрических сетей энергообъединений (хозяйственный способ). Выпуск 1. Воздушные линии электропередачи напряжением 35-750 кВ от 14.08.2003 №422

Научный руководитель: доцент, д.т.н. А.Г. Русина, декан ФЭН НГТУ.

## **СОГЛАСОВАНИЕ МОЩНОСТЕЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ И РЕГУЛИРУЕМОЙ СЕЗОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ**

А.С. Тутунин, А.В. Клоков  
Московский государственный технический университет  
Э, Э2, группа Э2-73Б

Для систем термостабилизации грунтов важна стабильность работы, поэтому энергосистема, обеспечивающая такую систему, должна отвечать требованиям по бесперебойности энергоснабжения. Системы термостабилизации зачастую работают в отдаленных районах, поэтому использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) поможет избежать логистических трудностей, связанных с доставкой топлива для дизельных генераторов или постройкой ЛЭП. Энергосистемы, использующие только один источник, не могут обеспечить должной бесперебойности, поэтому нами предложено использовать гибридные системы ВИЭ.

Термостабилизация грунта осуществляется с использованием геотермальных тепловых насосов (ТН). Проведенный теплотехнический расчет показал, что нагрузка на энергосистему

является сезонной (нет необходимости охлаждать грунт зимой) и имеет максимум летом. Большая тепловая инерция грунта позволяет мощности ВИЭ отклоняться от требуемой для термостабилизации мощности генерации в некоторых пределах, поэтому было принято, что выработка холодильной мощности следует за выработкой электрической мощности. Основная цель исследования заключалась в том, чтобы определить такую гибридную конфигурацию энергосистемы (включая схему агрегатирования ТН), которая обеспечивала бы систему термостабилизации энергией с заданным запасом за рабочий период, имела бы минимальное время простоя за рабочий период (когда энергия не поглощается потребителем) и минимальную стоимость.

Метеорологические данные: температура воздуха  $t_{amb}$ , °C, инсоляция местности  $GHI$ , Вт/м<sup>2</sup>, и скорость ветра  $V$ , м/с – были получены из [1] на севере Норвегии за 2021 год. На рассматриваемой метеостанции измерения проводились с интервалом 4 часа. Мощность, вырабатываемая солнечными батареями (СБ), рассчитывалась по зависимости (1) предложенной авторами [2]. В качестве СБ был принят солнечный модуль HVL-360/HJT [3].

$$P_{solar} = R_{solar} \cdot P_{rated} \cdot \left( \frac{GHI}{GHI_{TEST}} \right) \cdot (1 + K_T \cdot (t_{amb} + 0,0256 \cdot GHI - t_{TEST})), \quad (1)$$

где  $R_{solar}$  – доля солнечных батарей в энергосистеме (по установленной мощности);  $P_{rated}$  – установленная в энергосистеме мощность ВИЭ, Вт;  $GHI$  – текущая инсоляция местности, на которой установлены солнечные батареи, Вт/м<sup>2</sup>;  $GHI_{TEST}$  – значение инсоляции при испытании, Вт/м<sup>2</sup>;  $K_T$  – температурный коэффициент мощности фотоэлемента;  $t_{TEST}$  – температура фотоэлемента, при которой проводились испытания, °C.

Мощность, вырабатываемая ветряными турбинами, рассчитывалась по зависимости (2) с использованием кривой мощности ветротурбины Windspot 7,5 kW [4] с высотой мачты 18 м.

$$P_{WT} = (1 - R_{solar}) \cdot P_{rated} \cdot P(V_{hub})/P(V_{rated}), \quad (2)$$

где  $P(V_{hub})$  – зависимость вырабатываемой ветротурбинами мощности от скорости ветра  $V_{hub}$  на высоте ротора, Вт;  $V_{rated}$  – расчетная скорость ветра, м/с. Скорость ветра на высоте ротора ветротурбины рассчитывалась по показательному закону распределения скорости ветра по высоте в соответствии с методикой, представленной [5]. Если скорость ветра на высоте ротора ниже стартовой или выше максимальной рабочей, то ветротурбина остановлена и не вырабатывает мощность.

Суммарная мощность, вырабатываемая ВИЭ при заданной доле солнечных батарей, рассчитывалась по формуле (3):

$$P_{summary} = P_{solar} + P_{WT} \quad (3)$$

Геотермальные ТН используют инверторные компрессоры, работающие в диапазоне частот от 15 до 50 Гц с возможностью разгона до 70 Гц. Было принято, что мощность, с которой работает ТН линейно зависит от частоты. Частота 50 Гц соответствует номинальной электрической мощности ТН, частота 15 Гц – пороговой мощности ТН  $P_{inf}$ , частота 70 Гц – максимальной мощности  $P_{sup}$ . Если выработка ВИЭ  $P_{summary}$  меньше  $P_{inf}$ , энергия не будет поглощена, и холод не будет выработан. Если  $P_{summary}$  больше  $P_{sup}$  – будет поглощена только часть энергии.

Использование нескольких менее мощных тепловых насосов вместо одного более мощного (агрегатирование) позволяет снизить пороговую мощность потребителя и поглощать больше энергии при той же установленной мощности ВИЭ. В настоящем исследовании рассмотрены схемы агрегатирования, суммарная установленная электрическая мощность ТН которых на 20 % больше максимальной требуемой по тепловому расчету: схема из 1 ТН (120 %); схема из 3 ТН (40/40/40 %) и схема 4 ТН (40/40/20/20 %).

В процессе оптимизации менялись параметры  $R_{solar}$  и  $P_{rated}$ . Конфигурация должна была обеспечивать систему термостабилизации энергией за рабочий период с заданным запасом  $ICCR$  (4):

$$ICCR = \frac{\int_{\Delta\tau} P_{absorbed} d\tau}{\int_{\Delta\tau} P_{eHP} d\tau} \geq 1,2, \quad (4)$$

где  $P_{absorbed}$  – мощность, поглощенная ТН, ВТ;  $P_{eHP}$  – требуемая для работы системы термостабилизации мощность (по теплотехническому расчету).

Конфигурация должна обеспечивать систему термостабилизации энергией с минимальными простоями, количество которых оценивалось с помощью показателя  $EF$  (5):

$$EF = \frac{N_{inf}}{\Delta N} \cdot 100 \% \leq 15\%, \quad (5)$$

где  $N_{inf}$  – число точек, в которых  $P_{summary}$ , рассчитанная по дискретным метеоданным, меньше пороговой мощности ТН;  $\Delta N$  – число точек между началом и концом рабочего периода системы термостабилизации (по теплотехническому расчету).

Расчет стоимости конфигураций проводился на основе стоимостных характеристик ВИЭ и ТН, представляющих из себя зависимости удельной стоимости  $PRICE_{CB,VT,TH}^{specific}$ , руб/Вт от установленной мощности  $P_{CB,VT,TH}^{rated}$ , Вт (6). Характеристики были составлены на основе рыночных предложений [6–13].

$$COST_{CB,VT,TH} = PRICE_{CB,VT,TH}^{specific}(P_{CB,VT,TH}^{rated}) \cdot P_{CB,VT,TH}^{rated}. \quad (6)$$

Суммарная стоимость определялась как сумма стоимостей отдельных частей энергосистемы (СБ, ВТ и ТН). Для определения конфигурации, имеющей минимальную общую стоимость и наилучшим образом удовлетворяющей условиям оптимизации, выбирали конфигурацию, имеющую минимальный критерий  $C_{EF}$ , руб, который определялся по (7):

$$C_{EF} = COST_{общ} \cdot EF, \quad (7)$$

где  $COST_{общ}$  – общая стоимость конфигурации, включая стоимости СБ, ВТ и ТН.

Были отобраны оптимальные по стоимости моно-конфигурации (энергосистема только из СБ или только из ВТ), удовлетворяющие условию по  $ICCR$ , но не ограниченные по  $EF$ . Для каждой схемы агрегатирования была определена одна такая конфигурация. Критерий  $C_{EF}$  для них не определяли. Результаты представлены в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что агрегатирование позволяет снизить  $P_{rated}$ . Стоимость мелкомасштабного агрегатирования выше, чем стоимость крупномасштабного. Снижение пороговой мощности лучше сказывается на стоимости ВТ-конфигураций, чем на стоимости СБ-конфигураций. Это связано с удельной стоимостью СБ, которая остается примерно постоянной в области высоких установленных мощностей в отличие от удельной стоимости ВТ. Поэтому снижение установленной мощности СБ за счет снижения пороговой мощности не дает настолько большого выигрыша в стоимости, чтобы нивелировать увеличение стоимости ТН. Кроме того для моно-конфигураций снижение  $P_{inf}$  за счет применения схемы 40/40/20/20 % не приводит к значительному снижению  $P_{rated}$  по сравнению со схемой 40/40/40 %, а значит не приводит к значительному снижению стоимости.

Таблица 1. Лучшие по стоимости моно-конфигурации с различными схемами агрегатирования ТН

$R_{solar}$	$P_{rated}$ , кВт		$EF$ , %	$ICCR$	$COST_{общ}$ , млн. руб.	$COST_{ТН}$ , млн. руб.	Схема агрегатирования	$P_{inf}$ , кВт	$P_{sup}$ , кВт
	ВИЭ	ТН							
1	41,0	12,1	51,91 %	1,209	2,217	0,608	120 %	3,6	16,9
1	36,5	12,1	37,33 %	1,205	2,184	0,752	40/40/40 %	1,2	16,9
1	36,0	12,1	29,16 %	1,210	2,299	0,886	40/40/20/20 %	0,6	16,9
0	34,5	12,1	57,77 %	1,203	3,385	0,608	120 %	3,6	16,9
0	30,5	12,1	45,91 %	1,205	3,215	0,752	40/40/40 %	1,2	16,9
0	30,0	12,1	42,57 %	1,206	3,309	0,886	40/40/20/20 %	0,6	16,9

Ни одна моно-конфигурация не способна обеспечить заданный  $EF$ . Минимальный  $EF$  показывают конфигурации со схемой 40/40/20/20 %. ВТ-конфигурации демонстрируют больший  $EF$  по сравнению с СБ-конфигурациями только потому, что способны обеспечить заданный  $ICCR$  при меньших установленных мощностях.

В таблице 2 приведены гибридные конфигурации с наименьшими значениями критерия  $C_{EF}$  в порядке возрастания стоимости. Отбор не прошли конфигурации со схемой 120 % (слишком высокий  $EF$ ) и схемой 40/40/40 % (слишком высокая стоимость при сопоставимом  $EF$ ), поэтому для каждой конфигурации:  $P_{rated\ ТН} = 12,1$  кВт,  $P_{inf} = 0,6$  кВт,  $P_{sup} = 16,9$  кВт,

$COST_{ТН} = 0,886$  млн. руб. Для гибридных конфигураций применение агрегатирования 40402020 позволяет снизить  $P_{rated}$  настолько, что окупается высокая стоимость ТН.

Таблица 2. Лучшие по стоимости гибридные конфигурации конфигурации

$R_{solar}$	$P_{rated}$ , кВт			$EF$ , %	$ICCR$	$COST_{общ.}$ млн. руб.	$COST_{СБ}$ , млн. руб.	$COST_{ВТ}$ , млн. руб.	$C_{EF}$ , руб.
	ВИЭ	СБ	ВТ						
0,84	39,50	33,18	6,32	14,99	1,431348	2,483	1,302	0,295	372114
0,84	40,00	33,60	6,40	14,92	1,445217	2,502	1,319	0,297	373242
0,83	39,50	32,79	6,72	14,92	1,439451	2,507	1,287	0,334	374024
0,84	40,50	34,02	6,48	14,85	1,458933	2,521	1,335	0,299	374340
0,83	40,00	33,20	6,80	14,78	1,453521	2,537	1,303	0,348	375081
0,84	41,00	34,44	6,56	14,78	1,472494	2,547	1,352	0,309	376536
0,83	40,50	33,62	6,89	14,65	1,467444	2,568	1,319	0,362	376091

Таблица 2 показывает рост стоимости при незначительном снижении  $EF$ , что подтверждается критерием  $C_{EF}$ . На основе полученных в результате расчета данных, нами была выбрана конфигурация с  $R_{solar} = 0,84$  и  $P_{rated} = 39,50$  кВт, поскольку она имеет минимальный критерий  $C_{EF}$  по сравнению с остальными. Распределения вырабатываемой, поглощенной и требуемой мощностей выбранной конфигурации представлены на рисунке 1.

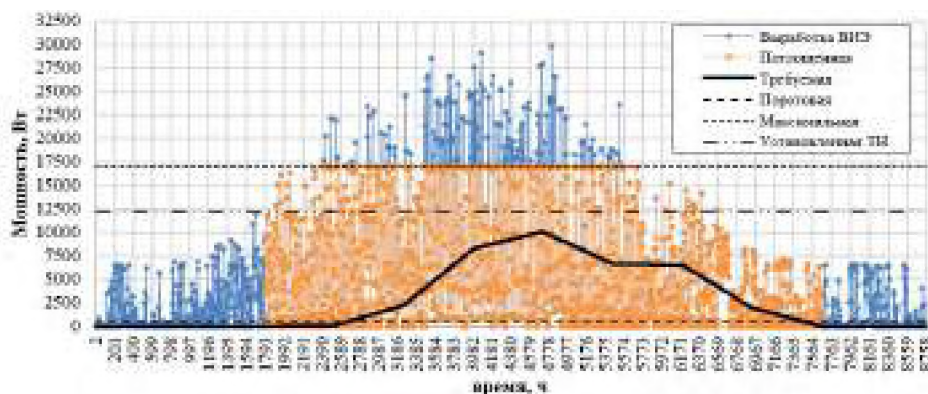


Рис. 1. Распределения вырабатываемой, поглощенной и требуемой мощностей оптимальной конфигурации

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Название станции: ProTech wsm. URL: <https://www.ecowitt.net/home/index?id=36566> (дата обращения: 15.11.2022).
2. P Kumar, P., & Saini, R. P. (2020). Optimization of an off-grid integrated hybrid renewable energy system with various energy storage technologies using different dispatch strategies. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects.
3. URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-360hjt/> (дата обращения: 15.11.2022).
4. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1372-windspot-7.5kw> (дата обращения: 15.11.2022).
5. Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. — М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. — 304 с.
6. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/> (дата обращения: 15.11.2022).
7. URL: <https://e-solarpower.ru/teplovye-nasosy/geotermalnye/> (дата обращения: 15.11.2022).
8. URL: <https://msk.solar-e.ru/catalog/teplovye-nasosy/geotermalnye/> (дата обращения: 15.11.2022).
9. URL: <https://leds-td.ru/products/category/vetrogenerator> (дата обращения: 15.11.2022)
10. URL: <https://energywind.nt-rt.ru/price/catalog/795234> (дата обращения: 15.11.2022)

11. URL: <https://rosvetrogenerator.ru/> (дата обращения: 15.11.2022)
12. URL: <https://enpartner.ru/vetrogeneratory> (дата обращения: 15.11.2022)
13. URL: <https://yashel.shop/vetrogeneratory> (дата обращения: 15.11.2022)

Научный руководитель: к.т.н. Е.Ю. Локтионов, с.н.с. САФУ.

## **ОБЗОР ЧИСЛЕННОСТИ И УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА**

О.А. Пичугова

Уральский федеральный университет  
УралЭНИн, кафедра АЭС, группа ЭН-490001

Таджикистан является одной из стран, расположенных в Центральной Азии, площадь его территории составляет 141,4 тыс. км<sup>2</sup>, в Таджикистане проживает более 9,3 млн. человек. Основной спецификой Таджикистана является его расположение в горах Средней Азии (Памир и др.), 93 % территории страны занимают горы высотой 300÷7500 метров. С энергетической точки зрения Таджикистан имеет уникальную особенность, связанную с гидроэнергетикой: гидроэнергетический потенциал горных рек Таджикистана, оценивается более чем в 500 млрд кВт·ч чистой выработки электроэнергии в год [1, 2].

Энергосистема Таджикистана с потреблением электроэнергии в стране около 14,2 млрд кВт·ч в год является небольшой. По данным портала «Мировая энергия», по результатам технологического функционирования в 2019 году установленная мощность всех электростанций энергосистемы Таджикистана составила 6451 МВт, выработка электроэнергии – 20,7 млрд кВт·ч в год, максимум нагрузки энергосистемы ~ 4500 МВт [1, 2].

Головной энергетической организацией Таджикистана является Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан [3]. Основным технологическим оператором энергосистемы является ОАХК «Барки Точик» [4].

Энергосистема Таджикистана имеет ряд технологических особенностей, представляющих конкретный научный интерес для российской и мировой энергетики и гидроэнергетики:

1. По состоянию на 01.01.2020 общая установленная мощность всех гидроэлектростанций (ГЭС) Таджикистана составляет 5733 МВт – 89 % от суммарной установленной мощности всех электростанций энергосистемы.

2. По состоянию на 01.01.2020 (на 2019 календарный год) выработка электроэнергии на ГЭС Таджикистана составила 19,2 млрд кВт·ч (93 %). С 2014 года выработка электроэнергии ГЭС увеличивается на ~5 % ежегодно.

3. Общий гидроэнергетический потенциал Таджикистана оценивается в 527 млрд кВт·ч выработки электроэнергии (8-е место в мире), потенциал используется на 4 %. На период до 2039 года за счёт строительства новых ГЭС планируется освоение потенциала общей установленной мощностью 28 ГВт, что позволит гидроэнергетический потенциал на ~30 %.

4. ГЭС Таджикистана работают в горных условиях, машинные залы ГЭС, внутри которых находятся гидроагрегаты, расположены на высоте 300–1000 метров над уровнем моря. Кроме того, ГЭС Таджикистана являются одними из самых южных в мире, поскольку они работают на 40 °N северной широты или южнее.

5. В составе установленной мощности ГЭС Таджикистана имеется несколько крупных ГЭС с мощными гидроагрегатами, которые являются одними из крупнейших в мире. При этом весь парк ГЭС Таджикистана по установленной мощности и выработке электроэнергии на 99 % состоит из 9-ти крупных ГЭС с единичной установленной мощностью более 25 МВт.

По этим причинам энергосистема Таджикистана уникальна и, безусловно, подлежит научному исследованию и изучению. ГЭС Таджикистана показывают специфику работы крупных ГЭС в горных условиях, на значительной высоте над уровнем моря. Например, отдельным

случаем является реконструкция и замена гидроагрегатов на Нурекской ГЭС, когда старые гидроагрегаты производства СССР (1972 г.) были заменены на новые австрийские «Andritz» (2019 г.) и мощность ГЭС увеличилась с 3000 до 3300 МВт [6], но статические и динамические характеристики такого оборудования требуют отдельного изучения в будущем.

На основании [1–7] и результатов собственных исследований установлено, что по состоянию на 01.01.2022 г. в энергосистеме Таджикистана работает 16 электростанций двух типов общей установленной мощностью ~6400 МВт, в том числе 13 ГЭС с общей установленной мощностью 5733 МВт и 3 ТЭС с общей установленной мощностью 718 МВт. В течение 2020–2022 гг. проводились собственные исследования с использованием пересчёта единичных мощностей ГЭС и их гидроагрегатов. По результатам исследования установлено, что в энергосистеме работают 13 ГЭС с установленной мощностью 5202 МВт и выработкой электроэнергии 22,0 млрд кВт·ч. Всего в Таджикистане насчитывается 52 технологические площадки ГЭС, из них 13 ГЭС (5202 МВт) – в эксплуатации, 1 ГЭС (Рогунская ГЭС 3800 МВт ввод до 2030 года) – строится и вводится в эксплуатацию, 38 площадок ГЭС – перспективные.

При изучении отчётных документов о технологическом функционировании энергосистемы Таджикистана [1–4] и дополнительных источников данных, в том числе снимков со спутников [6–9], удалось установить состав ГЭС, отчетные показатели функционирования и геолокацию (GPS-координаты) ГЭС Таджикистана. Основные результаты собственных исследований представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Из таблицы 1 с параметрами функционирования ГЭС видно, что вес каждой крупной ГЭС с установленной мощностью 30 МВт и выше изменяется в пределах 2–13 % по мощности и/или выработке электроэнергии. Эти ГЭС имеют системное значение для энергосистемы Таджикистана. ГЭС с установленной мощностью 30 МВт имеют вес меньше 1 % и в основном являются местными, локальными источниками. Дополнительно, в Таджикистане функционирует 1 технологически изолированная энергосистема – «Памир Энерджи», которая работает как изолированные энергосистемы в России [8, 9].



Рис. 1. Состав ГЭС Таджикистана. Установленная мощность (МВт) и выработка электроэнергии (млн кВт·ч) на 01.01.2020

По структуре ГЭС основные генерирующие мощности страны на 82 % представлены 3 крупными ГЭС: Нурекская 3000 МВт, Сангтудинская – 1 670 МВт, Байпазинская – 600 МВт – на эти три ГЭС приходится выработка электроэнергии в объёме 16,5 млрд кВт·ч, ГЭС обеспечивают 116 % потребности страны в дешевой электроэнергии по тарифу ~0,53 сомони (1,5 Р/кВт·ч). Основной объём мощностей ГЭС Таджикистана – 3900 МВт (75 %) работают на высоте более 600 м над уровнем моря, в том числе 3 ГЭС: Рогунская ГЭС, 240 МВт – 1000 м, Памир-1 ГЭС, 28 МВт – 2300 м и Хорогская ГЭС 9 МВт – 2100 м.

Отдельно для ГЭС Таджикистана необходимо отметить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Так, в 2020 году Нурекская ГЭС выработала 11,2 млрд кВт·ч при КИУМ 42,6 % и обеспечила 55,3 % всей выработки электроэнергии в Таджикистане. Этот уровень КИУМ ~ 42 % является нормальным и сравнимым с ГЭС в ЕЭС России [5]. Средний КИУМ по другим ГЭС Таджикистана в 2019 календарном году составил ~66 %, что явно выше, чем у Нурекской ГЭС, и свидетельствует о высокой технологической эффективности ГЭС.



Таблица 1. Показатели технологического функционирования ГЭС Таджикистана на 01.01.2020

№	ГЭС	$P_{уст}$ , МВт	Вес, %	$W_{ген}$ , млн кВт·ч	Вес, %	КИУМ, %
	Всего ГЭС в Таджикистане	5 202,0	100,0%	21 982,0	100,0%	67,4%
1.	Нурекская ГЭС	3000,0	57,7%	11 200,0	51,0%	42,6%
2.	Сангтудинская-1 ГЭС	670,0	12,9%	2 700,0	12,3%	46,0%
3.	Байпазинская ГЭС	600,0	11,5%	2 600,0	11,8%	49,5%
4.	Головная ГЭС	240,0	4,6%	1 500,0	6,8%	71,3%
5.	Рогунская ГЭС	240,0	4,6%	1 600,0	7,3%	76,1%
6.	Сангтудинская-2 ГЭС	220,0	4,2%	932,0	4,2%	48,4%
7.	Кайраккумская ГЭС	126,0	2,4%	690,0	3,1%	62,5%
8.	Перепадная ГЭС	29,9	0,6%	247,0	1,1%	94,3%
9.	Памир-1 ГЭС*	28,0	0,5%	184,0	0,8%	75,0%
10.	Центральная ГЭС	15,1	0,3%	114,0	0,5%	86,2%
11.	Варзоб-2 ГЭС	14,4	0,3%	93,0	0,4%	73,7%
12.	Варзоб-1 ГЭС	9,5	0,2%	64,0	0,3%	76,9%
13.	Хорогская ГЭС*	9,0	0,2%	58,0	0,3%	73,6%

\*Изолированная энергосистема «Памир Энерджи», 2 крупные ГЭС общей установленной мощностью 37 МВт

Для системных исследований в области состава ГЭС и их генерирующих агрегатов целесообразно использовать систему классификации установленной мощности ГЭС, действующую по шкале, введённой в России с 2012 г. СТО 01.01.78-2012 ПАО «РусГидро» [10]. Согласно Постановлению Правительства России [11], также необходимо учитывать все электростанции с установленной мощностью более 5 МВт. С учётом состава ГЭС Таджикистана, описанного выше, структура количества, установленной мощности, выработки электроэнергии и КИУМ по [10, 11] представлена в таблице 2.

Таблица 2. Структура ГЭС Таджикистана по Российской шкале установленной мощности ГЭС

№	ГЭС	Диапазон	$N_{ГЭС}$ , единиц	$P_{уст}$ , МВт	$W_{ген}$ , млн кВт·ч	КИУМ**
	<b>ГЭС Таджикистана, итого</b>					
1.	Микро ГЭС	<0,10 МВт	–	–	–	–
2.	Малые ГЭС	0,10 ÷ 4,99 МВт	*10	47,0	–	–
3.	Малые ГЭС	5,00 ÷ 24,99 МВт	5	48,0	329,0	<b>78,2%</b>
4.	Средние ГЭС	25,00 ÷ 249,99 МВт	5	883,9	5153,0	<b>66,6%</b>
5.	Крупные ГЭС	≥ 250 МВт	3	4 270,0	16 500,0	44,1%

\*Информация приведена в [1],

\*\*Среднее значение КИУМ по группе ГЭС.

Так, по российской шкале установленной мощности ГЭС в энергосистеме Таджикистана:

- Имеется 15 малых ГЭС единичной установленной мощностью от 1 до 25 МВт. Общая установленная мощность 15-ти малых ГЭС составляет 95 МВт, доля в структуре установленной мощности и выработки электроэнергии – до 2 %.

- Имеются 5 средних ГЭС общей установленной мощностью 883,9 МВт и выработкой электроэнергии 5,2 млрд кВт·ч, доля средних ГЭС составляет 17 %.

- В энергосистеме Таджикистане имеются 3 крупные ГЭС (2 крупных и 1 крупнейшая) с единичной мощностью от 250 МВт и суммарной установленной мощностью 4270,0 МВт и выработкой электроэнергии 16,5 млрд кВт·ч, доля крупных ГЭС составляет 82 %.

- Основу энергосистемы Таджикистана составляют 8 ГЭС: 5 средних и 3 крупных ГЭС общей установленной мощностью 5153,9 МВт (98 %) и годовой выработкой электроэнергии 21,4 млрд кВт·ч – 98 % от всей выработки и 150 % от всех потребностей страны в электроэнергии.

Для ГЭС Таджикистана отмечается высокий КИУМ для малых и средних ГЭС на уровне 66–78 %. Причины высоких КИУМ являются предметом дальнейших исследований и будут связаны с анализом параметров отдельных гидроагрегатов: мощности, массы, скорости вращения, режимов работы и других параметров технологического функционирования.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Генеральный план развития энергетического сектора – заключительный отчет. Таджикистан, 2012. – 253 стр.
2. Энергетический профиль Таджикистана. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-tadzikistana>
3. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mewr.tj/>
4. ОАХК «Барки Точик» [Электронный ресурс]. – URL: <http://barqitojik.tj/en/>
5. Годовые отчёты и ежемесячные релизы АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups>
6. Нурекская ГЭС, Таджикистан. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/updates-hydronews/nurek-news-update>
7. Cross-Border Electricity Trading for Tajikistan: A Roadmap. France, International Energy Agency, 2021. – 59 p.
8. Karamov D., Volkova I., Suslov K., Dolmatov I. Renewable energy sources and storage batteries for electrification of Russian decentralized power supply systems. *Journal of Physics: Conference Series* [International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021)]. Novorossiysk, 2021, №012016, pp. 1-13. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012016
9. Bonchuk I., Shaposhnikov A., Petrushin D., Popov M. Operational prediction of power consumption in isolated power systems with a predominance of utility and household loads. [2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)]. Sochi, 2021, pp. 36-41. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446324
10. Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования. СТО ПАО «РусГидро» 01.01.78-2012. Москва: 2012. – 296 с.
11. Постановление Правительства России от 17.10.2009 № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики». Москва. 2009.

Научный руководитель: к.т.н. А.О. Егоров, доцент кафедры АЭС УЭИ УрФУ.

## **СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАРУЖНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЛАТФОРМАХ**

И.Н. Хамидуллин, С.Ю. Маслов  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, ПЭ-2-19

Основной проблемой освещения железнодорожных платформ и поездов являются большие энергетические затраты, которые связаны с включением светильников на полную мощность сразу при наступлении сумерек, хотя в ряде случаев это не целесообразно. Одним из возможных решений служит разработанной нами так называемая автоматизированная система управления наружным освещением (АСУНО).

РКУ являются основными светильниками, используемыми для освещения железнодорожных платформ и поездов, их мощность составляет около (250 Вт). Учитывая, что при наступлении сумерек, происходит включение светильников на полную мощность, при том что это не всегда необходимо, к примеру, в летний период, разработанная система может сэкономить достаточное количество электрической энергии на этом.

Данная система удовлетворяет всем положенным требованиям: 1) система является надежной; 2) организует высокое качество освещения; 3) безопасно для людей; 4) обладает

достаточной долговечностью. К тому же позволяет сэкономить достаточное количество электрической энергии.

Суть работы в том, что светильники работают в автоматическом режиме. Каждый из них самостоятельно регистрирует данные в своей рабочей зоне и передает информацию остальным светильникам по беспроводному каналу связи. Такой системе нет необходимости в использовании блока центрального управления, что позволяет производить монтаж, замену на новые светильники, эффективно и быстро, даже без специалиста, не нарушая ее работы (рисунок 1).



Рис. 1. Система уличного освещения

В ее состав входит: специализированный контроллер АСУНО NEMA 1-10V, блока управления и связи, веб-сайта, светильника компании «Ферекс». Блок взаимодействуют между собой по беспроводной сети [1, 4, 5].

Данная разработка была внедрена для освещения на железнодорожных платформах «435 км» 17 светильников с лампами ДРЛ и 5 светодиодных светильников, и «Сортировочная 1,2» 24 светодиодных светильника, что позволило уменьшить потребляемую годовую мощность, что приведет к увеличению срока службы осветительного оборудования, а также сократить расходы электрической энергии на 17801,69 кВт и 3438,55 кВт, следовательно, сэкономить 66045,79 рублей и 3438,55 рублей соответственно.

Итак, разработанная система регулирует освещенность уличных светильников в зависимости от уровня естественного освещения при этом работает полностью в автоматизированном режиме, а также способна осуществлять контроль работы светильников с помощью веб-сайта. В результате функционирования (АСУНО) можно сэкономить значительную часть электрической энергии, используемую на железнодорожных платформах и переездах, а также увеличить срок службы светильников.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Аппаратура контроля параметров световых приборов, осветительных установок и световой среды / Шириев Р.Р., Иванов Д.А., Галиева Т.Г. // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 11. – С. 14-17.
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 12 мая 2018 года) [Электронный ресурс]: распоряжение от 22 ноября 2008 года N 1734-р – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678>.
3. Солюянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солюянов В.И. Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 1. – С. 156-166.

4. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Development the experimental stand for testing of experimental samples of wireless network for process automation module. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. – Т. 8. – № 12. – С.899-902.

## ПЕРСПЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ БОРТОВЫХ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ

К.А. Харитонова  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ООЭ, группа А2-27

Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения алюминия в качестве токопроводящей жилы для силового бортового монтажа современной кабельной системы (КБС) и выбор сплава на основе алюминия для токопроводящей жилы (ТПЖ) бортового провода.

КБС современного летательного аппарата содержит силовые провода стационарного и подвижного назначения, к которым предъявляются особо жесткие требования в виду специфики эксплуатации. Как правило способ их крепления в электрической системе летательного аппарата (ЛА) является фиксированным по причине строго ограниченного пространства под монтаж. Основными требованиями к бортовым проводам стационарного назначения являются стойкость к истиранию, перегибам и продавливанию, гибкость, виброустойчивость, устойчивость к линейным и ударным нагрузкам, стойкость к повышенной и пониженной температурам окружающей среды, к атмосферному давлению, воздействию масел и керосина, давлению, нераспространение горения, и ограничение по массе.

Вес кабельного изделия в основном определяется токопроводящей жилой (ТПЖ), ее характеристики представляются наиболее привлекательным для изменения конструкции. Требование к массе бортового провода обусловлено в первую очередь материалом ТПЖ. На сегодняшний день работа с этим параметром ведется конструкторами кабельных изделий, и наиболее перспективными материалами, обеспечивающими ощутимое снижение общей массы бортового провода, являются алюминиевые сплавы в виду их повышенной прочности, достаточной термостойкости, небольшого веса и низкой себестоимости.

В номенклатуре, представленной АО «ОКБ КП», имеется ряд бортовых проводов для стационарного монтажа бортовой системы, такие как: БИФ(Э), БИН(Э), ПТЛА, БФС(Э), и БФС-А, БФС(Э)-А. Последний с использованием алюминиевого сплава 01417 (ТУ 1-809-1038-2018) в качестве токопроводящей жилы со стеклополиимиднофторопластовой изоляцией. В качестве добавки к основному материалу в данном сплаве используются редкоземельные металлы (РЗМ) цериевой группы в количестве 7–9 %.

В качестве альтернативы к данному сплаву, на примере конструкций проводов БФС-А, БИФ, БИН рассматривается циркониесодержащий алюминиевый сплав с добавкой циркония в количестве 0,3 %. Значения основных технических характеристик вышеупомянутых алюминиевых сплавов относительно медной проволоки М1 представлены в сравнительной таблице 1.

Данные, приведенные в таблице 1 показывают: предлагаемый сплав обладает подходящими для бортового провода характеристиками и имеет следующие преимущества перед используемыми материалами:

– удельное электрическое сопротивление образца 1 позволяет уменьшить диаметр ТПЖ для проводов больших сечений по отношению к образцу 2 в большей степени (сечением более 4 мм<sup>2</sup>), и в меньшей степени для миниатюрных сечений (0,12-2,5 мм<sup>2</sup>);

– временное сопротивление разрыву образца 1 на 30% превосходит значение образца 2, и на 40 % уступает образцу 3;

- относительное удлинение образца 1 в 2,1 раза лучше образца 2, но в 2,3 раза меньше, чем у образца 3;
- вес образца 1 незначительно, но уменьшает общий вес ТПЖ на 5 % по отношению к образцу 2, но в тоже время меньше образца 3 в 3,2 раза.
- рабочая температура всех образцов соответствует требованиям к бортовым проводам стационарного назначения в группе рабочей температуры до 250 °С, однако у образца 1 рабочая температура выше, чем у двух остальных образцов, что позволяет рассматривать ТПЖ из алюминия, легированного цирконием, в качестве кандидата на бортовой провод с более высокими требованиями к температурному исполнению.

Таблица 1. Основные технические характеристики алюминиевых сплавов и медной проволоки

Материал, (образец)	Удельное электрическое сопротивление, Ом×кв²/м	Временное сопротивление разрыву, не менее МПа	Относительное удлинение, не менее, %	Плотность, г/см³	Рабочая температура, °С
Алюминиево-циркониевый сплав (1)	0,0287	220	17	2,756	300
Алюминиевый сплав 01417 (2)	0,0320	157	8	2,843	250
Медь М1 (3)	0,0175	350	40	8,89	250

Маркоразмеры бортового авиационного провода определяются по номинальному размеру ТПЖ, в соответствии с ГОСТ 22483-77 ряд номинальных сечений следующий: 0,12, 0,20, 0,35, 0,50, 0,75, 1,0, 2,5, 4,0, 4,6, 10,0, 16,0, 25,0, 35,0, 50,0, 70,0, 95,0 мм².

Для определения возможности оптимизации габаритно-массовых характеристик бортовых проводов стационарного назначения были проведены теоретические расчёты сечений ТПЖ по методикам, применяющимся в АО «ОКБ КП», далее были сравнены результаты для трех вариантов сплавов: циркониево-алюминиевый сплав, алюминиевый сплав 014017, медная проволока ТУ 16-705.492-2005. По результатам теоретических расчётов экономия массы циркониево-алюминиевой ТПЖ составляет до 80% от массы медной ТПЖ, и 30 % от ТПЖ из алюминиевого сплава 01417, уменьшение диаметра ТПЖ просматривается по каждому сечению циркониево-алюминиевого сплава относительно алюминиевого сплава 01417. Для сечений 0,35–2,5 мм² диаметр алюминиевой ТПЖ больше, чем у ТПЖ из медной проволоки в виду разницы удельного электрического сопротивления.

Таким образом, показана возможность применения алюминиево-циркониевого сплава для бортового провода стационарного назначения. Данный сплав может стать перспективной заменой для проводов БКС: применение выбранной ТПЖ обеспечивает снижение массы и габаритов кабельного изделия, а также увеличение ее прочности, что соответствует требованиям к тяжелым условиям ее эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. «Проволока медная круглая электротехническая», ТУ 16-705.492-2005, с.7
2. «Проволока электротехническая из алюминиевого сплава марки 01417» ТУ 1-809-1038-2018. – с 5.
3. «Жилы токопроводящие медные и алюминиевые для кабелей, проводов и шнуров. Основные параметры. Технические требования» ГОСТ 22483-77. – с 5.
4. «Алюминиево-циркониевый сплав», патент РФ № 2 696 797 С2, публ. 06.08.2019.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.П. Леонов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Е.Н. Никулина

Саратовский государственный технический университет  
ИЭ, кафедра ТАЭ

В настоящее время наблюдается тенденция стремительного развития энергетики в мире. Процесс совершенствования обусловлен сокращением запасов ископаемого топлива (газ, нефть, уголь). Перед человечеством стоит задача уделить больше внимание поиску альтернативных возобновляемых источников энергии, которые будут отвечать требованиям экологической безопасности.

Один из наиболее оптимальных вариантов альтернативных источников является использование топливных элементов (ТЭ), которые работают по принципу прямого преобразования энергии в совершенствовании теплоэнергетических установок. Топливный элемент – это электрохимическое устройство, которое использует водород или углеводородные топлива (жидкие, газообразные) и кислород (из воздуха) для выработки энергии.

На рисунке 1 представлена технологическая схема энергоустановки с топливными элементами. Данная схема показывает простоту установки, отсутствие большого количества вспомогательных элементов. В анодное пространство батареи топливного элемента поступает топливо, в катодное пространство подается воздух, вода является продуктом реакции. Наиболее совместимое топливо для ТЭ – чистый водород.

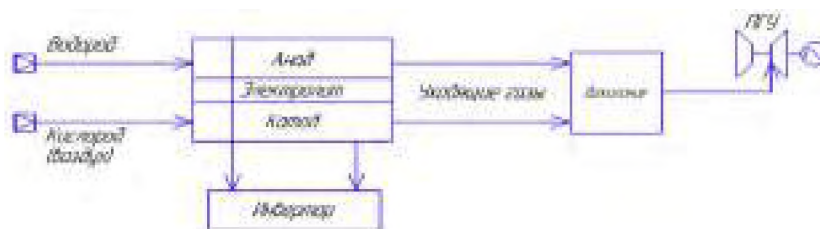


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема энергоустановки с топливными элементами

Основной отличительной особенностью разработки энергетических установок (ЭУ) с топливными элементами является возможность модульного строения схем. В такой схеме общая мощность складывается из нескольких однотипных частей, объединенных в батареи [5]. Элементарным элементом являются единичные топливные элементы малой мощности, которые собираются в блоки, которые объединяются в модули, из которых собираются энергоустановки и затем, электростанции любой, даже самой большой, мощности. Что позволяет выделить большое количество положительных достоинств энергетических установок с ТЭ:

– серийное производство и использование аналогичных компонентов позволяет достигать их высокой надежности, снизить их стоимость и повысить показатели ремонтпригодности энергетических комплексов;

– модульность конструкций дает возможность уменьшить себестоимость и период разработки ЭУ за счет однотипности модулей и технических решений, используя для получения опыта на более дешевых изделиях малой мощности;

– большой диапазон регулировки получаемой мощности, который недоступен при использовании традиционных ЭУ, и высокий коэффициент полезного действия во всем диапазоне регулировки (общая эффективность ЭУ достигается за счет вывода в резерв части батарей);

– возможность выдачи требуемой установленной мощности теплоэлектростанции при помощи параллельного использования установок с наиболее подходящими показателями, выпускаемых в крупных масштабах [2].

В настоящее время известны следующие типы ТЭ: щелочные топливные элементы (ЩТЭ); щелочно-мембранные топливные элементы (ЩМТЭ); топливные элементы с протоно-обменными мембранами (ПЭМТЭ); топливные элементы с фосфорнокислотным электролитом (ФКТЭ); топливные элементы с расплавленным карбонатным электролитом (РКТЭ); твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ).

Наиболее перспективным типом ТЭ являются ТОТЭ, основные характеристики которых приведены в таблице 1 [1]. В них возможно применение любого газообразного топлива, а также данный тип наиболее пригоден для использования в крупных высокотемпературных энергетических установках.

Таблица 1. Основные характеристики твердооксидных топливных элементов

Температура, °С	высокотемпературные 600–1000
Давление, МПа	0,1–1,6
Электролит	$Y_2O_3 - ZrO_2$
Анод	$Ni/YSZ$
Катод	$LSM$
Совместимое топливо	$H_2/CO/CH_4$ /риформат
Утилизация топлива, %	< 90
Окислитель	$O_2$ /воздух
Реакция на аноде	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2\bar{e}$ $C_nH_{2n+2} + (3n + 1)O^{2-} \rightarrow nCO_2 + (n + 1)H_2O + (6n + 2)\bar{e}$
Реакция на катоде	$O_2 + 4\bar{e} \rightarrow 2O_2$
Охладитель	Избыточный воздух
КПД элемента, %	≈66
КПД ТЭУ, %	45–65*
Диапазон мощности ЭУ, кВт	1–2000
Сфера применения	Стационарные, гибридные, транспортные, переносные

В последние годы отмечается рост реализации энергоустановок с топливными элементами на мировом рынке. Наиболее популярным видом являются высокотемпературные топливные элементы с керамической мембраной, получившие преимущество использования в энергетике, так как обладают самым высоким коэффициентом полезного действия, пусть и имеют небольшой диапазон маневрирования мощности. ЭУ на базе топливных элементов дает возможность получить более высокий коэффициент полезного действия превращения химической энергии топлива в электрическую энергию: в диапазоне небольших мощностей в простом цикле и цикле совместной выработки тепловой и электрической энергии – до 60 %, где КПД в электромеханических преобразователях (ЭМП) значительно ниже, в диапазоне больших нагрузок в гибридном цикле с газотурбинными, паросиловыми и парогазовыми установками – до 75 %, располагая высокими экологическими показателями [1].

Создание и массовое использование энергетических установок на ТОТЭ наиболее перспективны в РФ так как они дают возможность обеспечивать удаленные объекты электрической и тепловой энергией.

Единичный топливный элемент состоит из следующих компонентов: анод, катод и электролит. На рисунке 2 показана схема простейшего ТОТЭ. При прохождении реакции окисления ТЭ в среде электролита, разделяющего электроды, появляется возможность получить не только тепло от протекания химической реакции, но и электрический ток в соединяющий электроды цепи. Принцип работы топливного элемента заключается в перемещении ионов через электролит при подаче окислителя и топлива в ТЭ. В ТОТЭ на катоде ионизируется воздух, и ионы кислорода проходят через электролит. У анода они достигают топлива и окисляют водород до молекулы воды и монооксид углерода до углекислого газа. В процессе этих химических взаимодействий электроны освобождаются и, если анод и катод соединены с внешней цепью, поток электронов преобразуется в постоянный ток. Процесс длится пока топливо и окислитель

поступает к элементу. Основа действия других типов ТЭ очень схожи, и каждый имеет свои принципы [1].

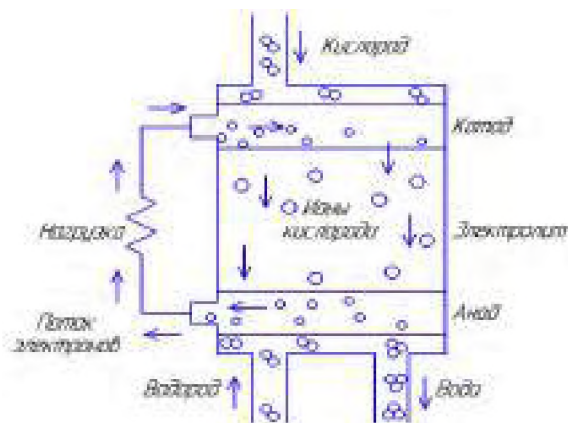


Рис. 2. Принципиальная схема действия ТОТЭ

Наиболее эффективные варианты использования ТЭ при работе с ГТУ [3]:

- ГЭУ с замещенной камерой сгорания (КС) ГТУ топливными элементами;
- ГЭУ на основе ГТУ и ТЭ с внутренней конверсией природного газа, работающая при атмосферном давлении;
- ГЭУ с ТЭ, работающими на продуктах газификации углей (мощностью до 300 МВт и более). В состав ГЭУ входит газификатор и ТОТЭ (модули которого работают при двух разных давлениях), ГТУ с регенерацией и промежуточным подводом тепла и ПТУ с промежуточным перегревом пара. Модули ТЭ, работающие при высоком (ВД) и низком (НД) давлениях, заменяют соответственно КС ГТУ ВД и НД.

Таким образом, можно считать, что разработка энергетических установок на базе твердооксидных топливных элементов является наиболее экономически выгодной технологией преобразования химической энергии топлива в электрическую, которая может конкурировать по эффективности и экологичности с топливными элементами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. // Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки – М.: НТФ "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК", 2017. – 392 с.
2. Филиппов С.П., Голодницкий А., Кашин А. // Топливные элементы и водородная энергетика – Общественно-деловой научный журнал Энергетическая политика, 2020.
3. Захаренков Е.А. Исследование и оптимизация схем и параметров гибридных электростанций на основе топливных элементов и газотурбинных установок: диссертация кандидата технических наук: 05.14.01 / Захаренков Евгений Алексеевич; [Место защиты: Моск. энергет. ин-т]. – Москва, 2009. – 120 с.
4. Лоскутников А.А., Горюнов И.М., Бакиров Ф.Г. // Термодинамический облик комбинированных энергоустановок на базе ГТУ и ТОТЭ / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. – № 3-1 (27). – С. 370-379.
5. Welaya, Y.M.A., El Gohary, M.M. and Ammar, N.R., 2011. A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 3(2), pp.141-149

Научный руководитель: к.т.н. Е.А. Ларин, профессор кафедры ТАЭ ИЭ СГТУ.



# APPLICABILITY OF LASER TECHNOLOGY AS AN ALTERNATIVE TO HYDRAULIC FRACTURING

G.H. Kerim, B.B. Soltanmyrat, A.Y. Ayna

International Oil and Gas University named after Yagshigeldi Kakayew  
Oil and Gas faculty, Development of oil and gas reservoirs department

## Introduction

Hydraulic fracturing is the well stimulation technique which is used to extract oil and gas from unconventional and low permeability conventional reservoirs. This is achieved by pumping the fracturing liquid fluid into formation with such high pressure that exceeds the fracture gradient of the rock. Hydraulic fracturing was thought best stimulation technique until nowadays. But its increased usage created several challenges and limitations. Major of them are large amount of water usage, requirement of high injection pressure, methane infiltration in aquifers, groundwater contamination, wastewater disposal and air pollution. By considering these challenges and limitations, an alternative to hydraulic fracturing is required. Main alternatives are explosive, electrical, nitrogen gas, cryogenic and laser fracturing.

## Literature review

One of the old method of fracturing the well without using liquid fluid is explosive fracturing that was commonly used between 1860s and 1940s. This method is effective but dangerous. Several problems encountered, such as wellbore damage and safety hazards. Schmidt et al (1980) stated that propellants have advantages over explosives which they deflagrate rather than detonate.

Another alternative to hydraulic fracturing is electrical fracturing that uses induced mechanical loads into rock. Melton and Cross (1967) conducted tests on mine tunnel to analyze the electrical fracturing. After the test, authors concluded that additional experiments are required to accept the feasibility of electrical fracturing because fractures were observed only near distances from borehole. Kalaydjian and Goffé (2012) reported that currently this technique is not viable alternative because permeability increases only few meters from wellbore.

For water sensitive formations, nitrogen gas will prevent the clay swelling which is one of main problems for slickwater fracturing. However, low density and low viscosity of nitrogen makes it poor proppant carrier and increases the required pumping pressure. Gandossi (2013) stated that application of this technique is only for shallow formations.

Cryogenic fracturing uses cold fluids to achieve the formation fracture. Even liquid fluid is used in this technique, it is not considered as hydraulic fracturing because injected pressure is lower than the formation rock strength. Unlike other techniques, in this technique pressure is not the main factor which fractures the formation but cold fluids like liquid CO<sub>2</sub> or nitrogen. Mueller et al (2012) presented a method that combines hydraulic fracturing with thermal shock fracturing that is caused by the injection of cold liquid CO<sub>2</sub>. Authors indicated that long time is required for the initiation of formation fracturing. Continuous injection of liquid CO<sub>2</sub> is required for several years and production would start after 2 years from the beginning of treatment. Requirement of large quantity of liquid CO<sub>2</sub> is another challenge of this technique.

There are 2 methods to destroy rocks namely, mechanical and thermal. Mechanical method is when the induced stress exceeds rock's internal strength. Thermal method is when applied heat exceeds the melting temperature of minerals that are present in the composition of rock. Laser destroys rocks in 3 ways: spallation, melting and vaporizing due to the increase in local temperature. When laser beams radiated to rock surfaces, they will be reflected, distributed and absorbed.

The laser-rock interaction efficiency is determined due to specific energy (SE). SE is common unit used for laser-rock interaction. It can be defined by Behrmann (1995):

$$SE = \frac{E}{V}. \quad (1)$$

Where SE is specific energy in kJ/cc, E is energy required in kJ and V is volume removed in cc. Specific energy shows the energy consumed to remove a cubic centimeter of rock. Lower values of specific energy indicate less energy consumed, hence more efficient and vice versa.

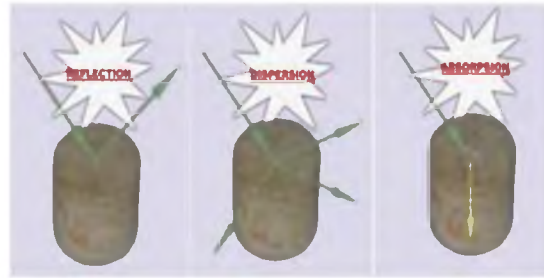


Fig. 1. Reaction of laser beams when in contact with rock surfaces (Source: Bakhtbidar et al, 2011)

Graves et al (1999) conducted laboratory tests at U.S. Air Force’s high power laser research facility using high power Chemical Oxygen-Iodine Laser (COIL). More than 100 rock samples were tested under varying laser power. Limestone showed highest penetration rate, followed by shale and Mesaverde shaly sandstone.

Batarseh (2001) tested several rock samples using high laser power varying from 2 kW up to 6 kW. Results showed that high power laser can penetrate all rock types regardless of their compressive strength and hardness. Also fractures were observed in sandstone and shale.

The length of penetration is directly proportional to lasing time and laser power while keeping diameter constant to optimize the penetration. Batarseh (2001) presented both relationships in his work.

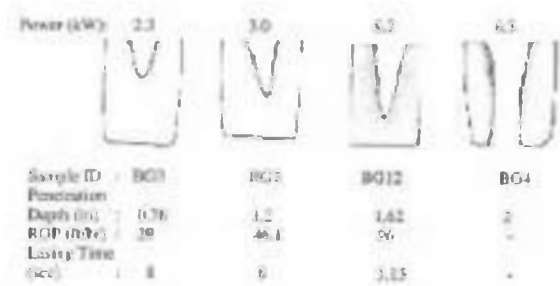


Fig. 2. Effect of laser power on penetration depth of Berea sandstone (Source: Batarseh, 2001)

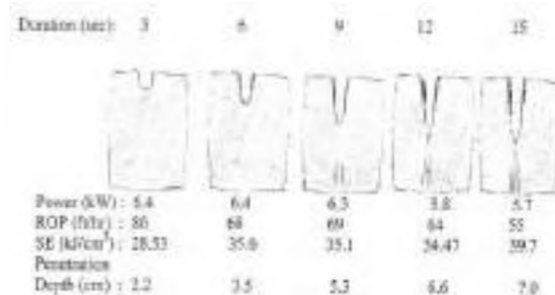


Fig. 3. Effect of lasing time on length of penetration for Berea sandstone (Source: Batarseh, 2001)

Xu et al (2004) conducted several experiments using 1,6 kW Nd:YAG laser for different sandstone rock samples to see and analyze the formation fracture initiation and length of penetration. From the results it was clear to observe formation fractures.

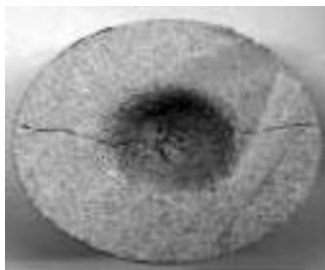


Fig. 4. Fracture of sandstone sample exposed to 1,6 kW Nd:YAG laser (Source: Xu et al, 2004)



Fig. 5. Penetrated sandstone core exposed to 1,6 kW Nd:YAG laser (Source: Xu et al, 2004)

According to Xu et al (2004), when sandstone core is exposed to 1.6 kW Nd:YAG laser for 80 seconds, a hole of 25 mm diameter and 100 mm length was penetrated.

In addition, Graves and Bailo (2005) presented the results of their study in which it was clear to see fractures from SEM image of shale rock sample.

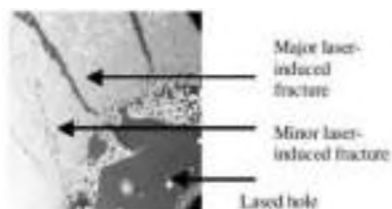


Figure 6: SEM image of lased shale showing fractures (Source: Graves and Bailo, 2005)



Figure 7: Penetrated limestone core exposed to 5,34 kW fiber laser (Source: Gahan and Batarseh, 2005)

Gahan and Batarseh (2005) showed that a hole with 50 mm diameter and 310 mm length was created when limestone core was exposed to 5.34 kW fiber laser.

#### REFERERANCE:

1. Bakhtbidar M., Ghorbankhani M., Alimohammadi M., Kazemi Esfeh M. R., & Rezaei P. (2011). Application of Laser Technology for Oil and Gas Wells Perforation, Society of Petroleum Engineers.
2. Batarseh S.I. (2001). Application of Laser Technology in the Oil and Gas Industry: An Analysis of High Power Laser-Rock Interaction and Its Effect on Altering Rock Properties and Behavior. PhD Dissertation, Colorado School of Mines.
3. Batarseh, S. I., Abass, H. H., Al-Mulhem, A. A., & Habib, N. S. (2012). High Power Laser Application in Openhole Multiple Fracturing with an Overview of Laser Research; Past, Present and Future, Society of Petroleum Engineers.
4. Behrmann, L. A. 1995. Under Balance Criteria for Minimum Perforation Damage. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Netherlands, 14-16 May 1995*.
5. Gahan, B.C., & Batarseh, S. (2005). Laser Drilling – Drilling with the Power of Light. DOE Annual Technical Progress Report. DOE Award Number: DEFC26- 00NT40917.
6. Graves, R. M., & O'Brien D. G. (1999). StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in 21<sup>st</sup> Century, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, SPE 56625.

Scientific adviser: Ph.D in Oil and Gas sciences Ogulgerek Berdimyradowa, head of Development of oil and gas reservoirs department.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ

А.А. Лавренчук<sup>1</sup>, М.Ю. Сперанский<sup>2</sup>, П.В. Поваляев<sup>3</sup>

Томский политехнический университет,

<sup>1</sup>ИШЭ, ОЭЭ, 3-А9-26, <sup>2</sup>ИШЭ, ОЭЭ, 3-А9-42, <sup>3</sup>ИШИТР, ОАР, А1-48

В настоящее время внимание современной промышленности направлено на поиск и развитие новых методов переработки вольфрамсодержащих руд и органических отходов с целью получения востребованных материалов, например, карбида вольфрама. Поиск таких методов переработки обусловлен стремлением к снижению энергетических и временных затрат на процесс переработки и синтеза материалов.

Карбид вольфрама обладает уникальными характеристиками, а именно невосприимчивостью к окислению, пластичностью под высокими нагрузками, сохранением высокой твер-

дости при высоких температурах, а также данное соединение является низкотоксичным веществом и устойчиво ко многим видам кислот. Данное соединение является сырьевой основой для производства сверхтвердых элементов различных инструментов [1]. Порошки и покрытия на основе карбида вольфрама получают следующими методами: осаждением из газовой фазы [2], обработкой поверхностей высокоинтенсивными электронными и ионными пучками [3], механохимическим синтезом в шаровых мельницах [4], генерацией плазменных пучков [5–7] и карботермическим восстановлением в резистивных и дуговых печах (в вакууме или инертной среде) [8–10]. Для реализации выше перечисленных методов в качестве исходных компонентов используются чистый вольфрам или различные оксиды данного соединения, полученные из вольфрамовой руды.

Недостатками вышеуказанных способов синтеза материалов являются значительные энергетические, капитальные и операционные затраты, что вызвано использованием дорогостоящего оборудования для создания вакуума или обеспечения инертной среды в реакторной зоне. Также большое количество технологических операций, необходимых для получения конечного продукта в жизненном цикле вольфрамовой руды определяет высокую стоимость и необходимость использования множества типов различных единиц специального оборудования. Безвакуумный электродуговой метод позволяет снизить затраты на синтез материалов, что связано с его конструктивными преимуществами: отказ от дорогостоящего вакуумного оборудования ввиду особенности методики и возможностью синтеза материалов в атмосфере воздуха, а также быстротой протекающих процессов, позволяющих сократить время синтеза. Этот относительно новый метод требует проведения исследований в области повышения производительности, дальнейшего повышения энергоэффективности. В данной работе представлены результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований температурных режимов работы электродов разрядного контура плазменного реактора переменного тока.

Исследование по определению температурных режимов работы проводилось на лабораторном безвакуумном электродуговом реакторе переменного тока, который ранее был модернизирован [11]. Электродуговой плазменный реактор представляет собой реактор совмещенного типа с вертикальным расположением электродов. При конструкции реактора с вертикальным расположением электродов дуговой разряд инициируется непосредственно между первым графитовым электродом и обрабатываемым материалом, заложенным в полость второго электрода, что позволяет обеспечить необходимые температурные условия для синтеза большинства материалов на основе углерода (известно, что температура в месте инициации дугового разряда может достигать порядка 10000 °С [12]). Процесс синтеза происходит без использования инертной среды или дополнительного оборудования для создания вакуума, но при этом продукты синтеза не окисляются что связано с особенностями устройства и работой электродугового реактора [13].

Электродуговой плазменный реактор состоит из регулируемого силового источника питания переменного тока, выполненного на базе промышленного двухфазного сварочного трансформатора марки ТДМ 450, такой источник питания имеет рабочий выходной ток от 80 А до 450 А, напряжение питания 380 В и напряжение холостого хода 63 В. Исходные материалы помещаются на дно цилиндрического графитового тигля, устанавливаемого на массивную медную шину, к которой подводится питание одного из выводов источника тока, тем самым обеспечивается максимальная площадь контакта и устойчивое положение тигля. Ко второму выходу источника питания подключается латунный стяжной захват, в котором фиксируется второй электрод, выполненный из мелкозернистого плотного графита. Подача второго электрода в реакторную зону (полость тигля) происходит с помощью подвижного ручного привода, после соприкосновения электрода с тиглем, графитовый электрод отводится на определенное расстояние в результате чего происходит образование дугового разряда.

Основными параметрами процесса электродугового синтеза материалов являются вольтамперные характеристики и температура зоны реакции. Для определения значения силы тока использовались токовые клещи марки TD-3348, данный прибор позволяет регистрировать зна-

чения силы тока до 1000 А. Регистрация напряжения проводилась с использованием мультиметра UNI-T UT 58С. С помощью высокотемпературного пирометра DT-9862S производилось измерение температуры на внешней стенке графитового тигля.

Регулирование процесса переработки и синтеза материалов в электродуговых реакторах может осуществляться путем изменения параметров силы тока и времени воздействия дугового разряда на образец. В данной работе были произведены исследования по изменению времени воздействия электродугового разряда от 10 до 50 с и шагом в 10 секунд при постоянном значении тока  $155 \pm 5$  А, на пустой графитовый тигель с целью определения влияния времени воздействия дугового разряда на массовый баланс системы. В таблице 1 показаны основные параметры работы электродугового реактора и их влияние на массовый баланс компонентов разрядного контура реактора, полученные в результате серии экспериментов по изменению времени воздействия электродугового разряда. Количество выделившейся энергии рассчитано по электрической мощности и времени воздействия; в рассматриваемой системе выделяется от 65 до 325 кДж энергии за время до 50 секунд.

Таблица 1. Влияние параметров электродугового реактора переменного тока на температурные режимы и массовый баланс элементов системы

№ Эксп.	Время, сек	Ток, А	Напряжение, В	Количество энергии, кДж	Максимальная температура, °С	$\Delta m$ электрода, г	$\Delta m$ тигля, г
1	10	155	42	65	1190,3	-0,412	0,116
2	20	155	42	130	1227,7	-0,533	0,127
3	30	155	42	195	1260,0	-0,694	0,244
4	40	155	42	260	1371,9	-0,872	0,302
5	50	155	42	325	1545,6	-1,175	0,498

Исходя из данных полученных из серии экспериментов по изменению длительности воздействия электродугового разряда на графитовый тигель наблюдается изменение, а именно увеличение массы тигля и уменьшение массы второго электрода. Следует отметить, что увеличение времени воздействия разряда, при сохранении значения силы тока, приводит к увеличению температуры реакторной зоны, что отображено на рисунке 1. Изменение массы элементов системы можно объяснить высокими температурами при горении дугового разряда, в результате чего происходит разрушение элементов системы с отделением углерода. Выделившийся углерод оседает на стенках графитового тигля, что приводит к увеличению его массы, также углерод при окислении кислородом образуются газы СО и СО<sub>2</sub> что приводит к экранированию зоны реакции и предотвращает окисление синтезируемого продукта.

По данным измерений температуры (таблица 1, рисунок 1) видно, что максимальная температура была достигнута при максимальном времени воздействия дуги, данный факт можно связать с процессом нагрева тигля. Увеличение времени воздействия позволяет обеспечить наибольший прогрев графитового тигля, со стенки которого производилось измерение температуры, в результате чего при максимальном времени была достигнута наибольшая зарегистрированная температура, при меньших значениях времени наблюдаются температуры ниже максимальной, что связано с недостаточным нагревом графитового тигля.

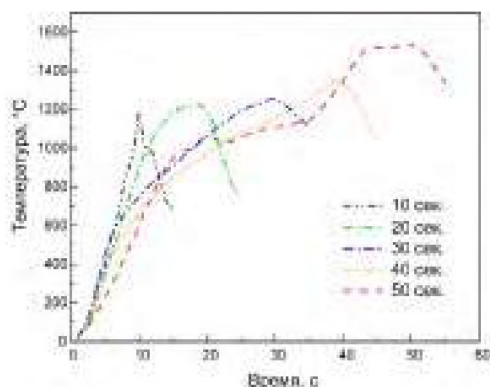


Рис. 1. Рост температуры поверхности тигля

Также в процессе экспериментов была достигнута температура тигля на внешней стенке в 1545 °С, что достаточно для синтеза карбида вольфрама безвакуумным электродуговым методом (температура синтеза карбида вольфрама 1200 °С [14]).

При исследовании режимов работы лабораторного атмосферного электродугового реактора переменного тока были получены основные параметры работы реактора и их влияние на массовый баланс системы. В процессе анализа температурных режимов работы была определена максимальная температура – 1545 °С, достигаемая при заданных параметрах системы, что позволяет утверждать о возможности синтеза карбида вольфрама на электродуговом реакторе переменного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Konyashin I., Klyachko L.I. History of cemented carbides in the Soviet Union // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2015. Vol. 49, № 1. P. 9–26.
2. Dushik V. V., Rozhanskii N. V., Lifshits V.O., Rybkina T. V., Kuzmin V.P. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes // *Materials Letters*. Elsevier, 2018. Vol. 228. P. 164–167.
3. Remnev G.E., Uglov V. V., Shymanski V.I., Pavlov S.K., Kuleshov A.K. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam // *Applied Surface Science*. Elsevier, 2014. Vol. 310. P. 204–209.
4. Fernique R.M.T., Savoie S., Gariépy M., Braidy N., Schulz R. A simple route to produce tungsten carbide powders by high-energy ball milling and annealing // *Ceramics International*. Elsevier, 2020. Vol. 46, № 2. P. 1736–1742.
5. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2009. Vol. 481, № 1–2. P. 274–277.
6. Dash T., Nayak B.B. Tungsten carbide – Titanium carbide composite preparation by arc plasma melting and its characterization // *Ceramics International*. Elsevier, 2019. Vol. 45, № 4. P. 4771–4780.
7. Ланцев Е.А., Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Болдин М.С., Цветков Ю.В., Благовещенский Ю.В., Исаева Н.В., Андреев П.В., Сметанина К.Е. Исследование кинетики электроимпульсного плазменного спекания ультрамелкозернистых твердых сплавов WC-10% Co // *Физика и химия обработки материалов. Общество с ограниченной ответственностью Интерконтакт Наука*, 2019. № 6. P. 36.
8. Wang K.-F., Sun G.-D., Wu Y.-D., Zhang G.-H. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction–carburization process // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2019. Vol. 784. P. 362–369.
9. Красильников В.Н., Поляков Е.В., Хлебников Н.А., Кузнецов М.В., Таракина Н.В. Нанодисперсный карбид вольфрама (WC) и углеродсодержащие нанокomпозиты (WC: NC): синтез, морфология, микроструктура // *Химия твердого тела и функциональные материалы–2016", XI семинар "Термодинамика и материаловедение"*. 2016. P. 184–186.
10. Пак А.Я., Якич Т.Ю., Кокорина А.И. Электродуговой синтез карбида вольфрама из рудных концентратов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального ...*, 2021. Vol. 332, № 5. P. 170–178.
11. Модернизация электродугового реактора для синтеза порошковых материалов для энергетики / Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А., Пак А.Я. // *Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии и материалы»*. - Севастополь: 2022. – С. 247-249.

12. Zhao J., Su Y., Yang Z., Wei L., Wang Y., Zhang Y. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties // Carbon. Elsevier, 2013. Vol. 58. P. 92–98.
13. Pak A.Y., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Elsevier, 2020. Vol. 93. P. 105343.
14. Pervikov A. V., Krinitcyn M.G., Glazkova E.A., Rodkevich N.G., Lerner M.I. Synthesis of tungsten carbide from bimodal tungsten powder produced by electrical explosion of wire // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Elsevier, 2022. Vol. 103. P. 105733.

Работа выполнена в рамках программы Гос.задания ВУЗАм (FSWW-2022-0018).

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **КОНФИГУРИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ**

А.В. Клоков, А.С. Тутунин

Московский государственный технический университет  
Э, Э2, группа Э2-73Б

При проектировании автономных энергоустановок необходимо взвешенно принимать решение по выбору оптимальной конфигурации системы. Важность этого шага особенно проявляется при разработке автономных систем, требующих стабильного бесперебойного электроснабжения. Как правило, это достигается организацией энергосистемы, включающей в себя возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Причем, для достижения максимальной эффективности энергосистемы и решения проблемы с нестабильностью генерации ВИЭ, она должна включать в себя не только накопители энергии, но и являться гибридной. Системы, получающие энергию из единственного источника, зачастую не в состоянии удовлетворять потребность в бесперебойности энергоснабжения. Также, по сравнению с гибридными, они являются чрезмерно габаритными, что значительно увеличивает первоначальные затраты на оборудование.

В данной работе предлагаются принципы конфигурирования гибридной системы автономного энергоснабжения, состоящей из солнечной батареи (СБ), ветроэнергетической установки (ВЭУ) и аккумуляторной батареи (АБ) на основе метеорологических данных с временным разрешением в 4 часа, полученным из [1]. Математическая модель системы энергоснабжения основана на зависимостях мощности, вырабатываемой СБ и ВЭУ, от условий окружающей среды и энергии, запасаемой в АБ, от времени.

Мощность ( $W_{SP}$ , Вт), вырабатываемая СБ [2], зависит от плотности солнечного излучения, падающего по нормали к поверхности СБ, ( $I$ , Вт/м<sup>2</sup>) и температуры самой СБ ( $T_{SP}$ , °С):

$$W_{SP} = P_{SP} * \frac{I}{I_{ref}} * \left( 1 + K_T * (T_{ref} - T_{amb} - 0,0256 * I) \right), \quad (1)$$

где  $P_{сол}$  – установленная мощность СБ (Вт);  $I_{ref}$  – номинальная инсоляция на горизонтальную поверхность (1000 Вт/м<sup>2</sup>);  $T_{ref}$  – номинальная рабочая температура СБ (°С);  $K_T$  – температурный коэффициент (1/°С);  $T_{amb}$  – температура окружающей среды (°С).

Мощность ( $W_W$ , Вт), вырабатываемая ВЭУ, зависит от скорости ветра ( $V$ , м/с) и плотности набегающего потока воздуха ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>):

$$W_W = \begin{cases} 0, \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_{ref}}} V < V_{min} \\ P_W * \left( \frac{\frac{\rho}{\rho_{ref}} * V^3 - V_{min}^3}{V_{ref}^3 - V_{min}^3} \right), V_{min} \leq \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_{ref}}} V < V_{max}, \\ P_W * \left( \frac{V_{max}^3 - V_{min}^3}{V_{ref}^3 - V_{min}^3} \right), V_{max} \leq \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_{ref}}} V \end{cases} \quad (4)$$

где  $P_W$  – установленная мощность ВЭУ (Вт);  $V_{min}$  – скорость включения (cut-in) ВЭУ (м/с);  $V_{max}$  – скорость торможения (cut-out) ВЭУ (м/с);  $V_{ref}$  – номинальная скорость набегающего потока воздуха (м/с);  $\rho_{ref}$  – плотность набегающего потока воздуха при нормальных условиях (1,29 кг/м<sup>3</sup>).

Энергия ( $E_B$ , Дж), запасенная в аккумуляторе [2]:

$$E_B = (1 - \sigma) * E_B^{t-\Delta t} + E_B^C, \quad (8)$$

где  $E_B^{t-\Delta t}$  – энергия, запасенная в аккумуляторе, на предыдущей итерации (Дж);  $W_N$  – мощность питаемого устройства (Вт);  $\sigma$  – степень саморазряда АБ за  $\Delta t$ ;  $E_B^C$  – разность между выработанной и потребленной энергиями (Дж).

Алгоритм расчета данных параметров и  $SoC$  в зависимости от времени основан на анализе (для каждого 4-х часового промежутка) соотношения между вырабатываемой, потребляемой и запасенной в АБ энергиями. Алгоритм расчета части срока службы АБ ( $ULT_{\Sigma}$ ), которая будет израсходована в процессе эксплуатации АБ в течении расчетного промежутка времени, основан на анализе зависимости  $SoC$  от времени. В математической модели учитывается влияние процесса разрядки АБ на срок службы АБ.

В качестве примера работы методики используются метеорологические данные станции, расположенной в селе Мейныпильгыно (Чукотка) по средней скорости ветра, инсоляции, температуре воздуха и атмосферному давлению [1]. Также, для сравнения, проводится расчет по осредненным по месяцам: метеорологическим данным метеостанции, расположенной в селе Мейныпильгыно; метеорологическим данным территории села Мейныпильгыно, полученным в рамках проекта POWER Исследовательского центра NASA в Лэнгли (LaRC), финансируемого в рамках программы NASA по наукам о Земле и прикладным наукам [3]; климатические данные метеостанции (ближайшей к селу Мейныпильгыно, по которой имеются все необходимые данные), расположенной в селе Марково [4]. Стоит отметить, что по причине низкой степени детализации осредненных данных, оказывается невозможным анализ влияния емкости АБ на работоспособность автономной системы, и это является одним из главных недостатков методик, основанных на использовании осредненных данных.

Наборы варьируемых при расчете параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры энергосистемы

Отношение установленной мощности солнечных панелей к суммарной установленной мощности, $SWR$	{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1}
$SoC^{min}$	{0.8, 0.6, 0.4}
Суммарная установленная мощность, $W_{\Sigma}$	{10, 15, 20, 25} * $W_N$ , Вт
Емкость накопителей энергии, $E_B^{inst}$	{0, 1, 2, 5, 10, 15} * $W_{\Sigma}$ , Вт*ч

При расчете рассматриваются различные типы АБ производителя SunStonePower: LiFePO4 SLP012-200, AGM ML12-200, гелевый MLG12-200. Данные о зависимости срока службы от глубины разряда и зависимости емкости АБ от температуры взяты с сайта производителя [5], проанализированы и преобразованы в удобные для анализа зависимости. Степень саморазряда, за рассматриваемые 4-х часовые промежутки времени для всех моделей АБ принимается  $\sigma = 0,4 * 10^{-3}$ . Стоимости данных моделей АБ взяты с сайта официального Российского дистрибьютора SunStonePower [6]. Данные о стоимости и основных технических характеристиках СБ (на примере HVL-390/НТ) и ВЭУ (на примере ROSVETRO FX-1000) взяты с сайтов производителей [7] и [8], соответственно. В качестве потребителя энергии принимается система мониторинга с  $W_N = 25$  Вт. КПД устройств преобразователей принимается  $\eta = 0,95$ .



В результате, всего было смоделировано 1980 вариантов системы энергоснабжения на основе метеоданных. На рисунке 1 представлены области, в которых распложены множества вариантов конфигураций в зависимости от модели АБ и минимальной глубины разряда («Модель»/«SoC<sup>min</sup>»). По горизонтальной оси представлена стоимость конфигурации в год, исходя из сроков службы СБ, ВЭУ и АБ.

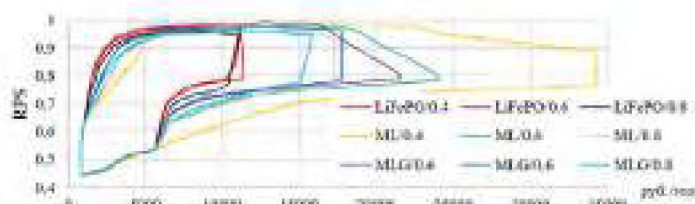


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы от стоимости конфигурации (расчет по метеоданным)

На основе результатов расчета, можно сделать выводы о работоспособности той или иной конфигурации, и, соответственно, подобрать наиболее подходящий вариант как по критерию максимальной надежности, так и по критерию минимальной стоимости.

Результаты расчета по осредненным данным представлены на рисунке 2, также в виде областей для различных источников данных. Так как учесть влияние АБ на вероятность безотказной работы при осредненным данным невозможно, емкость АБ принимается равной 0. Соответственно, по горизонтальной оси представлена стоимость конфигурации в год, исходя из сроков службы СБ и ВЭУ. Для сравнения, на рисунке представлена область для наиболее выгодных конфигураций на основе модели АБ LiFePO4 SLP012-200 при SoC<sup>min</sup> = 0,4 за вычетом стоимости АБ.

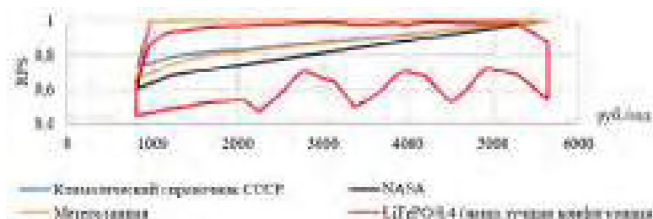


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы от стоимости конфигурации для климатических данных из различных источников

Стоит отметить, что в случае расчета по осредненным данным, подавляющее большинство конфигураций имеют вероятность безотказной работы равную 1 (идеально безотказная система). Хотя, при расчете по реальным метеорологическим данным с высоким разрешением, идеальная работа системы недостижима, а наиболее эффективные варианты конфигураций (RPS≈0,99) имеют стоимости, отличающиеся на порядки от наиболее выгодных вариантов с RPS=1, полученных при расчете по осредненным данным. Большую долю стоимости энергосистемы составляет стоимость АБ, соответственно, при проектировании целесообразно уделять особое внимание оптимизации работы АБ, как части данной системы. Как было отмечено ранее, метод, основанный на расчете по климатическим данным, не позволяет учитывать влияние АБ при анализе работоспособности проектируемой системы.

В случае необходимости предугадать погодные условия на годы вперед, использование многолетних осредненных климатических данных при проектировании сетевых генерирующих станций на основе ВИЭ дает наиболее надежные результаты. Но, данный подход неприемлем при проектировании автономных энергосистем, так как утрачивается возможность детального анализа поведения системы, что приводит к результатам, значительно отличающимся от полученных по реальным метеорологическим данным с высоким временным разрешением.

Таким образом, были рассмотрены принципы анализа работоспособности системы энергоснабжения с постоянной нагрузкой на основе реальных метеорологических данных с высо-

ким временным разрешением. В качестве примера, были рассчитаны критерии работоспособности набора различных вариантов конфигурации систем по метеорологическим данным с Чукотки, а также по климатическим данным. В результате, для данного региона, подходящими являются гибридные системы, использующие в качестве источника энергии как солнечные батареи, так и ветрогенераторы в соотношении 0,7–0,8 (в пользу солнечных батарей). В случае необходимости обеспечения предельно высоких вероятностей безотказной работы, более целесообразным вариантом является установка дорогостоящей системы с соотношением установленной мощности равным 0,9 (в пользу солнечных батарей). Также отмечено значительное различие результатов, полученных по реальным метеорологическим и осредненным климатическим данным. Главный недостаток климатических, осредненных по времени за несколько лет, данных заключается в том, что они исключают нулевую выработку энергии в отличие от реальных условий при неблагоприятной погоде. Таким образом, учет метеорологических данных особенно важен при проектировании автономных энергосистем.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ID станции: 61356. URL: <https://www.ecowitt.net> (дата обращения: 30.09.2022).
2. Best battery storage technologies of solar photovoltaic systems for desalination plant using the results of multi optimization algorithms and sustainable development goals / T. Salameh, P. P. Kumar, A.G. Olabi, K. Obaideen, E.T. Sayed, H.M. Maghrabie, M.A. Abdelkareem // Journal of Energy Storage. – 2022. – V. 55. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105312>.
3. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (дата обращения: 20.10.2022).
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1990. Ч. 1-6, вып. 33. 567 с.
5. URL: <https://www.sunstonepower.com/products.html> (дата обращения: 21.10.2022).
6. URL: <https://e-solarpower.ru> (дата обращения: 24.10.2022).
7. URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-390hjt/> (дата обращения: 24.10.2022).
8. URL: <https://rosvetrogenerator.ru/products/rosvetro-fx-1000.html> (дата обращения: 24.10.2022).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Архангельской области (грант № 22-19-20026).

Научный руководитель: к.т.н. Е.Ю. Локтионов, с.н.с. САФУ.

## **НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АТОМНОЙ НАУКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

Е.И. Старунская

Санкт-Петербургский политехнический университет

ИЭ, ВШВЭ, группа 3231302/00101

Целью доклада является рассмотрение концепции БРЕСТ – быстрого реактора естественной безопасности со свинцовым теплоносителем и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, работающего в замкнутом ядерном топливном цикле (ЯТЦ). Актуальность данной темы определяется ограничением топливных ресурсов в мире и необходимостью эффективного использования уранового сырья при многократном рециклировании ядерного топ-

лива в замкнутом ядерном топливном цикле (ЯТЦ). Также целью доклада является рассмотрение преимуществ нового материала для теплообменных труб парогенератора реактора БРЕСТ-ОД-300 – стали марки ЭП302М-Ш.

В 2021 году выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России составила 1 114 548,0 млн кВт·ч (рост к объему производства электроэнергии в 2020 году составил 6,4 %) [1]. С каждым годом объем производства электрической энергии возрастает. Для устойчивого энергообеспечения потребителей в дальнейшем необходимо развитие атомных электростанций. Россия на настоящий момент является мировым лидером в атомной энергетике и ядерно-радиационных технологиях. Отрасль атомной энергетике наращивает свой потенциал не только в области ядерной энергетике, а также в сфере цифровых, квантовых, лазерных и других передовых технологий. Вклад атомных электростанций в энергетике с каждым годом возрастает. АЭС в России являются станциями федерального уровня, в связи с этим правительство нашей страны уделяет большое внимание развитию атомной отрасли, 4 февраля 2021 года на встрече Михаила Мишустина с главой «Росатома» Алексеем Лихачевым было объявлено об утверждении правительством комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергетике в РФ на период до 2024 года» (РТТН) [2].

Одним из направлений развития атомной энергетике является реализуемый Росатомом проект «Прорыв» [3]. Он включает в себя разработку технологической платформы с замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ) на основе реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300. Основой ядерного топлива является уран. Наиболее распространенными видами урана в природе являются изотоп с массой 238 и изотоп 235. В природном уране они содержатся в соотношении примерно 99,3 % и 0,72 %, поэтому создание реактора, работающего в замкнутом ядерном топливном цикле, имеет высокую практическую значимость.

Свинцовый теплоноситель является слабо активируемым и радиационно-стойким, имеет высокую температуру кипения ( $T_{\text{кип}} > 1749^\circ\text{C}$ ), также его преимуществом является инертность при контакте с воздухом и водой. Применение высококипящего свинцового теплоносителя более безопасно по сравнению с натриевым: исключает аварии с потерей теплоносителя, с пожарами, паровыми и водородными взрывами и не требует высокого давления в контуре [3].

Преобладание нейтронов деления в БРЕСТ позволяет преобразовать  $^{238}\text{U}$  в  $^{239}\text{Pu}$  с коэффициентом воспроизводства  $K_{\text{В}} > 1$ . Содержание изотопа  $^{238}\text{U}$  в природном уране составляет более 99 %, следовательно, применение БРЕСТ увеличивает эффективность использования урана. Таким образом, реализуется экономическая целесообразность разработки бедных урановых руд, следовательно, значительно расширяется ресурсная база атомной энергетике. Что касается применяемого в реакторе топлива, то плотное высокотеплопроводное нитридное уран-плутониевое топливо позволяет работать при относительно небольшой рабочей температуре ( $T < 1000^\circ\text{C}$ ), следствием чего является небольшой запас аккумулированной в топливе тепловой энергии и также небольшой выход летучих и газообразных продуктов деления из топлива (в отличие, например от оксидного топлива, свойством которого является низкое удержание газообразных продуктов деления, что является причиной давления на оболочку; поэтому преимуществом нитридного топлива является низкое давление на оболочку и как следствие сохранение целостности ТВЭЛов) [2]. Сочетание свойств свинцового теплоносителя и нитридного топлива создает условия для полного воспроизводства делящихся нуклидов в активной зоне и стабилизации размножающих свойств реактора. Данная технология позволяет работать реактору в равновесном топливном режиме при малом запасе реактивности, исключить аварии с неконтролируемым ростом мощности, разрушением топлива и выбросом радиоактивности [6]. Ранее при реализации программ развития БР и ЗЯТЦ как в нашей стране, так и в мире была применена технология с использованием натриевого теплоносителя, оксидного топлива и гидро-металлургической технологии переработки ОЯТ. Практически любая утечка натрия на АЭС в атмосферу помещения связана с опасностью его возгорания.

Новый реактор – это часть опытного демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК), который включает три взаимосвязанных между собой уникальных объекта: модуль по фабрикации уран-плутониевого ядерного топлива; энергоблок БРЕСТ-ОД-300; и модуль по переработке используемого облученного топлива [3]. Таким образом, впервые в мире реализовано АЭС с быстрым реактором и пристанционный замкнутый ядерный топливный цикл на одной платформе. Облученное топливо после переработки (очистка облученного топлива от продуктов деления) будет направляться на рефабрикацию (повторное изготовление свежего топлива) [5]. Таким образом, минорные актиноиды в составе регенерируемого топлива возвращаются для трансмутации в активную зону реактора, а радиационные отходы направляют в специальные хранилища на длительную выдержку с последующим захоронением без нарушения природного радиационного баланса. С реализацией проекта «Прорыв» появляется возможность практически полностью автономной и независимой от внешних поставок системы.

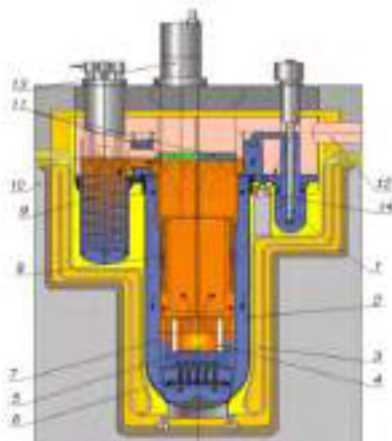


Рис. 1. Схема реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем:

- 1 – насос 2 – корпус, 3 – теплоизоляция, 4 – СУЗ,
- 5 – активная зона, 6 – опорные стояки,
- 7 – разделительная обечайка, 8 – хранилище ТВС,
- 9 – парогенератор, 10 – бетонная шахта,
- 11 – поворотные пробки, 12 – аварийный сброс,
- 13 – перегрузочная машина, 14 – опоры



Рис. 2. Схема реализации топливного цикла в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем

Для создания реакторных установок нового поколения со свинцовым теплоносителем необходима разработка новых инновационных конструкционных материалов. Материал теплообменных труб парогенератора реактора БРЕСТ-ОД-300 должен иметь высокое сопротивление коррозии, причем не только в теплоносителе, который снаружи омывает теплообменные трубы, а также и изнутри, в пароводяной среде [7, 8]. Чтобы удовлетворить заданным требованиям, были разработаны следующие принципы дополнительного легирования стали ЭП302-Ш: уменьшение углерода в стали 91302М-Ш с 0,08–0,12 до 0,03 % по массе хорошо снижает склонность к коррозии и охрупчиванию после холодной деформации и теплового старения; введение азота увеличивает стойкость аустенита к коррозионным повреждениям, и повышает прочность стали, при этом высокая пластичность стали сохраняется; введение молибдена повышает стойкость к коррозионному растрескиванию в хлоридсодержащей среде; введение ванадия повышает прочностные свойства стали тем, что способствует образованию мелкодисперсных нитридов; введение вольфрама обеспечивает регулирование содержания ферритной фазы и повышает прочностные характеристики при режимах высокой температуры; стабильность аустенита повышается за счет увеличения содержания никеля, при этом коррозионная стойкость в теплоносителе не уменьшается; введение микродобавок бора повышает технологическую пластичность и ударную вязкость.

В результате разработки стали ЭП302М-Ш с улучшенными свойствами сравнительно со сталью марки ЭП302-Ш были установлены следующие показатели: ударная вязкость стали

марки ЭП302М-Ш в 2–3 раза выше, чем стали марки ЭП302-Ш; предел текучести при 550 °С ощутимо превышает показатели стандартных коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса типа Х18Н10; длительная прочность стали ЭП302М-Ш выше, чем стали ЭП302-Ш [9].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. АО «СО ЕЭС»: официальный сайт. URL: [www.so-ups.ru](http://www.so-ups.ru) (дата обращения 10.11.2022)
2. РОСАТОМ: официальный сайт. URL: <https://www.rosatom.ru/index.html> (дата обращения 10.11.2022)
3. Проект «Прорыв»: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://proyv2020.ru/o-proekte/> (дата обращения 16.11.2022)
4. Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии. // Атомная энергия. – 2020. – № 129. – С. 185-194.
5. А.В. Баловнев, В.К. Давыдов, А.П. Жирнов, А.В. Моисеев, Е.О. Солдатов. Моделирование топливного цикла реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем // Известия вузов. Ядерная энергетика – 2021 - № 4 – С. 66-75.
6. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях / В.И.Рачков [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. №5. С.20-30.
7. Драгунов Ю. Г., Лемехов В.В., Смирнов В. С., Чернецов Н.Г. Технические решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. -Атомная энергия, 2012, т. 113, вып.1, с. 58–64.
8. Драгунов Ю. Г., Лемехов В.В., Смирнов В. С., Чернецов Н.Г. Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ). – В сб.: III Межд. Научно-техническая конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетике» (МНТК-2014). Москва, АО «НИКИЭТ», 2014, т.1, с. 94–102.
9. Коростелев А.Б., Европин С.В., Державин А.Г., Вершинин И.В., Гославский О.В., Романов А.Н. Разработка новых конструкционных материалов для инновационных проектов реакторных установок-Атомная энергетика, 2012, т. 129, вып.4, с. 233–237.

Научный руководитель: д.т.н. А.Н. Беляев, профессор ВШВЭ СПбПУ.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ЭЖЕКТОРА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ГАЗОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

А.А. Овчинников

Саратовский государственный технический университет  
ИнЭТС, кафедра ПТ, группа абЭТТ

В настоящей работе предложены технические решения, направленные на устранение потерь углеводородных газов в технологии переработки нефти на Саратовском НПЗ. Рассматривается установка Л-24-6, на которой осуществляется стабилизация дизельного топлива. Получаемый в процессе стабилизации газ низкого давления имеет в своем составе пропан–бутановую и пентановую фракции (содержание в смеси 35 %) и используется как топливо в технологических трубчатых печах установки. Часть газа стабилизации в количестве 2 тысячи м<sup>3</sup>/час избыточна для печей и сбрасывается на факел, где сжигается, то есть, по существу, теряется. Полезное применение сбросной части углеводородного газа на заводе возможно, если поднять давление данного газа.

Современные варианты компримирования газа в основном предполагают использование электродвигателей для создания движения поршневой группы, винта, турбины или рабочего

колеса нагнетателя. Реже используются струйные компрессоры, так как для их работы требуется рабочая среда определенного состава и повышенного давления, что не всегда имеется на производстве. На установке Л-24-6 Саратовского НПЗ имеются технологические потоки, которые могут быть использованы в качестве эжектирующей рабочей среды в струйном компрессоре для сжатия сбрасываемого на факел газа.

Возможны два малозатратных решения компримирования низконапорного газа, не требующие потребления электроэнергии.

На установке Л-24-6 осуществляется сброс давления потока технологического продукта с 37 до 5 атмосфер. Схема использования данного потенциала давления технологического продукта для сжатия сбросных углеводородных газов, имеющих давление 0,4 атм, до давления 5 атм с использованием струйного компрессора приведена на рисунке 1. Газо-жидкостный эжектор (струйный компрессор) устанавливается на дополнительной байпасной линии, которой оборудуется переток между сепараторами высокого и низкого давления, параллельно клапану уровня сепаратора высокого давления. Данное решение дает возможность компримировать и за счет этого вывести в топливную сеть завода весь сбросной низконапорный газ при минимальных капитальных затратах и без затрат электроэнергии на механические нагнетатели.

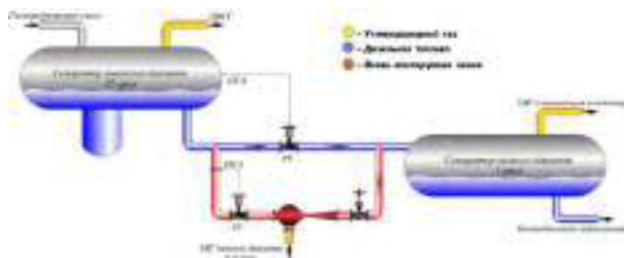


Рис. 1. Схема монтажа газо-жидкостного эжектора

Расход и давление нестабильного гидрогенизата на перетоке от реакторного блока к блоку стабилизации строго регламентированы, что идеально подходит к использованию гидрогенизата в качестве рабочей жидкости эжектора по схеме на рисунке 1.

Другим, альтернативным, вариантом является использование газового эжектора, который устанавливается на линии топливного газа высокого давления (3,5 атм) за колонной К-7 (рисунок 2). Газ высокого давления служит рабочей средой, с помощью которой сжимается избыток сбрасываемого на факел низконапорного газа от колонны К-8 установки.



Рис. 2. Схема монтажа газового эжектора

Анализ с использованием расчетных методик [1] показал, что из-за небольшой разницы давления топливного газа за колонной К-7 и давления газа в топливном коллекторе из двух рассмотренных возможных решений компримирования сбросного газа наиболее эффективным является первое из них. Использование двухфазного газо-жидкостного эжектора обеспечивает более устойчивую работу при переменных расходе и давлении низконапорного газа.

Предлагаемое решение позволит заводу сберечь до 3 т/час жидкого топлива, используемого в зимний период на печах ЭЛОУ-АВТ-6.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 573 с.

Научный руководитель: д.т.н. О.Ю. Кулешов, профессор кафедры ПТЭ ИЭ СГТУ.

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

К.А. Найпак

Санкт-Петербургский политехнический университет  
ИЭ, ВШАиТЭ, группа 3241301/10301

В современном мире трудно представить жизнь человека без его прямого использования энергии. Однако с развитием технологий и быстро идущим мировым прогрессом начинает появляться вопрос об исчерпании имеющихся энергоресурсов. Запасы органического топлива ограничены, и с каждым годом их добыча становится все менее доступной. Добываемое топливо расходуется с огромной скоростью, при этом становясь только дороже. Совсем недавно количество людей, проживающих на нашей планете, достигло 8 миллиардов, помимо этого прогнозируется, что прирост мирового населения удвоится уже к 2050 году, а это означает, что мировой энергетический спрос тоже будет продолжать расти. К тому же в настоящее время вопрос о декарбонизации энергетики стоит, как никогда, остро, т. к. человечеству энергия необходима как в количественном, так и в качественном отношении, поэтому и не должна привести к негативным влияниям на окружающую среду. Из-за всего перечисленного выше становится понятным, что миру необходимо искать альтернативные источники энергии, чистые, неиссякаемые, безопасные и надежные. В качестве такого энергоносителя может выступить водород. Водород, выработанный на атомной электростанции (АЭС) – это низкоуглеродный источник энергии, неиссякаемый и более распространенный на планете, чем ископаемое топливо. Его получение возможно осуществить несколькими способами, в основном это высокотемпературный и низкотемпературный электролиз, а также термохимические процессы (серно-йодный цикл, традиционный электролиз и паровой риформинг) [1].

Говоря о совместном производстве ядерной энергии и водорода, имеется в виду ядерная теплофикация. Ядерная теплофикация – это когда тепло, вырабатываемое атомной электростанцией, используется не только для выработки электроэнергии, но и для удовлетворения некоторых "труднодоступных для обезуглероживания" энергетических потребностей, таких как бытовое отопление и производство водорода. Это также позволяет использовать атомную станцию более маневренно, переключаясь между производством электроэнергии и теплофикацией. В настоящее время совместное производство ядерной энергии и водорода возможно только при низких температурах (около 300 °С), поскольку реакторы третьего поколения работают именно в таком диапазоне. Однако в скором времени развитие реакторов четвертого поколения, которые работают при высоких температурах (800–900 °С), позволит производить водород наиболее эффективными и дешевыми способами, к примеру, паровым риформингом, с помощью термохимических технологий или высокотемпературным электролизом [2].

Основным инструментом для экономической оценки крупномасштабного производства ядерного водорода является компьютерное моделирование, провести его предоставляется возможным с помощью компьютерной программы НЕЕР (Hydrogen Economic Evaluation Program), разработанной и выпущенной МАГАТЭ. Программа НЕЕР моделирует технологические системы с использованием технических данных и проводит анализ доходов и расходов

в части дисконтированной или постоянной стоимости, которые охватывают все основные составляющие водородной экономики, такие как производство, хранение, транспортировка и распределение, с возможностью исключения или включения конкретных деталей по требованию пользователей [3].

Так, на рисунке 1 представлены выходные данные программы НЕЕР в графическом формате. Система низкотемпературного электролиза для производства водорода интегрирована в типичную атомную электростанцию, так что необходимая электроэнергия для установки по производству водорода может подаваться реактором АЭС. Кроме того, на этом рисунке показана система хранения полученного водорода. Данный рисунок дает более глубокое понимание фундаментальных процессов расчета в НЕЕР.



*Рис. 1. Наглядный пример производства водорода с использованием технологии низкотемпературного электролиза в комбинации с атомной электростанцией с системой его хранения и необходимыми средствами для транспортировки водорода по трубопроводу*

Стоимость водорода для отдельного государства можно рассчитать, используя набор некоторых финансовых параметров, имеющих большие различия между друг другом. Финансовыми параметрами являются ставка дисконтирования (9 %), ставка процента на заемный капитал (4,5 %) и налоговая ставка (8 %), используемые для моделирования высокотемпературного реактора с газовым охлаждением и модульного реактора IV поколения с высокотемпературным газовым охлаждением с использованием серы и йода. При близком взаиморасположении водородной установки и АЭС электроэнергия, необходимая для производства водорода, будет поставляться по себестоимости. Но ввиду того, что скорость производства должна оставаться постоянной, потребности установки в электричестве возрастают вдвое и для их покрытия нужна установка дополнительных реакторов на АЭС. Таким образом, определяющим критерием, влияющим на стоимость производства водорода в случае его совместного получения с ядерной энергией, является эффективность производства электроэнергии АЭС. НЕЕР может рассчитывать и выводить промежуточные затраты, такие как приведенная стоимость энергии, которая используется для получения конечного продукта из водорода, будь то в форме тепла или электричества. Выявлено влияние эффективности выработки электроэнергии на стоимость водорода: общее количество реакторов, необходимых для производства того же количества водорода, уменьшается по мере увеличения выработки электроэнергии. На экономику производства водорода также большое влияние оказывают технологические усовершенствования. Они представляют собой разработку технологий для повышения экономичности системы реактора, например, использование конструкций реакторов следующего поколения, а также работы по повышению результативности процессов производства водорода. Так, общая тепловая эффективность системы влияет на приведенную стоимость системы производства водорода на высокотемпературном газовом реакторе. Стоимость производства ядерного водорода в значительной степени зависит от капитальных затрат АЭС и связанной с ней водородной установки. Хотя существует несколько способов снижения стоимости атомной электростанции, существует и множество способов снижения капитальных и эксплуатационных затрат на химическое производство за счет модернизации химических процессов. Результатом проведенной работы стал тот факт, что диапазон стоимости совместной выработки ядерной энергии и водорода зависит не только от оцениваемых технологий и процессов, но и от методов их интеграции, а также критических эксплуатационных характеристик, таких как тепловая эффективность и период эксплуатации технологии или установки. К тому же, экономические



параметры, обычно используемые для проведения технико-экономического анализа АЭС, зависят от конкретной страны и могут варьироваться в широких пределах. Кроме того, авторами установлены факторы, влияющие на себестоимость производства водорода: отношение собственного капитала к заемному (используемое для финансирования строительства АЭС), а также ставка дисконтирования и проценты по займам (при этом налоговая ставка и амортизация оказывают незначительное влияние). Общая стоимость произведенного водорода благодаря высокотемпературному реактору с газовым охлаждением и модульному реактору IV поколения с высокотемпературным газоохлаждаемым галечным слоем с сернистым иодом составляет 3,44 и 3,8 \$/кг соответственно. Другим важным фактором, влияющим на стоимость производства ядерного водорода, являются капитальные затраты на более мощные ядерные реакторные установки и высокотемпературные газоходы, которые производят избыточную мощность, не требуемую для производства водорода. В качестве вывода предоставляются рекомендации к исследованиям, фокусирующимся на рассмотрении социально-экономических аспектов использования ядерного водорода и последствий его использования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Liu, H., et al., Roles of trilemma in the world energy sector and transition towards sustainable energy: A study of economic growth and the environment. *Energy Policy*, 2022. 170: p. 113238.
2. Nadaleti, W.C., E.G. de Souza, and S.N.M. de Souza, The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources: the transition to a hydrogen economy in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. 47(82): p. 34727-34738.
3. Examining the Technoeconomics of Nuclear Hydrogen Production and Benchmark Analysis of the IAEA HEEP Software. 2018, Vienna: International atomic energy agency.

Исследование выполнено Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого и поддержано в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Российской Федерации (Договор 075-15-2021-1333 от 30.09.2021).

Научный руководитель: к.т.н. Садеги Хашаяр, ст. преп. ВШАиТЭ СПбПУ.

## REMOTE TESTING AND MONITORING OF FOCL

V.A. Volgin

Kazan state power engineering university

IEEE, RPaA, group ASCm-1-21

In most countries of the world, telecommunication networks are based on the use of fibre optic communication lines (FOCL).

Fibre optic communication lines (FOCL) have a number of advantages, such as: long repeater length (100 km), wide bandwidth (100 Gbit / s), availability of seamless design, low weight and size relative to the wires [1].

Fibre monitoring refers to the continuous assessment of fibre quality using software tools and devices that constitute an integrated fibre monitoring and management system. These elements combine to facilitate the detection of faults, degradation or security breaches.

Monitoring systems can also be used to proactively track and analyse attenuation and other indicators of fibre performance over time.

Fibre optics continues to take over territory once dominated by conventional coaxial cables and telephone wires. Fibre optics are now becoming more commonplace, with straight fibre routes providing higher bandwidth and improved data integrity for users. The expansion of fibre optic coverage is

inevitable, so fibre optic monitoring systems must now be able to accurately detect fibre faults from source to subscriber.

A remote fibre monitoring system (RFTS) allows the entire fibre network, including dark fibres, to be monitored. Using this comprehensive method, network performance can be continuously assessed and Mean Time to Restoration (MTTR) can be minimised.

MTTR (Mean Time to Restoration) is the metric which best reflects the overall performance of a fibre monitoring and management system. It is simply the average time required to troubleshoot and get a system back up and running. The repair and troubleshooting process consists of a "troubleshooting" or fault location process and a repair process. When a serious cable break or bend occurs, it often takes several technicians several hours to find the problem before it can be fixed. Remote monitoring reduces the time to locate the repair process to less than five minutes and is done remotely and automatically. This typically represents 30–40 % of the full time of the repair process [2].

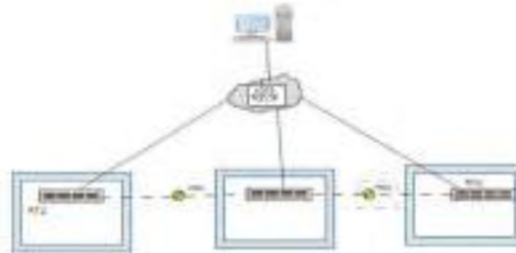
As the reach and capacity of fibre optic cables increases, the need for accurate and comprehensive fibre monitoring systems will also grow. An innovative P2MP network architecture incorporating passive optical networking (PON) will increase FTTH with less power consumption and less potential for electrical interference. The expected increase in fibre network complexity will make fibre monitoring more important than ever [3].

Innovations that continue to improve the accuracy and performance of OTDRs on short cable runs will inherently benefit fiber optic monitoring systems by reducing the impact of dead spots. Maintaining the security of fibre networks is imperative, so the fibre monitoring technology of the future must continually evolve to stay one step ahead of these challenges [4].

Remote Fiber Test System (RFTS) – this system allows the automatic monitoring of fibre optic cable parameters, finding the location of a fault or break and reporting the location of the fault to the dispatcher, maintenance personnel.

Professional fibre optic monitoring systems are the best solution for simultaneous monitoring of multiple fibres. They allow working with different fibres, including the possibility to monitor "dark", unused (at 1550 nm wavelength), as well as active, working (at 1625 nm or 1650 nm wavelength), optical fibres [5].

Remote Fiber Test System (RFTS) – this system allows for automatic monitoring of fiber optic cable parameters, finding the location of a fault or break and reporting the location of the fault to the dispatcher, maintenance personnel. Notifications can be sent to predefined Fibre Maintenance Nodes, telephones, IP addresses or email addresses (figure 1).



*Fig. 1. Organisation of the RFTS system*

RTU (Remote Test Units) are fibre remote test units. These modules contain the following devices:

- 1) OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – optical pulse reflectometers;
- 2) OTAU (Optical Test Access Unit) – access units for fiber testing;
- 3) Optical Switches;
- 4) ONT network control nodes (laptops or fixed PC).

Thus, automated FOCL monitoring systems solve the following tasks: prompt notification of personnel about faults in FOCL, detection of faults and damaged sections in automatic mode, availability of detailed information about the fault to maintenance personnel, reduction of time and human resources spent on fighting FOCL faults, reduction of depreciation costs to maintain system performance.

## LITERATURE:

1. Родина О.В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. – 2012. – 3-6 с.
2. Лутченко С.С., Богачков И.В., Копытов Е.Ю. Методика определения доступности волоконно-оптических линий и интервалов технического обслуживания. – Материалы: 2015. – С. 1-5.
3. «Вестник КГЭУ», Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Биткулов Р.Д. Способ разработки программно-вычислительных комплексов для проектирования систем электроснабжения стр. 14.
4. Милов В. Р., Суслов Б.А. и Крюков О.В. 2011 Автоматизация и дистанционное управление стр. 12.
5. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи измерения – М: Компания САЙРУС – СИСТЕМС, 1999 г. – 672 с.

Supervisor: PhD in Physics and Mathematics A.N. Gavrilenko, associate professor department of RPaA at KSPEU.

## MONITORING OF CABLE LINES BY NON-DESTRUCTIVE TESTING

I.V. Tikhonov

Kazan state power engineering university  
IEE, RZA, group AUSm-1-21

Diagnostics and monitoring of cable lines is not an easy, but rather important task, since damage to power cable lines is an emergency that requires urgent and expensive repairs [1].

At present, at a high level of technology and software and hardware, it is possible to create complex optical diagnostic systems, the most important of which are:

1. High voltage cable temperature control. Diagnostic pulses are periodically emitted by a laser into the optical fiber integrated into the cable line in the shield zone, under the outer sheath, and the back reflected light flux is recorded using a measuring device. The diagnostic parameters will be both the spectrum and the time of arrival of the reflected light flux relative to the emitted laser pulse. A temperature change will entail a change in the parameters of the optical fiber embedded in the power cable [2]. Technical requirements are given in table 1.

Table 1. Technical requirements for the complex of cable line monitoring systems

Parameter name	Value
Temperature measuring range	-200 to +600 °C
Measuring range along cable length	Up to 50 km.
Fiber type	Multimode, G 651.1
Laser wavelength	1550 nm.
Resolution of cable section temperature measurement	0,1 °C
Limit of permissible absolute error of temperature measurement	±0,5 °C
Settling time of the operating mode of the cable line temperature monitoring systems	≤ 15 min.

2. Distributed vibroacoustic monitoring. Using DAS (Distibuted Acoustic Sensing) technology, fiber optics can also be used as monitoring of acoustic signals, which allows you to identify the location of various disturbances not only along the entire length of the fiber optic cable, but also at a distance of tens of meters from it [3]. Based on the calculations performed, the system will generate television signals (as an example, table 2 and table 3 provide a list of signals transmitted by this system at a 110 kV substation) [3, 4].

Table 2. List of signals (telesignaling) transmitted to upper levels

Name	Signal name	Reception destination		№
		Dispatching station 1	Dispatching station 2	
Cable-overhead line tapping on Substation 110 kV	Alarm mechanical digging	+	+	1.
	Alarm mechanical drilling	+	+	2.
	Alarm hand dig	+	+	3.
	Fiber break	+	+	4.

Table 3. List of signals (telemetry) transmitted to upper levels

Name	Signal name	Unit of meas.	Reception destination		№
			Dispatching station 1	Dispatching station 2	
Cable-overhead line tapping on Substation 110 kV	Distance to mechanical dig	m.	+	+	1.
	Distance to mechanical drilling	m.	+	+	2.
	Distance to hand dig	m.	+	+	3.
	Distance to fiber break	m.	+	+	4.

Technical requirements are given in table 4.

Table 4. Technical requirements for the complex of cable line monitoring systems

Parameter name	Value
Operating conditions, ambient temperature	-40 to +70 °C
Fiber type	Multimode, G 651.1
Measuring range along cable length	Up to 100 km.
Limit of permissible absolute error in determining the place of occurrence of an event	±0,5 m.
Average event registration time	±0,5 s.
Operating mode settling time	≤ 10 min.

It is no exaggeration to say that a comprehensive diagnostic system using optical fiber in cable lines is a unique solution. Since, in addition to solving the problem of monitoring cable lines, full integration with the process control system is also provided and data is transmitted using standard protocols, which will allow performing a number of calculation tasks, displaying monitoring results on diagrams and analyzing operational parameters online.

#### LITERATURE:

1. Нетребко С.А., Сазыкин В.Г. Техническое состояние городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ.
2. Технология измерения температуры по оптическому волокну (DTS). URL: <https://www.apsensing.com/technology/dts> (date of application 30.10.2022).
3. Технология измерения акустических сигналов по оптическому волокну (DAS). URL: <https://www.apsensing.com/technology/distributed-acoustic-sensing-das-dvs> date of application 30.10.2022).
4. Система Вибро-Акустического Мониторинга Кабельных Линий (СВАМ). URL: <https://www.sedatec.org/resheniya/sistema-vibro-akusticheskogo-monitoringa-kabelnykh-linij-svam/> (date of application 30.10.2022).

Scientific adviser: Ph.D. of Physico-mathematical Sciences A.N. Gavrilenko, associate professor of the IEE of the KSPEU.

# ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ АВАРИЙНО-ПЛАНОВОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ ВВЭР- 1000 ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА 107 % ОТ НОМИНАЛЬНОЙ

Е.А. Морозова  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5072

Повышение мощности и продление срока эксплуатации энергоблоков ВВЭР-1000 являются одними из ключевых направлений работ АО «Концерн Росэнергоатом». На данный момент переход на мощность 104 % от номинальной уже произведен на третьем и четвертом энергоблоках БалаАЭС. Следующим повышением уровня мощности станет мощность, равная 107 % от номинальной [1, с. 1]. Цель данной работы – выяснить, необходимо ли заменить текущий теплообменник системы аварийно-планового расхолаживания (далее т/о) при переходе на новую мощность. Для этого необходимо узнать остаточное тепловыделение от образовавшихся осколков деления.

Расчет остаточного тепловыделения будет проводиться по двум методикам. Дальнейшие расчеты будут вестись по методике, показавшей наибольшие значения. Формула Уэя-Вигнера (погрешность формулы 50 %):

$$Q_{\text{ВУ}} = 6,62 \cdot 10^{-2} N_T [T^{-0,2} - (T + T_0)^{-0,2}] \quad (1)$$

Унтермайер и Уэллс получили эмпирическую формулу, учитывающую вклад в остаточную тепловую мощность от распада продуктов деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ :

$$Q = 10 \cdot \{(T + 10)^{-0,2} - (T + T_0 + 10)^{-0,2} - 0,87 \cdot [(T + 2 \cdot 10^7)^{-0,2} - (T + T_0 + 2 \cdot 10^7)^{-0,2}]\} \quad (2)$$

Чтобы получить тепловыделение от продуктов деления только  $U^{235}$  нужно из выражения (2) вычесть тепловыделение от  $Pu^{239}$  и  $Np^{239}$ :

$$Q_{Pu} = 0,25 \{ \exp(-T / 2040) - \exp[-(T + T_0) / 2040] \}, \quad (3)$$

$$Q_{Np} = 0,13 \{ \exp(-T / 29000) - \exp[-(T + T_0) / 29000] \}. \quad (4)$$

где  $T$  – момент времени после останова, на который определяется остаточное тепловыделение, с;  $T_0$  – время работы реактора, с.

Формулы (2)-(4) имеют следующую точность, оцененную Унтермайером и Уэллсом для различных  $T$  [2, с. 137]:

- ±50% для  $1 \leq T \leq 10^2$ ;
- ±30% для  $10^2 \leq T \leq 10^4$ ;
- ±10% для  $10^4 \leq T \leq 10^6$ ;
- ±50% для  $10^6 \leq T \leq 10^8$ .

Максимальные значения тепловыделения по данным формулам будут при времени работы, равным компаниии реактора (18 месяцев).

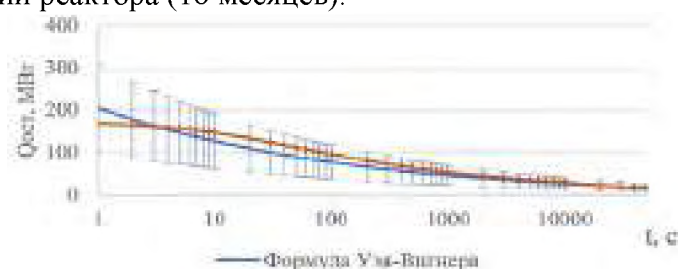


Рис. 1. Распределение остаточного тепловыделения по времени стоянки реактора ВВЭР-1000 на мощности 107% от номинальной

На рисунке 1 представлены графики распределения остаточного тепловыделения по формулам Унтермайера-Уэллса и Уэя-Вигнера.

Так же необходимо оценить время после останова реактора, при котором т/о включится в работу.

Переход из горячего (температура теплоносителя не превышает  $T_{гор}=206$  °С, давление равно номинальному,  $p_{ном}=160$  кгс/см<sup>2</sup> [3, с.17]) состояния в холодное осуществляется плановым расхолаживанием, которое сначала ведется через парогенераторы, затем, при достижении давления, равного  $p_{дон}=18$  кгс/см<sup>2</sup>, и температуры, равной  $T_{дон}=150$  °С, производится через т/о. При расхолаживании скорость изменения давления первого контура не должна превышать  $v_p=10$  кгс/см<sup>2</sup>, а температуры – не более 30 °С [3, с.233].

Время, необходимое для того чтобы в контуре установилось давление 18 кгс/см<sup>2</sup> равно:

$$t = (p_{ном} - p_{дон}) / v_p = (160 - 18) / 10 = 14,2 \text{ мин} = 852 \text{ с.}$$

К найденному времени необходимо прибавить 35-40с. Это время включения системы аварийно-планового расхолаживания после достижения давления 18 кгс/см<sup>2</sup> [4, стр.7].

Время, необходимое для расхолаживания активной зоны до температуры 150 °С, с максимально допустимой скоростью расхолаживания  $v_T=30$  °С, равно:

$$t' = (T_{гор} - T_{дон}) / v_T = (260 - 150) / 30 = 3,6 \text{ ч} = 13200 \text{ с.}$$

Таким образом, время включения т/о в работу после останова составляет 13200 с. Тепловыделение в этот момент времени по формуле (1) с учетом погрешности составляет:

$$Q_{\beta\gamma} = 38,35 \text{ МВт.}$$

Определим мощность текущего т/о. Расход тех. воды равен  $G_{м.в.} = 3000 \text{ м}^3 / \text{ч}$ , плотность тех. воды равна  $\rho_{м.в.} = 993,55 \text{ кг} / \text{м}^3$ , температура тех. воды на выходе из т/о не более  $t''_{м.в.} = 40$  °С, температура тех. воды на входе в т/о  $t'_{м.в.} = 5...33$  °С.

$$Q = G_{м.в.} \cdot c_p \cdot (t''_{м.в.} - t'_{м.в.}) = 3000 / 3600 \cdot 993,55 \cdot 4176,4 \cdot (40 - 33) = 24,2 \text{ МВт.}$$

Можно сделать вывод, что текущий теплообменник системы аварийно-планового расхолаживания не сможет обеспечить достаточный отвод тепла от активной зоны.

Для того чтобы обеспечить безопасное функционирование блока, теплообменник нужно спроектировать на  $Q = 38,35$  МВт.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Оптимизация 18-месячных топливных циклов ВВЭР-1000 повышенной мощности с учетом облучения выгородки и корпуса реактора / Егоров А. Л., Павловичев А. М., Сумароков М. А., Зарицкий С. М. – Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2019. – 9 с.
2. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов / Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д., Клочков В.И., Семенов В.В. [и др.] – Москва: Атомиздат, 1977. – 280 с.
3. Технологический регламент эксплуатации энергоблока № 4 Балаковской АЭС Р.4.ОУБ/03, Балаково, 2019. – 414 с.
4. Техническое описание системы аварийного и планового охлаждения зоны (активная часть) ТО.1,2,3,4.ТQ12,22,32.ОТ/148, Балаково, 2019. – 114 с.

Научный руководитель: к.т.н. К.Б. Ларионов, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# СЖИГАНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ГОРНОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТУ

В.В. Безруких

Санкт-Петербургский политехнический университет

ИЭ, ЭиТ, аспирант

Для стабильного развития российской энергетики необходимо использовать все существующие энергоресурсы, в частности уголь, запасы которого в нашей стране значительны [1]. Уголь является более дешевым энергоресурсом по сравнению с газом, в среднем по всей России стоимость угля в 2,25 раза меньше стоимости газа [2], в отдельных регионах эта разница в стоимости еще выше.

Среди наиболее экологичных и перспективных способов энергетического использования угля можно выделить его газификацию, которая позволяет из угля получать газ различного состава, калорийности, температуры на выходе из газификатора. Получаемый газ можно направить на сжигание в котле, турбине, газопоршневом двигателе и другом энергетическом оборудовании. Наибольшей эффективностью среди способов сжигания генераторного газа обладает его сжигание в газотурбинной установке (ГТУ), которая входит в состав парогазовой установки (ПГУ).

Данная работа посвящена расчету процесса сгорания генераторного газа и сравнению получаемых продуктов сгорания с продуктами сгорания природного газа.

В качестве исследуемого типа газификатора был выбран горновой газификатор ВТИ [3]. Сырьем для газификации был выбран уголь Березовского месторождения. Расчет процесса газификации в выбранном типе газификатора был выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Характеристики угля и получаемого при его газификации газа приведены в таблице 1.

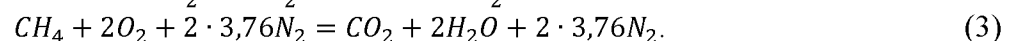
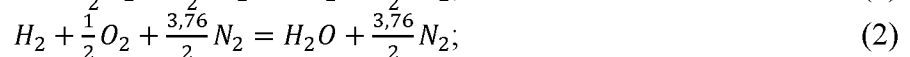
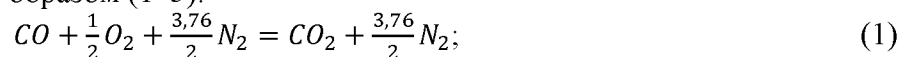
Таблица 1. Характеристики угля и генераторного газа

Характеристика	Уголь	Генераторный газ
Низшая теплотворная способность, $Q_{н.}^p$ , МДж/кг	19,33	7,86
Состав, %	$W^p = 20\%$ ; $A^p = 5,61\%$ ; $C^p = 52,78\%$ ; $H^p = 3,70\%$ ; $N^p = 0,48\%$ ; $S^p = 0,24\%$ ; $O^p = 17,19\%$ .	$CO = 26,81\%$ ; $CO_2 = 5,51\%$ ; $CH_4 = 4,41\%$ ; $H_2 = 20,64\%$ ; $H_2O = 13,10\%$ ; $N_2 = 29,50\%$ ; $H_2S = 0,03\%$ .

Полученный при газификации газ является генераторным газом низкой калорийности с большим количеством азота, это обусловлено тем, что газификация происходит при паровоздушном дутье (расход воздуха на 1 кг угля: 1,044 кг/кг; расход острого пара: 0,249 кг/кг). В газе основными горючими элементами являются: окись углерода ( $CO$ ), водород ( $H_2$ ), метан ( $CH_4$ ). В камеру сгорания газ поступает с температурой 500 °С.

В первую очередь необходимо определить стехиометрически необходимое количество воздуха для полного сжигания газа.

Основные уравнения для окисления генераторного газа кислородом в составе воздуха можно записать следующим образом (1–3).



Количество молей кислорода, азота и воздуха, которые необходимы для окисления 1 кмоль топлива:

$$O_2 = 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 = 0,326 \text{ кмоль}; \quad (4)$$

$$N_{2\text{возд}} = \frac{3,76}{2} \cdot CO + \frac{3,76}{2} \cdot H_2 + 2 \cdot 3,76 \cdot CH_4 = 1,224 \text{ кмоль}; \quad (5)$$

$$N_{2\text{возд}} + O_2 = 1,550 \text{ кмоль}. \quad (6)$$

При расчете также важно учитывать то количество водяных паров, которое попадает в камеру сгорания вместе с воздухом, так как водяной пар сильно влияет на теплофизические свойства продуктов сгорания. Количество поступающего водяного пара:

$$H_2O_{\text{возд}} = \frac{N_{2\text{возд}} + O_2}{z_{\text{сух.возд}}} - N_2 + O_2 = \frac{1,547}{0,99} - 1,547 = 0,016 \text{ кмоль}, \quad (7)$$

где  $z_{\text{сух.возд}} = 0,99$  – мольная доля сухого воздуха.

Теперь необходимо определить количество продуктов сгорания и их состав.

Количество двуокиси углерода можно осуществить следующим образом:

$$CO_{2\text{гор}} = CO + CH_4 = 0,268 + 0,044 = 0,312 \text{ кмоль}; \quad (8)$$

$$H_2O_{\text{гор}} = H_2 + 2CH_4 = 0,207 + 2 \cdot 0,044 = 0,295 \text{ кмоль}. \quad (9)$$

Количество воды, образованное в ходе реакций и внесенное воздухом в камеру сгорания:

$$H_2O_{\text{сумм}} = H_2O_{\text{гор}} + H_2O_{\text{возд}} = 0,295 + 0,016 = 0,311 \text{ кмоль}. \quad (10)$$

Тогда конечный количественный состав продуктов сгорания:

$$CO_{2\text{пр.сг.}} = CO_{2\text{гор}} + CO_2 = 0,312 + 0,055 = 0,367 \text{ кмоль}; \quad (11)$$

$$H_2O = H_2O_{\text{сумм}} + H_2O = 0,311 + 0,131 = 0,442 \text{ кмоль}; \quad (12)$$

$$N_2 = N_{2\text{возд}} + N_2 = 0,295 + 1,224 = 1,519 \text{ кмоль}. \quad (13)$$

Количество продуктов сгорания на 1 кмоль газа:

$$CO_{2\text{пр.сг.}} + H_2O + N_2 = 0,367 + 0,442 + 1,519 = 2,328 \text{ кмоль}. \quad (14)$$

Мольный состав:

$$CO_{2\text{пр.сг.}} = \frac{CO_{2\text{пр.сг.}}}{CO_{2\text{пр.сг.}} + H_2O + N_2} = 0,157; \quad (15)$$

$$H_2O = \frac{H_2O}{CO_{2\text{пр.сг.}} + H_2O + N_2} = 0,190; \quad (16)$$

$$N_2 = \frac{N_2}{CO_{2\text{пр.сг.}} + H_2O + N_2} = 0,653. \quad (17)$$

Тогда молярная масса:

$$\mu_{\text{г.г.}} = \frac{CO \cdot 28 + CO_2 \cdot 44 + H_2 \cdot 2 + CH_4 \cdot 16 + H_2O \cdot 18 + N_2 \cdot 28}{100} = 21,67 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}. \quad (18)$$

Стехиометрически необходимое количество воздуха рассчитаем по следующей зависимости:

$$L_0 = (N_{2\text{возд}} + O_2) \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{г.г.}}} = 1,550 \frac{28,86}{21,67} = 2,064 \frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}}, \quad (19)$$

где  $\mu_{\text{в}} = 28,86 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$  – молярная масса воздуха.

При определении избытка воздуха необходимо учитывать комплекс факторов, которые учтены в следующей формуле:

$$\alpha_{\text{КС}} = \frac{(L_0 + 1) \cdot h_{\alpha=1, T_3} - h_{\text{в}, T_3} \cdot L_0 - (Q_{\text{Р}}^{\text{H}} + h_{\text{г.г.}}) \cdot \eta_{\text{КС}}}{L_0 \cdot (h_2 - h_{\text{в}, T_3})}, \quad (20)$$

где  $\eta_{\text{КС}}$  – КПД камеры сгорания;  $h_{\alpha=1, T_3}$  – энтальпия продуктов сгорания при стехиометрическом сжигании;  $h_{\text{в}, T_3}$  – энтальпия воздуха при температуре выхода из камеры сгорания;  $h_{\text{г.г.}}$  – энтальпия генераторного газа на входе в камеру сгорания;  $h_2$  – энтальпия воздуха на входе в камеру сгорания.

Данные расчеты позволяют быстро оценить количество и состав продуктов сгорания, а также необходимое количество воздуха для окисления топлива, однако он не учитывает ряд факторов, таких как: наличие обратимых реакций, наличие реакций образования оксидов азота и других соединений.

При сравнении состава продуктов сгорания природного и генераторного газов видно, что составы слабо разнятся, составы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Составы продуктов сгорания природного и генераторного газов

Характеристика	Природный газ [4]	Генераторный газ
Состав, %	CO <sub>2</sub> = 0,094; H <sub>2</sub> O = 0,197; N <sub>2</sub> = 0,709.	CO <sub>2</sub> = 0,157; H <sub>2</sub> O = 0,190; N <sub>2</sub> = 0,653.

За счет того, что составы газов схожи, схожи и теплофизические свойства, а значит и процессы в проточной части изменяются не сильно, что говорит о том, что нет необходимости



к кардинальной реконструкции проточной части турбины, но из-за уменьшения стехиометрического количества воздуха увеличивается и объем газа, который необходимо подать в камеру сгорания при фиксированном количестве подаваемого воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Л.С. Плакиткина, Ю.А. Плакиткин Парижское соглашение по климату, Covid-19 и водородная энергетика – новые реалии добычи и потребления угля в странах ЕС и Азии в период до 2040 года. // Горная промышленность, 2021; (1). – 83-90 с.
2. Скоробогатов В.А. Будущее российского газа и нефти. // Геология нефти и газа. – 2018. – №4. – с. 31-43.
3. Сучков С. И. Разработка отечественной технологии газификации твердого топлива для парогазовых установок. // М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 120 с.: ил. [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 7 (175)].
4. Ромахова Г. А. Газотурбинные установки электростанций: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 163 с.

Научный руководитель: к.т.н. И.Д. Аникина, доцент ВШАиТЭ СПбПУ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИРАЗРЯДНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.И. Приходько<sup>1</sup>, А.В. Мокряков<sup>2</sup>, В.В. Горшков<sup>2</sup>

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН<sup>1</sup>

МАИ, Российский государственный университет<sup>2</sup>

На момент публикации, одним из самых сложных компонентов любой энергетической системы является автоматизированная система управления, к которой предъявляются серьезные требования по надежности. При этом существует несколько способов повышения надежности систем управления, одним из которых является повышение надежности вычислительной подсистемы.

Одним из способов повышения надежности вычислительной подсистемы [1, 2] является использование при работе специального класса систем, способных работать на нескольких режимах аппаратного обеспечения вычислительной техники. Этот положительный эффект связан с тем, что такие системы обладают следующими характеристиками:

1. Они способны переключить режим работы в зависимости от степени повреждения аппаратного обеспечения.
2. Переключение режима в большинстве случаев не требует использования перезагрузки вычислительной системы.
3. Использование специальных приложений, написанных с учетом специфики работы на нескольких режимах, позволяет не терять контроль за всей энергетической системы в момент смены режима работы оборудования.

Например, для оборудования архитектуры микропроцессора AMD64 [3], который является CISC микропроцессором со стековым семейством «Лебедева» и «Фон-Неймана», специализированная операционная система имеет сложный механизм построения внутренних механизмов, однако в простейшем случае структура построения показана на рисунке 1.



Рис. 1. Упрощенная структура специальных операционных систем для микропроцессора AMD64

Пример: класс систем, называется мультиразрядными операционными системами. По своему поведению этот класс систем похож на мультиверсионные операционные системы, однако имеются существенные отличия:

1. При работе с мультиверсионными [4] системами подразумевается то, что внутри систем храниться готовая версия. Но в случае с мультиразрядными – версия собирается на основе зашитых внутренних механизмов. Эта особенность позволяет уменьшить размер системы.
2. Мультиразрядные системы ориентированы в первую очередь на работу на нескольких режимах микропроцессора, и строятся как можно ближе к оптимальным системам для каждого режима микропроцессора. Мультиверсионные [4] в целом эту особенность на момент публикации не учитывают, но возможность построения допускается.

Поэтому в момент повреждения энергетической системы при использовании в качестве элемента управления мультиразрядную операционную систему произойдет следующее: мультиразрядная операционная система как элемент управления начнет, как и обычная операционная система выполнять задачи по контролю и управления, но в критические моменты, когда будут повреждены не только элементы функционирования энергетической системы, но и элементы самой вычислительной системы, эта операционная система просто перестроит режим работы и сможет дальше функционировать. При этом оператор энергетической системы получит уведомление о смене режима работы и с учетом обстоятельств будет выполнено техническое обслуживание всей энергетической системы. При этом функционировать система управления продолжит в большинстве случаев.

Поэтому, использование мультиразрядных, позволяет повысить надежность работы энергетических систем с точки зрения использования в качестве операционной системы для системы управления.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Босова Л.Л., Босова А.Ю. «Информатика. Базовый уровень». Учебник для 10 класса. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. – 288 с.
2. Фуфаев Д.Э. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Д. Э. Фуфаев, Э. В. Фуфаев. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 304 с.
3. AMD x86-64 Architecture Programmer's Manual. : Application Programming. URL: <http://support.amd.com/TechDocs/24592.pdf>. (дата обращения 25.0.2021).
4. Карцан И. Н., Ефремова С. В. Мультиверсионная модель программного обеспечения систем управления космическим аппаратом с ранжированием принятия решения // Сибирский аэрокосмический журнал, 2021. – Т. 22, № 1. – С.32-46. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-32-46.

Научный руководитель: д.т.н. В.В. Горшков, доцент РГУ.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Т.Н. Сафиуллин

Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, ЭПП, группа ЭПм-1-21

В связи с увеличением спроса на электрическую энергию, ростом количества сетей и увеличением загруженности линий в целом, режим работы энергосистемы, а также качество поставляемой потребителю электроэнергии должно быть на высоком уровне.

Качество электроэнергии в энергосистемах характеризуется в основном: стабильностью угла ротора, постоянством частоты и напряжения [1].

Стабильность угла ротора во взаимосвязанных системах, характеризуется тем, что синхронные машины остаются в синхронизме после воздействия какого-либо возмущения. Когда происходит изменение состояния системы ротор генератора начинает изменять частоту своего вращения, как в большую сторону, так и в меньшую. Если один из генераторов временно ускоряется относительно другого, то он опережает другие по углу. Часть нагрузки из-за этой разницы переводится с медленного на быстрый ротор. Таким образом, разница между скоростями и разница углов также уменьшается. Зависимость угла мощности здесь линейная. Нестабильность возникает, если этот ротор не может поглотить мощность или кинетическую энергию, создаваемую изменением скорости.

Качество частоты в энергосистеме зависит от дисбаланса между генерацией и нагрузкой. Выражается как способность оставаться на постоянной частоте. Нормы отклонения частоты отражены в ГОСТ 32144-2013 [2].

Стабильность напряжения энергосистемы отражает работу системы в нормальных условиях эксплуатации или при отклонении напряжения в допустимых пределах после возмущения. Нормы отклонения напряжения отражены в ГОСТ 32144-2013 [2]. Если значения напряжения не находятся в допустимых пределах, то это вызовет проблемы как у потребителя, так и со стороны сети.

Самым большим фактором влияющим на стабильность напряжения в системе является невозможность покрытия требуемой реактивной мощности. Для поддержания реактивной мощности в энергосистеме на необходимом уровне, используют системы компенсации реактивной мощности.

Традиционная компенсация обычно выполняется с помощью конденсаторов, подключенных параллельно к системе. Эти конденсаторы представляют собой реактивную мощность нагрузки. Он активируется или деактивируется постепенно с помощью электронного реле управления реактивной мощностью и контакторов в зависимости от необходимости. Системы компенсации реактивной мощности, как правило, представляют из себя синхронные, статические и тиристорные компенсаторы. Благодаря им линия освобождается от части реактивной мощности, а это играет важную роль в повышении устойчивости, управляемости, перегрузочной способности и экономичности энергосистемы [3].

В случае увеличения потребляемой мощности на сборных шинах происходят перепады напряжения. Перепады напряжения, как правило, обусловлены удаленностью источников питания до центров потребления нагрузок, производству переключений и коммутаций на низком напряжении, сбоями работы генератора, обрывами линий, неподходящими характеристикам линий нагрузками, а также отсутствием согласования между различными системами управления и защиты. Для предотвращения неустойчивости напряжения используют трансформаторные переключатели ответвлений для осуществления контроля напряжения, контроля выходных напряжений генераторов, а также стремятся к обеспечению глубокого ввода, то есть энергосистемы с наименьшим количеством ступеней трансформации. Стабильность напряжения хоть и является динамическим явлением, однако к ней применим и статический анализ [4].

Удаленность электростанций до центров потребления приводит к тому, что произведенная энергия передается по длинным линиям электропередач. А качество передаваемой электроэнергии напрямую зависит от перегрузочных способностей этих линий [5].

Предельно максимальная мощность, передаваемая с шины одной шины на другую, равна  $P_{12\max}$ . Активная, реактивная и полная мощности  $P_{12}$ ,  $Q_{12}$ , и  $S_{12}$  соответственно.



Рис. 1. Система генератор-нагрузка

Необходимые формулы мощностей приведены в (1–4), где  $\delta$  – угол нагрузки.

$$P_{12 \max} = \frac{V_1 V_2}{x} (\delta = 90^\circ), \quad (1)$$

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{x} \sin \delta, \quad (2)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{x} (V_1 - V_2 \cos \delta), \quad (3)$$

$$S_{12} = V_2 \frac{V_1 - V_2}{jx}. \quad (4)$$

В результате по потокам нагрузок, значений амплитуд и углов напряжения всех сборных шин, активных и реактивных мощностей, протекающих по линиям электропередачи, можно определить потери.

Таким образом, увеличение мощности электроустановок приводит к тому, что реактивной мощности источника питания может оказаться недостаточной, а это повлечет нестабильность напряжения в сети. Поэтому для обеспечения стабильности напряжения в энергосистемах необходимо отслеживать перетоки реактивной мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грачева Е.И., Абдуллазянов Р.Э., Алимова А.Н. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях / Грачева Е.И., Абдуллазянов Р.Э., Алимова А.Н. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-sposoby-rascheta-poter-aktivnoy-moschnosti-i-elektroenergii-v-nizkovoltnyh-tsehovyh-setyah> (дата обращения: 20.10.2022).
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
3. Грачева Е.И., Сафин А.Р. Оценка потерь электроэнергии в радиальных электрических сетях низкого напряжения с помощью алгоритмов нечеткого регрессионного анализа / Грачева Е.И., Сафин А.Р. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45599036> (дата обращения: 21.10.2022).
4. Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И., Зубанов Д.А., Бубнов А.В., Харламов В.В. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения / Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И., Зубанов Д.А., Бубнов А.В., Харламов В.В. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17879229> (дата обращения: 24.10.2022).
5. Овчаренко Т. И., Васюченко П.В. Особенности внедрения мероприятий по снижению потерь электрической энергии на действующих предприятиях / Овчаренко Т. И., Васюченко П.В. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vnedreniya-meropriyatiy-po-snizheniyu-poter-elektricheskoy-energii-na-deystvuyuschih-predpriyatiyah/viewer> (дата обращения: 29.10.2022).

Научный руководитель: д.т.н. Е.И. Грачева, профессор КГЭУ.

# ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.А. Михайлович

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ

Нефтегазовая отрасль – является одной перспективных областей промышленности в Российской Федерации, так как она занимает важное место российской экономике. Продукция нефтегазовой отрасли, необходима для функционирования огромного количества механизмов в технологическом процесса множества предприятий и конечно же, для бытовых нужд. Поэтому данная отрасль должна развиваться достаточно интенсивно для покрытия всех этих нужд. Для добычи нефти и газа на новых месторождениях необходимо выбрать и спроектировать оптимальную систему электроснабжения, чтобы обеспечить нефтедобывающее хозяйство качественной электроэнергией [1, С. 2].

Основной проблемой в проектировании системы электроснабжения нефтегазовых предприятий является их удаленность от энергосистемы. Поэтому постройка полноценной линии электропередач может быть нецелесообразна, так как этому могут помешать несколько факторов такие как:

- экономический фактор заключается в том, что протяженность линии, установка опор, может оказаться слишком дорогой для проектирования системы электроснабжения;
- географический фактор заключается в том, что неровности рельефа, горные образования, могут помешать постройка этой линии электропередач;
- электрический фактор заключается в том, что потери мощности на данной линии электропередач могут быть достаточно велики.

Поэтому основной целью данной статьи является сравнение электроснабжения нефтегазового предприятия от энергосистемы и с использованием автономных источников электроэнергии таких, как газотурбинная электростанция и дизельная электростанция [2, С. 96].

Для начала необходимо произвести расчет нагрузок на предприятии используя метод упорядоченных диаграмм, применив основные формулы и сведем в таблицу 1:

$$P_p = k_p \cdot \sum k_u \cdot P_H, \quad (1)$$

$$Q_p = 1,1 \cdot \sum k_u \cdot P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (3)$$

где  $P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$  – расчетная активная, реактивная и полная мощности соответственно, кВт, кВар, кВА;  $k_p$  – коэффициент расчетной нагрузки;  $k_u$  – коэффициент использования (спроса);  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности.

Таблица 1. Расчетные нагрузки предприятия

Расчетная нагрузка		
Активная, кВт	Реактивная, кВар	Полная, кВА
5628	6190,8	8366,62

Зная расчетную нагрузку необходимо рассчитать и выбрать провод по методу экономической плотности тока, так напряжение будет составлять 110 кВ. Выбираем провод марки АС-120/19, с площадью поперечного сечения токоведущей жилы 120 мм<sup>2</sup> и сечением 19 мм<sup>2</sup> несущей жилы. Зная расстояние от энергосистемы до нашего предприятия приблизительно 50 км необходимо рассчитать потери мощности на данной линии по формулам:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot (r_0 \cdot L), \quad (4)$$

$$\Delta Q_{\text{л}} = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot (x_0 \cdot L), \quad (5)$$

где  $\Delta P_L$ ,  $\Delta Q_L$  – потери активной и реактивной мощности в линии, кВт, кВар;  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжения на высокой стороне, примем 110 кВ;  $r_0$  – удельное активное сопротивление, примем 0,249 Ом/км;  $x_0$  – удельное реактивное сопротивление, примем 0,391 Ом/км;  $L$  – длина линии, км.

Подставляя значения в данные формулы получим следующие значения  $\Delta P_L = 113,09$  кВт, а  $\Delta Q_L = 72,02$  кВар. Теперь можно определить годовые потери электроэнергии в рублях:

$$\Delta S_L = \sqrt{\Delta P_L^2 + \Delta Q_L^2}, \quad (6)$$

$$\Delta S_{ГОД} = \Delta S_L \cdot T, \quad (7)$$

$$Cm_{ГОД} = \Delta S_{ГОД} \cdot C_{Э}, \quad (8)$$

где  $\Delta S_{ГОД}$  – годовые потери электроэнергии, кВА;  $T$  – период работы, примем 365 дней;  $Cm_{ГОД}$  – стоимость годовых потерь;  $C_{Э}$  – цена за кВт электроэнергии, примем 4,04 руб/кВт.

Подставляя значения в формулы получим следующий результат, потери в год составляют  $\Delta S_{ГОД} = 49426,55$  кВт, а в рублях  $Cm_{ГОД} = 199683,26$  руб.

Теперь представим, что источником электроэнергии является не энергосистема, а газотурбинная электростанция. Для примера выбираем газотурбинную электростанцию немецкой компании Jenbacher, марки J920 FleXtra мощностью 10400 кВт. Стоимость данной станции сильно разнится и составляет десятки миллионов рублей. Окупаемость данной электроустановки составляет десятки лет, без учета стоимость затрат на постройку самой линии. На данный момент использование столь дорогого оборудования затруднительно, так затраты и окупаемость данных систем не совместимы.

Рассмотрение вариантов с использованием нескольких газотурбинных электростанций работающих параллельно также нецелесообразна так как цена на эти электроустановки, так же очень высока.

Немного лучше складывается ситуация на российском рынке дизельных электростанций, к примеру, взяв несколько генераторов марки АЗИМУТ АД-1000С-Т400-1РМ11, стоимостью 6811000 рублей. Окупаемость увеличивается в разы. Поэтому данный вариант имеет право на существование. Хотя необходимо учитывать затраты на транспортировку топлива для данных генераторов, что тоже увеличивает стоимость данной системы.

В заключение можно сказать, что использование автономных источников электроэнергии эффективно, так как: нету связи с энергосистемой, это означает, что при аномальных процессах в энергосистеме, не будет влияния на само предприятие; предприятие обеспечивает само себя электроэнергией, так как в выбранных электроустановках встроена либо может быть реализована система очистки газа, для использования его в качестве топлива для газотурбинной электростанции. Эти энергокомплексы имеют возможность когенерации, то есть возможность совместной выработки электрической и тепловой энергии. Но данные установки обладают огромной стоимостью, что может поставить их использование под сомнение. Поэтому классический вариант с электроснабжением через энергосистему в данный момент времени более реалистичен, несмотря на возможную сложность постройки линии электропередач.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Абрамович Б.Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: Учебное пособие / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев, ДА.Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт. СПб, 2008. 81с. ISBN 978-5-94211-357-5.
2. Турышева А. В. Автономное энергоснабжение нефтегазодобывающих предприятий //Наука, техника и образование, 2015. – №. 4 (10). – С. 94-96.

Научный руководитель: к.т.н. Е.С. Логинова, доцент ЭиАТП СТИ НИЯУ МИФИ.

# АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

М.А. Литовка

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
ИКС, кафедра №32, группа 3926

Для комфортной жизни нам необходима энергия, каждый из нас использует аккумуляторы каждый день, и вряд ли уже возможно жить без них и других накопителей. Быстрый рост мировой экономики привел к существенному увеличению потребления ископаемого топлива, что порождает две проблемы: не вечность существующих ресурсных запасов и возникновение серьезных экологических проблем, таких как загрязнение климата. Поэтому разработка чистых, безуглеродных энергетических ресурсов и соответствующих технологий является неотложным приоритетом. Большое внимание уделяется интеграции возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения в сельских регионах, а также гибридной энергетической системе с накопителем для микросетей, ведь это может решить ряд возникающих проблем. Возобновляемые ресурсы могут помочь сократить выбросы углерода, но их зависимости от внешних факторов приводит к непостоянному производству энергии, что требует введения банка аккумуляторов для преодоления разрыва между спросом и предложением, так как существует проблема в грамотной эксплуатации энергии [1]. В связи с этим совершенствование технологий и устройств хранения энергии приобретает первостепенное значение. Сегодня для хранения энергии с целью дальнейшего использования доступны самые разные средства и технологии, проведено много исследований для определения высокоэффективных методов хранения и преобразования необходимой энергии [2]. В статье рассмотрены некоторые из них, их достоинства и недостатки.

Сфера энергетики постоянно меняется, а вместе с ней и системы накопления энергии, играющие все более важную роль в её распределении. Уже создано множество первых разработок новых систем. Так, в ближайшем будущем в нашем жизненном обиходе нас будут окружать натриевые аккумуляторы, ядерные батарейки, органические редокс-аккумуляторы.

Двумя типами накопителей энергии являются аккумуляторы и суперконденсаторы. Ионистор, особенно двухслойные суперконденсаторы и псевдоконденсаторы, привлекли больше внимания, чем батареи. Они преобладают такими параметрами, как более высокая удельная мощность и более длительный срок службы. В конструкции электродов суперконденсаторов используются различные нанокompозитные материалы, такие как углерод (графен или углеродные нанотрубки), оксиды металлов (сульфиды) и проводящие полимеры. Среди этих материалов сульфид олова (IV) является наиболее широко используемым материалом, поскольку его слоистая структура способна образовывать двумерные морфологии. Благодаря распространённости в природе, экологичности и дешевизне сульфид олова (IV) рассматривается как перспективный материал для создания эффективных электродов [3]. Фарадеевские свойства этого материала также делают его пригодным для применения в ионисторах.

Распространённые аккумуляторные системы основаны на электрохимическом процессе. В настоящее время доступны и другие методы хранения химической энергии. Например, водородная энергетика. Это некая отрасль, которая объединяет в себя вопросы производства хранения и транспортировки и, что самое главное, использование водорода. Водород сжимается и хранится для будущего использования в водородных генераторах или топливных элементах, превращаясь обратно в воду [4]. Такой подход позволяет хранить большое количество энергии, но он не обязательно является самым эффективным. Проблема в том, что он сам по себе энергозатратен, так как требует много энергии для электролиза. Эту проблему можно решить с помощью альтернативных источников энергии. На данный момент у нас происходит следующий виток развития, связанный с удешевлением технологии. Можно сказать, что это тоже газовая батарея, только выглядит иначе и называется топливным элементом или топливной

ячейкой. Центральным элементом являются мембраны, которые разделяют пространство топлива ( $H_2$ ) и окислителя ( $O_2$ ). Она непроницаема для газа и непроницаема для электрического тока в виде электрона, но пропускает электрический ток в виде иона кислорода. На этой мембране используют электроды, на которых будут протекать две реакции. На катоде из газообразного кислорода получаем ионы кислорода, а на топливном электроде, с помощью этих же ионов кислорода, окисляется  $H_2$ , на выходе получаем ту же самую воду ( $H_2O$ ) и при этом дополнительный член, в виде электронов. Эти электроны, результат разделения реакции на две полуреакции, используется для получения полезной работы. Для получения мощности, что требуется потребителю, их собирают в батареи, а нагрузкой может быть, к примеру, мотор машины. Сейчас почти все автогиганты могут похвастаться концептами водородных автомобилей. выхлоп, от которых вместо вредных соединений лишь пары воды. Подобное поведение по отношению к окружающей среде демонстрируют и электромобили, но у водородного транспорта перед ними есть неоспоримое преимущество. Энергоустановки, которые создаются на топливных элементах позволяют достичь энергоёмкости до 700 Вт·ч/кг. Это в 3–5 раз больше, чем современный аккумулятор. Соответственно, в такое же количество раз при той же массе мы можем увеличить дальность пробега. Таким же способом сегодня увеличивают электроёмкость и других видов транспортов и электроприборов, что помогает расширить сферу их эксплуатации.

Не так давно российские ученые из Московского института стали и сплавов совместно с немецкими коллегами выбрали вещество, которое может стать хорошей альтернативой лития в аккумуляторах. Это натрий – дешёвый щелочной элемент. Для хорошей электроёмкости, необходима двуслойная структура из графена, между слоями которого – упорядоченные слои натрия. Созданная подобным образом структура показала ёмкость 335 Ма·ч на грамм вещества, что сравнимо с ёмкостью литий-ионных аккумуляторов – 372 Ма·ч на грамм [5].

А российским ученым из НИТУ МИСиС удалось повысить эффективность ядерной батареи в 10 раз. Для этого они разработали специальную структуру микроканала для более эффективного преобразования бета-излучения в напряжении. Кроме того, в новой структуре ученым удалось контролировать обратный ток – всё это повысило эффективность ядерных элементов по сравнению с аналогами, имеющимися на рынке [5].

Шотландская компания Gravitricity разработала новую систему для накопления энергии. Эта система представляет собой шахту, в которой будет размещаться огромный груз весом от 500 до 5000 тонн. При нахождении на верху потенциальная энергия будет максимальна, при опускании вниз – высвобождается энергия, вырабатывается электричество. Преимущество такой системы в её долговечности и износостойкости. Так же гравитационный накопитель дает возможность достичь пикового значения мощности за считанные секунды. Основная проблема гидроаккумулирующей станции – необходимость создания огромных подземных конструкций, в которых поток воды разворачивает на 90 градусов. Компания «Obermeyer Hydro», финансируемое департаментом энергетики США, разработала новую конструкцию гидротурбин для аккумулирующих электростанций. Эти турбины позволят разворачивать поток воды на 180 градусов. Поэтому, используя такие турбины, достаточно будет соорудить вертикальный колодец. Это позволит снизить стоимость строительства ГАЭС на 45 %. При этом расчетный КПД таких турбин более 92 % [5].

Во всех областях прогресс и развитие деятельности человека определяет быстрый рост производства и потребления энергии различных видов. Накопителям энергии являются важным связующим звеном между системами генерирования и системами распределения и потребления энергии. Возобновляемые источники энергии могут внести большой вклад в обеспечение надежной и устойчивой электроэнергией изолированных сообществ и в будущее устойчивой энергетики мира, причиняющее минимальный вред окружающей среде и климату. Поэтому вдохновляющие исследования, связанные с хранением и преобразованием энергии, необходимы для разработки передовых материалов и построения взаимосвязей между процессом и свойствами. Комплексные исследования в области накопления и преобразования энер-



гии требуют междисциплинарного подхода в связи с присущим им потенциалом для реализации высокопроизводительных электрохимических систем для реальной энергетики. Помимо предложения новых материалов для высокопроизводительных энергетических систем необходима оптимизация систем преобразования энергии. В настоящее время шаги, предпринятые в направлении выработки энергии возобновляемыми источниками вместо традиционных, особенно ошеломляющий спрос на электромобили и электрохимические накопители энергии являются основной движущей силой дальнейшего увеличения производства и разработки. Так проблема аккумуляции энергии очень актуальна в наше время, требует особого внимания и вложений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, 2012.
2. Современное производство и техника. URL:[https://itexn.com/8479\\_akkumulirovanie-terplovoj-i-jelektricheskoj-jenergii.html](https://itexn.com/8479_akkumulirovanie-terplovoj-i-jelektricheskoj-jenergii.html) (дата обращения 6.09.2022).
3. Современные системы накопления энергии. URL:<https://controleng.ru/apparatnyesredstva/sistemy-nakopleniya-energii/> (дата обращения 13.08.2022).
4. Соренсен Б. Преобразование, передача и аккумуляция энергии: учебносправочное руководство. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011.
5. SD Science Daily «Последние новости в области накопления энергии: новые разработки аккумуляторов, гравитационные и водяные накопители энергии, новые материалы, новые конструкции», 2020 (дата обращения 11.06.2021).

Научный руководитель: к.т.н. М.В. Сержантова, доцент кафедры №32 ИКС ГУАП.

## ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Т.Н. Сафиуллин

Казанский государственный энергетический университет

ИЭЭ, ЭПП, группа ЭПм-1-21

Уровень потребления электроэнергии является как показателем темпов развития страны, так и отражает ее индустриализацию в целом.

При передаче электроэнергии от источника питания к потребителям возникают различные потери. Большинство из них приходит на распределительные сети. Это связано с тем, что в этих сетях низкое напряжение, а ток большой.

Поэтому при совершенствовании распределительных фидеров, решающим фактором является минимизация потерь мощности [1].

Электроэнергия от источника питания до трансформаторов транспортируется по линиям электропередач, где среднее напряжение преобразуется в низкое, которое, в свою очередь, подается конечному потребителю.

Проводники, используемые в распределительных сетях, по конструкции делятся на подземные и надземные. Подземные системы включают в себя заглубленные каналы и кабельные блоки, а в качестве проводника используются кабельные линии. Надземные системы передачи электроэнергии состоят из воздушных линий и различных опор, проводниками выступают провода. Несмотря на относительную дешевизну и меньшее время поиска различных неисправностей на воздушных линиях, подземные сети считаются более надежными, а также не портят эстетический вид улиц.

Полностью устранить потери в электрических системах невозможно, их можно лишь минимизировать, коррекцией коэффициента мощности, правильным выбором сечения проводника, оптимальным выбором мощности трансформатора.

Потери электроэнергии в распределительных сетях можно разделить на технические и нетехнические. Технические потери зависят от электрических характеристик распределительных сетей, вызваны рассеянием энергии в проводниках и оборудовании, используемом для распределения мощности. Технические потери могут возникнуть в любом месте распределительной сети. Когда электрический ток проходит через линию электропередач, он вызывает потери электроэнергии в виде тепла. В сердечнике трансформатора потери происходят из-за электромагнитной индукции. То есть, технические потери можно разделить на токозависимые и токонезависимые, а значит и на зависящие и не зависящие от нагрузки. Потери независимые от тока, возникают под действием сетевого напряжения, представляют собой диэлектрические потери и потери тока утечки. Эти потери, возможны в конденсаторных батареях, которые часто используются для улучшения коэффициента мощности в устройствах низкого и среднего напряжения. Диэлектрическими потерями кабелей можно пренебречь, ток утечки не зависит от тока нагрузки, протекающего по кабелю, он пропорционален напряжению. Токозависимые потери представляют собой потери, зависящие от квадрата тока протекающего по проводнику и проявляются в виде тепловой энергии. Кабельные соединения, броня в кабелях, потери в экране и взаимное реактивное сопротивление также можно отнести к классу токозависимых потерь [2].

Нетехнические потери – это как разница между фактически потребляемой электроэнергией и электроэнергией, проходящей через средства учета, обуславливаются различными погрешностями. Нетехнические потери больше связаны с потребителем и бывают преднамеренными или непреднамеренными. Основными причинами нетехнических потерь являются: незаконное использование электроэнергии, неправильные показания счетчика или ошибки при выставлении счетов на оплату.

Таким образом, потери электроэнергии, и последствия таких потерь с каждым днем становятся все более актуальными, обуславливается это постоянным увеличением потребителей.

Полностью устранить потери невозможно, их необходимо максимально нивелировать. Как вариант, следует предпочесть использование подземных систем электроснабжения, у них более высокая пропускная способность, они не загромождают уличное пространство, по сравнению с надземными сетями, подземные защищены от атмосферных воздействий. Подземные сети практически полностью исключают возможность самовольного подключения.

Системы компенсации реактивной мощности необходимо подбирать исходя из существующих нагрузок, для достижения коэффициента мощности близкого к единице. Мощность трансформаторов должна быть выбрана так, чтобы был достигнут его оптимальный коэффициент загрузки. Необходимо избегать как перегрузки, так и недогрузки трансформаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Влияние основных параметров электрооборудования на потери электроэнергии в низковольтных сетях / Грачева Е.И., Алимова А.Н. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37181173> (дата обращения: 03.11.2022).
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения / Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека: [сайт]. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42670394> (дата обращения: 05.11.2022).

Научный руководитель: д.т.н. Е.И. Грачева, профессор КГЭУ.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА НАДЁЖНОСТЬ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.Н. Журиков

Томский политехнический университет  
группа З-А1-27

На кабельные изделия в процессе эксплуатации и хранения действуют различные сочетания климатических, механических и электрических факторов. Кроме того, любой из этих факторов (тепло, холод, вибрация и пр.) не является постоянным по величине, изменяясь во времени.

На надёжность кабельных изделий в основном влияют рабочие температуры, особенно их циклические чередования с отрицательными температурами при этом безотказность может быть описана законом, выраженным эмпирической формулой [1]:

$$\ln(\tau) = \frac{A}{T} + B, \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность, или время в часах до выхода из строя, при абсолютной температуре  $T$ ;  $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от материалов, применяемых в кабеле.

Уравнение (1) схоже с уравнением Аррениуса и показывает, что физико-химические процессы в материалах кабельных изделий при тепловом старении подчиняется общим закономерностям кинетики химической мономолекулярной реакции, постоянная скорости которой определяется по формуле:

$$K = K_{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная (кал/град.г.моль);  $T$  – абсолютная температура (К);  $E$  – энергия активации, (кал/г.моль);  $K_{\infty}$  – постоянная скорости при  $T = \infty$ .

В полулогарифмическом масштабе координат уравнение (1) имеет вид прямой линии, что дает теоретическую базу для экстраполяции экстремальных данных в область более низких температур, т. е. для проведения ускоренных испытаний на безотказность кабельных изделий, которая определяется в основном сроком жизни изоляционных и шланговых материалов.

Определение закономерностей, характеризующих физико-химические процессы изменения материалов, позволяет разрабатывать и применять на практике модели отказов, имитировать условия эксплуатации и прогнозировать время ожидаемого отказа или время гарантированной наработки без отказов.

В качестве наиболее общих физико-химических процессов в материалах конструкции изделий, которые могут быть связаны в той или иной степени с постепенным или скачкообразным отказом обычно указывают процессы, вызывающие необратимое ухудшение работоспособности изделий при их эксплуатации и хранениях. Такие процессы, объединяемые под собирательным термином «старение», могут включать в себя диффузионные процессы в объеме и на поверхности твердых тел, перемещение и скопление точечных дефектов в кристаллической структуре, флуктуационный разрыв межатомных связей в металлах и сплавах, разрыв химических связей цепей макромолекул полимерных материалов, сорбционные процессы, структурные превращения, окисление радикалов молекул полимеров и др. [2].

Даже в наиболее простых элементах конструкции могут протекать при соответствующих режимах работы и внешних условиях многие физико-химические процессы, способные привести к отказу изделия. Достижение критичных изменений, устанавливается при этом посредством контроля структурных или структурно-чувствительных параметров.

Данная методика позволяет определить условную энергию активации  $E$  преобладающего физико-химического процесса старения и планировать испытания в форсированных режимах. При этом определение величины  $E$  возможно при одном режиме испытаний, тогда как при применении традиционных методов величина  $E$  устанавливается по отказам не менее, чем при 3-х испытательных режимах (температурах).

В данной работе проведен анализ испытаний основного проводникового материала в кабельной промышленности – медной проволоки, для защиты от коррозии и старения которую в большинстве случаев покрывают слоем олова, серебра, реже никеля и олово-никелевого сплава.

Проводниковые материалы подвергались испытаниям в воздушной среде при температурах (от 85 до 600 °С), а также в коррозионных средах – морской воде, соляном тумане, 98 %-ой относительной влажности при температуре 40 °С. Контролировался внешний вид, удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и механические свойства (временное сопротивление разрыву  $\sigma$  и относительное удлинение  $\delta$ ).

В реальных условиях эксплуатации проводниковые элементы исследуемых кабельных изделий не подвергаются непосредственному воздействию морской воды. От воздействия повышенной влажности воздуха и соляного тумана проводниковые элементы в достаточной степени защищены изоляцией и покровными оболочками, а также корпусом аппаратуры, внутри которой размещаются многие типы кабельных изделий (низковольтные монтажные провода, бортовые ленточные провода, миниатюрные радиочастотные кабели). К этому следует добавить наличие герметичных или влагоуплотненных кабельных разъемов.

Поэтому основным процессом, приводящим к необратимому ухудшению проводниковых элементов, является тепловой, старение, как в воздушной среде, так и без неё (в изоляционной «оболочке»).

Медная проволока интенсивно окисляется на воздухе при температурах выше 225 °С. При температуре 200 °С и выше в медной проволоке происходит значительный рост зерен, а также значительное не только наружное и внутреннее окисление (по телу зерен и между ними). Эти факторы влияют на механические и электрические свойства проводника, снижая его прочность и пластичность и увеличивая сопротивление.

В условиях герметизации существенного окисления меди не происходит до 300 °С. Таким образом, при длительной эксплуатации проводов и кабелей применение медного внутреннего проводника допустимо при температуре не выше 150 °С.

В медной лужёной оловом проволока под действием повышенной температуры развиваются процессы, характерные для каждого из сочетаемых компонентов, а также происходит взаимная диффузия между сердечником и антикоррозийным покрытием. В результате реакции взаимодействия диффундирующих элементов возникает ряд химических соединений (интерметаллоидов), характеризующихся определенными физическими и механическими свойствами, отличными от элементов, составляющих химические соединения.

Взаимная диффузия между оловом и медью наблюдается уже при 150°С с постепенным образованием интерметаллического сплошного слоя, которому присущи пониженные механические свойства. Таким образом, рекомендуется медную луженую оловом проволоку, защищенную изоляцией, длительно эксплуатировать при температуре не выше 180°С.

При воздействии высокой температуры на медную посеребренную проволоку происходит ряд явлений:

- рост зерен медного сердечника,
- взаимная диффузия металлов,
- самодиффузия серебра,
- внешнее и внутреннее окисление поверхности проводника.

Диффундирующие компоненты при взаиморастворении образуют смесь кристаллов обоих компонентов в определенном соотношении. Наличие интерметаллоидов в граничном слое резко меняет свойства медной посеребренной проволоки. Таким образом, медную посеребренную проволоку, защищенную изоляцией, рекомендуется длительно использовать при температуре до 200 °С.

Аналогичные процессы, но более медленные, имеют место в медной никелированной проволоке, которая в составе кабельных изделий может длительно работать при температуре до 250 °С.

Процесс старения проводниковых материалов описывается, как и для изоляционных материалов, эмпирическим уравнением, условно называемым уравнением Аррениуса. Условно – так как классическое уравнение Аррениуса, справедливо для химической реакции, тогда как при старении материалов «протекает» комплекс физических и химических процессов и превращений. В общем виде уравнение Аррениуса применительно к кабельным изделиям и элементам их конструкции представляет экспоненциальную зависимость времени старения от величины, обратной абсолютной температуре. Характеристикой такой зависимости является коэффициент, который принято называть условной энергией активации  $E$  [3].

При обобщении результатов испытаний проводниковых материалов при различных значениях повышенных температур были рассчитаны значения величины  $E$  в диапазоне температуры от 100 °С до 250 °С. Расчёт проводился для разных критериальных параметров  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  и уровней. Данные расчёта приведены на рисунке 1.

На основе полученных данных, значение условной энергии активации проводниковых материалов можно принять в среднем равным 20 ккал/г.моль. Эта величина близка к значению условной энергии активации полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции ((16,3-22,3) ккал/г.моль), но значительно уступает величине  $E$  для фторопластовой изоляции (26,7 ккал/г.моль).

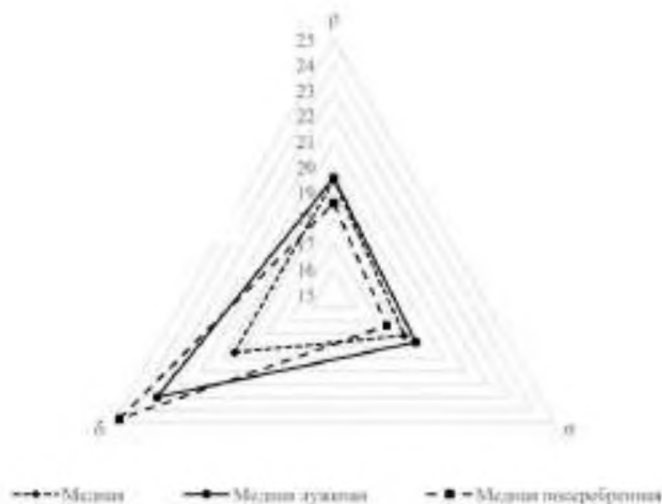


Рис. 1. Значения условной энергии активации для разных критериальных параметров

Исходя из разницы в значениях  $E$  между проводниковыми материалами и изоляционными, правомерно утверждать, что для многих теплостойких проводов и кабелей при испытаниях на надёжность в фиксированных (ускоренных) режимах, слабым местом является не изоляция, а токопроводящие жилы и электрические экраны.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кранифельд Л.И., Потапов С.Н., Дудкевич А.Н.: надёжность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры. – М: Информэлектро, 1990. – 47 с.
2. The Non-Probabilistic Reliability Analysis of Stayed-Cable Based on the Interval Algorithm / Shan Shan Cao, Jun Qing Lei, Kun Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – V. 455. – P. 267–273.
3. Ageing and reliability of electrical insulation: the risk of hybrid AC/DC grids / Gian Carlo Montanari, Peter Morshuis, Paolo Seri, Riddhi Ghosh // The Institution of Engineering and Technology. – 2020. – V. 5. – P. 620–627.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.П. Леонов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ГРАВИТАЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

И.В. Токтаров, Р.Р. Мухаметзянов, Э.А. Мухамедзянов  
Казанский государственный энергетический университет  
ИЭЭ, кафедра ЭТКС, группа ЭМК-1-19

**Аннотация:** в статье описывается конструкция гравитационного аккумулятора, приводится принципиальная схема и электромеханический расчет данного устройства, рассматривается возможность его применения в качестве резервного источника питания.

**Ключевые слова:** резерв, аккумулятор, генератор переменного тока, источник питания, асинхронная машина, гравитация, энергия.

Бесперебойность поставки энергии для стратегически важных для экономики и оборонной промышленности объектов, таких как заводы, угольные шахты, нефтяные и газовые месторождения, должна быть на высоком уровне. Постоянно должно обеспечиваться питание ключевых узлов и агрегатов, таких как насосы и вентиляция (питание электродвигателей), освещение, всевозможные охлаждающие и подогревательные установки. Установка классических дизель-генераторов может быть очень дорогой, при том, что для полноценного ввода в сеть требуется время. В данной статье предлагается конструкция и ввод в эксплуатацию полноценных, надежных и по-настоящему экологичных гравитационных аккумуляторов.

Принцип его работы отображен на рисунке 1. Подвешенный на высоте груз 1 в необходимый момент начинает медленно падать, вращая блок 2. Блок 2 вращается на валу 3 вместе с большой шестерней редуктора 4. Малая шестерня редуктора 5 вращается на валу 6, на нем же вращаются автоматическая коробка переключения передач 7 и ротор генератора 8. Сам груз, обладая потенциальной энергией выступает в роли аккумулятора, подвижный блок преобразует кинетическую энергию уже падающего груза в кинетическую энергию вращения вала. С помощью подбора размеров шестерен редуктора можно добиться требуемой частоты вращения вала. АКПП выступает в роли регулирующего устройства, которое поддерживает частоту вращения генератора при изменении количества потребителей, подключенных к генератору, или изменении их мощности.

Пример возможного расчета такого аккумулятора может выглядеть следующим образом: требуется оснастить резервным аккумулятором насосный цех, потребляемая мощность которого в зависимости от режима работы порядка 60-70 кВт в течение 8 часов. Для гравитационного аккумулятора выкопана скважина глубиной 25 метров и поставлена вышка – опора 25 метров. В качестве электрической машины выбран асинхронный двигатель с количеством полюсов  $n = 12$ . Для обеспечения промышленной частоты тока на выходе 50 Гц требуется поддержание вращения вала ротора со скоростью 500 об/мин. При прохождении пути 50 метров за 8 часов линейная скорость груза равна 0,0017 м/с, или же 0,17 см/с. Преобразование энергии падения груза в угловую скорость вращения блока происходит по формуле  $\omega = \frac{v}{R}$ , где  $R$  – радиус подвижного блока, равный 10 см. Тогда угловая скорость вращения вала  $\omega = 0,017$  рад/с, или же 0,16 об/мин. Редуктор требует содержать в себе 3 группы зубчатых колес, с общим передаточным соотношением 125 и зубчатую пару с передаточным соотношением 25.

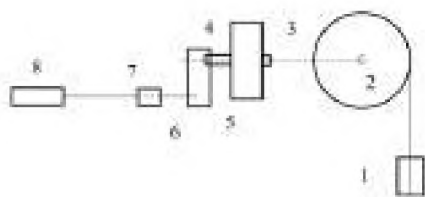


Рис. 1. Принципиальная схема гравитационного аккумулятора

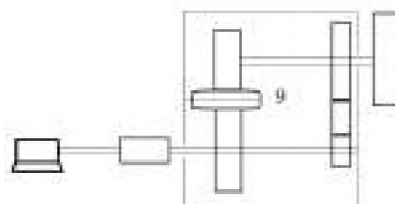


Рис. 2. Принципиальная схема редуктора

Для поднятия каната после разрядки, в редукторе предусмотрена червячная передача 9, соединяющая блок напрямую с асинхронной машиной, которая работает теперь как лебёдка.

Преимуществами данной системы является то, что она гибко настраивается под нужды любого потребителя, его возможно просто и быстро установить. Энергоноситель – твердое тело, нет никаких требований к качеству энергоносителя. Недостатком устройства является большое количество механических элементов, подвергаемых износу.

Максимум, который может запасти такая гравитационная установка определяется по формуле:

$$A = \frac{W \cdot \gamma \cdot H \cdot W_{\text{нас}}}{367200} \text{ кВт/ч}, \quad (1)$$

где  $A$  – емкость, кВт/ч;  $W$  – объемный вес груза;  $H$  – глубина шахты;  $W_{\text{нас}}$  – коэффициент насыщения (0,15 – 0,2);  $\gamma$  – удельный вес материала гири.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Сорокин, В. А. Рекуперационное устройство с гравитационным аккумулятором / В.А. Сорокин, М. В. Кубриков // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1. – № 8. – С. 72-73. – EDN TAPGXV.
2. Патент № 2216645 С2 Российская Федерация, МПК F03G 3/00. Гравитационный аккумулятор : № 2001125836/06 : заявл. 21.09.2001 : опубл. 20.11.2003 / Г. П. Морев. – EDN ZZSFOT.
3. Исследование трехфазного синхронного генератора: Метод. Указания по выполнению лабораторной работы № 7 на стенде НТЦ-23 / Сост.: Ю.А. Рылов, Н.Г. Баженов, Г.С. Магданов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 32 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. И.С. Антипанова, ст. преп. КГЭУ.

## OVERHEAD WIRE TEMPERATURE CONTROL. PURPOSE AND DESCRIPTION OF THE DEVICE

D.F. Sharafiev

Kazan state power engineering university  
IEE, RPA, group AUSm-1-21

The key task of the electric power industry is to ensure the uninterrupted supply of electrical energy to the consumer. As you know, electricity mainly moves through the wires of an overhead line (OHL), so its efficiency and reliability is determined by the state of the power supply networks [1].

This is a complex and non-trivial task that affects many areas and areas, including:

– the use of modern and high-quality materials in the construction and reconstruction of power lines;

– competent design;

– compliance with the rules and regulations during installation;

– proper maintenance during operation;

– continuous monitoring and timely detection of potential emergencies.

Monitoring the temperature of overhead lines solves many problems:

One of them is the problem of mechanical cable overload due to ice, snow and wind loads. Ice-snow deposits on wires cause additional mechanical loads on power lines, as a result of which wire breaks, destruction of fittings and overhead line supports are possible.

Another problem is the maximum allowable temperature of the wire. Controlling this parameter will allow:

– to maintain the mechanical strength of the wire, thereby avoiding an increase in the sag and the danger of reducing the normalized distances to the ground and intersected objects;

– to avoid cable breakage due to overheating. For example, when heating wires during ice melting.

Indeed, for each wire that has insulation or for a cable, there is its own permissible limit for the heating temperature, its value directly depends on the insulation used.

On each brand of cable or wire, the manufacturer indicates the maximum allowable temperature during heating:

– for wires with rubber insulation – the maximum allowable temperature during heating should be in the range from 50 to 65 degrees.

– for wires with paper insulation – the maximum allowable temperature during heating should not exceed 80 degrees.

– for wires whose insulation consists of modern polymeric materials, this figure is much higher. Such insulation calmly tolerates heating up to 100 degrees.

Methods for calculating the temperature of the wire are divided into two generally accepted:

– non-contact, which use heat balance equations, where the heat transfer coefficient is calculated by measuring the wind speed and calculating its value depending on the specified wind speed.

– contact, which use various types of sensors installed on the measurement object. The devices are mounted directly on the current-carrying parts of high-voltage equipment and measure the temperature at the installation site.

Overhead line monitoring is an important part of improving the reliability and efficiency of power supply to consumers. This approach can be implemented both on the basis of existing methods, inspection of each kilometer of the line, and using new solutions that can significantly reduce time and material costs.

At the moment, there are many solutions for the implementation of an overhead line monitoring system that provide the operator with real information about the current state of overhead power supply networks.

The monitoring system consists of measuring units, which include various sensors, a processor, wireless communication transfers, their power supply, etc. The connection between the measuring unit and the monitoring center is formed through a communication channel. The figure 1 shows the monitoring system for power transmission lines [2].

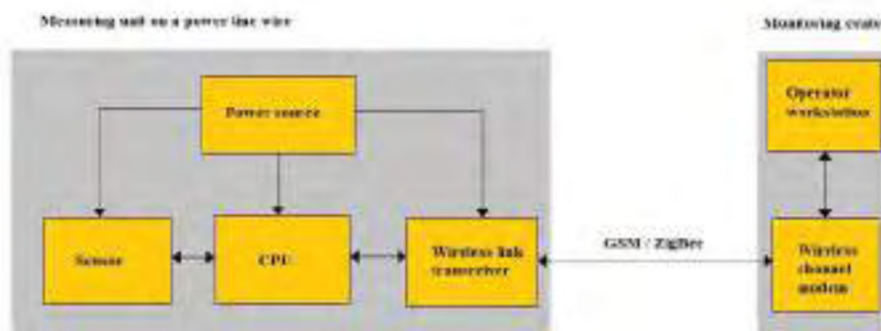


Fig. 1. Power line wire monitoring system

The device is mounted directly on the current-carrying parts of high-voltage equipment and measures the temperature at the installation site using a built-in integrated temperature sensor. The results of temperature measurements via a standard wireless interface are transmitted to wireless information receivers at a distance of up to 100 meters. Measurement and data transfer occurs in a specified period of time (for example, every 10 seconds, 15 minutes, etc.)

Food can be provided in two ways:

–For measuring systems placed on the masts of power transmission lines, as a rule, batteries recharged from solar panels are used.

–For measuring modules mounted directly on the wires of power lines, the power is supplied



from a current transformer.

This device can be used in power supply systems of consumers to protect the contact network and electrical networks, it can also be used to protect the contact network of urban and other types of transport, as well as to protect electrical networks and general high-voltage lines from overheating of wires.

#### LITERATURE:

1. Wang C. Online Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Equipment. – Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2006.
2. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП / А.В. Самарин, Д.Б. Рыгалин, А.А. Шкляев // Естественные и технические науки. - 2012. - № 1, 2.
3. Overhead Transmission Line Monitoring System for Dynamic Rating / M. Sanda, T. Kojima, E. Higashi, T. Maruyama, N. Iwama, O. Sakai // Sei technical review. Environment & Energy. - october 2018. - №87.
4. Study on overhead transmission line on-line monitoring technology / Z. Yang // Thermal Science. – 2016. - Vol. 20. - Suppl. 2. - pp. S383-S391.

Scientific adviser: PhD in Physics and Mathematics A.N. Gavrilenko, associate professor IEE RPA KSPEU.

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВПРЫСКА ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГТУ НА ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.А. Минор, Е.С. Болдушевский, А.А. Туболев, Н.Н. Галашов  
Томский политехнический университет,  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова

Впрыск водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ) является одним из наиболее эффективных, простых и экономически выгодных способов для увеличения ее мощности и КПД, а также снижения содержания в выбросах наиболее опасных загрязняющих веществ – оксидов азота  $\text{NO}_x$  и монооксида углерода  $\text{CO}$  [1, 2]. Особенностью простейшей схемы ГТУ с впрыском пара являются безвозвратные потери очищенной и обессоленной воды в виде водяного пара, который, отработав в газовой турбине выбрасывается в атмосферу вместе с уходящими газами. В настоящее время этот вопрос решается установкой за газовой турбиной (ГТ) котла-утилизатора (КУ) для получения перегретого пара, который используется для привода паровой турбины и впрыска в камеру сгорания. На выходе газов из КУ устанавливают конденсационный теплоутилизатор, что позволяет снижать температуру и улавливать влагу из уходящих газов и этим увеличивать экономичность установки и снижать загрязнение окружающей среды, а также полезно использовать уловленную влагу. ГТУ в комплексе с КУ и системой впрыска пара в которых в газовой турбине вместе с продуктами сгорания топлива дополнительно работает впрыскиваемый в камеру сгорания (КС) пар называют газопаровыми установками (ГПУ), чтобы не путать с парогазовыми установками (ПГУ).

В [3] для исследования влияния основных параметров цикла ГТУ и впрыскиваемого в КС пара разработаны алгоритм и программа расчета тепловых схем ГПУ. Программа позволяет из подпрограмм элементов составлять и рассчитывать схемы ГПУ любой сложности. В статье [3] исследовалась схема простой ГПУ, предназначенной только для выработки электроэнергии. Показано, что впрыск пара в КС ГТУ эффективен только при температурах перед ГТ выше  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . А существенный прирост КПД по отпуску электроэнергии может быть получен при температуре выше  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  и степени сжатия в компрессоре выше 30 может быть получен КПД нетто выше 55 %. А при достигнутой на зарубежных ГТУ температуре  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  может быть получен КПД нетто до 57 % при степени сжатия 55. Исследования проводились при постоянной температуре впрыскиваемого пара  $540\text{ }^\circ\text{C}$ . Расчеты показали, что температура выходящих газов из ГТ позволяет получить перегретый пара на выходе КУ до  $650\text{...}900\text{ }^\circ\text{C}$ . В данной работе проведены расчеты с изменением температуры впрыскиваемого в КС ГТУ пара в пределах  $525\text{...}800\text{ }^\circ\text{C}$ . Для наиболее важных показателей ПГУ результаты расчетов приведены на рисунках 1–4.

На рисунке 1 видим, что максимальный диапазон изменения температуры впрыскиваемого пара может быть получен для температур пара на входе ГТ  $1100\text{...}1300\text{ }^\circ\text{C}$ . С ростом этой температуры диапазон сужается, достигая  $525\text{...}630\text{ }^\circ\text{C}$  при температуре на входе ГТ  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ .

На рисунке 2 приведена зависимость электрического КПД нетто ПГУ от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ. Для определения влияния температуры впрыскиваемого пара расчеты проводились для двух случаев: а) постоянная температура впрыскиваемого пара  $540\text{ }^\circ\text{C}$ ; б) переменная температура впрыскиваемого пара. Точки на рисунке 2 соответствуют точкам на рисунке 1.

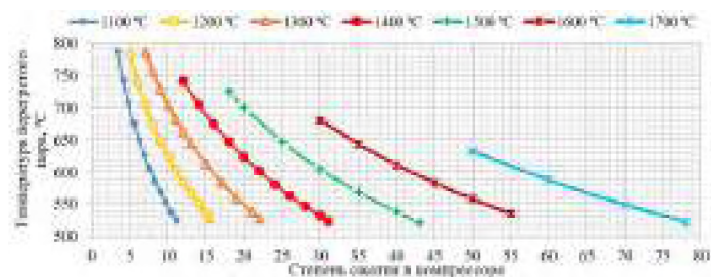


Рис. 1. Температура пара, впрыскиваемого в камеру сгорания ГТУ

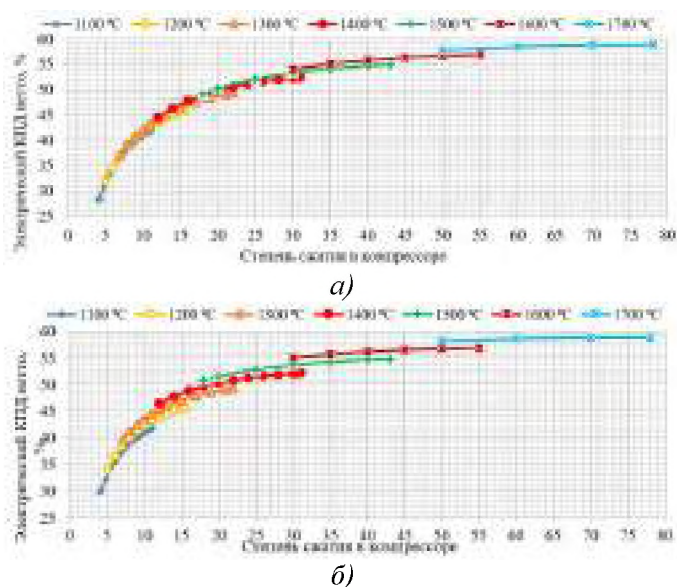


Рис. 2. Зависимость электрического КПД нетто от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ:

а) температура впрыскиваемого пара 540 °С; б) переменная температура впрыскиваемого пара

Сравнение зависимостей электрического КПД нетто ПГУ при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов перед ГТ на рисунках 2а и 2б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара увеличивает КПД при уменьшении степени сжатия от 1 % при температуре газов перед ГТ 1600 °С до 3 % при температуре газов перед ГТ 1100 °С.

На рисунке 3 приведена зависимость расхода впрыскиваемого пара в кг на кг сжигаемого топлива от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ.

Сравнение зависимостей расхода впрыскиваемого пара при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов перед ГТ на рисунках 3а и 3б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия уменьшает расход впрыскиваемого пара от 3,3 до 2,8 кг при температуре газов перед ГТ 1700 °С и от 8,35 до 7,63 кг при температуре газов перед ГТ 1100 °С.

На рисунке 4 приведена зависимость коэффициента избытка воздуха в КС ГТУ от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ.

Сравнение зависимостей коэффициента избытка воздуха в КС ГТУ при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов перед ГТ на рисунках 4а и 4б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия увеличивает коэффициента избытка воздуха от 1,27 до 1,38 при температуре газов перед ГТ 1700 °С и от 1,8 до 2,1 при температуре газов перед ГТ 1100 °С.

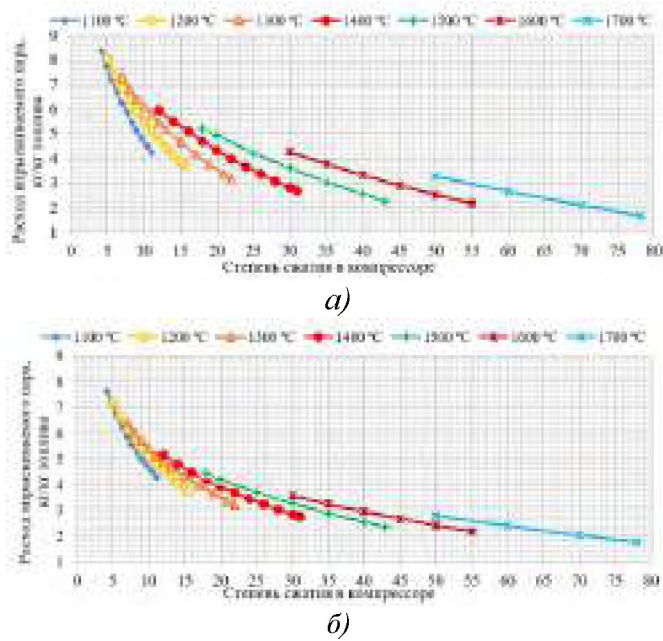


Рис. 3. Зависимость расхода, впрыскиваемого пара от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ:  
 а) температура впрыскиваемого пара 540 °С; б) переменная температура впрыскиваемого пара

Повысить экономичность ПГУ можно используя отпуск тепла с помощью конденсационного теплоутилизатора и теплового насоса [4], а также используя паровой и органический цикл Ренкина с воздушным конденсатором, рассмотренные в [5].

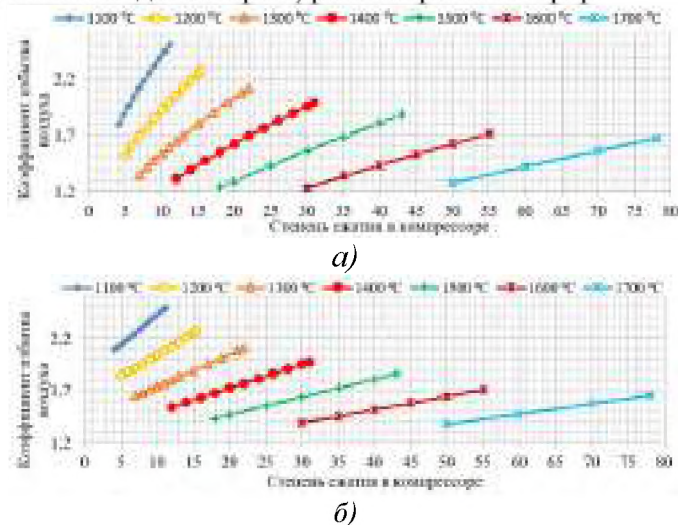


Рис. 4. Зависимость коэффициента избытка воздуха от степени сжатия в компрессоре, температуры газов перед ГТ и впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ  
 а) температура впрыскиваемого пара 540 °С; б) переменная температура впрыскиваемого пара

Проведенные исследования показывают, что увеличение температуры впрыскиваемого пара более выгодно при низкой степени сжатия в компрессоре и температуре газов перед ГТ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
2. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 5. – С. 9–29.

3. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А, Баннова А.И. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2021. – Т.332. – № 12. – С. 124–135.
4. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Беспалов В.В., Минор А.А, Болдушевский Е.С. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т.333. – № 5. – С. 43–55.
5. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т.330. – № 5. – С. 44–55.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Н.Н. Галашов, доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В.Г. Горячев, А.А. Полева  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б94

Рассмотрены тенденции в проектировании центров обработки данных с использованием выделяемого тепла из горячих коридоров, как встраиваемое дополнение в существующую систему теплоснабжения, оценена эффективность использования тепловой энергии от ЦОД на основе данных, полученных при разработке финансового предпроект.

На сегодняшний день существует множество альтернативных источников энерго- и теплоснабжения, одним из которых является использование тепловой энергии ЦОД.

Основной процент избытков теплоты центров обработки данных составляет ИТ-оборудование, которое равно примерно 70 % от всего выделяемого тепла ЦОД (рисунок 1). Мощность центров обработки данных оценивается числом стоек серверной и их мощностью.

Существует классификация стоек по мощности:

- малой мощности – от 1 до 2 кВт,
- средней мощности – от 5 до 8 кВт,
- высокой мощности – более 100 кВт.

При этом мощность ЦОД малых размеров составляет около 300 кВт, средние ЦОД вырабатывают мощность до 1 МВт, а крупные до 5 МВт. Удельная теплота при средней мощности стойки составляет 3 кВт/м<sup>2</sup> [1, 2].

Тепло выделяемое ЦОД уходит в атмосферу, при этом средняя температура воздуха в некоторых секциях центра обработки может достигать от 25 до 45 °С [3]. Система, при которой возможно использовать тепловую энергию от ЦОД позволяет рекуперировать до 12 МВт энергии. По расчетам, полученным из зарубежных источников [3], затрата тепловой энергии при использовании рекуперативной системы снизится примерно на 30 %, а нагрузка системы центрального отопления на 6 % [3].

На базе воздушного теплового насоса встраивается система рекуперации, где воздух проходя через серверную зону нагревается и нагнетается с помощью вентиляторов в камеры-теплообменники, используется в Америке и странах Европы. Данные проекты были реализованы и работают успешно. Одним из энергоэффективных примеров является дата-центр в городе Стокгольм Bahnhof Thule. Тепловые насосы центра обработки данных берут тепловую энергию из серверной и холодоснабжения, а затем выдают энергию в систему центрального

теплоснабжения. Суммарная мощность тепловых насосов 1,6 МВт при температуре теплоносителя 68 °С [3].



Рис. 1. Распределение температур выделяемого тепла от ЦОД (белым цветом выделены шахты отвода тепла)



Рис. 2. Схема использования рекуперации тепла в компании Bahnhof Thule

При воздушном охлаждении на выходе температура рабочего тела составляет не более 30–40 °С, что не позволяет эффективно нагревать воду для бытовых нужд компаний, при использовании водяного охлаждения температура на выходе равна 65–70 °С, так как теплоемкость воды выше, чем у воздуха. Это позволит упростить систему дополнительного теплоснабжения.

На данный момент в России существуют различные ЦОД, которые выбрасывают тепло в атмосферу, при суммарной мощности составляющей около 600 МВт [2] и выбросе в атмосферу около  $7 \cdot 10^9$  кВт · ч/год [2]. Эти цифры соизмеримы с годовым потреблением газа некоторыми странами Европы [2].

Согласно информации, полученной при проведении авторами экспертного интервью с ИТ-компанией, имеющей оборудование для вычислительных мощностей в городе Томске, были получены примерные характеристики теплового потока от ЦОД. Тепловыделение оборудования составляет 3 МВт/час при воздушном охлаждении в помещении производственного типа с площадью около 1000-1300 м<sup>2</sup>. Согласно рекомендациям СНиП 41-01-2003 для обогрева каждого кубического метра объема необходим 41 Вт тепла, т. е. для помещения с высотой потолков 10 метров и площадью 1000 м<sup>2</sup> расчет будет следующим:

$$Q = V \cdot q = 10 \cdot 1000 \cdot 41 = 410 \text{ кВт},$$

где  $Q$  – количество тепла для обогрева;  $V$  – объем помещения;  $q$  – норма тепла для кубического метра.

Из этого следует, что количество отводимого тепла превышает необходимую норму в несколько раз позволяет экономить на обогреве помещения более 100 тыс. рублей в месяц.

Как показывает анализ эффективности тепловой энергии от центров обработки данных, приведенный выше, тепловая энергия от ЦОД, которая может идти на потребление в городские системы отопления, а также на собственные нужды предприятий, если правильно наладить взаимосвязь между компаниями ЦОД и системами отопления. То есть можно сказать, что тепловая энергия ЦОД это продукт, который при правильном использовании является эффективным альтернативным источником тепловой энергии [2, 4].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Хомутский Ю. Почему центры обработки данных охлаждаются отдельно? Общие требования и особенности СКВ ЦОД // Мир климата. 2017. № 104. С. 92–97.
2. Спасский А. А., Сушенцева А. В. Высокоэффективные решения для систем охлаждения с использованием фрикуллинга и рекуперации тепла на базе оборудования CLIMAVENETA // Холодильная техника. 2016. № 2. С. 41–45.

3. Тепло и уютно: как дата-центры жителям северных регионов жить помогают // 2022 Хабр. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/249099/> (дата обращения: 06.11.2022).
4. Согревающие дата-центры // 2021 Хабр. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/selectel/blog/598735/> (дата обращения: 06.11.2022).

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, ст. преп. НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОМАССЫ В КАЧЕСТВЕ УСКОРЯЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ЗАЖИГАНИЯ ДОБАВКИ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

М.С. Тамашевич  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ14

**Аннотация.** В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияние массового содержания биомассы на временные характеристики зажигания капель водоугольных топлив. Установлено, что добавление древесной биомассы приводит к существенному снижению периода термической подготовки водоугольного топлива.

**Введение.** В последние десятилетия широкое развитие получили альтернативные источники энергии. Внедрение последних позволит уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Но уже сейчас инженеры столкнулись с существенными проблемами в ходе их активного внедрения. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) такие, как ветроустановки [1] и солнечные панели [2] существенно зависят от времени суток и метеоусловий. Поэтому для стабильной работы энергосистемы доля ВИЭ не должна превышать 30 %. Также стоит отметить, что производство и утилизация солнечных панелей ведет к существенному загрязнению окружающей среды токсичными веществами. Имеется трудности и с утилизацией лопасти ветроустановок (длина которых может достигать 100 метров). Последние после выработки своего ресурса не перерабатываются, а захораниваются в грунте, на это отводятся огромные площади. Угольное топливо считается одним из самых грязных. При его сжигании в атмосферу земли уносится вместе с дымовыми газами большое количество вредных веществ. В том числе и антропогенные оксиды азота и серы. Но несмотря на вышеизложенное на уголь приходится порядка 30 % всех генерируемых мощностей [3]. В этой связи можно с уверенностью сказать, что главенствующая роль угля, как основного источника энергии в ближайшие десятилетия сохранится.

Но стоит отметить, что внедрение новых, более экологически чистых способов сжигания угля позволит уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду. К таким можно отнести использование водоугольных топлив (ВУТ). Анализ современных периодических изданий показал, что при сжигании ВУТ существенно сокращаются выбросы оксидов серы и азота [4]. Но внедрение водоугольных суспензий на объектах энергетики затруднено в связи с высокими временами задержки зажигания, которые могут достигать несколько десятков секунд [5]. Решить поставленную задачу можно путем ввода в топливную композицию ускоряющих процесс зажигания добавок. К последним можно отнести и биомассу. Авторами [6] показано, что при сжигании биомассы выбросы оксидов серы и азота существенно меньше, чем при сжигании угля, это в свою очередь окажет благоприятное влияние на экологию. В этой связи становится актуальным оценить возможность использования биомассы в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки.

**Методика проведения эксперимента.** Составы исследовавшихся топливных композиций представлен в таблице 1.

Таблица 1. Состав исследуемых топливных композиций

Уголь		Добавка		Вода
Марка	Содержание, %	Содержание, %	Вид	Содержание, %
«Тощий» (Т)	44	6	Хвоя сосны	50
	46	4		
	48	2		

Экспериментальная установка приведена на рисунке 1. Основными элементами являются: металлический держатель, для фиксации капли топлива 2, которая вводилась в высокотемпературную печь 4. Температура внутри печи регулировалась в достаточно широком диапазоне (от 873 К до 1273 К) при помощи регулятора 3. Процессы термической подготовки и последующего зажигания фиксировала высокоскоростная камера 6 со скоростью видеосъёмки до 1000 кадров/сек. Перемещение печи осуществлялась при помощи подвижной площадки 5 и направляющих 7.

Для каждой смеси проводилась серия из 7 экспериментов. Период времени от начала теплового воздействия (момент попадания капли в печь) до зажигания (появление пламени) считался временем задержки воспламенения ( $t_{ign}$ ). По результатам проведенных исследований определялись средние значения  $t_{ign}$ . Доверительные интервалы при доверительной вероятности 0,95 составлял не более  $\pm 9,3\%$ .

**Результаты.** На рисунке 2 представлены экспериментальные зависимости времен задержки зажигания капель водоугольных топлив от температуры окислительной среды, при различных массовых концентрациях биомассы.

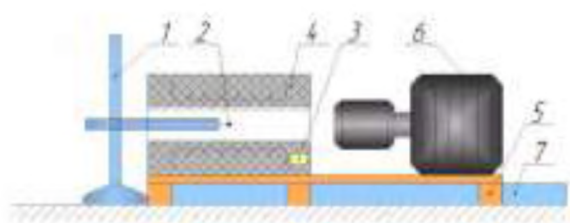


Рис. 1. Экспериментальный стенд  
1 – держатель; 2 – капля топлива; 3 – регулятор температуры; 4 – высокотемпературная печь  
5 – подвижная площадка; 6 – высокоскоростная видеокамера, 7 – направляющая подвижной площадки

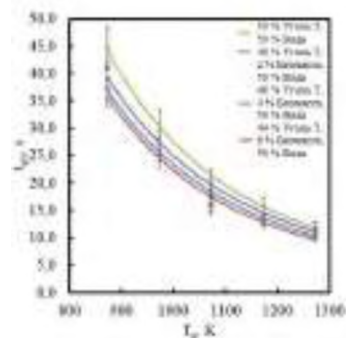


Рис. 2. Зависимости времен задержки зажигания от температуры окислительной среды, для разных составов топлива (при характерном размере капли 4 мм)

Анализ экспериментальных зависимостей, приведенных на рисунке 2 показал, что увеличение содержания биомассы в топливе ведет к существенному уменьшению времен задержки зажигания, особенно для относительно низких температур (до 1073 К). Так, например, при добавлении 2 % опилок сосны в состав топлива времена задержки зажигания уменьшаются на 8 %, а добавление 6 % приводит к снижению  $t_{ign}$  на 17 %. Концентрации биомассы выбирались исходя из условия текучести, при более высоких содержаниях опилок в составе ВУТ, в топливе образовывались топливные агломераты в виде комков, в связи с тем, что биомасса обладает весьма высокой адсорбционной способностью. Кроме того, калорийность древесины значительно меньше угля, поэтому замена части угольного топлива биомассой снижает общую калорийность топлива. Поэтому оптимальным, с точки зрения энергетических характеристик, будет добавление биомассы, для обеспечения необходимого и достаточного снижения периода термической подготовки топлива.

**Выводы.** По результатам проведенных экспериментов установлена перспективность использования древесной биомассы в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки водоугольного топлива. Добавление древесных опилок (6 % по массе) позволяет снизить времена задержки зажигания до 17 % в области низких температур.



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Shoab, M. Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 216. – P. 346-360.
2. Koskela, J. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization // Applied Energy. – 2019. – V. 239. – P. 1175-1189.
3. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, 2018. 56 p. <http://www.bp.com>.
4. Деягин, Г. Н. Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: ЦНИЭИ Уголь, 1969. – 49 с.
5. Syrodoy, S. V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment // Combustion and Flame. – 2017. – V. 180. – P. 196-206.
6. Haykiri-Acma, H. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass // Fuel Processing Technology. – 2008. V. 89. – P. 176 – 182.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (2.0047.РНФ.2022 (РНФ 22-79-00223)).

Научный руководитель: к.т.н. Д.Ю. Малышев, ассистент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## СИНТЕЗ БОРИДА МОЛИБДЕНА В АТМОСФЕРНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ

Ю.А. Некля<sup>1</sup>, Ю.З. Васильева<sup>2</sup>

Томский политехнический университет

<sup>1</sup>ИШЯТ, группа 0А15, <sup>2</sup>ИШЭ, инженер

Борид молибдена (MoB) является уникальным и малоизученным материалом [1]. В последние годы к нему был вызван повышенный интерес как к перспективному материалу для новых жаропрочных, коррозионных и износостойких сплавов и покрытий [2]. Кроме того, борид молибдена обладает собственной решетчатой теплопроводностью [3]. Существует несколько способов получения различных боридов, однако синтез боридов молибдена пока мало изучен [4]. Как правило, бориды молибдена получают по технологиям СВС-металлургии из оксидного сырья со стадией восстановления [5]. Согласно литературе [6], для получения боридов молибдена необходимы высокие температуры, порядка 1400–1800 °С. Это требует больших затрат и усилий, поэтому актуален поиск простого и эффективного способа получения MoB. В настоящее время успешно реализуется синтез карбидов и боридов в атмосферной плазме дугового разряда постоянного тока [7, 8]. Основным преимуществом данного способа является его реализация в открытой воздушной среде, что ведет к уменьшению габаритов установки и повышению энергоэффективности процесса синтеза.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по получению боридов молибдена в атмосферной электродуговой плазме. Эксперимент был проведен в плазмохимическом реакторе с вертикальным расположением электродов [8]. Установка состоит из анода, выполненного из графита в форме стержня, катода, выполненного из графита в форме тигля, источника тока, автоматического привода для перемещения анода, системы управления установкой и осциллографа для измерения показателей силы тока и напряжения в процессе эксперимента. Синтез боридов молибдена реализуется путём инициации дугового разряда постоянного тока, в процессе перемещения анода вдоль оси катода в его полости. В ходе

этого перемещения генерируется плазма постоянного тока, воздействующая на исходное сырьё. В качестве исходного сырья использовались порошки бора и молибдена в соотношении В:Мо = 1:1, которые предварительно смешивали в шаровой мельнице Mixer/Mill 8000M. После синтеза полученный порошок собирался с внутренней полости тигля и анализировался методом рентгеновской дифрактометрии на приборе Shimadzu XRD-7000S ( $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ ). На рисунке 1 представлена типичная картина рентгеновской дифракции полученного материала, на которой можно идентифицировать наличие двух кристаллических фаз: MoB и Mo<sub>2</sub>B. Фазе MoB соответствуют рефлексы, расположенные на  $2\theta \sim 20,9^\circ; 29,2^\circ; 32,9^\circ; 38,7^\circ; 43,6^\circ; 43,6^\circ; 47,5^\circ; 52,4^\circ; 59,6^\circ; 66,3^\circ; 67,7^\circ; 70,0^\circ; 73,4^\circ; 75,7^\circ; 79,1^\circ$  и  $88,3^\circ$ . Рефлексы фазы Mo<sub>2</sub>B выявлены на  $2\theta \sim 30,2^\circ; 35,3^\circ; 41,1^\circ$  и  $45,0^\circ$ . Формирование фаз боридов молибдена в рассматриваемой системе возможно при нагревании исходного сырья, а именно, порошков молибдена и бора, током разрядного контура, а также плазмой дугового разряда.

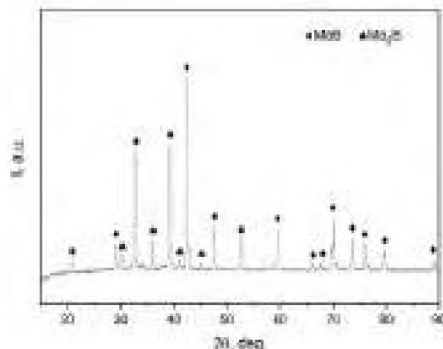


Рис. 1. Картина рентгеновской дифракции продукта синтеза, содержащего фазу боридов молибдена

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментальных исследований, показывающие возможность получения боридов молибдена электродуговым методом в открытой воздушной среде. Для идентификации фазового состава полученного в результате синтеза порошка была проведена рентгеновская дифрактометрия. Подбор оптимального соотношения исходных компонентов бора к молибдену для обеспечения доминирования искомым фаз является предметом дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Zhao Feng, Tao Qiang, You Cun, Ye Meiyang, Li Li, Han Yang, Dong Shushan, Wang Xin, Cui Tian, Zhu Pinwen. Enhanced hardness in tungsten-substituted molybdenum diboride solid solutions by local symmetry reduction // *Materials Chemistry and Physics*. Elsevier, 2020. Vol. 251.
2. Shein I.R., Shein K.I., Ivanovskii A.L. First-principles study on the structural, cohesive and electronic properties of rhombohedral Mo<sub>2</sub>B<sub>5</sub> as compared with hexagonal MoB<sub>2</sub> // *Physica B: Condensed Matter*. Elsevier, 2007. Vol. 387, № 1-2. P. 184-189.
3. Chonga XiaoYu, Jianga YeHua, Zhoua Rong, Feng Jing. Stability, chemical bonding behavior, elastic properties and lattice thermal conductivity of molybdenum and tungsten borides under hydrostatic pressure // *Ceramics International*. Elsevier, 2012. Vol. 42, №2. P. 2117-2132.
4. Erdem Hasan Camurlu. Preparation of single phase molybdenum boride // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2011. Vol 509. P. 5431-5436
5. Kurbatkina V.V. Molybdenum Borides // *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. Elsevier, 2017. P. 204-205.
6. Klesnar H., Aselage T.L, Morosin B., Kwei G.H., Lawso A.C. The diboride compounds of molybdenum: MoB<sub>2-x</sub> and Mo<sub>2</sub>B<sub>s-y</sub> // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 1996. Vol. 241, №1-2. P. 180-186.

7. Vassilyeva Yu.Z., Pak A.Ya., Kononenko P.N., Yakich T.Yu., Mostovshchikov A.V., Shanenkov I.I. Vacuumless Arc Discharge Synthesis of Molybdenum Carbide-Based Powders at Various Discharge Currents // *Inorganic Materials*. Springer, 2022. Vol. 58, P. 265- 270.
8. Pak A.Ya., Rybkovskiy D.V., Vassilyeva Yu.Z., Kolobova E.N., Filimonenko A.V., Kvashnin A.G. Efficient Synthesis of WB<sub>5-x</sub>-WB Powders with Selectivity for WB<sub>5-x</sub> // *Inorg. Chem.* 2022, Vol. 61, №18, P. 6773-6784

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ПРОБЛЕМА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛА**

А.Д. Титов, А.Д. Кеслер  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А97

Автоматизация систем управления технологическими процессами (АСУТП) в настоящий момент является одним из активно развивающихся направлений. Объектом исследования является АСУТП камеры сушки. Актуальное направление для развития для сушильных камер – снижение энергопотребления. Вопросы по актуальному направлению энергосбережения рассматривались в работе [1], где приведен анализ повышения эффективности. Большая часть сушильных камер оборудованы твердотопливными котлами, которые не управляются и излишки энергии выбрасываются во внешнюю среду. В отличие от твердотопливных котлов газовые котлы, которые стали доступны, обладают хорошей управляемостью, благодаря чему можно выделять энергии столько, сколько требуется. Такие системы уже существуют, но возможности управления котлом ещё не исчерпаны. В частности, представляют интерес системы рекуперации [2], позволяющие сэкономить до 30–40 % энергии, благодаря реализации идеи, опубликованной в работе [3].

Там же предложено решение проблемы заиневаания путем поддержания температуры в точке росы, которые исследованы в работе [4,5]. Прототип камеры сушки с рекуперацией был сделан в лабораторных условиях и эффективность в этой работе была доказана. Основная проблема реализации связана с консервативностью заказчиков камер. Препятствием использования данной системы является то, что автоматика не предусматривает наличие такой системы. В данной работе предложено включить контур рекуперации в программируемый логический контроллер (ПЛК).

Система рекуперации представляет собой контур теплообмена между входящим и выходящим калорифером [2]. В результате входящий холодный воздух нагревается горячим калорифером и остужается при выходе холодным калорифером благодаря такому теплообмену. Теплообмен обеспечивает двигатель, управляемый частотным преобразователем, где частотным преобразованием происходит регулировка меры теплообмена. Без системы рекуперации теплый воздух будет выбрасываться наружу. С системой рекуперации можно сохранить до 30–40 % тепла в камере.

В работе предлагается изменить классическую схему управления камерой сушки, изображенной на рисунке 1, добавив в неё рекуператор (выделен красным цветом). В схеме: Газовый котел (1), частотный привод циркуляционного насоса (2), воздушный калорифер (3), вентилятор (4), воздушный клапан (5), “мокрый” (6) и “сухой” (7) датчики температуры, пиломатериал (8), конденсационная панель (9), на которой выделяется вода при температуре точки росы, циркуляционный насос, датчик температуры точки росы (11).

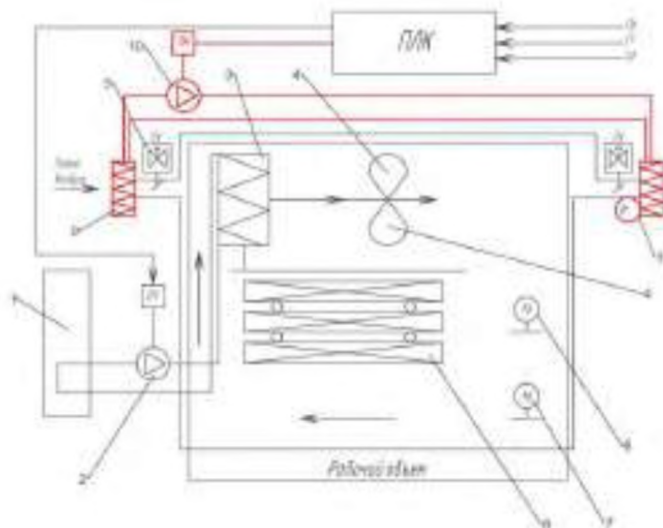


Рис. 1. Структурная схема сушильной камеры

В схеме без рекуперации два контура управления: по температуре и влажности, где влажность контролируется разностью “сухого” (поз.7 на рисунке 1) и “мокрого” (поз.6 на рисунке 1) датчика (психометрическая разность температур). Управлять температурой можно с помощью котла, либо закрылок (воздушные клапаны, поз.5 на рисунке 1). Для двухконтурных систем можно использовать одноконтурные системы в случае, если одно управляющее воздействие конкретно влияет на одну цель, а второе на свою цель. Если они взаимосвязаны, а в представленной схеме существует взаимосвязь контуров, то возможны два случая: первый случай, если закрылки открываются с целью понизить влажность, то понижается и температура. Это можно компенсировать подъемом температуры за счет работы газового котла, и второй случай, если поднять температуру газового котла, то происходит увеличение влажности, но с коэффициентом меньше, чем в первом случае. То есть закрылки влияют и на температуру, и на влажность, а нагрев котла в основном влияет на температуру, в меньшей степени на влажность. Также на температуру оказывает влияние движение теплоносителя: важно, чтобы в сушильной камере происходил эффективный обмен тепла, благодаря чему будет затрачиваться меньше энергии.

Существует два варианта управления двухконтурной системы: одним поддерживаем температуру (медленный контур, потому что нагрев и остывание происходит медленно), одним влажность (быстрый контур, так как сброс пара ведет к быстрому падению температуры). Требуется соблюсти условие: при сбросе влажности необходимо, чтобы сброс температуры был не критичный. Нельзя выпустить много влажности, так как можно потерять температуру.

Изображенная на рисунке 2 уже является двухконтурной взаимосвязанной, поэтому существуют коэффициенты от каждой ошибки в каждый контур, а также два пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регулятора, каждый из которых управляет своим контуром. Пид-регулятор привязан к исполнительному устройству: котлу, либо закрылкам. В контуре с котлом считается ошибка в основном по температуре, а в контуре с закрылками и по температуре, и по влажности.

Данная схема была изменена путем добавления ещё одного контура управления. Соответственно, в новой схеме используется три ПИД-регулятора. Третий ПИД-регулятор настраивается по ошибке, где максимальный коэффициент по ошибке берется из контура управления по температуре и по влажности, небольшой коэффициент ошибки берется из медленного контура (по температуре внутри сушильной камеры), т. е. формируются три ошибки, и на каждый контур со своим коэффициентом идут они в ПИД-регулятор и управляют своим объектом.

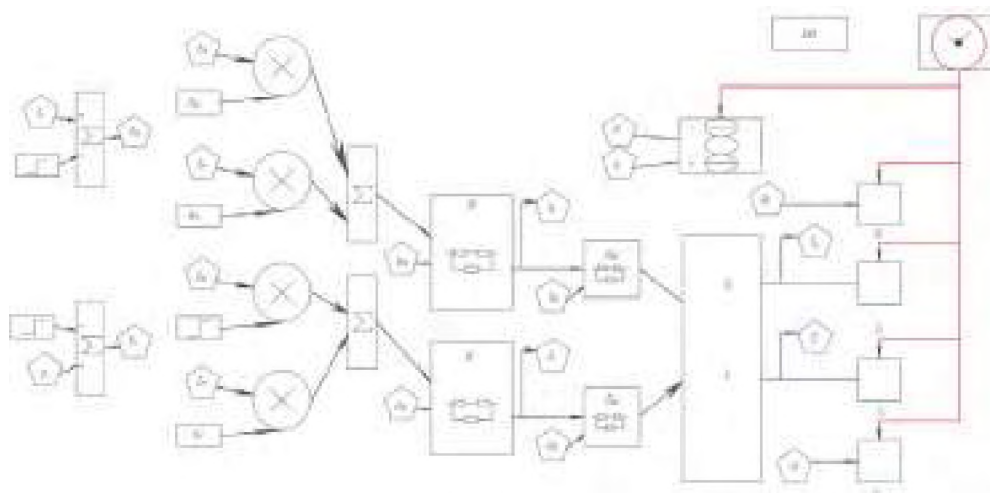


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы

Самый тяжело настраиваемый контур – контур с заслонками, но данный вопрос решён в работе [3].

Второй вариант развязки многоконтурной системы – спектральные развязки. Необходимо, чтобы внутренний контур был быстрее, а внешний медленнее. В работе [3] контура уже частотно разведены: контур по температуре от калорифера самый медленный, где переходный процесс может быть до 10 часов, а самый быстрый контур – контур с заслонками, где переходный процесс длится около 2 минут. Один контур не мешает работе другого контура. В данной работе третий контур будет средним по величине переходного процесса и будет длиться около часа. Каждый контур работает в своей декаде.

Третий контур легко вписывается в схему с рекуператором, коэффициенты в регуляторе многоконтурной системы предусматриваем согласно рекомендациям: в первом контуре – температура, во втором – температура и влажность в примерно одинаковых пропорциях, в третьем контуре – температура с первого контура, а также температура и влажность со второго контура (20 процентов). Ошибка считается по трем ошибкам: ошибка регулирования по трем ошибкам, у каждого контура своя главенствующая: у первого контура – температура, у второго – температура и влажность в одинаковой пропорции. Все контура работают в своем частотном диапазоне, друг на друга в динамике не влияют.

Основной вывод данной работы: добавление третьего контура принципиально не меняет предыдущую структуру. Благодаря третьему контуру возможно снижение потребления энергии. Если третий контур присутствует, то будет экономия тепла. Предложена новая структура трехконтурного регулятора, совместимая с предыдущими решениями, но если заказчик согласится добавить третий контур, то он почувствует разницу.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кизина О.А. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины / О.А. Кизина, А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг // Вестник полоцкого государственного университета. Серия в. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 32– 37.
2. Pacak A. Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air / A. Pacak et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – V. 133. – P. 842–860.
3. Нгуен Ван Вьонг, Метод синтеза регуляторов и алгоритмы контроллера двухканальной системы управления камерой сушки пиломатериала: дисс. к.т.н. / ТУСУР – Томск, 2021. – 159 с.
4. Васильев Л.Л. Применение термосифонов для осушения воздуха / Л.Л. Васильев и др // Агротехника и энергообеспечение, 2018. – № 2 (19). – С. 7–18.

5. Гвоздиков А.Н. К вопросу повышения энергетической эффективности систем кондиционирования воздуха и вентиляции на основе регулирования режимов обработки воздуха в контактных аппаратах/ А.Н. Гвоздиков, О.Ю. Сулова// Интернет-Вестник ВолгГАСУ, 2014. – №3. – С. 1-7.

Научный руководитель: д.т.н. А.А.Шилин, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **СИНТЕЗ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ**

Д.Е. Стовец

Томский политехнический университет  
ИЯТШ, ОЯТЦ, группа 0А15

Ввиду динамичного развития многих отраслей промышленности и технологий, увеличивается спрос на материалы. Материалы, обладающие уникальными физическими и химическими свойствами, особенно ценятся, поэтому наличие таких свойств как высокая твёрдость при относительно невысокой плотности, радиационная стойкость и коррозионная стойкость, а также высокие тепло- и электропроводность у карбида кремния (SiC) определяет огромный спрос на него [1]. Настолько обширный набор свойств находит спрос во многих отраслях промышленности. Например, радиационная стойкость SiC может быть использована для создания ёмкостей для хранения ядерных отходов. Твёрдость карбида кремния можно применять для создания бронезилетов. Некоторые свойства позволяют использовать SiC для создания микропроцессоров и полупроводников. На этом сферы использования карбида кремния не заканчиваются, SiC также используется в аэрокосмической промышленности, оптике и т. д.

Существует несколько наиболее распространённых способов синтеза карбида кремния: карботермическое восстановление, метод горячего прессования, метод синтеза в низкотемпературной плазме в условиях вакуума и др. [2]. Главный недостаток синтеза SiC данными способами это необходимость в создании условий вакуума, либо в использовании инертного газа в процессе синтеза, что требует вложения большого количества средств и усилий. В данной работе рассмотрен метод синтеза карбида кремния в атмосферной плазме дугового разряда постоянного тока. Основным преимуществом данного способа синтеза относительно вышеперечисленных является возможность его реализации в открытой воздушной среде.

Серия экспериментов по синтезу карбида кремния оригинальным электродуговым методом проводилась на лабораторном электродуговом реакторе постоянного тока. Перед началом каждого эксперимента серии в графитовый тигель, который в процессе эксперимента будет являться катодом, помещалась смесь порошков Si и C в эквимольном соотношении. Смесь порошков, необходимая для синтеза, была получена с помощью перемалывания порошков кремния и углерода с помощью вибрационной мельницы “MM500 nano”. Время смешивания исходных порошков составляло 20 мин при частоте 20 Гц.

Рабочий цикл реализовывался в ходе горения дугового разряда постоянного тока в полости графитового катода (тигля) в присутствии кремния и углерода. Разряд инициировался путём перемещения анода вдоль оси тигля в его полости. Сила тока и время синтеза изменялись по ходу серии: от 50 до 150 А и от 30 до 90 с, соответственно. Затем синтезированный продукт собирался со дна и стенок тигля. Идентификация фазового состава синтезированного продукта проводилась посредством рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000s.

Картина рентгеновской дифракции продукта синтеза, полученного в результате одного из экспериментов серии, представлена на рисунке 1. По результатам проведённой дифрактометрии можно идентифицировать наличие трёх кристаллических фаз: графита, кремния и кубической фазы карбида кремния, получение которой и являлось целью серии. Фазе карбида

кремния на данной картине соответствуют 5 явно выраженных дифракционных максимумов, помеченных на рисунке. Содержание карбида кремния в полученном продукте синтеза составляет 93 %, содержание кремния – 6,6 %.

Для удаления графита и кремния, присутствующих в продукте синтеза, была проведена очистка синтезированного вещества в атмосферной печи.

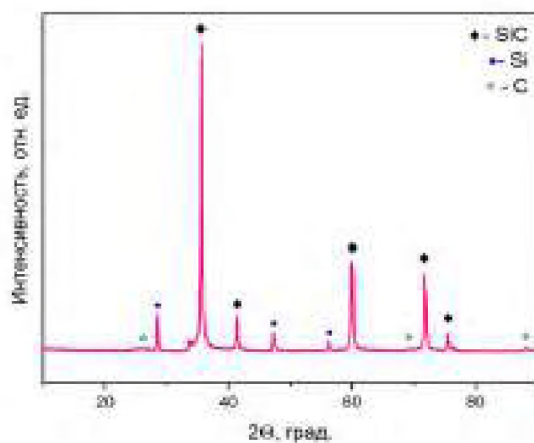


Рис. 1. Картина рентгеновской дифракции продукта синтеза

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, определяющих возможность получения кубической фазы карбида кремния оригинальным электродуговым методом в открытой воздушной среде, для идентификации фазового состава полученного в результате синтеза карбида кремния была проведена рентгеновская дифрактометрия. При этом в продукте синтеза помимо карбида кремния присутствуют графит и исходный кремний, для очищения конечного продукта была проведена очистка в атмосферной печи. Повышение выхода искомой фазы карбида кремния и поиск наиболее актуальных параметров синтеза являются предметами последующих исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. The mechanical, thermophysical and electromagnetic properties of UD SiCf/SiC composites in different directions / N. Li, Y. Wei, F. Ye, L. Cheng, J. Zhou, S. Yang, Q. Zhang, L. Zhang // Journal of the European Ceramic Society.
2. Microstructure and mechanical properties of hot-pressed SiC nanofiber reinforced SiC composites / J. Yang, R. Ma, M. Zhu, Y. Xiong, J. Shi, X. Li, H. Li, J. Chen // Ceramics International.
3. Cubic SiC nanowire synthesis by DC arc discharge under ambient air conditions / A. Pak, A. Ivashutenko, A. Zakharova, Y. Vassilyeva // Surface and Coatings Technology.
4. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials / R. Wu, K. Zhou, C.Y. Yue, J. Wei, Y. Pan // Progress in Materials Science.
5. Etching of SiC–SiC-composites by a laser-induced plasma in a reactive gas / K. Zimmer, M. Ehrhardt, P. Lorenz, X. Wang, P. Wang, S. Sun // International Journal of Applied Ceramic Technology.

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НЕОБРАТИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПО ВТОРОМУ ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМИКИ

А.А. Саммур<sup>1</sup>, О.В. Комаров<sup>2</sup>  
Уральский федеральный университет  
УралЭНИН<sup>1,2</sup>, ЭНА-301102<sup>1</sup>

В данной работе описывается использование эксергетического анализа при оценке производительности газотурбинной установки с использованием фактических эксплуатационных данных. Эксергию можно объяснить, как возможность работы, которая может совершаться как открытыми и закрытыми системами, так и потоком материи, в конечном итоге приходящая в состояние равновесия с определенным состоянием окружающей среды [1–2]. Второй закон термодинамики является основой эксергетического анализа, в то время как обычный энергетический анализ строится на основе первого начала термодинамики. Первый закон термодинамики не способен различать как количество, так и качество энергии [3]. Энергетический анализ демонстрирует только количественные результаты, а также разъясняет, как энергия преобразуется из одного вида в другой. С другой стороны, эксергетический анализ определяет качественные результаты по конкретному потреблению энергии [4–5]. В данной работе был проведен эксергетический анализ для определения величины, а также локализации эксергетического разрушения в различных компонентах, а также для оценки эксергетической эффективности.

Общая эксергия любой системы состоит из четырех основных частей: физической эксергии  $\dot{E}_x^{PH}$ , химической эксергии  $\dot{E}_x^{CH}$ , потенциальной эксергии  $\dot{E}_x^{PT}$  и кинетической эксергии  $\dot{E}_x^{KN}$ , которые представлены следующим образом [2–5]:

$$\dot{E}_x = \dot{E}_x^{PH} + \dot{E}_x^{CH} + \dot{E}_x^{PT} + \dot{E}_x^{KN} \quad (1)$$

Физическая эксергия включает тепловые свойства, а также механические свойства.

$$\dot{E}_x^{PH} = \dot{E}_x^T + \dot{E}_x^P, \quad (2)$$

где

$$\dot{E}_x^T = mC_{p,a} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right], \quad (3)$$

$$\dot{E}_x^P = mRT_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right), \quad (4)$$

где  $m$  – массовый расход,  $C_{p,a}$  – удельная теплоемкость воздуха,  $R$  – идеальная газовая постоянная,  $T_0$  так же как  $P_0$  относятся к температуре и давлению в мертвом состоянии соответственно.

Удельные химические значения эксергии обычных углеводородов  $C_aH_b$  можно оценить в зависимости от низшей теплотворной способности, LHV как [7]:

$$\bar{e}^{che}_f = \left( C_1 + C_2 \left( \frac{b}{a} \right) - \frac{C_3}{a} \right) LHV, \quad (5)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ , а также  $C_3$  постоянны и равны 1,033, 0,0169 и 0,0698 соответственно. Химическая эксергия химической смеси может быть рассчитана как [8].

$$\bar{e}^{che} = \sum X_n (\bar{e}^{che})_n + \bar{R}T_0 \sum X_n \ln(X_n). \quad (6)$$

Здесь,  $X_n$  молярная доля газа, а также  $\bar{R}$  обозначает универсальную газовую постоянную. Exergy destruction is computed by:

$$I_x = \dot{E}_{x.in} - \dot{E}_{x.out} \quad (7)$$

Эксергетическая эффективность рассчитывается как:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{x.out}}{\dot{E}_{x.in}} \quad (8)$$

Коэффициенты эксергетического разрушения рассчитываются как:



$$\varepsilon = \frac{I_x}{\bar{e}_{fuel}^{che}}. \quad (9)$$

### Результаты:

Наибольшее значение эксергетического разрушения блока происходит внутри камеры сгорания и составляет 57,6 МВт с долей 80,02 %, за ней следует газовая турбина с 12,78 МВт с долей 17,6 %. Наименьшее значение эксергетического разрушения имеет место в компрессоре, равном 1,7 МВт.

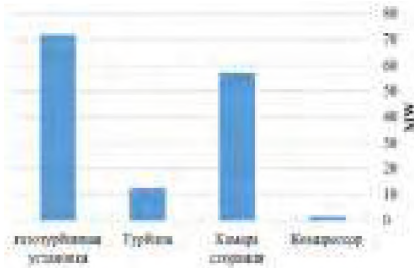


Рис. 1. Разрушение эксергии по различным компонентам

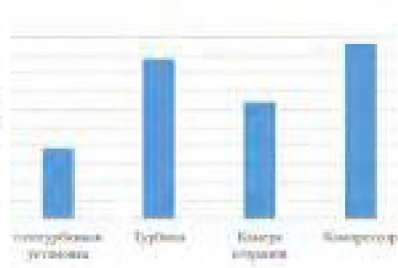


Рис. 2. Эффективность по второму закону в компонентах

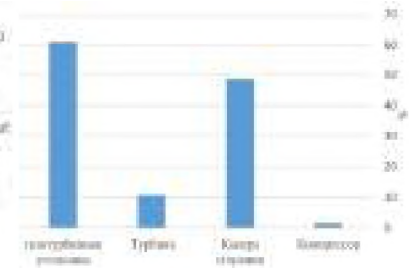


Рис. 3. Коэффициент эксергетического разрушения компонентов

Значения коэффициента эксергетического разрушения и эффективности второго закона, которые в данной статье обозначены как эксергетическая эффективность, показаны на рисунках 2 и 3 для различных компонентов. Причины большой эксергетической скорости разрушения и низкого эксергетического КПД в камере сгорания: не полностью сгоревшее топливо и потери тепла. Химическая реакция считается одним из наиболее важных источников эксергетической скорости разрушения в камере сгорания, необратимость возникает из-за того, что теплопередача, трение и перемешивание снижают термодинамические характеристики, такие как эксергетическая эффективность. Эксергетический КПД установки составляет 39 %. Процесс горения показал наибольшую эксергетическую эффективность разрушения 48,7 % в структуре. Эксергетическая эффективность разрушения компрессора составляет 1,4 %, турбины – 10,8 %.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Martin, A., Miswandi, Prayitno, A., Kurniawan, I., & Romy. (2016). Exergy analysis of gas turbine power plant 20 MW in Pekanbaru-Indonesia. *International Journal of Technology*, 7(5), 921–927. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i5.1329>. журнал на английском языке.
2. Hussein, W., Hussein, W., & Doori, A. (2014). Exergy Analysis of a Gas Turbine Performance With Effect Cycle Exergy Analysis of a Gas Turbine Performance With. 13(October 2012), 549–556. журнал на английском языке.
3. Okechukwu, E. H. (2013). Exergy Analysis of Omotosho Phase 1 Gas Thermal Power Plant. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2(5), 197. <https://doi.org/10.11648/j.ijep.20130205.13>. журнал на английском языке.
4. Younis, N. S., Abbani, B. O., & Alnayed, O. A. (2018). Exergetic Analysis of South Tripoli Gas Turbine Power Plant (Unit Four). *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 62(1), 15–22. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v62p204>. журнал на английском языке.
5. Baghernejad, A., & Anvari-moghaddam, A. (2021). Exergoeconomic and environmental analysis and multi-objective optimization of a new regenerative gas turbine combined cycle. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311554>. журнал на английском языке.
6. Daoud R.W., Ahmed A.H., Al Doori W.H., Jassim A.H., Ahmed A. M., & Ali Z. H. (2021). Exergy and Energy Analyses of 70 Mw Gas Turbine Power Plant Using Fuzzy Logic Control. 7th International Conference on Engineering and Emerging Technologies, ICEET 2021,

July 2022. <https://doi.org/10.1109/ICEET53442.2021.9659610>. журнал на английском языке.

7. Moran, M.J. et al , 2014. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 8th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA. Книга.
8. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., (1996). Thermal Design and Optimization, By Jhon Wiley & Sons, Inc. книга.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. О.В. Комаров, зав.каф. Тид УралЭНИН УрФУ.

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ И ЖКХ**

А.Г. Федосеев

Сибирский федеральный университет,  
кафедра ТЭС, группа ФЭ21-06М

Состояние топливно-энергетического комплекса современной России подвержено негативному влиянию старения и износа основных производственных фондов и нуждается в новых проектах строительства, модернизации и расширения объектов генерации. Процесс поиска эффективных проектных решений встречается со множеством вызовов, так как к результатам проектирования могут предъявляться несколько различных требований: надежность и экономичность энергоснабжения, рациональное потребление ресурсов, минимизация влияния на окружающую среду и так далее. Все эти критерии могут иметь разную степень влияния на определение оптимального результата и принятие итогового решения в зависимости от исходных характеристик и требований, предъявляемых к разрабатываемым проектам. Поэтому такие условия требуют тщательной проработки и многофакторного анализа проектных решений. Тем не менее большинство инвестиционных решений в энергетике основывается на опыте эксплуатации и не имеет обоснованной научной базы, что мешает достижению максимального эффекта и поиску оптимального варианта и придает процессу более случайный характер.

Выход из такой ситуации возможен только при формировании принципиально нового системного подхода к поиску и анализу проектных решений, который будет основан на создании и многокритериальном сравнении множества альтернативных вариантов, отличающихся типом используемой технологии и составом генерирующего оборудования, а также видом используемого первичного источника энергии (органическое топливо, возобновляемые источники энергии и другие)

В таком ключе предлагается разработать новый методологический подход к формированию проектных решений в энергетике и их комплексным оценке и сопоставлении, который будет основываться на следующем алгоритме:

1. Формирование технического задания к проекту
2. Анализ исходных данных, таких как:
  - 2.1 географическое положение и правовой статус территории;
  - 2.2 топливно-энергетический баланса территории, на которой планируется реализация проектных решений
  - 2.3 обеспеченность водными ресурсами и потенциал использования возобновляемых источников энергии;
  - 2.4 электро- и теплоэнергетический комплексы;
  - 2.5 транспортная система;
3. Формирование множества альтернативных вариантов схем, отличающихся выбором технологии производства электроэнергии и тепла, составом генерирующего оборудования, видом используемого первичного источника энергии;

4. Расчетная оценка показателей, определяющих всесторонне эффективность проекта:

4.1 расчет тепловой и топливной эффективности, технико-экономических показателей производства электроэнергии и тепла;

4.2 расчет капитальных вложений в проект, основных ежегодных операционных и финансовых затрат, показателей коммерческой эффективности инвестиционного проекта;

4.3 расчет показателей экологического влияния проектируемого решения на окружающую среду;

4.4 расчет показателей надежности производства и отпуска электрической и тепловой энергии;

5. Сопоставление и анализ результатов расчетов и выбор одного или нескольких оптимальных вариантов.

На рисунке 1 отображена схема, демонстрирующая принцип формирования альтернативных вариантов схем. Для случаев, когда когенерационные установки не могут покрыть целиком тепловую нагрузку предусмотрены смешанные схемы, в которых недостающая часть тепловой нагрузки покрывается отдельно стоящей установкой – будь то, к примеру, водогрейный, паровой или электрический котел.

Апробация ранних разработок данного подхода осуществлялась на примере с. Ярцево в процессе технико-экономического обоснования мероприятий по модернизации систем энергоснабжения Енисейского района Красноярского края по заказу министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Красноярского края.

Енисейский район – муниципальный район Красноярского края Российской Федерации, имеющий слаборазвитую систему централизованного обеспечения электрической энергией, представленную на юге района. Большая часть территории района имеет децентрализованную систему обеспечения электроэнергией, получаемой от 18 ДЭС.

Среди нескольких рассматриваемых населенных пунктов в качестве конечного объекта анализа было выбрано с. Ярцево, отличающееся значительным потреблением электрической энергии, географическим расположением вдоль реки Енисей и наличием речного порта. В поселке действует 2 отопительных котельных с проектными мощностями 2,5 и 2,6 Гкал/ч каждая, работающих в основном при сжигании бурого угля. Основное топливо, используемое для генерации электрической энергии – дизельное топливо. Суммарная установленная мощность ДЭС – 1,68 МВт. Тарифы на электроэнергию составляют от 1,12 до 1,8 руб./кВт·ч для населения и 24,54 руб./кВт·ч для коммерческих организаций. Тариф на отпускаемую тепловую энергию составляет 5 931,16 руб./Гкал.

Был оценен потенциал использования возобновляемых источников энергии. Использование ветряных энергетических установок перспективно на равнинных местностях, на вершинах возвышенностей и в прибрежных зонах реки Енисей. Потенциал использования солнечной энергии оказался невелик. Возможность использования водных ресурсов требует проведения испытаний и дополнительной оценки.

На основании вышеизложенного был сформирован набор вариантов технологических схем, включающих в себя использование газовых и паровых турбинных установок (ГТУ и ПТУ соответственно) для генерации электрической энергии, а также ветроэнергетической установки (ВЭУ) и когенерационной установки «Wartsila 6L20» (КТУ-W).

Для отпуска тепловой энергии могут использоваться частично или полностью отработавший пар паровых турбин, котел-утилизатор, а также электрические котлы и водогрейные и паровые котлы действующих котельных. Использование уже имеющихся котельных установок позволяет не учитывать капитальные вложения в новые котлоагрегаты в таких схемах и снизить ежегодные затраты на амортизацию.

В качестве топлива, используемого для производства электрической энергии, рассматривалась сырая нефть на замену дизельному топливу. Технико-экономические и финансовые показатели работы водогрейных и паровых котлов посчитаны при условии сжигания бурового угля.

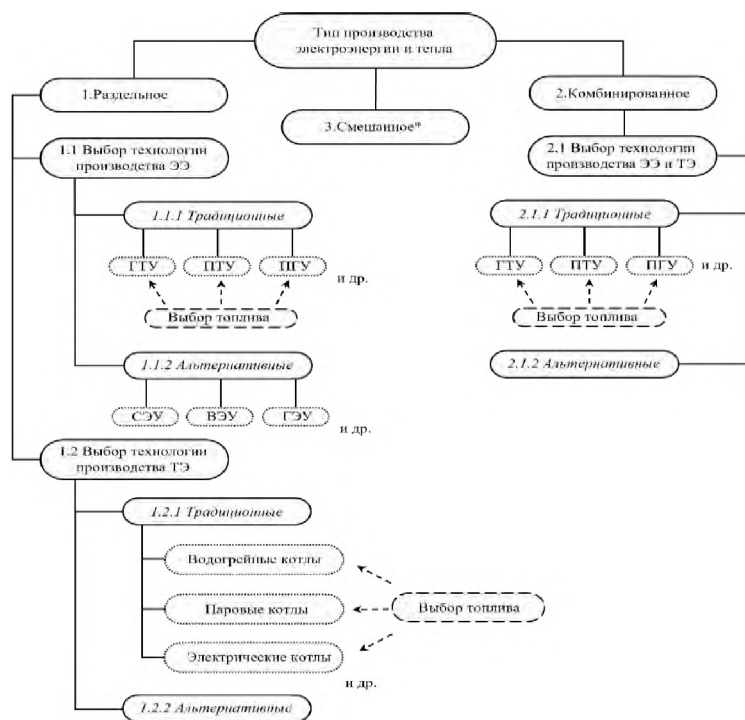


Рис. 1. Схема формирования альтернативных схем

Оценка, сопоставление и выбор вариантов осуществлялся на основании значений себестоимости отпускаемых видов энергии и срока окупаемости инвестиций. Все расчеты осуществлялись в программе MS Excel. Данные расчетов представлены на рисунке 2.

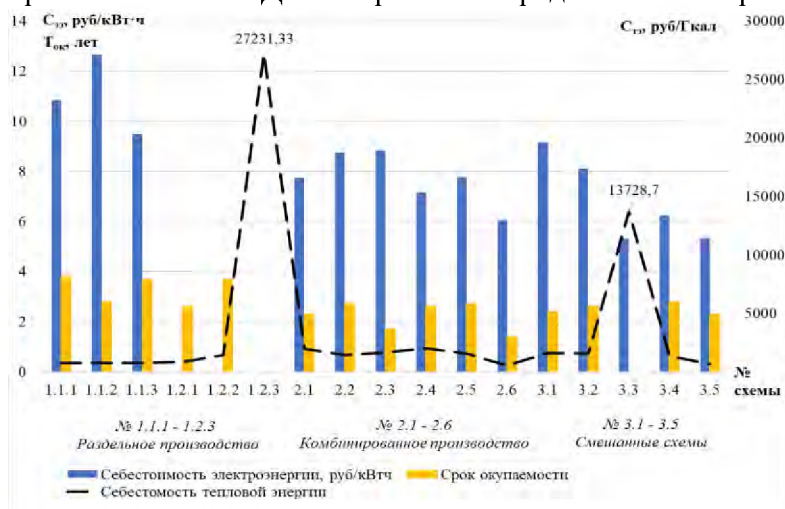


Рис. 2. Результаты расчетов конденсационной ПТУ в сочетании с ВК, ГТУ в сочетании с ВК, конденсационной ПТУ:

1.2.1 Водогрейные котлы (ВК); 1.2.2 Паровые котлы (ПК); 1.2.3 Электрические котлы (ЭК) 2.1 ПТУ с турбоагрегатом типа Т; 2.2 ПТУ с турбоагрегатом типа Р; 2.3 ГТУ с КУ (с сжиганием доп. топлива); 2.4 ПТУ с турбоагрегатом типа Т; 2.5 ПТУ с турбоагрегатом типа Р; 2.6 Когенерационные установки «Wartsila 6L20» (КГУ-W); 3.1 ПТУ с турбоагрегатом типа Т в сочетании с ВК (с покрытием 50 % тепла от ВК); 3.2 ГТУ с КУ и ВК; 3.3 ГТУ с КУ в сочетании с ВЭУ и ЭК; 3.4 ГТУ с КУ в сочетании с ВЭУ и ВК; 3.5 КГУ-W в сочетании с ВЭУ, ЭК и ВК

Полученные результаты хорошо согласуется с известными закономерности касательно применения энергетических установок.

Как видно из рисунка 2 наименее экономичными технологиями с точки зрения себестоимости отпускаемой тепловой энергии являются электрические котлы – схемы №1.2.3 и № 3.3.

Наиболее низкое значение себестоимости отпускаемой тепловой энергии соответствует схеме № 2.6 – 547,21 руб./Гкал.

Максимальное значение себестоимости отпуска электрической энергии соответствует схеме № 1.1.2 – 12,66 руб./кВт·ч. Такое высокое значение себестоимости обусловлено высокими тепловыми потерями с отработавшими газами на выхлопе из турбины и низким коэффициентом использования топлива. Минимальное значение себестоимости отпуска электрической энергии соответствует схеме № 3.3 – 5,33 руб./кВт·ч, что связано с утилизацией тепла отработавших газов на выхлопе из газовой турбины, поступающих в котел-утилизатор, и снижением топливных затрат в целом при генерации части электрической энергии ветроэнергетической установкой.

Для всех вариантов, за исключением схем № 1.2.3 и 3.3, характерны низкие значения сроков окупаемости инвестиций: в пределах от 1,4 до 1,8 лет. Это обусловлено значительной разницей между значениями себестоимости и тарифов, отпускаемых электрической и тепловой энергии, а также большой величины отпуска электрической энергии, что позволяет быстро генерировать и накапливать чистый денежный поток. Самый короткий срок возврата инвестиций соответствует схеме № 2.6 – 1,4 года.

Исходя из проведенного анализа к реализации рекомендованы варианты проектных решений № 2.6 и 3.5 с использованием когенерационной установки «Wartsila 6L20».

Применяемый подход позволил составить значительное количество альтернативных вариантов энергоснабжения с. Ярцево, осуществить объективную оценку и сравнение эффективности каждой схемы и, определить перспективные направления модернизации с минимальными значениями себестоимости отпускаемых видов энергии и сроков окупаемости инвестиций.

На основании всего вышеперечисленного можно сделать уверенный вывод, что предлагаемый системный подход положительно зарекомендовал себя. Формирование всех возможных вариантов технологий производства тепла и электроэнергии, их многокритериальная оценка позволяет увеличить вероятность определения оптимального варианта и достичь максимального эффекта. С увеличением числа критериев, по которым производится оценка и сравнение вариантов, с одной стороны увеличивает трудоемкость задачи, но с другой позволяет всесторонне провести сопоставительный анализ. Для снижения трудоемкости задачи и ускорения получения результатов необходимо увеличивать степень автоматизации расчетов с возможным внедрением специализированного программного обеспечения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Повышение эффективности коммунальной и промышленной энергетики за счет развития распределенной когенерации / М.Д. Дильман., С.П. Филиппов // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. – 2016. – № 2 (34).
2. Бойко Е.А. Техничко-экономическое обоснование мероприятий по модернизации систем энергоснабжения Енисейского района Красноярского края. – Красноярск.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 2013. – 237 с.
3. Методический подход к комплексной оптимизации структуры источников тепла в задачах развития теплоснабжающих систем / В.А. Стенникова, О.А. Еделева, Д.В. Соколова // Теплоэнергетика. – 2020. – № 12. – С. 88 – 100.

Научный руководитель: д.т.н. Бойко Е.А., зав. каф. ТЭС ПИ СФУ.

# СПОСОБЫ ПОДДЕРЖАНИЯ КОМФОРТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ОДЕЖДЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.О. Воронович

Сибирский федеральный университет  
ПИ, ФЭ, ТиЭБ, группа ФЭ22-09М

Возникновение пожаров становится большой угрозой для здоровья и безопасности спасателей. Даже при соблюдении требований к использованию средств индивидуальной защиты пожарных, количество несчастных случаев, к сожалению, увеличивается. Для обеспечения безопасных условий работы часто возникает необходимость в охлаждении одежды пожарного, что является актуальной задачей в настоящее время.

Известны ряд работ, освещающих эту тему.

Например, в [1] представлена теплоотражающая каска с водяным охлаждением, которая содержит систему водяного охлаждения, включающую съёмную ёмкость, фиксируемую на поясе пожарного, для воды, гибкие шланги, шарнирный смеситель для подачи воды и регулирования напора потока, подаваемого на внутреннюю поверхность каски и/или на необходимые участки тела через форсунки. Вода из ёмкости поступает в шланги за счёт давления, создаваемого пневмогрушей. К сожалению, данный способ охлаждения в реальных условиях не удобен. Теплоотражающая каска с водяным охлаждением представлена на рисунке 1.

В [2] приводится конструкция теплоотражающей каски с воздушным охлаждением, на внешней поверхности которой установлены теплоотражательные сегменты, каска содержит элементы для фиксации на голове оператора и состоит из соединяющихся частей, обеспечивающих создание потока воздуха вентилятором, приводимым в действие от батареек. Для охлаждения шлема пожарного данный способ не приемлем.

Принципиальная схема способа воздушного охлаждения каски представлена на рисунке 2.

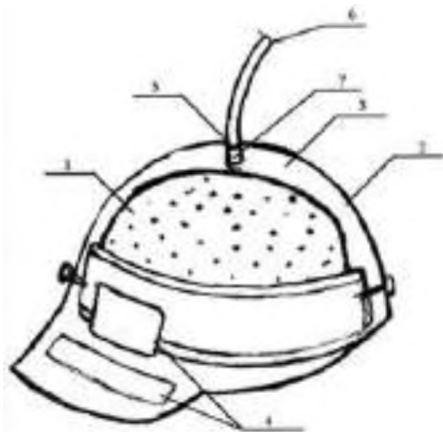


Рис. 1. Теплоотражающая каска с водяным охлаждением:  
1 – внутренняя поверхность; 2 – наружная поверхность; 3 – полость между внутренней и наружной поверхностью; 4 – экранирующие теплоотражательные сегменты; 5 – отверстие; 6 – гибкий шланг; 7 – форсунка



Рис. 2. Принципиальная схема способа воздушного охлаждения каски:  
1 – нижняя часть в форме усеченного конуса; 2 – упругие мягкие прокладки; 3 – перфорированный конус, перекрывающий верхнее основание; 4 – верхняя часть каски в виде цилиндра; 5 – перфорированный конус; 6, 7 – вентиляционные отверстия; 8 – вентилятор; 9 – стержень; 10 – конусообразный втулок; 11 – жесткие распорки; 12 – аккумуляторные батареи; 13 – провода; 14 – реостат

Для создания газового слоя в куртке пожарного в [3] выполнен проект защитного устройства (рисунок 3). Газовый слой должен обеспечивать дополнительную защиту от термического воздействия и даже частично обеспечивать механическую прочность изделия. Кроме того, при проектировании защитного слоя предусматривалось, что вкладыш не должен ограничивать работоспособность спасателя и мешать выполнению функций.

Такой газовый слой или вкладыш 1 изготавливается из плотной газонепроницаемой ткани, предпочтительно хлопчатобумажной. Изнутри одного из слоёв прикрепляются пружины 2, причём изготовленные из материала с памятью формы. Обычно используют сплав никеля и титана – нитинол. Пружины по своему типу относятся к плоским конусным. В герметичном вкладыше предусматривается установка специального баллончика 3 с выпускным клапаном 4 и захватом 5 для установки сосуда. Баллончик должен быть заполнен нейтральным газом – азотом или гелием, и в нём поддерживается давление 2 - 2,5 бар. Наши расчёты показали, что предпочтительнее использовать азот, как доступный и дешёвый компонент. Вкладыш прикрепляется к слоям куртки с помощью предусмотренной монтажной ткани 6.

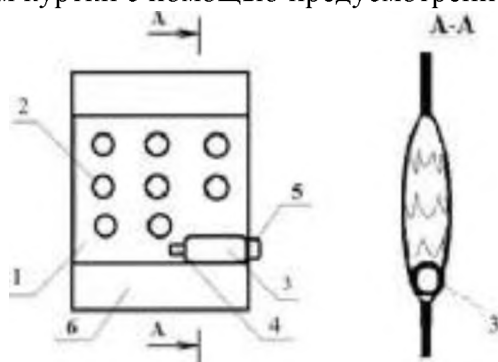


Рис. 3. Конструкция защитного вкладыша от перегрева:

1 – два слоя газонепроницаемого материала; 2 – пружины; 3 – баллончик; 4 – выпускной клапан;  
5 – захват; 6 – монтажная ткань

При повышении температуры пружины 2 разворачиваются, открывается выпускной клапан 4, и газ поступает в пространство между слоями вкладыша.

Для повторного использования баллончик 3 извлекают с помощью захвата 5 из защитного вкладыша, осуществляют заправку его азотом и вновь закрепляют в полости защитного вкладыша.

Предлагаемое устройство позволяет организовать в куртке пожарного дополнительную защиту от термического воздействия и повысить механическую прочность изделия. Вкладыш может быть изготовлен любой геометрической формы и использоваться в любых конструкциях специальной защитной одежды.

Исследования по способам охлаждения продолжается в настоящее время.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Теплоотражающая каска с водяным охлаждением: пат. Рос. Федерация, №246492, заявл. 11.04.2011; опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
2. Теплоотражающая каска с воздушным охлаждением: пат. Рос. Федерация, №2444966, заявл. 21.10.2010; опубл. 20.03.2012. Бюл. № 8.
3. Защитный вкладыш от перегрева: пат. Рос. Федерация, №2553005, заявл. 24.07.2014; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.

Научный руководитель: к.т.н. Т.А. Енютина, доцент ТиЭБ ПИ СФУ.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

С.С. Соловьёв  
Санкт-Петербургский горный университет  
ЭнФ, группа ЭРБ-21

Затраты промышленных предприятий на оплату электрической энергии и мощность оказывают значительное влияние на конечную себестоимость выпускаемой продукции. Для горных предприятий ставится задача самостоятельного выбора ценовой категории, включающая рассмотрение следующих факторов при обосновании рационального тарифа по оплате за электроэнергию: сезонность (лето, зима); суточный профиль потребления; тариф на услугу по передаче; максимальная мощность (до и свыше 670 кВт) и ограничения выбора соответствующих ценовых категорий. Однако, выбора и обоснования ценовой категории на оплату за электрическую энергию и мощность, отдельные решения управленческого персонала по оптимизации договорной политики, становится недостаточным инструментом, влияющим на важность принятия стратегических решений в условиях привязки и ограничения выполнения плана производств. Кроме того, анализ факторов, влияющих на показатели энергоэффективности и величину расхода электроэнергии, поможет принять правильные решения в реализации мер, направленных на уменьшение объема используемых энергоресурсов, при сохранении объема выпуска продукции [1, 2].

Цель настоящего исследования – повышение энергоэффективности электротехнических комплексов горных предприятий на основе комплексного подхода, включающего обоснование и разработку моделей прогнозирования, учитывающих зависимости изменения графиков нагрузок от времени.

Задачи настоящего исследования:

- 1) анализ изменения графиков электрических нагрузок от времени для угольного предприятия;
- 2) выявить зависимости изменения основных коэффициентов от времени, характеризующих профили электрических нагрузок;
- 3) произвести расчет и обоснование удельного показателя электроэнергии от времени для горных предприятий;
- 4) обосновать требования к разработке прогнозных моделей электропотребления в условиях выполненного анализа.

Анализ первой задачи показал, что для выбранного предприятия необходимо регулировать электропотребление, равномерно распределяя нагрузку среди рассматриваемых электроприемников.

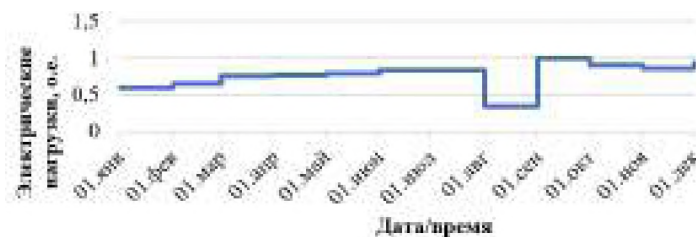


Рис. 1. График электрических нагрузок от времени для угольного предприятия

На рисунке 1 представлен график изменения электрической нагрузки от времени на примере угольного предприятия. Изучение плана производств поможет определить факторы, влияющие на изменение нагрузки. Резкие изменения указывают на необходимость принятия регулирующих мероприятий и дальнейшего учёта этих факторов при создании прогнозной модели.



Для расчёта электрических нагрузок были рассмотрены коэффициенты, представленные ниже.

Коэффициент использования активной мощности, показывающий степень использования установленной, номинальной мощности:

$$K_{и} = \frac{P_{ср}}{1,5 \cdot P_{max}}, \quad (1)$$

где  $P_{ср}$  – средняя активная мощность;  $P_{max}$  – максимальная мощность (кВт).

Коэффициент формы графика нагрузки, характеризующий неравномерность графика нагрузки во времени:

$$K_{ф} = \frac{P_{ср}}{P_{д}}, \quad (2)$$

где  $P_{д}$  – среднеквадратичная активная мощность (кВт).

Коэффициент заполнения графика нагрузки, показывающий во сколько раз потребленное количество электроэнергии за рассматриваемый период меньше количества энергии, которое было бы потреблено за тот же промежуток времени, если бы нагрузка оборудования была максимальной (чем равномернее график, тем ближе значение  $K_{з}$  к единице):

$$K_{з} = \frac{P_{ср}}{P_{max}}, \quad (3)$$

где  $P_{ср}$  – средняя активная мощность;  $P_{max}$  – максимальная мощность (кВт).

Коэффициент максимума активной мощности, определяющий вероятность одновременного включенного состояния электроприемников в течение исследуемого периода времени:

$$K_{max} = \frac{P_{max}}{P_{ср}}, \quad (4)$$

где  $P_{ср}$  – средняя активная мощность;  $P_{max}$  – максимальная мощность (кВт).

На рисунке 2 представлены зависимости изменений коэффициентов для расчёта электрических нагрузок на примере горных предприятий. В I квартале наблюдается увеличение потребления электроэнергии с уменьшением  $K_{max}$ . Это отражает неоднородности нагрузки работающего оборудования. II квартал обладает планомерной нагрузкой электроприемников, что позволяет судить о проведении регулировочных мероприятий руководством предприятия. Однако были учтены не все факторы, влияющие на потребление электроэнергии, поэтому в III квартале оборудование эксплуатировалось с наибольшей изменчивостью. Резкие изменения в августе были обусловлены массовым уходом персонала в отпуск, и, как следствие, уменьшение показателя средней активной мощности. Одним из основных факторов, влияющим на данные показатели, может выступать необходимость реализации плановой добычи для предприятий угольной отрасли. Мероприятием для устранения данного результата в последующем должно быть снижение потребления электроэнергии в III квартале для одинаковой нагрузки электроприемников, что в свою очередь позволит получить равномерный график электрической нагрузки. Кроме того, коэффициент максимума показывает, что введение в эксплуатацию большего числа электроприемников позволит достичь планомерности потребления электроэнергии, что приведет к уменьшению затрат на услуги по передаче электроэнергии при соответствующем тарифе. С учетом выше сказанного, установление нормированного объема электропотребления будет поддерживать равномерность нагрузки электрооборудования предприятий угольной промышленности. В таблице 1 представлены изменения данных коэффициентов по кварталам, позволяющие оценить ситуацию, связанную с выполнением ежеквартальных планов производства.

Таблица 1. Коэффициенты для расчёта электрических нагрузок

Название коэффициента/квартал	Диапазон изменений			
	$K_{max}$	$K_{и}$	$K_{ф}$	$K_{з}$
I квартал (январь, февраль, март)	1,92÷2,66	0,3÷0,43	1,14÷1,38	0,45÷0,63
II квартал (апрель, май, июнь)	1,47÷1,64	0,45÷0,47	1,07÷1,12	0,66÷0,70
III квартал (июль, август, сентябрь)	1,41÷2,88	0,31÷0,48	1,05÷1,31	0,48÷0,72
IV квартал (октябрь, ноябрь, декабрь)	1,60÷1,68	0,43÷0,44	1,08÷1,12	0,65÷0,66

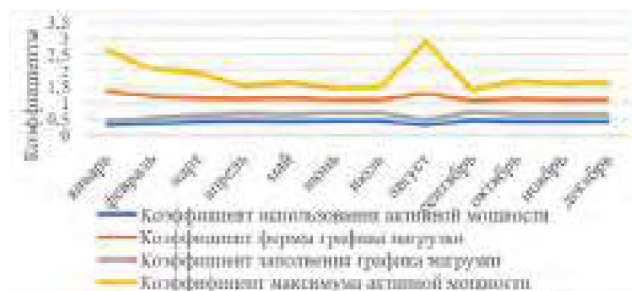


Рис. 2. График зависимости изменений коэффициентов от времени на примере экскаваторного типа оборудования (период анализа – год)

В рамках работы над второй задачей была проанализирована работа нескольких предприятий по затратам электрической энергии по основным технологическим процессам (рассматриваемый период – год, предприятия – шахты, разрезы, обогатительные фабрики). Рассматривались следующие показатели – удельный расход электроэнергии на горную массу  $w_{уд}^{ОР}$  (кВт·ч/м<sup>3</sup>), удельный расход электроэнергии на переработку  $w_{уд}^{ОФ}$  (кВт·ч/т), число часов использования мощности (ЧЧИМ). Проанализируем более подробно удельный расход электроэнергии на переработку  $w_{уд}^{ОФ}$  – показатель, характеризующий отношение объема затраченной электроэнергии к объему переработки:

$$w_{уд}^{ОФ} = \frac{W}{V_{ОФ}}, \quad (5)$$

где  $W$  – потребленная электроэнергия на предприятии за выбранный период, кВт·ч;  $V_{ОФ}$  – объем переработки для обогатительных фабрик, т.

Таблица 2. Изменения показателей энергоэффективности от времени (наблюдаемый период-год, регион №3 (ОФ-3, разрез-3, шахта-3))

Квартал	$w_{уд}^{ОФ}$ , кВт·ч/т		
I квартал (январь, февраль, март)	2,16	2,05	1,77
II квартал (апрель, май, июнь)	2,97	1,61	1,29
III квартал (июль, август, сентябрь)	0,59	1,46	1,26
IV квартал (октябрь, ноябрь, декабрь)	1,43	1,39	1,55

Рассмотрим ситуацию для обогатительной фабрики №3 (ОФ-3). В I квартале происходит снижение потребления электроэнергии при незначительном уменьшении объема переработки. Во II квартале при незначительном увеличении электропотребления происходит колоссальное падение объема переработки. Такой результат вызывает дальнейшее увеличение потребления, но с значительным увеличением объема выполненных работ для минимального расхождения установленного руководством плана. Характерное снижение электропотребления наблюдается в III квартале, в последующем наблюдается увеличение удельного расхода в IV квартале.

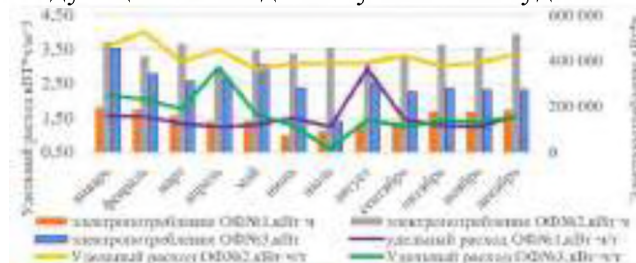


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии на переработку и электропотребления предприятий угольной промышленности

### Заключение

В ходе анализа показателей энергоэффективности для горных предприятий была выявлена необходимость создания прогнозных моделей электропотребления. Кроме того, качественный анализ коэффициентов графиков нагрузок должен выступать основой для создания прогнозных моделей, учитывающих факторы, влияющие на характер электропотребления. По

этим причинам для предприятий особый интерес вызывают вопросы необходимости создания предиктивных моделей электропотребления в зависимости от типа прогноза (оперативное, краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное) для спектра решаемых задач. Каждая задача имеет свои начальные условия, факторы, влияющие на функционирование предприятия. По этим причинам обоснование анализа графиков электрических нагрузок, выявление особенностей в поведении временных рядов (электропотребление, электрическая нагрузка), последующее создание прогнозных моделей можно рассматривать как способ повышения энергоэффективности предприятий горной промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабанова, И.С. Разработка моделей прогнозирования с целью управления режимами электропотребления промышленных предприятий / С.П. Петров, Б.Н. Абрамович, И.С. Бабанова // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 2–8.
2. Бабанова И.С. Разработка моделей прогнозирования с целью управления режимами электропотребления предприятий угольной промышленности / И. С. Бабанова. - Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. - 2021. - № 10. - С. 9-22.

Научный руководитель: к.т.н. И.С. Бабанова, ассистент кафедры ЭЭиЭМ СПбГУ.

## СПОСОБЫ ОБОГРЕВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Д.Д. Глотов, Е.А. Федотов  
Сибирский федеральный университет  
ПИ, ФЭ, ТиЭБ, группа ФЭ22-11М

Процесс неконтролируемого горения – пожара – сопровождается значительными материальными потерями, колоссальным ущербом окружающей среде, а также возможным появлением пострадавших людей.

Ликвидация возгорания в условиях низких температур сопряжена со значительными трудностями: во-первых, имеет место снижение температуры в водопроводе до 0,5–1°C, а в открытых водоемах, реках и озерах до 0°C, во-вторых, возникает опасность замерзания воды в рукавных линиях, особенно в начальный период работы насоса [1]. При температуре воздуха –40°C и ниже температуры стенок рукавов близки к температуре окружающего воздуха, и движущаяся по ним вода быстро охлаждается, превращаясь иногда в пастообразную ледяную массу, закупоривающую рукавную линию и ствол.

В [1] приведены основные рекомендации по предотвращению замерзания воды в пожарных линиях при наружной установке: обогревание паяльной лампой, засыпка снегом, ветошью. Для утепления разветвлений предлагается использовать специальные кожухи, выполненные по форме разветвления из металла и имеющие отводы для обогрева с помощью паяльной лампы.

На рисунке 1 приведён вид источника водоснабжения, требующего предварительного обогрева для обеспечения нормальной работы спасателей.

В [2] приведено описание способа, в котором подготовка к работе производится с использованием выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля. Выходящие газы имеют достаточно высокую температуру – порядка 300 °C и могут служить греющей средой при подготовке элементов пожарного водоснабжения.

Нами разработана схема нагревания воздуха выхлопными газами с целью подачи нагретого потока к замёрзшему элементу водоснабжения.

На рисунке 2 приведена принципиальная схема способа отогревания продуктами сгорания.



Рис. 1. Вид источника пожарного водоснабжения

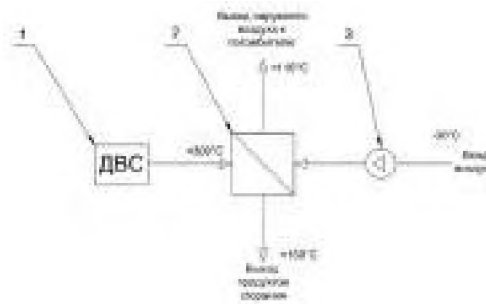


Рис. 2. Принципиальная схема способа нагрева воздуха для подачи к потребителям

Схема работает следующим образом. Продукты сгорания топлива из выхлопной трубы двигателя 1 поступают в теплообменный аппарат 2. Воздух из окружающей среды забирается вентилятором 3 и направляется в теплообменный аппарат, где нагревается примерно до температуры 110 °С, после чего поток направляется к элементу пожарного водоснабжения.

При реализации схемы используются только быстросмыкающиеся соединения.

Достоинствами рассматриваемого способа являются простота устройства и применения, а также надежность и безопасность для обогреваемого оборудования. Для прохождения потоков можно использовать, например, гибкий металлический рукав Уральского промышленного завода.

Гибкий металлический рукав представляет собой гофрированный трубопровод, заключенный в одну или несколько оплеток и снабженный концевой арматурой. Металлорукава применяются для транспортирования любых жидких и газообразных сред, для систем водяного охлаждения, гидравлики, подачи кислорода, агрессивных сред и смазочных материалов. Высокая надежность и долговечность металлорукавов, изготовленных методом гидроформования, позволяют успешно применять их в различных отраслях промышленности: атомной, автомобильной, судостроительной, металлургической, авиационной, машиностроительной, химической, криогенной и других отраслях.

Основные технические данные:

Диаметры: от 6 мм до 300 мм,

Температура: от -270 °С до +750 °С,

Рабочее давление: до 380 Атм Запас прочности: 400%.

На рисунке 3 приведен общий вид гибкого металлического рукава.



Рис. 3 Общий вид гибкого металлического рукава

Опытом установлено, что применять выхлопные газы целесообразно для отогревания сравнительно небольших предметов: гидрантов, различной рукавной арматуры, насосов.

В настоящее время проводятся исследования по усовершенствованию способа разогрева.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Пожарная техника: учебник / М. Д. Безбородько, М. В. Алешков, В.В. Роечко и др.; под ред. М. Д. Безбородько. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 437 с.
2. <https://fireman.club/statyi-polzovateley/otogrevanie-zamershego-oborudovaniya/>
3. <http://fluitech.com.ua/assets/files/metalorukav.pdf>

Научный руководитель: к.т.н. Т.А. Енютина, доцент ТиЭБ ПИ СФУ.

# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.М. Лапшова<sup>1</sup>, М.В. Козлова<sup>2</sup>

Ивановский государственный энергетический университет  
ТЭФ, ПТЭ, группа 1-4М<sup>1</sup>, ассистент<sup>2</sup>

Одной из важнейших экономических и экологических задач настоящего времени является сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) промышленными предприятиями.

Использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), образующихся как побочный продукт технологических процессов, позволяет частично решить поставленную задачу.

В первую очередь, целесообразно использование ВЭР для наиболее энергоемкой отрасли страны – металлургии. В черной металлургии широко представлены горючие ВЭР, к которым можно отнести доменный, конвертерный и коксовые газы [1].

Одним из наиболее эффективных способов энергосбережения в тяжелой промышленности является использование доменного газа. У него имеются следующие показатели: температура 175–250 °С, выход 1100–2200 м<sup>3</sup>/т чугуна; состав, %: 23–40 СО, 12–22 СО<sub>2</sub>, 1,5–6,0 Н<sub>2</sub>, остальное – N<sub>2</sub>; теплота сгорания ~ 4 МДж/м<sup>3</sup>; давление на колошнике до 0,4 МПа [1].

Доменный газ относится к горючим и тепловым видам ВЭР, поэтому на большинстве металлургических предприятий Российской Федерации после очистки от пыли он применяется в доменных воздухонагревателях, энергетических котлах, для отопления коксовых батарей, нагревательных колодцев и печей прокатного производства [2].

Рассмотрим один из способов применения доменного газа в качестве ВЭР, который нашел широкое применение в нашей стране – утилизационная ТЭЦ (УТЭЦ). Данная технология заключается в одновременном использовании в качестве топлива природного и доменного газов. На рисунке 1 представлена схема парового котла УТЭЦ.

Этот способ применения доменного газа имеет ряд недостатков, обусловленных тем, что данный тип ВЭР приводит к изменению в работе обычных парогенераторов. Из-за низкой теплоты сгорания доменного газа и большого балласта инертных газов в нем, температура в топке парогенератора сильно снижается.

Для оценки влияния доли доменного газа в смеси на процесс горения авторами был выполнен тепловой расчет данных процессов, в ходе него рассчитывалась степень черноты продуктов сгорания [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^* \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  – степень черноты углекислого газа;  $\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^*$  – степень черноты водяного пара;  $\varepsilon_{H_2O}^*$  – условная степень черноты водяного пара;  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий особенности излучения водяного пара.

На рисунке 2 приведен график зависимости степени черноты природно-доменной газовой смеси от процентного содержания доменного газа в смеси. Из графика видно, что с увеличением доли доменного газа уменьшается количество углеводородов в смеси, следовательно, факел горит менее ярко, увеличивается балласт негорючих компонентов в смеси. Все это ухудшает светимость факела и, как следствие, ухудшается работа радиационных поверхностей нагрева.

Существует более эффективные способы применения доменного газа в качестве топлива, например, схема парогазовой установки (ПГУ) с дожиганием, которая представлена на рисунке 3.

В данной схеме природный газ сжигается в камере сгорания газовой турбины, а небольшое количество доменного газа – в котле-утилизаторе (КУ). Дожигание используют для получения дополнительного количества пара для производственных процессов и тепловой энергии для нагрева сетевой воды.

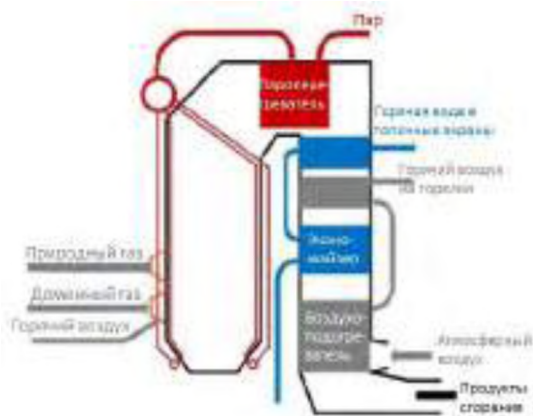


Рис. 1. Схема парового котла УТЭЦ

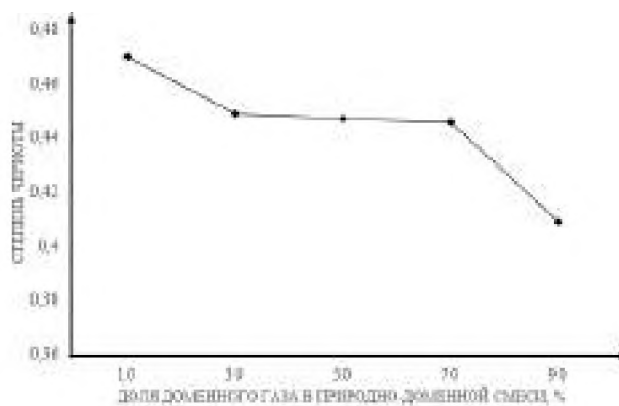


Рис. 2. График зависимости степени черноты природно-доменной газовой смеси от процентного содержания доменного газа в смеси

Подвод дополнительной тепловой энергии в КУ ведет к росту параметров и расхода рабочего тела паротурбинной установки (ПТУ), поэтому он всегда приводит к повышению мощности ПТУ и всей ПГУ в целом.

КПД по выработке электроэнергии ПГУ с дожиганием (около 46 %) что выше, чем у УТЭЦ (24–41 %, наибольшее значение достигается при режиме работы преимущественно на природном газе и конденсационной выработке) [4].

Далее рассмотрим более подробно схему применения доменного газа в качестве топлива в ПГУ, которая нашла широкое применение в Китае, Японии и других странах мира.

На рисунке 4 изображена принципиальная тепловая схема, которая похожа на схему ПГУ с дожиганием, но топливом для газовой турбины в данной схеме служит доменный газ, а котел-утилизатор работает без дожигания дополнительного топлива.

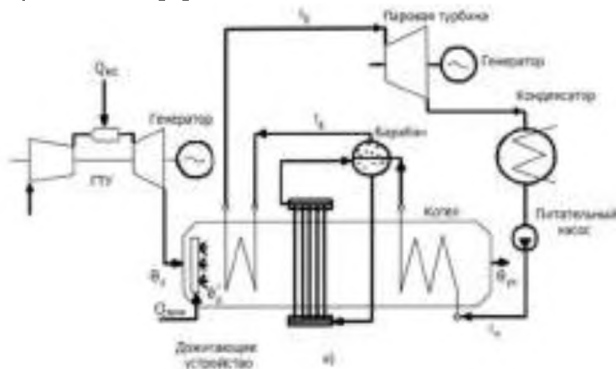


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема ПГУ с дожиганием

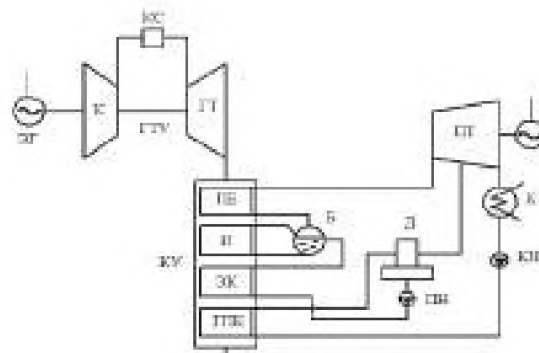


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема ПГУ на доменном газе

В схеме ПГУ, работающей на доменном газе, используются те же газовые турбины, которые работают на привычном для нас топливе – природном газе. Стоит отметить лишь то, что для этих турбин необходима модернизированная топливная система для низкокалорийного газа.

В отличие от парогазовых установок на природном газе ПГУ на доменном газе имеют более высокие затраты на сжатие топливного газа и меньшую работу расширения газовой турбины. Все это следствие того, что в доменном газе выше содержание  $\text{CO}_2$  и ниже содержание  $\text{H}_2\text{O}$  в рабочем теле газовой турбины.

К плюсам можно отнести сокращение выбросов оксидов азота, углерода и сернистого ангидрида, так как выводится существенная часть мощности ТЭЦ. Также в выбросах ПГУ на

доменном газе меньшее количество загрязняющих веществ из-за того, что происходит контролируемое смешение газов на газосмесительной станции ПГУ и оптимизируется процесс горения в камере сгорания ГТУ.

На рисунке 5 представлена схема газовой турбины с характерными точками. Для расчета использовалась газовая турбина LM6000 поставки «General Electric». Авиационная ГТУ LM6000 номинальной мощностью при условиях ISO 42,3 МВт.

В ходе расчетов, был построен термодинамический цикл ГТУ, представленный на рисунке 6, где линии a–b – процесс сжатия воздуха в компрессоре, b–c – сгорание топлива и c–d – расширение продуктов сгорания в газовой турбине.

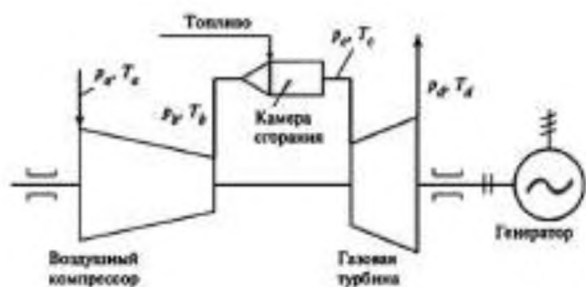


Рис. 5. Принципиальная схема ПГУ

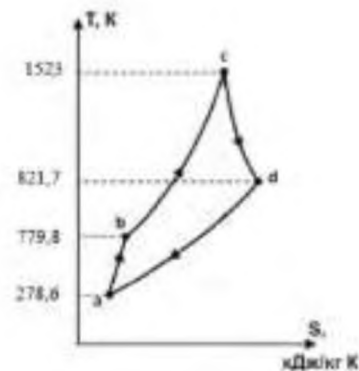


Рис. 6. Термодинамический цикл ГТУ на доменном газе

По результатам расчетов КПД ПГУ составил 66,2 %.

Опираясь на научные данные и проведенные расчеты, можно сделать вывод, что ПГУ, работающая полностью на доменном газе, имеет самый высокий КПД по выработке электрической энергии, среди рассмотренных технологий использования ВЭР на металлургическом предприятии. Очевидно, что ПГУ на доменном газе не использует органическое топливо, поэтому затрат на него нет, тем самым решается проблема топливно-энергетических ресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лотош В.Е. Утилизация вторичных энергетических ресурсов // Ресурсосберегающие технологии, 2003. – № 9. – С. 3-18.
2. Лотош В.Е. Технологии основных производств в природопользовании, 3 изд. – Екатеринбург: изд-во УрГУПС, 2002. – 553 с.
3. Энциклопедия теплоснабжения. URL: <https://www.rosteplo.ru/w/Излучение> (дата обращения 25.04.2022).
4. А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Е.И. Левин, П.С. Филиппов // Применение доменного газа в комбинированном парогазовом цикле. – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия, 2018.

Научный руководитель: Н.Н. Пронин, ст.преп. ИГЭУ.

# РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С СУТОЧНОЙ ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ

И.Н. Маленкова  
Братский государственный университет  
УАД, группа ЭСЭСа-20

С каждым годом в мире растет актуальность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одной из ведущих целей Стратегии социально-экономического развития России<sup>5</sup> является задача достижения углеродной нейтральности к 2050 году, что повышает актуальность увеличения доли генерации возобновляемыми источниками энергии [2].

В России на начало 2022 года установленная мощность солнечных электростанций составила 1960,62 МВт. В октябре 2021 года Правительством Российской Федерации было принято решение продлить действующую программу поддержки ВИЭ до 2035 года с выделением 360 млрд. рублей для обеспечения строительства дополнительных 6,7 ГВт новой мощности ВИЭ [2].

Проблема оценки поступающей солнечной радиации (СР) все еще остается актуальной для многих регионов мира. Это связано с высокой стоимостью измерительного оборудования и сложностью его эксплуатации. На интенсивность СР оказывают влияние различные метеорологические и климатические факторы. Это влияние положено в основу построения эмпирических моделей, которые представляют собой регрессионную зависимость ключевого показателя от определенного набора параметров [3]. Благодаря простоте и при этом достаточной точности эмпирические модели широко применяются учеными всего мира для оценки СР [4]. Необходимо отметить, что точность модели не может зависеть от ее структуры и многообразия входных параметров, часто упрощенные модели показывают более точные результаты. Соответственно, при разработке эмпирических моделей необходимо обеспечить компромисс между точностью и сложностью модели, а также доступностью исходных данных. Это было подчеркнуто многими исследователями [5, 6, 7]. В результате анализа источников, представленных выше, было установлено, что на сегодняшний день очень сложно дать оценку СР, базируясь на конкретной эмпирической модели или группе моделей.

Эмпирические модели могут представлять собой как линейную, так и нелинейную зависимость ряда климатических, географических, геометрических параметров от оценки СР. Достаточно высокую точность, как правило, позволяет обеспечить линейная эмпирическая модель [8]:

$$\frac{H}{H_0} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i, \quad (1)$$

где  $H$  – поток суммарной СР;  $H_0$  – поток внеатмосферной СР;  $k_i$  – параметры эмпирической модели, имеющие связь с оценкой СР;  $n$  – количество параметров;  $x_i$  – коэффициенты линейной регрессии.

Поток внеатмосферной СР определяется по формуле (2):

---

<sup>5</sup> Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации N 3052-р от 29 октября 2021 года.



$$H_0 = \frac{12 \cdot 360 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot N}{365}\right) \right] \cdot \left\{ \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot [\sin(h_2) - \sin(h_1)] + \left[ \frac{\pi \cdot (h_2 - h_1)}{180} \right] \cdot \frac{1}{2} \sin(L) \cdot \sin(\delta) \right\}, \quad (2)$$

где  $G_{sc}$  – солнечная постоянная, равная 1367 Вт/м<sup>2</sup>;  $N$  – порядковый номер дня от 1 до 365;  $L$  – широта местности, рад,  $\delta$  – угол склонения солнца, рад;  $h_2$  и  $h_1$  – часовые углы солнца, соответствующие интервалу оценки, рад.

В зависимости от набора доступных параметров может быть сформирован набор эмпирических моделей, полученных в различных исследованиях и представленных в многочисленных обзорах [5, 9]. Также могут быть предложены и новые эмпирические модели на основе комбинации известных зависимостей или путем добавления отношения или произведения дополнительных параметров. Калибровка моделей осуществляется на основе большей части доступных данных (до 80%) наземных измерений метеостанций. Рассчитанные значения потока СР по разным уравнениям регрессии сравниваются с оставленной для валидации частью данных измерений наземных метеостанций. Этот процесс сопровождается расчетом статистических показателей. В исследованиях используется большое разнообразие таких показателей. Одними из наиболее часто используемых параметров являются средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя ошибка смещения (МВЕ) [9]. MAE является общей мерой точности прогноза и рассчитывается на основе абсолютной разности между рядом расчетных ( $H_i$ ) и измеренных значений ( $H_m$ ) потока СР:

$$MAE = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t |H_i - H_m|, \quad (4)$$

где  $t$  – количество измерений СР, по которым проводится сравнение;  $H_i$  – расчетное значение уровня СР,  $H_m$  – измеренное значение уровня СР.

Чем ниже значение MAE, тем выше точность эмпирической модели [9].

МВЕ является индикатором среднего отклонения расчетных значений от измеренных и описывает систематическую ошибку или погрешность:

$$MBE = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t (H_i - H_m). \quad (5)$$

Положительные значения МВЕ указывают на завышенные оценки СР, а отрицательные – на заниженные оценки, получаемые с помощью эмпирической модели [10].

В результате валидации определяется наиболее точная эмпирическая модель оценки СР. В случае, если точность модели недостаточна, может быть рассмотрен вариант определения эмпирических моделей для отдельных сезонов года. Эмпирические модели позволяют оценить СР для достаточно большой территории относительно той локации, климатические данные которой использовались для ее калибровки.

Разработка группы регрессионных моделей и их сравнение с существующими моделями по точности осуществлялось на примере г. Иркутск. Сбор климатических и метеорологических данных выполнен с использованием базы данных МЦРД и сайта Расписание погоды. Данные наземных измерений СР с суточным разрешением в базе МЦРД доступны за период с 2007 по 2019 гг. [11].

Для калибровки эмпирических моделей используются данные за период с 2007 по 2015 гг. Валидация моделей осуществляется по данным за период с 2016 по 2019 гг.

Далее выполняется формирование набора эмпирических моделей. Анализ научных публикаций [12, 9, 13] позволил автору работы выделить десять эмпирических моделей (таблица 2, модели 1–10), кроме того было дополнительно предложено для рассмотрения еще четыре модели. Они отличаются дополнительным учетом параметра нижней облачности  $C_l$ , давления, синуса максимального за месяц угла высоты солнца  $\sin \alpha$  (таблица 2, модели 11–14).

Таблица 2. Результаты калибровки исследуемых эмпирических моделей

Название модели	Обозначение	Формула
Модель 1	M1	$H/H_0 = 0,8833 - 0,0062 \cdot RH$
Модель 2	M2	$H/H_0 = 0,5619 - 0,003 \cdot T_{max} + T_{min} + 0,0185 \cdot (T_{max} - T_{min}) - 0,004 \cdot RH$
Модель 3	M3	$H/H_0 = 0,2298 + 0,023 \cdot (T_{max} - T_{min})$
Модель 4	M4	$H/H_0 = 0,0073 + 0,1471 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5}$
Модель 5	M5	$H/H_0 = 0,4701 - 0,0003 \cdot (T_{max}/T_{min}) - 1,6152 \cdot (T_{max}/T_{min})^2$
Модель 6	M6	$H/H_0 = 0,213 + 0,0238 \cdot T_{max} - 0,0259 \cdot T_{min}$
Модель 7	M7	$H/H_0 = -3,671 + 0,0254 \cdot T_{max} - 0,0248 \cdot T_{min} + 0,005 \cdot P$
Модель 8	M8	$H/H_0 = 0,7623 - 0,0396 \cdot C$
Модель 9	M9	$H/H_0 = 0,595 + 0,0425 \cdot C - 0,007 \cdot C^2$
Модель 10	M10	$H/H_0 = 0,3779 + 0,0958 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} - 0,0283 \cdot C$
Модель 11	M11	$H/H_0 = -0,0598 + 0,0013 \cdot P - 0,0032 \cdot RH + 0,0022 \cdot T - 0,0231 \cdot C_1 - 0,0201 \cdot C - 0,1277 \cdot \text{Sin} \alpha$
Модель 12	M12	$H/H_0 = 0,611 + 0,0078 \cdot (T_{max} - T_{min}) - 0,0202 \cdot C - 0,0236 \cdot C_1$
Модель 13	M13	$H/H_0 = 1,508 - 0,0003 \cdot (T_{max}/T_{min}) - 0,001 \cdot P - 0,0232 \cdot C - 0,0293 \cdot C_1$
Модель 14	M14	$H/H_0 = 0,8064 + 0,0034 \cdot (T_{max} + T_{min}) - 0,0023 \cdot RH - 0,0199 \cdot C - 0,0223 \cdot C_1$

Рассчитав значение показателей MAE и MBE было установлено, что наиболее точные результаты оценки для исследуемого района представлены моделями M11, M12, M13 и M14. Эти модели включают такие параметры как температура, относительная влажность воздуха, общая и нижняя облачность. Модель M14 показала самую высокую точность (MAE = =504,71 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут), что, по мнению автора, является результатом комплексного учета климатических параметров. Однако модели M11-M14 имеют сравнительно высокие ошибки смещения (MBE составляет от -251,68 до 364,63 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут). По результатам расчета годовой суммарной СР наиболее точной моделью является M1 [13]. Преимущество модели M1 перед разработанными моделями M11–M14 объясняется ее малой ошибкой смещения MBE. На рисунках 1 и 2 показаны графики, отражающие разброс рассчитанных с помощью эмпирических моделей суточных оценок относительно измеренных значений для наиболее точной модели M14 и наименее точной – M1. Точки, расположенные ближе к прямой линии, соответствуют более точным оценкам относительно измеренных на метеостанции.

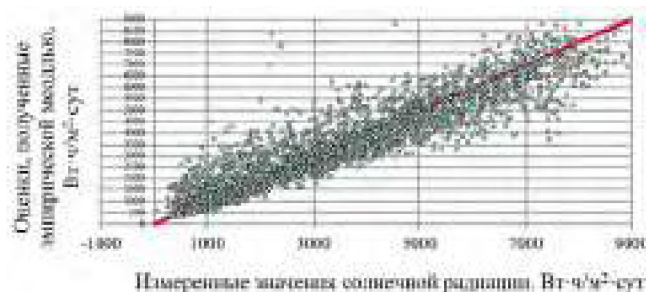


Рис. 1. Разброс измеренных и рассчитанных значений для модели M14

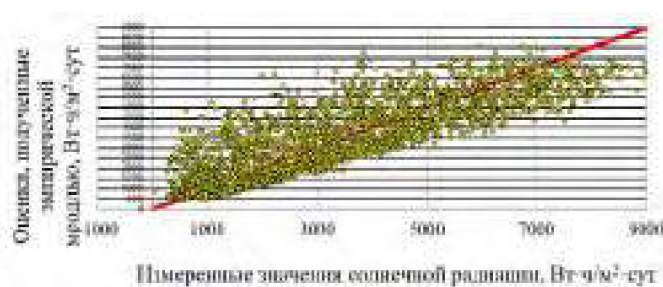


Рис. 2. Разброс измеренных и рассчитанных значений для модели M1

Сравнение точности моделей по статистическим показателям и годовым суммам СР позволили сделать следующие выводы:

- наиболее высокую точность при оценке СР с суточной детализацией показали модели с большим набором параметров;
- предложенные автором новые модели показали наибольшую точность при оценке суточных значений СР в сравнении с известными рассмотренными регрессионными моделями.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года
2. Отчет «Единая энергетическая система России: промежуточные итоги». Оперативные данные за январь 2022 года, URL: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups\\_review\\_0122.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups_review_0122.pdf), (дата обращения: 01.04.2022)
3. Dongyu Jia, Liwei Yang, Tao Lv, Weiping Liu, Xiaoqing Gao, Jiaxin Zhou, 2022, «Evaluation of machine learning models for predicting daily global and diffuse solar radiation under different weather/pollution conditions», *Renewable Energy* 187 (2022), pages 896—906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.002>
4. Zhang J, Zhao L, Deng S, Xu W, Zhang Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;70:314–29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.124>
5. Hassan MA, Khalil A, Kaseb S, Kassem MA. Independent models for estimation of daily global solar radiation: a review and a case study. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:1565–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.002>
6. Li H, Ma W, Lian Y, Wang X, Zhao L. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. *Renew. Energ.* 2011;36:31415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.019>
7. Olanrewaju M. Oyewola, Tchilabalo E. Patchali, Olusegun O. Ajide, Satyanand Singh, Olaniran J. Matthew, Global solar radiation predictions in Fiji Islands based on empirical models, *Alexandria Engineering Journal* Volume 61, Issue 11, November 2022, Pages 8555-8571, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.065>
8. Quej, V.H., Almorox, J., Ibrakhimov, M., Saito, L., 2016. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. *Energy Conver. Manag.* 110, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050>
9. Naserpour, S., Zolfaghari, H., Zeaiean Firouzabadi, P., 2020. Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran. *Sustain. Energy Technol. Assessment*, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100855>
10. Besharat F, Dehghan AA, Faghih AR. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;21:798–821. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>
11. Интернет-ресурс: Расписание погоды, URL: [https://gp5.ru/Погода\\_в\\_Иркутске](https://gp5.ru/Погода_в_Иркутске) (дата обращения: 14.04.2022)
12. Bounoua Z, Ouazzani Chahidi L, Mechaqrane A. Estimation of daily global solar radiation using empirical and machine-learning methods: A case study of five Moroccan locations. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021 г., <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00261>
13. Md Shamim Ahamed, Huiqing Guo & Karen Tanino (2021): Cloud cover-based models for estimation of global solar radiation: A review and case study, *International Journal of Green Energy*, <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1941043>

Научный руководитель: к.т.н. В.А. Шакиров, с.н.с. ИСЭ СО РАН.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А.С. Сорогин<sup>1</sup>, Р.Н. Хамитов<sup>2</sup>  
Тюменский индустриальный университет  
группа Эка-20-1<sup>1</sup>, кафедра ЭЭ<sup>2</sup>

На выработку электроэнергии солнечных панелей существенное влияние оказывает температура окружающего воздуха (рисунок 1), чем выше температура солнечного модуля, тем ниже вырабатываемая мощность. Это объясняется тем, что повышенная температура вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, с ростом температуры ширина зоны уменьшается, ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования электронно-дырочных пар. При этом ток короткого замыкания незначительно увеличивается, в то время как напряжение холостого хода уменьшается и приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности [1].

В статье [2] была смоделирована математическая модель солнечной панели и было получено семейство мощностных характеристик солнечной панели в зависимости от температуры нагрева солнечной панели (рисунок 2). Дело в том, что изолированные потребители заметно испытывают потерю электроэнергии, эквивалентом данных потерь является дизельное топливо ДЭС, которое чаще всего используется в генераторах изолированных потребителей на территории России [2].



Рис. 1. Схема влияния солнечного излучения на солнечную панель

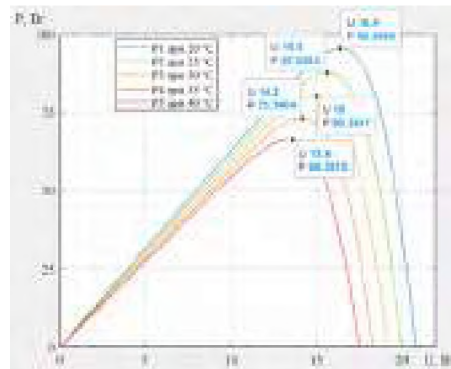


Рис. 2. Характеристики мощности и напряжений в максимальной точке солнечной батареи при различных температурах окружающей среды построенные в среде Matlab Simulink [2]

Мощность СБ снижается согласно уравнению (1). Влияние температурного коэффициента мощности, показывает на сколько процентов снизится мощность солнечной панели при увеличении температуры нагрева панели свыше 25 градусов Цельсия [3].

$$P_{сэ} = P_0 (1 + \beta \Delta t), \quad (1)$$

где  $P_{сэ}$  – мощность солнечной батареи, Вт;  $P_0$  – мощность солнечной батареи при 25 °С, Вт;  $\beta$  – температурный коэффициент мощности, °С-1;  $\Delta t$  – изменение температуры, °С.

Прежде чем определить наиболее оптимальный способ охлаждения солнечной панели необходимо было собрать экспериментальную установку с имитацией солнечного излучения, Данная установка состоит из солнечной панели EasySunSolar UL15 100 Вт, галогенного прожектора TDM ИО150П 150 Вт 2700 К – 2 шт, инфракрасной лампы для нагрева ИКЗК 250 Вт – 2 шт, МРРТ-контроллера Solar Charge Controller PWM (рисунок 3).

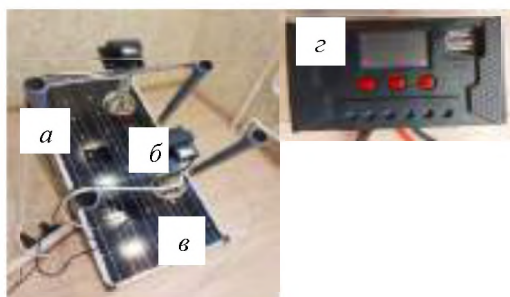


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения выходной мощности солнечной панели с использованием прожекторов и ламп:

а) Солнечная панель EasySunSolar UL15 100 Вт; б) Прожектор галогенный TDM ИО150П 150 Вт 2700 К 2 шт.; в) Лампа инфракрасная для нагрева ИКЗК 250 Вт 2 шт.; з) MPPT-контроллер Solar Charge Controller PWM

Для сравнения данных, полученных с солнечной панели, предлагается использовать 3 типа охлаждения:

- 1) с помощью термоэлектрических модулей (ТЭМ) и баков для отвода тепла (рисунок 4);
- 2) с помощью насоса и хладагента(воды) (рисунок 5);
- 3) с помощью насоса, хладагента и ТЭМ в качестве охлаждения воды (рисунок 5).

В качестве начальных условий измерения было принято:

- 1) Панели установлены перпендикулярно освещению;
- 2) Освещение в 3 точка измерений постоянно;
- 3) Нагрузка солнечной панели постоянна  $R_n = 1 \text{ кОм}$ ;
- 4) Напряжение и ток, подаваемый на ТЭМ постоянны;
- 5) Температура воды(хладагента) для охлаждения панели  $T = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Замеры велись каждые 1,5 мин в течении 12 мин. Результаты измерений мощности с учетом сопротивления представлены на рисунке 6.



Рис. 4. Экспериментальная установка для измерения выходной мощности солнечной панели с использованием прожекторов, ламп и охлаждением ТЭМ:

а) Солнечная панель EasySunSolar UL15 100 Вт; б) Прожектор галогенный TDM ИО150П 150 Вт 2700 К 2 шт.; в) Лампа инфракрасная для нагрева ИКЗК 250 Вт 2 шт.; з) MPPT-контроллер Solar Charge Controller PWM; д) Термоэлектрические элементы TEC1-12704 9 шт.; е) Алюминиевые баки 3 шт.; ж) Насос BARBUS PUMP 001 4 Вт; з) Источник постоянного тока зарядное устройство T- 1021



Рис. 5. Экспериментальная установка для измерения выходной мощности солнечной панели с использованием прожекторов, ламп и охлаждением насосом и ТЭМ:

а) Солнечная панель EasySunSolar UL15 100 Вт 1 шт.; б) Буфер для охлаждающей жидкости; в) Бак с охлаждающей жидкостью 1 шт и насосом BARBUS PUMP 001 4 Вт 1 шт.; з) Термоэлектрический элемент TEC1-12704 с алюминиевыми ребрами охлаждения 1 шт.; д) Трубка с отверстиями для охлаждающей жидкости

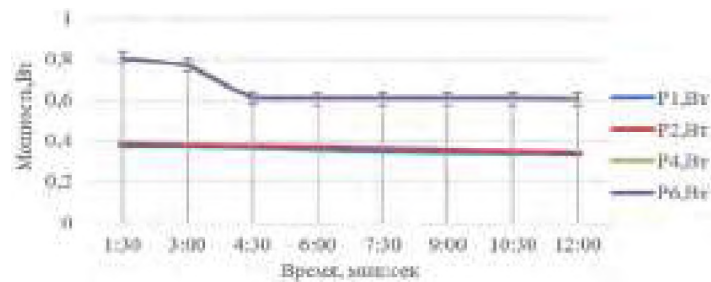


Рис. 6. Диаграмма мощности солнечной панели:

$P_1$  – выдаваемая мощность солнечной панели без охлаждения;  $P_2$  – выдаваемая мощность солнечной панели с охлаждением от ТЭМ и баков для отвода тепла;  $P_4$  – выдаваемая мощность солнечной панели с охлаждением от насоса и хладагента;  $P_6$  – выдаваемая мощность солнечной панели с охлаждением от насоса, хладагента и ТЭМ в качестве охлаждения

Таким образом, была собрана установка с имитацией солнечного излучения и 3 типа экспериментальных установок с различными видами охлаждения. Наиболее оптимальным вариантом для охлаждения солнечной панели является жидкостное охлаждение панели с помощью насоса. Эффективность солнечной панели увеличилась на 50%. Затраты на охлаждение составили 4 Вт (без учета охлаждения жидкости).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
2. Сорогин А.С., Хамитов Р.Н., Глазырин А.С. Модель энергоэффективной солнечной панели, работающей при повышенных температурах окружающей среды // Электротехнические и информационные комплексы и системы Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2022. – № 1. – С. 77-94.
3. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности // Известия Тульского государственного университета. 2020. № 2. С. 489-499. Баранов, Н. Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии: учебное пособие / Н. Н. Баранов. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 384 с.
4. Роза, А. В. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие: пер. с англ. / А. В. Роза; ред.: С. П. Малышенко, О. С. Попеля. - Долгопрудный: Интеллект; М.: МЭИ, 2010. – 704 с.
5. Бессель В. В. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: Учебно-методическое пособие/ Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалева Р. Д. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. – 90 с.

Научный руководитель: д.т.н. Р.Н. Хамитов, профессор ТюмИУ.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПУТЕМ ПЕРЕХОДА К СВЕТОДИОДНОМУ ОСВЕЩЕНИЮ

Д.Д. Тупиков, Д.Э. Никулина  
Санкт-Петербургский горный университет  
ЭНФ, кафедра ТиТ, группа ТЭ-19

Одной из распространенных и существенных проблем в шахтах и рудниках является низкий уровень освещенности. Недостаточное освещение является причиной целого комплекса проблем, основными из которых являются:

1. Повышенный риск травматизма и аварий в подземных горных выработках.

2. Ошибочные действия персонала, которые, в свою очередь, также могут привести к увеличению числа аварийных и травмоопасных ситуаций.

3. Развитие профессиональных болезней у шахтеров, связанное со снижением остроты зрения.

Сегодня основными источниками света в подземных горных выработках являются металлогалогенные и компактные люминесцентные лампы. Однако такие светильники обладают рядом недостатков, в частности, значительной деградацией светового потока в процессе эксплуатации, вредными для зрения пульсациями светового потока, а также низким сроком службы.

В последнее время мы наблюдаем буквально революцию в производстве осветительных приборов, в основе которых лежит использование полупроводниковых источников света или светодиодов (их еще называют «светоизлучающие диоды», сокращённо СИД) [1, с. 5-6].

Светодиоды широко применяются благодаря своим преимуществам перед другими источниками света, и их использование является важным фактором энергосбережения. Для нас, студентов горного университета, особенно важным является тот факт, что в последнее время происходит переход на светодиодные источники освещения шахт и рудников. Растущая популярность рудничных источников света на основе светодиодов, вызвала у нас интерес к их исследованию.

При организации освещения в подземных горных выработках нужно руководствоваться положениями стандарта ГОСТ Р 55733-2013 [2, с. 4,5], в котором сформулированы основные требования, предъявляемые к рудничным источникам света. Так, по светотехническим характеристикам рудничные источники света должны:

1. Обеспечивать требуемый уровень освещенности и равномерное распределение света по всей рабочей зоне;

2. Исключать явления светового дискомфорта, а именно: ослепленности, блескости отраженного света. При этом должен отсутствовать стробоскопический эффект;

3. Обеспечивать устойчивое и стабильное излучение света в процессе работы технологического оборудования.

4. Коэффициент пульсации, представляющий собой критерий оценки относительной глубины колебаний освещенности в результате изменения во времени светового потока источника света, не должен превышать 20 %.

5. Коэффициент освещенности в самых темных и наиболее освещенных участках не должен отличаться более чем в 10 раз.

6. Напряжение питания не должно превышать 220 В. В условиях повышенной влажности напряжение должно быть не выше 42 В. Напряжение аккумуляторных светильников индивидуального пользования не должно превышать 12 В.

Воздушная среда в подземных горных выработках характеризуется присутствием пыли и влаги. При этом пыль и горные породы являются мощными поглотителями светового потока, поглощение достигает 80–95 %. Кроме того, в шахте и руднике обязательно присутствует вода (грунтовая или техническая, необходимая для проведения проходческих работ). Отсюда вытекает еще одно требование к рудничным источникам света – пыле и влагозащищенность.

Одно из главных требований к светильникам для угольных шахт – взрывобезопасное исполнение. При этом такое требование предъявляется также к шахтам и рудникам, которые не являются опасными по газу и пыли. Светильники должны иметь взрывозащищенное исполнение (РВ Ex), что будет гарантировать защищенность персонала рудника от возгораний и взрывов.

Кроме этого, рудничные источники света должны безотказными в работе. Должны исключаться всевозможные ситуации, связанные с перебоями в освещении рабочей зоны, например, вследствие простого обрыва нити накаливания или же перепадов напряжения.

Сегодня применение светодиодов настолько актуально и популярно, что находит применение светодиодов не только в качестве источников общего и индивидуального освеще-

ния. На сегодняшний день светодиоды являются основными элементами большинства современных светотехнических приборов. Они используются в различных индикаторных устройствах; телевизионных дисплеях (LED-технология); являются источниками излучения для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и т. д. [4, с. 5-11].

Согласно проведенным исследованиям на 2022 год количество используемых светодиодных ламп превосходит доли всех традиционных источников света, к которым относятся: ртутные; компактные люминесцентные и металлогалогенные лампы. В абсолютных значениях доля СД ИС составляет порядка 20 млн шт. [1, с. 188].

Переход к светодиодным источникам света в подземных горных выработках обусловлен рядом их преимуществ. Основными из них являются:

- 1) Механическая прочность к ударным нагрузкам и высокая надежность.
- 2) Отсутствие низкочастотных пульсаций (стробоскопического эффекта), что позволяет снизить нагрузку на органы зрения персонала и создать более безопасные условия труда.
- 3) Малый нагрев колбы, составляющий не выше 50–60 °С, что увеличивает ожоговую и пожарную безопасность.
- 4) Экономия электричества, что обеспечивает высокую энергоэффективность всей системы освещения. Энергопотребление светодиодной лампы на 70 % меньше, чем у газоразрядных ламп, и на 25–30 % меньше, чем у компактных люминесцентных ламп [5, с. 309].
- 5) Спектр излучения светодиодов близок к солнечному. Они имеют цветовую температуру от «холодного белого» до «теплого белого», что положительно сказывается на восприятии оттенков в рабочем пространстве.
- 6) Высокий срок службы, который составляет не менее 50 тыс. часов, что значительно превышает показатели других источников света;
- 7) Экологическая безопасность и отсутствие необходимости специальных условий по утилизации за счет отсутствия в составе светильника ртути, свинца, кадмия, которые являются ядовитыми для человека.
- 8) Светодиодные приборы для рудников универсальны и могут использоваться в забоях с различными ограничениями электрического потенциала (24 В; 36 В; 42 В; 127 В).

Стоит обратить внимание и на сроки окупаемости устройства осветительной сети в подземных горных выработках на основе светодиодных ламп. Суммарные затраты по сравнению с люминесцентными лампами уменьшаются через 3,5 года [6, с. 36].

Наряду с вышеизложенными явными преимуществами светодиодного освещения необходимо учесть еще один важный аспект, актуальный в ходе четвертой промышленной революции, также известной как Индустрия 4.0. Таким аспектом является управляемость и возможность интеграции светодиодных источников света с датчиками освещенности, процессорами и сетевыми интерфейсами, которые, в свою очередь, обеспечивают обмен данными с другими системами управления Интернетом, Интернетом вещей (Internet of things – IoT), смартфонами с соответствующими приложениями. Управляемость и оптимизация системы освещения в зависимости от локализации рабочих мест, присутствия или отсутствия людей и вида выполняемых работ обеспечивает потенциал экономии в 20–60 % [1, с. 189].

Светодиод представляет собой полупроводниковый диод с p-n-переходом, при протекании тока через который генерируется оптическое излучение, то есть возникает электролюминесценция, которая обусловлена излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда, инжектируемых в активную область. Наиболее эффективная инжекция осуществляется в гетеропереходах, а высокоэффективная излучательная рекомбинация происходит в т.н. двойной гетероструктуре, которая обеспечивает большую концентрацию неравновесных носителей тока в активной области. В настоящее время светодиоды изготавливаются преимущественно на основе гетеропереходов в системах твердых растворов на основе соединений  $A_3B_5$ , которые излучают в широком спектральном диапазоне. Например, чистый монокристалл GaAs дает инфракрасный луч, небольшая добавка Al и/или P меняет цвет излучения на красный. Зеленый свет испускает GaP. Использование же p-n-перехода на основе композиции AlInGaP позволяет получать желтое или оранжевое излучение [7, с. 432].



Мы исследовали два монолитно интегрированных светодиодных излучателя, изготовленных на базе одного мощного светодиода с помощью спектрофотометра UPRtek MK 350N. Были измерены следующие характеристики: доминантная и пиковая длина волны; величина освещенности (LUX); индекс цветопередачи (CRI). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений

Номер опыта	$I_{л}, \text{мА}$	$U_{л}, \text{В}$	$\lambda, \text{нм}$	LUX	CRI
1	90	2,7	562	18492	70,8
2	90	2,7	569	3268	64,9

Обратим внимание на колоссальные значения освещенности – они равны 18492 люксов и 3268 люксов соответственно. Они реализованы при сравнительно небольших значениях тока через излучатель (90 миллиампер) и напряжения питания (2,7 вольт). Данные показатели соответствуют установленным отраслевым стандартам, регулирующим освещенность в подземных горных выработках. Минимальный уровень освещенности зависит от конкретного участка шахты. Так, согласно Государственным стандартам минимальный уровень освещения в наименее освещенных участках рабочей зоны колеблется от 1 до 75 люксов [2, с. 3,4].

Индекс цветопередачи (Colour rendering index) – это показатель того, как цвета выглядят под источником светодиодного света по сравнению с солнечным светом. Индекс измеряется от 0 до 100, при этом идеальные 100 указывают, что цвета под источником света выглядят такими же, как при естественном солнечном свете [10, с. 5]. Индекс цветопередачи относится к качеству источника света с точки зрения того, насколько хорошо он передает цвета или объекты по сравнению с естественным дневным светом. Индекс цветопередачи исследуемого светодиодного светильника достиг значения 71, что является достаточно хорошим показателем [8, с. 226, 227].

Стоит отметить, что светодиоды могут применяться не только в системах освещения. Светодиоды на основе диффузионных р-п-переходов в твердых растворах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (с шириной запрещенной зоны от 0,354 до 1,42 эВ в зависимости от  $x$ ) позволяют получать излучение на длине волны, равной 3,4 мкм. Это значение соответствует основной полосе поглощения метана, создающего главную угрозу безопасности в угольных пластах; производственных и бытовых помещениях с газовыми горелками. На основе таких светодиодов был создан макет высокочувствительного метанометра [1, с. 111–115].

Проведя анализ существующих исследований в области светодиодных систем освещения подземных горных выработок, было выявлено, что, несмотря на явные преимущества светодиодных светильников, они все равно не смогут решить существующие проблемы в шахтах и рудниках, если их устанавливать на большом расстоянии друг от друга. Одновременная установка большого количества светильников на одном участке приведет к увеличению трудозатрат на их обслуживание. Решением этого является появившейся на рынке новый более совершенный вид освещения шахт – светодиодные ленты. Главным их преимуществом перед точечными светильниками является достижение равномерности освещения по всей рабочей зоне и меньший вес, что облегчает их монтаж и установку.

Подводя итоги проведенного исследования, мы можем сказать, что светильники на основе светодиодов не только создают требуемую эффективность освещения рабочего пространства, но и обеспечивают световой комфорт и уменьшают эмоциональную нагрузку. За счет этого повышается качество мониторинга за машинами и механизмами, предотвращается травматизм; а также улучшаются санитарно-гигиенические условия. Светодиодные решения характеризуются высокой энергоэффективностью, что является дополнительным критерием рентабельности шахт. Использование аккумуляторных светильников индивидуального пользования повышает производительность труда персонала рудника на 3–4 %. [9, с. 3-5]. Все это позволяет сделать вывод, что применение светодиодов в качестве рудничных источников света, действительно, перспективно.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Закгейм А.Л. Светодиоды и их эффективное применение // Москва изд. «Светотехника». 2021. – 199 с.
2. ГОСТ Р 55733-2013 Освещение подземных горных выработок. Основные требования и методы измерений. М., 2014.
3. Истомин А.М., Петров Г.М., Кутепов А.Г. Современный подход к устройству освещения в подземных горных выработках // Горный информационный аналитический бюллетень. 2014. – №1. – С. 304–310.
4. Картамышева Н.С. Экологические последствия развития солнечной энергетики / Н.С. Картамышева, Е.С. Картамышева, Е.С. Вахрушин // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). СПб.: Свое издательство, 2015. – 102 с.
5. Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Хасанов А.Т. Исследование спектров электролюминесценции светоизлучающих диодов. Казань: Казанский Федеральный университет, 2013. С. 5–11.
6. Истомин А.М., Петров Г.М., Кутепов А.Г. Современный подход к устройству освещения в подземных горных выработках // Горный информационный аналитический бюллетень. 2014. – № 1. – С. 304–310.
7. Истомин А.М., Петров Г.М., Кутепов А.Г. К устройству светодиодного освещения в подземных горных выработках // Научный вестник МГГУ (электронный журнал). 2013. – № 10. – С. 25–37.
8. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. М.: Физматлит, 2007. – 414 с.
9. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. М.: Физматлит, 2008. – 309 с.
10. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. М., 2017.

Мы выражаем глубокую благодарность доктору физ.-мат. наук Закгейму А.Л. и старшему научному сотруднику ФТИ им. Иоффе РАН Н.Г. Дерягину за оказанную помощь и содействие в организации процесса измерений.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Н.А. Тупицкая, доцент каф. ОТФ ФФиГД СПГУ.

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ПРИМЕРЕ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ**

С.И. Луппов<sup>1</sup>, М.Ю. Самбулова<sup>2</sup>, М.С. Ковалев<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
ИВТ, КФТ им. Н.И. Ярополова, ХТТб-22-1<sup>1</sup>, КАиУ, аУППоп-22-1<sup>2</sup>,  
КАиУ, ИРТм-22-1<sup>3</sup>

В настоящее время во всем мире тема энергосбережения и энергоэффективного использования ресурсов является одной из приоритетных направлений политики компаний, ориентированных на инновационное и динамичное будущее. Энергоэффективное использование отработанных ресурсов позволяет снизить издержки производства и повысить доходность предприятия посредством производства продукции из отработанных ресурсов.

В Российской Федерации слабо развита переработка отработанных ресурсов в частности отработанных масел. В сравнении с ведущими мировыми державами потенциал задействования в производстве отработанных продуктов мал. По статистике, представленной за 2020 год российским экологическим надзором только 13 % от общего объема мусора, в который входит

(отходы жизнедеятельности, отработанное масло, ЖБО и т.д.) подлежат переработке и дальнейшему использованию или утилизации.

Нами была разработана программа эффективной и экологичной технологии по утилизации/переработки/регенерации отработанных масел с получением востребованного продукта(ов). При анализе вопроса переработанных масел были выявлены следующие проблемы: обычно состав отработанных масел неизвестен; стоимость отработанных масел существенно ниже, чем стоимость каких-либо отходов; отработанные масла нельзя использовать как низкосортную смазку из-за возможного содержания в них стружки металлов; отработанные масла представляют опасность для экологии из-за содержания тяжелых металлов и канцерогенных веществ. Изучив рынок можно сделать вывод что технологии: дистилляция, селективная очистка, центробежная очистка, фильтрация, адсорбционная очистка – являются одними из самых популярных в сфере переработки нефтяных отходов. Нами рассмотрен процесс вакуумной дистилляции.

Смысл переработки отработанных масел состоит в получении из них базовых масел для дальнейшего использования в жизнедеятельности. Для этого используется вакуумная дистилляция. Вакуумная дистилляция – один из методов разделения смесей органических веществ. Широко применяется в ситуации, когда дистилляция не может быть осуществлена при атмосферном давлении из-за высокой температуры кипения целевого вещества, что приводит к термическому разложению перегоняемого продукта. Так как в вакууме любая жидкость кипит при более низкой температуре, становится возможным разогнать жидкости, разлагающиеся при перегонке с атмосферным давлением. Дистилляция – перегонка, испарение жидкости с последующим охлаждением и конденсация паров. В процессе вакуумной дистилляции получают следующие фракции: дизельное топливо (около 8 %), вода (3–5 %), битумные фракции (8–10 %), базовые масла (80–85 %). Плюсы данной установки: экономичность, безопасность, производительность и непрерывность. Отработанное моторное масло подогревается в рекуператоре тепла до 40–80 °С и подается в отстойники для очистки от механических примесей, с добавлением дизэмульгатора происходит флокулярная предварительная обработка, следом поступает в центробежный сепаратор, таким образом, происходит удаление воды, шлака, металлических примесей и коллоидов. Далее предварительно обработанное моторное масло через масляный насос поступает в колонну вакуумной дистилляции с дефлегматором, где нагревается до 360 градусов. Базовое масло из колонны атмосферной спиральной ректификации – подается через теплообменник в вертикальный тонкоплочный испаритель где масло нагревается до 310–330 °С) Пары масел поступают в вакуумную ректификационную колонну фракционирования в самой высокой стороне башни есть выход для легкого дизельного топлива, в нижней части колонна имеет 3 выхода: высокий для базового масла (150SN), средний для базового масла (250SN и нижний для базового масла (350SN) также выделяются масляные остатки (асфальтен и коллоид), также выделяется неконденсируемые газ, он проходит через вакуумный бак, водяной замок и используются для подогрева отработанного масла. Система вакуумной дистилляции позволяет снизить рабочие температуры процессов и повысить качество получаемых масел.

Базовое масло при добавлении присадок может быть использовано для производства трансмиссионных масел, пластичных смазок, автомобильных масел.

Также, нами были рассмотрены возможные риски при использовании данной технологии. В таблице 1 приведены возможные риски, которые могут повлиять на предложенную технологию. Волатильность рубля является максимальной и минимальной стоимостью российской валюты, данная характеристика может повлиять на стоимость как конечного продукта (базовых масел), так и самой установки по переработке отработанного масла. Нарушение в снабжении может возникнуть по различным причинам: проблемы с логистикой из-за человеческого фактора или из-за условий окружающей среды. Конкуренция – это составляющая любого рынка, которая существует всегда. Проблема нехватки квалифицированных кадров может возникнуть в любой момент, и для предприятия важно предусмотреть этот риск и укомплектовать штаб заранее. Продажи на рынке не всегда стабильные, и важно предусмотреть

возможные варианты реализации продукта производства помимо продаж. Один из ключевых моментов производства – это своевременное введение оборудования в эксплуатацию, в противном случае издержки производства могут начать возрастать. Также, важно следить за техническим состоянием функциональных узлов оборудования и производить своевременное техническое обслуживание.

Таблица 1. Возможные риски

№	Возможный риск
1	Волатильность рубля
2	Нарушения в снабжении
3	Конкуренция
4	Кадровые ресурсы
5	Рынок/продажи
6	Несвоевременный ввод оборудования в строй
7	Износ оборудования

На рисунке 1 указано соотношение уровня ущерба и вероятности возникновения возможных рисков. Исходя из приведенной схемы можно сделать вывод, что самыми нежелательными рисками для производства являются волатильность рубля и нехватка кадровых ресурсов. Данные риски несут более большой ущерб и имеют большую вероятность возникновения по сравнению с другими рисками.

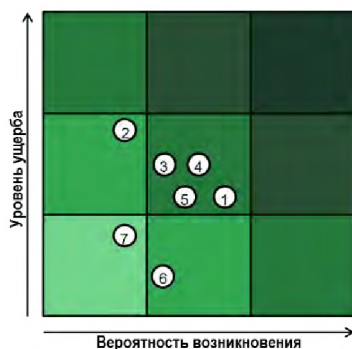


Рис. 1. Соотношение уровня ущерба и вероятности возникновения возможных рисков

Таким образом, предложенная технология позволяет не утилизировать отработанные машинные и технические масла, а перерабатывать их для дальнейшего использования, тем самым предприятие может извлекать из этого дополнительную прибыль. Базовые масла служат основой для моторных масел, поэтому их можно рассматривать как некий «фундамент», на котором производятся машинные моторные масла. Также данная технология благоприятно воздействует на окружающую среду посредством переработки опасного для окружающей среды отхода.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гиматдинов Р. Р., Фахрутдинов Р. З. Состояние производства базовых масел в России //Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 11. – С. 58-62.
2. Ефремов В. В., Маркман Г. З. «Энергосбережение и энергоэффективность»: уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – №. 4. – С. 146-148.
3. Шашкин П. И., Брай И. В. Регенерация отработанных нефтяных масел. 2 изд. – 1970.
4. Каменчук Я. А. Отработанные нефтяные масла и их регенерация (на примере трансформаторных и промышленных масел) //Автореферат дис... к. х. – 2007. – №. 02.00.

5. Керученко Л. С., Мальцева Е. И. Анализ загрязненности отработанных моторных масел // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития. – 2016. – С. 25-27.
6. Пауков А. Н. Разработка технологии переработки нефтяных шламов, промышленных и бытовых отходов : дис. – Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2010.

Научный руководитель: к.т.н. В.Ю.Конюхов, профессор кафедры АиУ ИНИТУ.

## **КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КАНАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Н.П. Курбатов, Д.М. Щербакова  
Тверской государственный технический университет

**Аннотация.** Статья посвящена оценке коэффициента полезного действия канала. Надежность – качественный признак сооружения. Используя методы теории надежности и математической статистики, рассчитывается коэффициент полезного действия канала через снижение качественных характеристик гидротехнического сооружения.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, канал, коэффициент полезного действия, фильтрация, надежность, вероятность безотказной работы.

Системы энергетического хозяйства имеют целый ряд гидротехнических сооружений. Это водозаборные сооружения, отстойники, шламонакопители, подводящие и отводящие каналы.

Канал, как любая система имеет коэффициент полезного действия. Только часть воды от водозабора поступает к потребителю. Значительное количество воды теряется [1].

По А.Н. Костякову коэффициент полезного действия системы [2]:

$$\eta = \frac{\sum q}{Q''}, \quad (1)$$

где  $Q''$  – расход, забираемый из источника, в голове системы;  $\sum q$  – суммарные потери воды;  $\eta$  – коэффициент полезного действия системы.

Объемы воды, не дошедшие до потребителя, как показывают натурные исследования, зависят от длины и размеров каналов. Небольшие каналы меньше теряют воды, так как уменьшается соотношение, общей длины сооружения на единицу расхода.

При определении коэффициента полезного действия системы, необходимо вычислить количество не дошедшей воды потребителю при различных внешних условиях и при изменении расходов воды в системе.

Исходя из опыта мелиоративного строительства, общее значение коэффициента полезного действия оросительных систем составляет для новых систем около 40 %, для старых систем оно повышается до 66–70 %. [3].

Установлено, что с уменьшением скорости течения и увеличения глубины воды канала возрастают потери воды. За счет зарастания каналов водными растениями наблюдается снижение скорости течения воды и приводит к потерям пропускной способности сооружения на 50–60 % больше относительно чистых каналов [2].

Если рассматривать изменение фильтрационных характеристик канала, как изменение надежности гидротехнического сооружения, то потери воды из канала – это потери свойств у сооружения, которые заложены были при проектировании [4]. Уменьшается пропускная способность вследствие, размывов и разрушений откосов. Надежность, это способность системы обеспечивать и сохранять в условиях эксплуатации характеристик, заданных проектом, в течение всего срока эксплуатации.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  в заданном интервале времен  $t$ , показывает, что система сохранит свою работоспособность в течение определенного времени  $t$ .

$$P(t) = P(T > t),$$

где  $T$  – гарантийное время работы системы с заданными свойствами.

Значение вероятности безотказной работы по статистическим данным определяется по формуле:

$$P(t) = \frac{n(t)}{N},$$

где  $n(t)$  – число элементов, отработавших без аварии;  $N$  – общее число элементов.

Частота отказов, то есть отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу элементов:

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t},$$

где  $n(\Delta t)$  – число отказавших элементов в период времени  $t - \frac{\Delta t}{2}$  до  $t + \frac{\Delta t}{2}$ ,  $\Delta t$  – интервал времени.

Частота отказов – это плотность вероятности времени работы одного элемента до первого отказа

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt.$$

Интенсивность отказов ( $\lambda$ ), т. е. как часто за время  $t$  система может выходить из строя, терять свои качественные характеристики. Статистическое значение интенсивности записывается в виде:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t},$$

где  $N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  среднее число исправно работающих элементов в интервале времени  $\Delta t$  в начале и конце интервала.

Вероятностное значение интенсивности отказов имеет вид:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)},$$

Наиболее типичная зависимость интенсивности отказов элементов от времени эксплуатации (рисунок 1) [4].

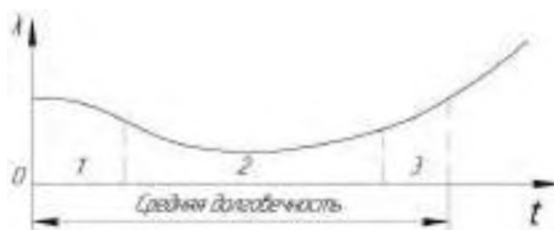


Рис. 1. Характер распределения отказов:

1 – период приработки; 2 – период нормальной работы; 3 – период износа

На графике отражены три участка: период приработки (наиболее часто выходят из строя элементы системы с дефектами); период нормальной работы (характеризуется постоянным значением интенсивности отказов); период износа (интенсивность отказов растет, система выходит из строя).

Срок службы устанавливается календарной продолжительностью эксплуатации системы до момента возникновения предельного состояния, оговоренного в технических условиях.

Под воздействием внешних факторов характеристики гидротехнической системы меняются. Изменяется коэффициент фильтрации, на дне канала накапливаются осадки, расчетный расход не проходит. Эксплуатация системы становится невозможной, если отклонения основных параметров от расчетных, достигнут предельных значений.

В общем виде вероятность работы элемента системы определяется по формуле:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right].$$

Натурными исследованиями установлено, что интенсивность отказов подчинена экспоненциальному закону, поэтому для практических расчетов можно принимать  $\lambda = \text{const}$ , а вероятность исправной работы одного элемента системы работы будет равна:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}; \quad a_i(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}; \quad T_{cp} = \frac{1}{\lambda_i},$$

где  $T_{cp}$  – срок службы до первого капитального ремонта, срок службы до списания средний срок службы.

Вероятность исправной работы системы каналов, состоящей из  $N$  элементов, в течение времени  $t$  будет равна, произведению вероятностей исправной работы ее составных элементов в течение того же времени [4, 5, 6]:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \dots P_N(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (2)$$

принимая интенсивность отказов величиной постоянной формулу (2) можно записать в виде:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} e^{-\lambda_3 t} \dots e^{-\lambda_N t}; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i. \quad (3)$$

При расчетах допускается, что все элементы работают в нормальном режиме, все они равнонадежны и работают одновременно.

Физический износ системы приводит к снижению качественных характеристик сооружения. Ухудшается пропускная способность канала. Внешние факторы, которые воздействуют на гидротехнические сооружения, носят случайный характер. Чтобы предупредить разрушение системы и снизить риск аварии, каналы периодически обследуются и ремонтируются. Установить сроки межремонтного периода и заранее спланировать объем и стоимость ремонта, позволяют методы математической статистики и теории вероятности.

В качестве примера рассмотрим сбросной канал, имеющий общую длину 200 м. Конструктивная часть выполнена в двух вариантах – с креплением и без крепления. Варианты креплений обусловлены характеристиками грунтов. В первом случае железобетонное крепление, во втором крепление отсутствует. В результате обследования установлено, что участок (1 м) с креплением имеет разрушения, в конце канала, на неукрепленной части, небольшой участок (1 м) с боковым размывом, что свидетельствует о наличии в этом месте слабых грунтов. Установить, как изменится КПД канала через 10, 15 и 20 лет эксплуатации, если разрушения облицовок и откосов будет продолжаться с той же скоростью.

Вероятность выхода из строя или снижение фильтрационной надежности равно:

$$P_c(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t},$$

где  $\lambda_1$  – интенсивность отказов из-за разрушенных креплений;  $\lambda_2$  – интенсивность отказов ввиду размыва откосов;  $\lambda_3$  – интенсивность отказов вследствие старения сооружения.

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{N_1} = \frac{1}{100},$$

где  $n_1$  – протяженность разрушенных креплений;  $N_1$  – общая длина участка.

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{N_2} = \frac{1}{100},$$

где  $n_2$  – протяженность размыва откоса;  $N_2$  – общая длина участка,  $t$  – расчетный срок эксплуатации сооружения.

Считая, что срок службы гидротехнических сооружений до капитального ремонта составляет 50 лет:

$$\lambda_3 = \lambda_3'' = \lambda_3''' = \frac{1}{t} = \frac{1}{50},$$

$$P_c(t) = 1 - e^{-2/100 \cdot 10} \cdot e^{-1/100 \cdot 10} \cdot e^{-1/50 \cdot 10} = 0,39,$$

$$P_c(t)'' = 1 - e^{-2,5/100 \cdot 10} \cdot e^{-1,5/100 \cdot 10} \cdot e^{-1/50 \cdot 15} = 0,50,$$

$$P_c(t)''' = 1 - e^{-3/100 \cdot 20} \cdot e^{-2/100 \cdot 20} \cdot e^{-1/50 \cdot 20} = 0,75.$$

В результате надежность системы через 10 лет снизится на 39 %, через 15 лет – на 50 %, через 20 лет – на 75 %. Потребитель получит через 10 лет не 1000 куб. воды, а только 610 м<sup>3</sup>, через 15 лет – 500 м<sup>3</sup>, через 20 лет – 250 м<sup>3</sup>.

Коэффициент полезного действия сооружения системы каналов составит через 10 лет  $\eta = 0,65$ ; через 15 лет  $\eta = 0,50$ ; через 20 лет  $\eta = 0,25$ .

Гидротехнические сооружения подвержены воздействию различных факторов, проявления которых случайны. Надежность и долговечность каналов зависят от условий эксплуатации. Наблюдения и своевременные профилактические ремонты позволят эксплуатировать сооружения без снижения их качественных характеристик. Важным показателем эффективности работы канала – пропускная способность. Изменение характеристик гидротехнического сооружения в период эксплуатации можно прогнозировать, используя методы математической статистики и теории вероятности. Уменьшение пропуска воды и снижение КПД определяется как оценка возможных случайных величин.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Курбатов Н.П. Пропускная способность мелиоративного канала / «Современные технологии и инновации». – Тверь: ТвГТУ, 2021. – С. 58-63.
2. Костяков, А.Н. Основы мелиорации. / А.Н. Костяков. –М.: Издание автора 1927. – 476 с.
3. Курбатов Н.П. Основные параметры для прогнозирования и оценки фильтрационных потерь / Н.П. Курбатов // Вестник ТвГТУ. –2009. №15. С.196-199
4. Курбатов Н.П. Методы определения пропускной способности канала с помощью теории надёжности / Н.П. Курбатов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. №1. С. 30- 34.
5. Сотсков Б.С. Основы теории расчета надежности элементов автоматики и вычислительной техники. / Б.С. Сотсков. -М.: «Высшая школа», 1970. 272 с.
6. Мирцхулава Ц.Е. Надежность гидромелиоративных сооружений. / Ц.Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1974. – 279 с.

Научный руководитель: к.т.н. Н.П. Курбатов, доцент кафедры ГТиГ ТГТУ.

## РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СРЕДЕ SIMINTECH

С.Ю. Еремочкин, А.А. Жуков, Д.В. Дорохов  
Алтайский государственный технический университет  
ЭФ, ЭиАЭП, группа 8Э-23

На сегодняшний день, в области построения систем автоматизированного электропривода, наибольшую значимость для исследователей и проектировщиков имеет метод компьютерного имитационного моделирования. Данный метод, по сравнению с другими методами исследования электроприводов, такими как физическое (опытно-экспериментальное) и аналитическое моделирование, позволяет получать искомые характеристики электропривода без выполнения трудоёмких опытов на реальном оборудовании и без выполнения сложных математических расчетов. Одной из перспективных сред компьютерного имитационного моделирования является SimInTech. Данная среда имеет набор базовых инструментов и блоков, представляющие математические модели реальных процессов и явлений, протекающих в системах электропривода. Однако, главная роль при построении компьютерных имитационных моделей остаётся за исследователем, т. к. только от его квалификации и знаний зависит достоверность



построенной модели и, как следствие, результатов моделирования. В таком случае, имеется вопрос создания типовых функциональных блоков, применение которых возможно для любого типа трехфазного асинхронного электропривода [1–3].

В стандартной библиотеке программного обеспечения SimInTech доступна модель трехфазного асинхронного электродвигателя, построенная во вращающейся системе координат  $dq$  с ориентированной осью  $d$  по потоку ротора [4]. Однако, для работы данной модели необходима математическая модель нагрузки.

Для выполнения имитационного моделирования асинхронного электропривода, в том числе с использованием различных устройств питания, необходимо разработать базовую имитационную модель, которая позволит получать характеристики исследуемого электропривода.



Рис. 1. Изображение блока «Асинхронный двигатель»



Рис. 2. Структурная схема блока «Нагрузка»

Порт входа «Мет» служит для соединения внешней части схемы со схемой, находящейся внутри блока и осуществляет прием значений угловой скорости вращения вала электродвигателя для последующей передачи на вход блока «Сумматор», который вместе с блоком «Источник» осуществляет задание момента нагрузки на вал электродвигателя. С помощью блока «Источник» задается значение момента нагрузки на валу электродвигателя, которое с помощью блока «Сумматор» алгебраически складывается с значением крутящего момента вала электродвигателя, поступающего с порта входа «Мет». Результат сложения поступает на вход блока «Источник момента вращательного движения», который соединен с блоком «Инерция вращательного движения».

Связка данных блоков позволяет осуществлять решение уравнения движения вращающегося вала электродвигателя с заданным значением момента инерции по следующей формуле (1):

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t), \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции вала электродвигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\omega(t)$  – угловая скорость вала электродвигателя,  $\text{рад/с}$ ;  $M(t)$  – суммарный вращательный (крутящий) момент вала электродвигателя,  $\text{Нм}$ ;  $t$  – время моделирования,  $\text{с}$ .

Значения крутящего момента поступает на вход блока «Датчик вращательного движения», соединенного с блоком «Заделка вращательного движения» [5].

Связка данных блоков позволяет определять значение угловой скорости вращения вала электродвигателя по следующему выражению (2):

$$\omega(t) = \omega'(t) - \omega_3(t), \quad (2)$$

где  $\omega'(t)$  – угловая скорость вращения вала электродвигателя;  $\omega_3(t)$  – угловая скорость, поступающего с блока «Заделка вращательного движения»;  $\omega(t)$  – измеряемая разность угловых скоростей [6].

Причем значение угловой скорости, поступающее с блока «Заделка вращательного движения» является постоянным в течении всего времени моделирования и равно нулю. Далее, рассчитанное значение угловой скорости поступает на порт выхода «Uт», служащего для соединения внутренней части схемы разработанного блока с внешней схемой.

Значение статического момента нагрузки поступает на порт выхода «Mст», служащего для соединения внутренней части схемы разработанного блока с внешней схемой.

Для того, чтобы фиксировать значение коэффициента полезного действия электродвигателя, был разработан специальный блок «КПД».



Рис. 3. Структурная схема блока «КПД»

Разработанный блок производит расчет значения коэффициента полезного действия в реальном времени по следующей формуле (3):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\omega M}{I_{abc} U_{abc}}, \quad (3)$$

где  $P_1$  – потребляемая активная мощность, Вт;  $P_2$  – полезная мощность, отдаваемая нагрузке, Вт;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $M$  – электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя, Нм;  $I_{abc}$  – сила тока фаз А, В и С, А;  $U_{abc}$  – напряжение фаз А, В и С, В.

Графическое представление полученных данных осуществляется с помощью «Временного графика» из раздела «Вывод данных».

Для того, чтобы фиксировать значение коэффициента мощности электродвигателя, был разработан специальный блок «cos(fi)».



Рис. 4. Структурная схема блока «cos(fi)»

Данный блок выполняет расчет значения коэффициента мощности в реальном времени по следующей формуле (4):

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (4)$$

где  $P$  – активная мощность, Вт;  $S$  – полная мощность, ВА;  $Q$  – реактивная мощность.

Графическое представление полученных данных осуществляется с помощью «Временного графика» из раздела «Вывод данных».

На рисунке 5 представлена имитационная модель для прямого пуска асинхронного электродвигателя «4АА50В4У3», созданная в среде «SimInTech».

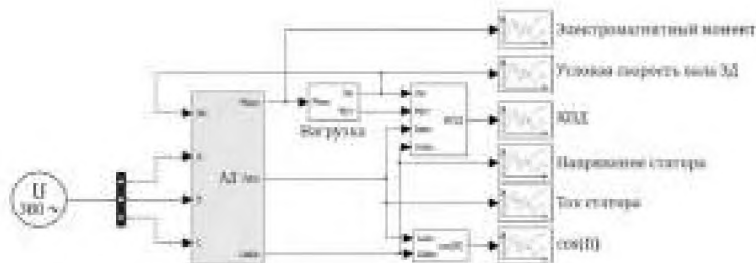


Рис. 5. Имитационная модель пуска асинхронного электродвигателя марки «4АА50В4У3»

Питание электропривода осуществляется с помощью элемента «Источник напряжения 3-фазный», а подключение обмоток электродвигателя к питающей сети осуществляется с помощью «Шины». Данные элементы взяты из раздела «ЭЦ-Динамика».

Для фиксирования значений электромагнитного момента, угловой скорости вала электродвигателя, а также напряжения и токов обмоток статора, используются блоки «Временный график» из раздела «Вывод данных».

В результате выполненной работы, в среде имитационного моделирования были разработаны функциональные блоки, с помощью которых было выполнено построение имитационной модели асинхронного электропривода. Стоит отметить, что данные блоки построены на основании общеизвестных математических соотношений и являются универсальными элементами имитационной модели, поэтому их использование не имеет ограничений для решения задач имитационного моделирования трехфазных асинхронных электроприводов в среде SimInTech.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Акопов А.С. Имитационное моделирование. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 389 с.
2. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем. – Норильск: НИИ, 2015. – 135 с.
3. Калачев Ю.Н. «SimInTech»: моделирование в электроприводе. – М.: SimInTech, 2021. – 90 с.
4. Среда динамического моделирования SimInTech // SimInTech. 2021. URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения 20.10.2022).
5. Инерция вращательного движения // Справочная система SimImTech. 2021. URL: [https://help.simintech.ru/#biblioteki\\_blokov/mekhanika/elementy\\_vrasheniya/4200.html](https://help.simintech.ru/#biblioteki_blokov/mekhanika/elementy_vrasheniya/4200.html) (дата обращения: 20.10.2022).
6. Идеальный датчик вращательного вращения // Справочная система SimImTech. 2021. URL: [https://help.simintech.ru/#biblioteki\\_blokov/mekhanika/mechanich\\_datchiki/4230.html](https://help.simintech.ru/#biblioteki_blokov/mekhanika/mechanich_datchiki/4230.html) (дата обращения: 20.10.2022).

Научный руководитель: к.т.н. М.И. Стальная, профессор АлтГТУ.

## **СРАВНЕНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБСОРБЦИОННОГО И ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ**

М.Б. Перехвал, П.А. Перехвал  
Белорусский национальный технический университет  
ЭФ, ПТЭиТ, группа 5062602202

Эксергетический анализ служит теоретической базой энергосбережения, поскольку даст возможность просто и наглядно определить степень совершенства процесса и источники потерь из-за неравновесности во всевозможных установках, эксергетические показатели легко могут быть связаны с технико-экономическими.

Эксергия – это та максимальная работа, которую может совершить система при переходе из заданного состояния в состояние равновесия с ОС. Так же это можно назвать характеристикой качества энергии, ее потенциал [2].

Если сравнивать эксергию с энергией, полученной или затраченной в неравновесном процессе, то можно сделать вывод о степени термодинамического совершенства.

На данный момент актуален вопрос о повышении энергоэффективности используемого топлива для выработки тепловой энергии. Эффективность тем выше, чем ниже удельный расход условного топлива. Одним из путей экономии является устранение рассеяния энергии в окружающую среду в градирнях. Для этих целей широкое применение нашли тепловые насосы.

Тепловой насос – это повышающий трансформатор теплоты, который, в прямом смысле

слова, перекачивает тепловую энергию от источника низкого теплового потенциала к источнику более высокого, но все же достаточно умеренного, потенциала. Тепловые насосы так же, как и холодильные машины действуют по обратному термодинамическому циклу.

Для привода тепловых насосов требуется энергия в тепловой или механической (электрической) формах. В первом случае имеют место абсорбционные тепловые насосы (АБТН), во втором – компрессионные тепловые насосы (ПКТН).

В данной статье будут представлены выводы о термодинамической эффективности применения АБТН и ПКТН для получения данных выводов был произведен эксергетический и энергетический анализ.

Рассмотрим два варианта со следующими исходными данными:

1. Для ПКТН: коэффициент преобразования равен 3, тепловая нагрузка на потребителя 10 Гкал/ч, остальные исходные данные будут представлены на рисунке 1.
2. Для АБТН: коэффициент преобразования 1,7, тепловая нагрузка на потребителя 10 Гкал/ч, остальные исходные данные будут представлены на рисунке 1.

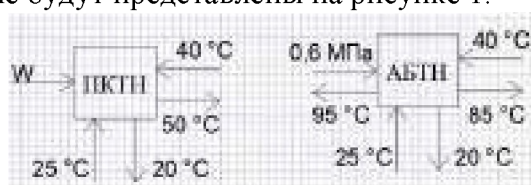


Рис. 1. Расчетная схема с потоками для ПКТН и АБТН

Для проведения оценки термодинамической эффективности необходимо провести эксергетический анализ, в ходе которого определяется эксергетический КПД установки, для нахождения эксергетического КПД необходимо знать выходящие и входящие потоки эксергии. В данном случае для ПКТН входящими будут являться: поток электроэнергии на привод ПКТН, низкопотенциальный поток температурой 25 и 40 °С, а выходящими потоки температурой 20 и 50 °С. Для АБТН входящие потоки: поток пара на привод АБТН, потоки температурой 25 и 85 °С, а выходящими потоки с температурой 40 и 20 °С. Во всех случаях мы принимаем тепловую нагрузку на потребителя, равную 10 Гкал/ч.

Для нахождения эксергетического КПД пользуемся формулой 1:

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'}, \quad (1)$$

где  $\sum E''$  – выходящие потоки эксергии, кДж/с;  $\sum E'$  – входящие потоки эксергии, кДж/с.

Для нахождения каждого из потоков эксергии использовался источник [1].

В ходе анализа были получены следующие данные: эксергетический КПД для ПКТН составил 45,3 % при заданных условиях, а для АБТН эксергетический КПД составил 79,5 % при заданных условиях. Для наглядности на рисунке 2 представлен график.

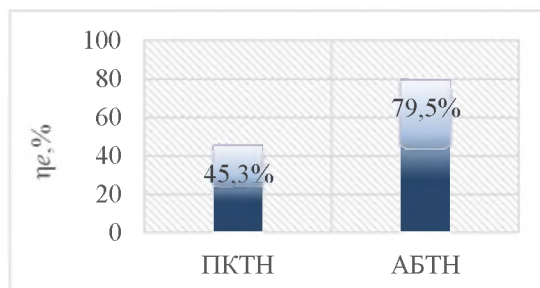


Рис. 2. Диаграмма для наглядного сравнения

Эксергетический анализ дополняет энергетический в оценке эффективности преобразования энергии в различных системах. В нашем случае по полученным данным можно сделать вывод: хоть и на первый взгляд коэффициент трансформации говорит нам о том, что энергетический КПД ПКТН выше, чем у АБТН, проведя эксергетический анализ мы убеждаемся в

обратном: эксергетический КПД почти вдвое выше у АБТН, нежели чем у ПКТН. Это нам говорит о том, что процесс преобразования энергии у АБТН происходит термодинамически совершеннее, чем у ПКТН. Почему так происходит? Дело в том, что электрическая энергия является в большей степени ценным энергоресурсом, чем пар, в связи с этим, пытаясь забрать теплоту у низкопотенциального источника, мы используем очень малый потенциал энергии, которым обладает электроэнергия. Пар же, в свою очередь, является не таким качественным энергоресурсом, как электроэнергия, тем самым тепловой насос с приводом в виде пара имеет эксергетический КПД выше.

Хотелось бы отметить важность эксергетического анализа системы, так как он позволяет определить несовершенства системы и пути ее улучшения, а также дает более широкую оценку работы установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталёв Б.М., Несенчук А.П., Романюк В.Н.: Техническая термодинамика: учебник. В 2 частях. Часть 2 – Минск: Изд-во «Технопринт», 2004 – 560 с.
2. Хрусталёв Б.М., Несенчук А.П., Романюк В.Н.: Техническая термодинамика: учебник. В 2 частях. Часть 1. – Минск.: Изд-во «Технопринт», 2004 – 560 с.

Научный руководитель: к.т.н. И.Л. Иокова, доцент ПТЭиТ ЭФ БНТУ.

## ДИАГНОСТИКА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

С.И. Киреев

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-42

Современный этап развития энергетики характеризуется интенсивным развитием технологий, обеспечивающих надежную работу основных составляющих электроэнергетической системы. Надежность высоковольтного оборудования в значительной степени определяется качеством его изоляции. На приемо-сдаточных испытаниях определяют кратковременную электрическую прочность изоляции в большинстве своем используя разрушающие методы контроля. В последнее время большое внимание уделяется неразрушающим методам контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования [1]. Одним из таких методов является метод обнаружения частичных разрядов, позволяющий диагностировать целостность изоляции в период всего жизненного цикла установки, а также в процессе её нормальной эксплуатации.

К действующим методам обнаружения частичных разрядов относят: электрический и электромагнитный, акустический, химический и оптический методы.

**1. Электрический метод** основан на измерении импульса тока в системе. Используются различные типы датчиков, каждый из которых устанавливается в отдельной области исследуемого объекта. На данный момент реализованы и чаще всего используются 3 типа датчиков:

### 1.1. HVCC (High Voltage Ceramic Capacitors).

Датчики HVCC основаны на использовании высоковольтного конденсатора связи. Эти датчики встроены непосредственно в линию и обеспечивают непрерывный мониторинг частичных разрядов. Использование таких датчиков возможно только при установке на каждую фазу исследуемого объекта, а для эффективной работы и локализации места ЧР – двух на каждой фазе. Данные устройства нашли свое применение на электродвигателях, генераторах, трансформаторах.

### 1.2. HFCT (High Frequency Current Transformers).

Работа датчиков этого типа основана на явлении электромагнитной индукции. Частичный разряд вызывает импульс тока в линии. Аналогичный импульс возникает в изолирующем экране. Высокочастотный трансформатор улавливает импульсы и передает их параметры на прибор для измерения частичного разряда. Недостатками такого вида датчиков являются сложность установки, плохая помехоустойчивость.

1.3. TEV (Transient Earth Voltage) – датчик представляет собой конденсатор емкостного делителя. Второй конденсатор – это металлический корпус устройства, к которому прикреплен датчик. Как и в случае с датчиками HFCT, эта система обнаруживает импульсы тока, которые создают ЧР. Емкостные датчики предназначены для использования в ситуациях, когда использование датчиков HFCT или HVCC невозможно по конструктивным или другим причинам. Эти датчики могут быть установлены непосредственно на корпусе установки и проводить измерения без изменений в его работе.

Помимо очевидных преимуществ, таких как простота установки и использования, TEV – датчики имеют ряд недостатков, главным из которых является низкая помехоустойчивость, так как через заземление оборудования протекают не только импульсы, наводимые ЧР, но и другие высокочастотные процессы.

**2. Акустический метод.** Используется дистанционно и позволяет размещать датчики в КРУ и шинпроводах. Недостатком метода является низкая чувствительность при регистрации частичных разрядов малой интенсивности. Также при установке направленных акустических датчиков будет иметь место сложность калибровки. Распространение сигнала ЧР зависит от наличия физических препятствий. Для точной локализации места ЧР требуется установка большого количества датчиков.

**3. Химический метод** заключается в хроматографическом анализе жидкого диэлектрика – масла. Возникновение практически любого типа дефекта в оборудовании сопровождается образованием газов, которые растворяются в масле, при этом определенные типы дефектов выделяют свои газы в различных количествах. При ЧР основным газом является  $H_2$ , характерными газами с низким содержанием будут  $CH_4$  и  $C_2H_2$ .

На практике для хроматографического анализа используются два метода. Первый, который используется чаще всего – это сбор масла в специальную емкость, а затем анализ образцов в лаборатории. Данный анализ является комплексным на определение потенциальных дефектов различного типа и не специализируется на отдельной диагностике частичных разрядов для которых необходим постоянный мониторинг.

Второй способ – онлайн мониторинг. Принцип тот же, что и при лабораторном анализе, но образцы исследуются на месте с помощью мобильных приборов, и все данные мгновенно отображаются в систему программного контроля. Все, что происходит с трансформатором либо другим исследуемым оборудованием, отображается в режиме реального времени. При такой системе уже имеет место быть постоянный мониторинг, но будет отсутствовать возможность локализации места ЧР, а также диагностики в рабочем режиме.

**4. Оптический метод** основан на регистрации излучения, выделяемого ЧР, с помощью различных датчиков. Спектр излучения света варьируется от ультрафиолетового излучения до видимого диапазона в зависимости от энергии частичных разрядов [2]. Действующими оптическими методами на сегодня являются:

4.1. При ультрафиолетовом излучении, выделяемым частичными разрядами используют фотодетектор.

4.2. С помощью флуоресцирующего вещества, прикрепленного к наконечнику оптоволоконной линии. Работает как точечный датчик.

4.3. Использование оптоволоконной линии с жилой, легированной флуоресцирующим веществом. Датчики такого типа встраивают в изоляцию, что обеспечивает более точное определение источника, генерирующего частичные разряды.

Одним из главных недостатков оптических датчиков это ограничение по углу приема. Данный недостаток присущ первым двум типам датчиков, вследствие чего имеем низкую их

чувствительность к выделяемому излучению. Для осуществления эффективного контроля исследуемого объекта на ЧР требуется большое их количество.

На сегодняшний день существует широкий спектр контроля частичных разрядов. Действующие методы обнаружения не всегда эффективны на ранних этапах развития частичного разряда. Учитывая сложность их установки, отключение и расшиновку электрооборудования, фильтрацию помех. А ведь рекомендации к контролю состояния частичных разрядов является периодические проверки, а в идеальных условиях постоянный контроль в режиме реального времени. Итоговая стоимость и полученные результаты измерений, не всегда являются финансово целесообразными. Одним из путей решения проблемы контроля состояния без снятия напряжения является использование коммутационных импульсов [3]. На рисунке 1 приведена блочная схема физической модели для обнаружения частичных разрядов.

Принцип работы модели: высоковольтным источником постоянного тока через первое положение коммутационного ключа заряжается высоковольтный конденсатор. Далее коммутационный ключ переключается во второе положение, тем самым на испытуемый объект подается импульсное напряжение от конденсатора.

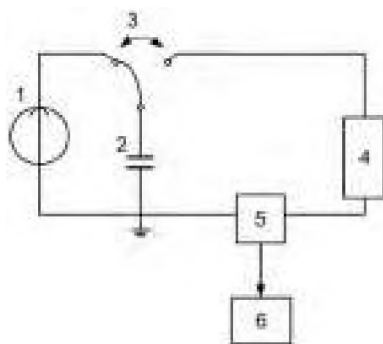


Рис. 1. Блочная схема модели:

- 1 – высоковольтный источник постоянного тока;
- 2 – высоковольтный конденсатор; 3 – ключ;
- 4 – испытуемый объект; 5 – датчик;
- 6 – осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

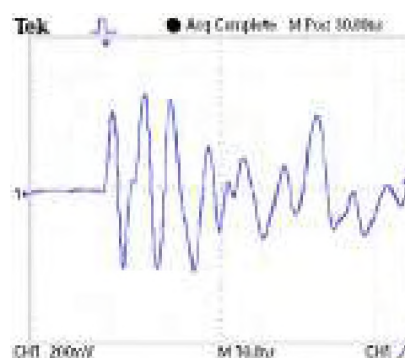


Рис. 2. Осциллограмма коммутационного импульса. Ячейка с частичным разрядом содержит пору. Напряжение на ячейке 2 кВ

Таким образом, результаты исследований на физической модели продемонстрировали возможность осуществления контроля частичного разряда путем использования импульсов коммутационного происхождения. Критерием, по которому можно констатировать наличие частичного разряда, является уменьшение амплитуды токового сигнала в случае присутствия частичного разряда.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кочура М. Б. Диагностика технического состояния мощных силовых трансформаторов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Минск, 1996. – 3 с.
2. M. Muhr, R. Schwarz Experience with optical partial discharge detection // Materials Science-Poland. – 2009. – V. 27(4). – P. 1139–1146.
3. Экспериментальное исследование контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов на основе коммутационных импульсов / В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – No 5. – С. 77–86

Научные руководители: профессор, д.т.н. В.Я. Ушаков, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ, к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

# ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE IRT-T REACTOR'S CENTRIFUGAL PUMP

E.K. Ketter, A.G. Korotkikh  
Tomsk polytechnic university

## 1.0. Abstract

The purpose of this study is to emphasize how crucial it is to examine the industry's data analysis and reliability. With the help of this study, it is possible to identify the pattern of damage that has taken place and choose the best course of action. The D 320-50 centrifugal pump in the TPU's IRT-T reactor was used for this study. The primary goal of this research is to estimate the centrifugal pump dependability using recurrent data analysis for failure modes because the centrifugal pump that is the subject of this work has already had numerous significant failures. The reliability of each pump component can be calculated and evaluated for maintenance needs using the information from the daily operating report. To resolve the problem, however, a generic mathematical model and algorithms are needed because the data gathered from the location may be insufficient or incomplete.

## 2.0. Introduction

Plant production can be increased while operating costs are greatly decreased with proper equipment maintenance [1]. With the idea of producing a pressure difference between the intake and the exit, pumps are utilized in the industrial world to transport fluids from one location to another [2]. When designing the equipment or system for these pumps, performance criteria including dependability, availability, maintainability, and safety should be taken into consideration and maintained [3]. A total output loss and daily losses of more than a billion ringgit for the corporation are inevitable if the system fails frequently or for an extended period of time. To prevent this from happening, the system and its components need to undergo a dependability assessment. Reliability has elevated in importance over the past few years as a subject and element of organizational continuous improvement [4]. A prediction of the total dependability can be made using the component's time to failure. The system can also be divided into two categories: systems that can be repaired and those that cannot [5]. In this research the reliability of each pump component can be calculated and evaluated for maintenance needs using the information from the daily operating report. In this research D 320-50 centrifugal pump was chosen. The characteristics of this pump can be shown in the table 1 below. Weibull analysis will be used to calculate the reliability of each component.

Table 1. Characteristics of Centrifugal pump

Pump size	flow m <sup>3</sup> /h	Head m	Power consumed by the pump (nom.), kW	Rotation frequency, rpm	Soviet equivalent since 1973	Voltage, V	Weight, kg
D320-50	320	50	60	1450	6NDV	380/660	326

## 3.0. Failure modes

The Ishikawa or Fishbone Diagram, a visualization tool for classifying the possible sources of a problem in order to find its root causes, was used to analyze the obtained data as part of the Root Cause Failure Reliability Centered Maintenance methodology. In troubleshooting sessions, a fishbone diagram is helpful to keep the dialogue on topic. The technique enables the researcher to draw conclusions from all potential explanations for a problem. The diagram's layout closely resembles a fish skeleton. The conventional way to draw a fishbone diagram is from right to left, with each big "bone" of the fish branching out to include smaller bones with more detail. The Fishbone method was used to look at the many causes or contributing factors that led to the failure of the pump as a whole. The causes can be seen in the fishbone diagram in figure 1 below [6, 7, 8].



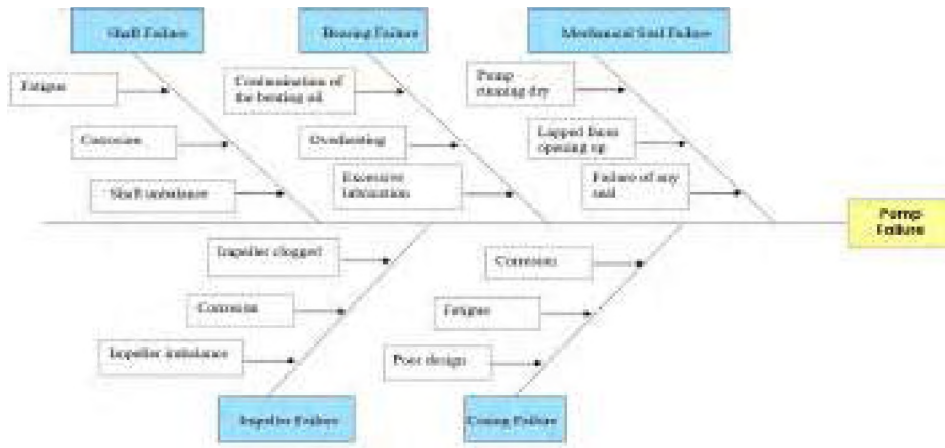


Fig. 1. Cause and Effect (“Fishbone”) Diagram of Pump Failure

#### 4.0. Preparing a mathematical model for calculation reliability

##### Weibull distribution

Weibull distribution is used in reliability engineering, medical research, quality control, finance, and climatology. Time-to-failure data, such as the probability that a part fails after one, two, or more years is required during the analysis. Weibull distribution is described by 3 parameters shape ( $\beta$ ), scale ( $\eta$ (Eta)) and threshold parameters or location ( $\gamma$ ). The probability distribution function can be used to derive reliability metrics such as the reliability function, failure rate, mean and median as shown in the equations below [9, 10].

Weibull reliability function can be determined by,

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad (1)$$

when threshold is zero equation 1 becomes,

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (2)$$

$R(T)$  decreases for  $0 < \beta < 1$

For  $\beta = 1$ ,  $R(T)$  decreases monotonically but less sharply than for  $0 < \beta < 1$

For  $\beta > 1$   $R(T)$  decreases as increases

Weibull failure rate function can be calculated as shown in equation 3.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}. \quad (3)$$

Weibull mean life, or mean time to failure MTTF function can be determined by (4),

$$\bar{T} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right), \quad (4)$$

where  $\Gamma$  is the gamma function

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx. \quad (5)$$

In order to find median ranks, Bernard's approximation is used (6).

$$F(t) = \frac{j-0.3}{n+0.4}, \quad (6)$$

where,  $j$  is the failure order while  $n$  is the sample size.

##### Serial and parallel connection of elements

In cases where the system consists of several parts, the failure of at least one of any of which results in the failure of the entire system is said to be serial connected. The block diagram of a series connection with  $K$  elements is shown in the figure 2 below [11].

The reliability of this system is expressed by (7),

$$R_s = P(E_1 E_2 E_3 \cdots E_k), \quad (7)$$

where:  $E_j$  is the successful operation (i.e., success event) of unit  $j$ , for  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $P(E_1 E_2 E_3 \dots E_k)$  is the occurrence probability of events  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_k$ ;  $R_s$  is the series system reliability.

In cases where the system consists of several parts and the failure of only all parts results in the failure of the system, it is said that these parts are connected in parallel. The block diagram of a parallel connection with K elements is shown figure 3 below.

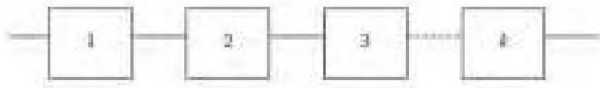


Fig. 2. A k-unit series system

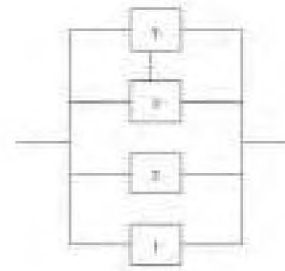


Fig. 3. Parallel connection of elements

Then,

$$F_P = F_1 F_2 F_3 \cdots F_K = \prod_{j=1}^K F_j, \quad (8)$$

where  $F_j$  is the unit  $j$  failure probability, for  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ .

### 5.0. Calculation of reliability

The initial step in the analysis is to gather failure time data over a 5-year period and separate the many failure types connected with this pump. The pump failure history card is where you may find the history of pump failures. The next step is to determine which pump components are crucial. Applying the critical level of pump components will only concentrate attention on machinery that is extremely significant and needs quick handling. Therefore, doing this is crucial. Weibull distribution parameters were then calculated using analysis in Excel from the collected data. Different modes' failure times were arranged in ascending order. Bernard's approximation was then used to determine the median rank. Each failure's unreliability is calculated using the median rank. According to a 50 % confidence level and a sample size of  $N$  units, the median rank is the value that the true chance of failure should have at the  $j^{\text{th}}$  failure. Next, a probability plot of failure time against median rank was plotted.

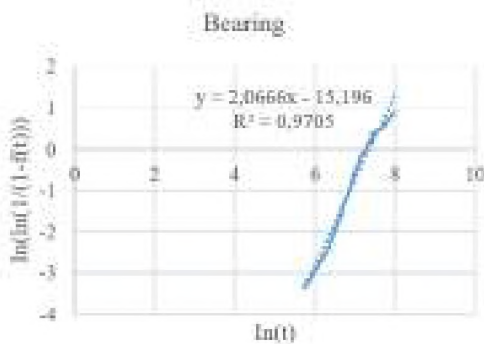


Fig. 4. Probability plot of failure time against median rank for the bearing

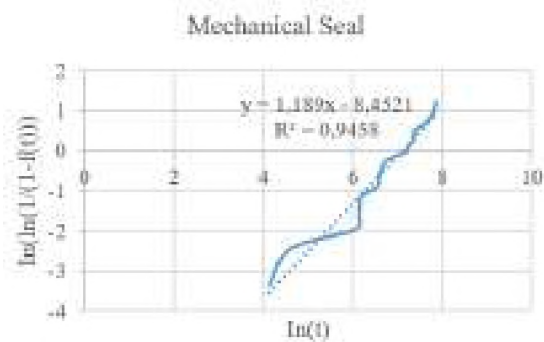


Fig. 5. Probability plot of failure time against median rank for mechanical seal

Component	Shape ( $\beta$ )	scale ( $\eta$ (Eta))	Reliability in 1year
Bearing	2,0666	1561,091	4,5712E-16
Mechanical Seal	1,189	1222,409	3,0503E-05
Impeller	1,6448	1147,377	5,0429E-13

The failure rates of the pump's casing, shaft, and motor were found in earlier studies. These components' reliability can be assessed based on their failure rates. The hourly failure rates for these parts are  $2,6612E-7$ ,  $1,6216E-5$ , and  $7,0584E-6$ , respectively [12, 13]. These components' annualized reliabilities are calculated to be  $2,3285E-3$ ,  $0,1324$ , and  $0,06$  respectively. To calculate the overall reliability of the pump, the structural reliability scheme is drawn as shown below (7).

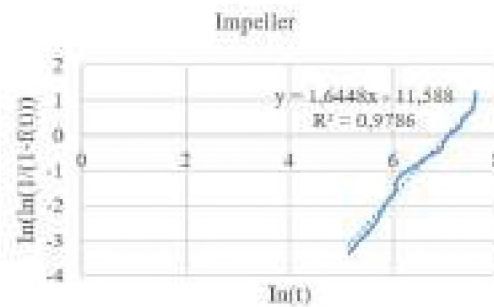


Fig. 6. Probability plot of failure time against median rank for impeller



Fig. 7. Structural reliability scheme of the pump

Considering that the pump elements are connected in series, then the overall reliability of the system can be calculated using equation 7.

$$R=4,5712E-16*3,0503E-5*5,0429E-13*2,3285E-3*0,1324*0,06=1,3007E-37.$$

#### 6.0. Ways in which pump reliability can be improved

- To prevent infant mortality or early failure, review the routine maintenance procedures for all important equipment.
- Run-to-failure maintenance should replace time-based maintenance because time-based or predictive maintenance operations on random failure won't add value or lower the failure rate.
- In order to provide passive redundancy as part of a standby system, centrifugal pump units should be stacked in parallel (one pump is operating and the other is waiting in standby mode for the failure of the first pump).

#### 7.0. Conclusion

To characterize centrifugal pump failure data and provide precise maintenance solutions, Weibull reliability analysis is appropriate. With the aid of this research, the management will be able to make the best choice for centrifugal pump availability and minimize plant downtime. An extra tool for performing maintenance to ensure the dependability of centrifugal pumps is provided by the availability indicators in the monthly report. The system reliability value can be modified by a number of factors depending on the findings of the analysis that was done. According to the maintenance aspect, reliability may suffer if repairs are not completed on time and with quality, and the availability of pump parts may delay repairs. Another factor is age; if the repair work done in the workshop is of poor quality, the pump's life may be shortened, and the maintenance schedule may be thrown off. Pumps are notorious for having issues during design or installation with bearings and mechanical seals. By using the Weibull analysis method, industries will be able to set priorities for centrifugal pump units based on their availability or how important they are to operations.

#### REFERENCE:

1. Thin, K. C., Khaing, M. M., & Aye, K. M. (2008). Design and performance analysis of centrifugal pump. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 46(1), 422- 429.
2. Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(7), 839-848.
3. Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
4. Nelson, W. B. (2003). *Applied life data analysis (Vol. 521)*. John Wiley & Sons.
5. Li, Y., Cui, L., & Yi, H. (2016). Reliability of non-repairable systems with cyclic-mission switching and multimode failure components. *Journal of Computational Science*, 17, 126- 138.

6. McKee, K., Forbes, G., Mazhar, M. I., Entwistle, R., & Howard, I. (2011). A review of major centrifugal pump failure modes with application to the water supply and sewerage industries. In ICOMS Asset Management Conference Proceedings. Asset Management Council.
7. Skewis, W. H. (2011). Mechanical Seal Failure Modes. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment.
8. <https://www.scribd.com/document/408265237/Handbook-of-Reliability-Prediction-Procedures-for-Mechanical-Equipment-15-May-2011-pp-235-pdf>
9. <https://accendoreliability.com/2-parameter-weibull-distribution-7-formulas/>
10. Sheikh, A. K., Younas, M., & Al-Anazi, D. M. (2002, December). Weibull analysis of time between failures of pumps used in an oil refinery. In The 6th Saudi Engineering Conference (Vol. 4, pp. 475-491). Dahrán, Saudi Arabia: KFUPM.
11. Dhillon, Balbir S. Design reliability: fundamentals and applications. CRC press, 1999.
12. Hashim, N., Hassan, A., & Hamid, M. F. A. (2020, April). Predictive maintenance model for centrifugal pumps under improper maintenance conditions. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2217, No. 1, p. 030170). AIP Publishing LLC.
13. Fernando, V. (2005). Reliability Analysis of Centrifugal Pumps System Justifies Improvements in Gas Plant. Maintenance and Reliability Integrity Engineer, ABB Service, Argentina, 9.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.Г. Коротких, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДИАГНОСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Е.С. Айбасов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ18

Понятие частичного разряда в изоляции охватывает местный разряд на поверхности или внутри изоляции в виде короны, скользящий разряд или пробой отдельных элементов изоляции, шунтирующий часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами. Частичные разряды в изоляции возникают в местах с пониженной электрической прочностью (например, в прослойках пропитывающей жидкости или в газовых включениях в толще диэлектрик) [1].

Существует три основных метода диагностики ЧР:

- электрический;
- электромагнитный или дистанционно управляемый микроволновый метод;
- акустический; химический.

### **Электрический метод**

Этот метод требует контакта измерительных приборов с изоляцией. Это позволяет определить большое количество характеристик частичного разряда. Это самый точный из всех методов измерения частичных разрядов.

Преимуществом метода является высокая чувствительность, но для поддержания надлежащей чувствительности необходимо устранить помехи или использовать фильтры. Электрические процедуры не опасны для изоляции оборудования, так как напряжение питания не сильно превышает номинальное.

Электрический метод измерения позволяет получить характеристики ЧР в режиме онлайн без задержек, которыми обладает хроматография. Существует также возможность при-

менения этого метода без отключения тестируемого объекта (для устройств ввода через соответствующие подключаемые устройства), что делает этот метод необходимым для мониторинга работоспособности устройств, находящихся в эксплуатации [2].

Прибор R2200 используется для измерения изоляции в ЧР (рисунок 1).

Принцип работы измерительных приборов основан на преобразовании измерительной информации в сигналы частичного разряда, которые регистрируются датчиками измерительного прибора.

Два основных режима работы:

- режим периодического измерения максимальной амплитуды повторяющегося частичного разряда напряжения и частоты повторных частичных разрядов в 1 секунду;
- режим "временного" наблюдения.

#### **Акустический метод регистрации**

В этом методе используются микрофоны, которые принимают аудиосигналы от работающего устройства. Датчики устанавливаются в сложные распределительные устройства и работают с дистанционным управлением.

Датчик AR 200 используется для регистрации акустического ЧР (рисунок 2).

Устройство включает в себя первичный преобразователь в виде датчика и измерительный прибор. Датчик преобразует импульс давления в электрический сигнал. В основном используются датчики с пьезоэлектрическим преобразователем. Недостаток: небольшие значения ЧР не учитываются.

#### **Дистанционный или электромагнитный метод**

Обнаружение ЧР с помощью метода сверхвысоких частот – это простой и эффективный процесс. Используется направленная антенна, недостатком этого метода является то, что нет возможности измерить значения разряда [3].

Для регистрации ЧР используется HVPD Longshot с датчиком HFCT (рисунок 3).

Обнаружение ЧР с помощью метода сверхвысоких частот – это простой и эффективный процесс.

Обнаружение колебаний электромагнитных волн с помощью радиочастотных датчиков на частотах от 300 МГц до 3 ГГц [4].



*Рис. 1. Измеритель изоляции для CHR R2200*



*Рис. 2. Акустический датчик AR 200*



*Рис. 3. Устройство HVPD Longshot*

Мощные силовые трансформаторы входят в состав систем электроснабжения, а рядом с ними устанавливаются высоковольтные устройства, в которых может присутствовать ЧР. Сигналы от них передаются на управляемый трансформатор. Если к трансформатору подключены линии электропередач, которые подвергаются воздействию грозových разрядов, сигналы от них регистрируются в изоляции трансформатора при измерении характеристик частичного разряда. Если трансформатор находится на открытой подстанции, то в зависимости от температуры, влажности и других факторов на его внешних токоведущих частях периодически возникают коронарные разряды. Показания, полученные испытательным трансформатором, перекрываются сигналами помех, вызванными работой оборудования, находящегося поблизости. В таких случаях необходимо использовать правильно подобранный метод измерения, чтобы избежать помех от полученных данных о частичном разряде в трансформаторах [5].

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. Отделение, 1979. – 224 с.
3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 370 с.
4. Потапов А.И., Игнатов В.М., Александров Ю.Б. и др. Технологический неразрушающий контроль пластмасс. Л.: Химия, 1979. – 288 с.
5. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse / V.Lavrinovich, A. Mytnikov, Li Hongda // Resource-Efficient Technologies. – 2016. – V. 2. – № 3. – P. 111–117.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЗОНДИРОВАНИЕМ НИЗКОВОЛЬТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ОДНОСТУПЕНЧАТОМ РЕЖИМЕ**

И.А. Кавун

Томский политехнический университет

ИШЭ, ОЭЭ, группа А1-42

Реализация надежных и чувствительных технологий контроля состояния изоляции обмоток – необходимое условие устойчивой работы трансформаторного оборудования. Соответствующая технология контроля механического состояния была предложена в 1966 и получила название импульсного дефектографирования. Принцип технологии состоит в подаче импульса на одну из обмоток (1,2/50 мкс при амплитуде 500–1000 В), при короткозамкнутых остальных, и снятии отклика переходного процесса, возникающего в обмотке. Далее необходимо обработать снятый сигнал и сравнить начальную нормограмму исправного оборудования с полученной, разница в которых будет свидетельствовать о наличии дефекта в обмотках силового оборудования [1].

Данный метод низковольтных импульсов для повышения точности контроля был модифицирован в метод измерения амплитудно-частотных характеристик. Принцип предложенного амплитудно-частотного метода заключается в подаче синусоидального сигнала со значением амплитуды около 10 В на один из вводов обмотки трансформатора и измерении амплитудно-частотной характеристики с вывода одноименной обмотки [2]. Далее полученные амплитудно-частотные характеристики сравниваются с нормограммами, снятыми на исправном трансформаторном оборудовании. Преимущество данного подхода состоит в отсутствии сильного влияния параметров схемы на результаты измерений. В последствии метод амплитудно-частотных характеристик получил название технологии FRA.

Метод низковольтных импульсов (НВИ) много лет является одним из наиболее чувствительных подходов обнаружения дефектных состояний активных частей силовых трансформаторов, однако нуждается в дальнейшем совершенствовании с целью повышения эффективности выявления дефектов обмоток, так как классический метод НВИ и метод амплитудно-частотных характеристик иногда имеют низкую чувствительность и в ряде случаев не обеспечивают необходимый уровень точности диагностики.

В данной работе представлены результаты совершенствования метода НВИ в направлении одноступенчатого подхода. Повышение эффективности предлагаемого метода НВИ, а именно контроля состояния активных частей высоковольтного трансформатора с помощью

одноступенчатого дефектографирования, заключается в применение зондирующего импульса в диапазоне частот до 50 МГц.

Диагностические измерения откликов исследуемых обмоток трансформатора ТМ-160/10-У1 для последующей оценки состояния осуществляется следующим образом, для получения осциллограмм необходимо предварительно произвести расшиновку оборудования, далее на высоковольтный ввод одной из обмоток подавался прямоугольный зондирующий импульс амплитудой 200 В с длительностью 110 нс. Последующий вывод о состоянии производится только посредством спектрального анализа формы и длительности сигнала отклика, поданного на вход обмотки [3–4].

Схема обследования трансформатора состоит из специально разработанного генератора импульсов наносекундной длительности и электронных осциллографов для контроля сигнала на входе в обмотку трансформатора. Схема диагностического обследования представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема обследования трансформатора

Применение одноступенчатого дефектографирования проводится на для высоковольтной обмотки трансформатора класса напряжения 10 кВ.

Были произведены обследования для двух дефектных состояний, а именно механическое смещение 4 и 8 витков вверх обмотки при различных длительностях импульса. Примеры осциллограмм представлены на рисунке 2 (а, б).

Для определения состояния оборудования необходимо произвести разложение импульса, поданного на обследуемую обмотку, в ряд Фурье с целью получения частотного спектра импульсного сигнала по формуле:

$$S1_n = \frac{1}{N} \cdot \left( \sum_{k=0}^{N-1} ((S^{(1)})_k \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N} k}) \right), \quad (1)$$

где  $S$  – присвоенный символ файла со значениями сигнала (ЗИ);  $N$  – число дискретных значений сигнала ( $N = 2499$ );  $k$  – временной индекс входных отсчетов ( $k = 0..N - 1$ );  $n$  – необходимое число гармоник ( $n = 0..150$ ).

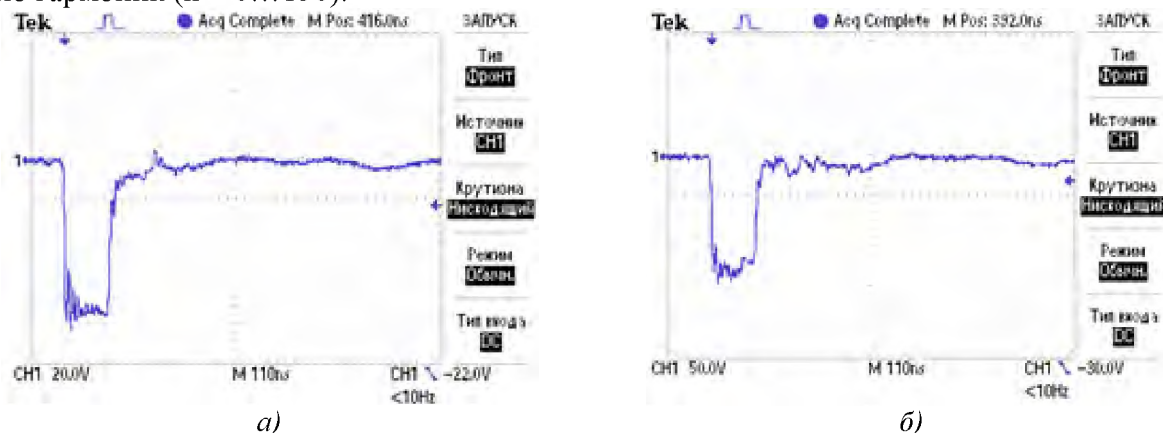


Рис. 2. Осциллограмма импульса на входе в обследуемую обмотку: а) дефект отсутствует; б) дефект – полегание витков обмотки

Стоит отметить, что визуально осциллограммы исправной и дефектной обмоток практически не отличаются, вывод о наличии дефекта заключается при исследовании отношений спектров.

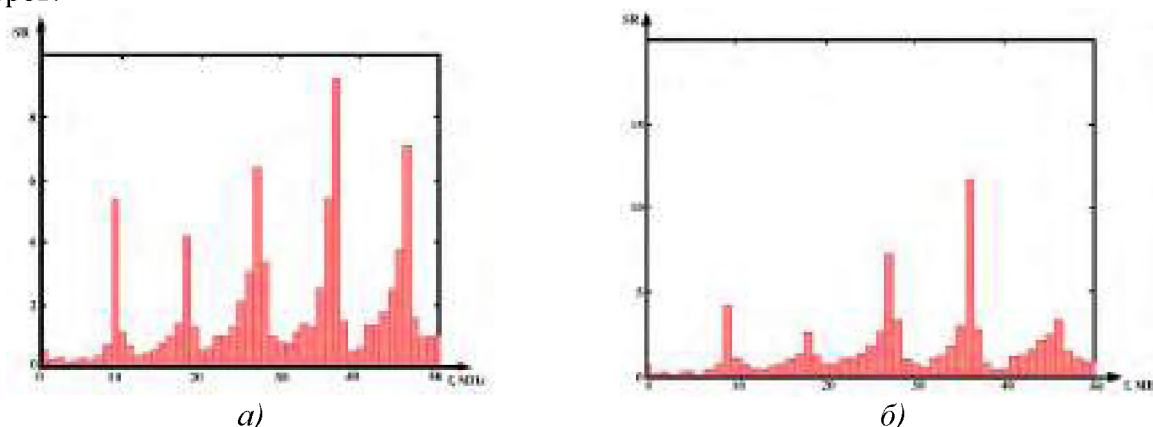


Рис. 3. Отношение спектров исправной и дефектной обмоток при 110 нс:  
а) дефект при смещении 4 витков; б) дефект при смещении 8 витков

Результаты проведенных исследований при различных длительностях импульса представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость амплитуд отношений спектров от длительности зондирующего импульса

Длительность импульса, $t_{ис}$	Амплитуды спектров при полегании 4 витков, $A_{о.е.}$	Амплитуды спектров при полегании 8 витков, $A_{о.е.}$
20	2	2
60	3,5	4
110	9	12
260	3,8	4,2
520	1,8	1,6

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что при различной длительности были обнаружены дефектные состояния, но наиболее эффективными показателями являются исследования при длительности импульса 110 нс, при зондировании которым наблюдается максимальная эффективность обнаружения дефектного состояния обмотки.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лех В., Тымински Л. Новый метод индикации повреждений при испытании трансформаторов на динамическую прочность // Электричество, 1966. – Т. 1. – № 1. – С. 77- 81.
2. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов // Электрические станции, 2003. – № 11. – С. 49- 51.
3. Lavrinovich V.A, Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Translation on Dielectric Electrical Insulation, 2015. – V. 22. – N. 4. – p. 2041–2045.
4. Lavrinovich V.A, Mytnikov A.V, Hongda Li. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies, 2016. – V. 2. – N. 3. – p. 111–117.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.



# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА ДЛЯ АКВАРИУМНЫХ РЫБ

А.А. Иванова

Томский университет систем управления и радиоэлектроники  
РКФ, РЭТЭМ, группа 239-3

Известно, что свет играет важную роль в жизнедеятельности рыб. Как правило при освещении аквариумов используются люминесцентные лампы с постоянным световым потоком и цветовой температурой. В естественной среде обитания освещённости и цветовая температура меняются в течение суток. Утром и вечером преобладает тёплая цветовая температура, а в обед холодная цветовая температура. Световая отдача светодиодов белого цвета свечения может достигать 250 лм/Вт с индексом цветопередачи не менее 85. Целью работы является создание светодиодного светильника для аквариумных рыб, который имитирует естественную освещённость и цветовую температуру в течение светового дня. Для достижения поставленной цели следует выбрать светодиоды и изготовить макет светильника.

Для изготовления светильника важно было выбрать светодиоды трех разных цветовых температур для приближенного восполнения естественного освещения. Для этого были выбраны светодиоды теплого света с температурой 3300 К, нейтрального света с цветовой температурой 4000 К и холодного с температурой 6000 К. Светодиоды представлены на рисунке 1.

После выбора подходящих светодиодов был выполнен чертеж печатной платы для будущей лампы. Он представлен на рисунке 2.



Рис. 1. Выбранные светодиоды

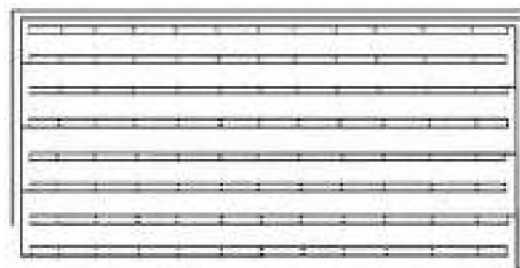


Рис. 2. Чертеж печатной платы

Для изготовления печатной платы был выбран фольгированный стеклотекстолит FR4. Он имеет хорошие диэлектрические свойства, стабильность характеристик и размеров, высокая устойчивость к воздействию неблагоприятных климатических условий. Последнее особенно хорошо подходит к нашему случаю.

В этот раз было принято решение отказаться от лазерно-утюжной технологии нанесения рисунка ПП и воспользовались перманентным маркером

После было произведено травление печатной платы. Для этого использовалась лимонная кислота, перекись водорода и поваренная соль. В полученный раствор была помещена плата. Для получения нужного результата раствор был несколько раз обновлен. Процесс травления показан на рисунке 3.

После травления стирается слой тонера с готовых дорожек и начинается процесс лужения. Для монтажа светодиодов была выбрана технология поверхностного монтажа (SMT) – это метод, при котором электрические компоненты монтируются непосредственно на поверхность печатной платы. Процесс показан на рисунке 4.



Рис. 3. Травление платы



Рис. 4. Печатная плата со светодиодами

В результате работы разработана эскизная конструкторская документации и изготовлен макет светодиодного светильника для аквариумных рыб.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама / Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. // Системы анализа и обработки данных, 2022. – № 3(87). – С. 75-88.
2. Подбор комплектующих компонентов для аквариумного светильника / О.В. Панкратов, А.А. Горбунова // Сборник докладов XXVI Всероссийской научно-технической конференции, 2020 – С. 144-147.
3. Анализ материалов для изготовления печатных плат / Д.В. Гордеев, В.А. Зайкин, К.В. Селиванов, А.А. Цветков // Технологии инженерных и информационных систем, 2020 – С. 26-45.
4. Исследование характеристик светового прибора с изменяемым спектральным составом // научная электронная библиотека [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.elibrary.ru/query\\_results.asp](https://www.elibrary.ru/query_results.asp) (дата обращения: 01.09.2022).
5. Мощность люминесцентных ламп для аквариума // электро-помощь [Электронный ресурс]. – URL: <https://grand-electro.ru/vopros-otvet/raschet-optimal-nogosvescheniya-dlya-akvariuma.html> (дата обращения: 20.09.2022).
6. Травление печатной платы в домашних условиях // дзен [Электронный ресурс]. – URL: <https://dzen.ru/media/masterskayaidey/travlenie-pechatnoi-platy-v-domashnih-usloviiah-rasskazyvaiu-chto-luchshe-i-pochemu-5eea9ee7058020546c6776f5> (дата обращения: 01.10.2022).

Научный руководитель: к.т.н. В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ ТУСУР.

## **К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ВОДОПОДГОТОВКИ И ХИМВОДООЧИСТКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

М.Е. Чириков

Омский государственный университет путей сообщения  
ИЭТСЭ, Теплоэнергетика, группа 41ж

Качество технической воды теплоэлектростанции имеет большое значение, поэтому всегда актуально улучшать системы химводоочистки технологической воды. Какой бы ни была принятая система очистки, она сопровождается образованием различного количества осадков и шлама, которые необходимо утилизировать. Также операторы водоочистительных установок сталкиваются с постоянной работой, по слежению за параметрами очищенной воды и поддержанием работы самих установок в определенном режиме. Работа установок цеха водоподготовки и химводоочистки часто не автоматизирована. Операторы вынуждены вручную открывать задвижки, а отбор воды производится также без автоматизации.

Рассмотрим тепловую электростанцию, работающую на угле, с испарительными градирнями. Необходимая подпиточная вода системы охлаждения для тепловых электростанций может быть получена из поверхностных вод, имеющих в непосредственной близости от станции, или из систем «водоканала» города и должна подвергаться механической и химической обработке, чтобы она соответствовала эксплуатационным требованиям станции, а также соответствовала существующим нормам в отношении уровня загрязнения сбросов сточных вод.

Необходимая для работы установки сырая вода хранится в резервуарах и перед использованием пропускается через станцию обезуглероживания. Система охлаждения воды электростанции снабжается подпиточной водой непосредственно со станции обезуглероживания. Часть потока обезуглероженной воды перекачивается на станцию полной деминерализации и после прохождения через фильтры с гравием, катионами, анионами и смешанным слоем служит в качестве подпиточной воды для паровых систем электростанции. Электростанция также включает в себя устройство, которое собирает и опресняет непригодный для использования конденсат из различных установок. Опресненный конденсат и подпиточная вода со станции деминерализации обеспечивают питательную воду для резервуаров для хранения конденсата электростанции.

Для электростанций можно выделить различные потоки сточных вод, которые образуются в разных элементах схемы станции, соответственно необходимо отводить следующие потоки сточных вод с различным загрязнением:

- 1) вода, образующаяся в результате продувки системы охлаждения, с высоким содержанием соли, а иногда и со свободным хлором и взвешенными веществами;
- 2) регенерационная вода, полученная в результате полной деминерализации и очистки конденсата, с высоким содержанием соли и избытком кислот или щелочей;
- 3) сточные воды при очистке дымовых газов с высоким содержанием солей и высокой концентрацией твердых частиц;
- 4) сточные воды или осадок из системы очистки подпиточной воды для системы циркуляции градирни. В случае использования ионного обмена эти сточные воды имеют высокое содержание солей и избыток кислот.
- 5) Фильтры предварительной очистки для подпиточной воды, с возможным содержанием взвешенных веществ
- 6) сточные воды из системы золошлакоудаления с относительно высоким содержанием солей и взвешенных веществ.

Образуется также химически загрязненная вода кислотой или щелочью в результате испытаний парогенератора под давлением, процедур очистки и т. д. Однако по сравнению с количеством сточных вод из вышеперечисленных источников количество периодически возникающих сточных вод достаточно мало.

Мероприятия, которые могут проводиться:

- при наличии избытка кислоты или щелочи нейтрализацию проводят в резервуарах для хранения и нейтрализации соответствующего размера, и нейтрализованная вода сливается без удаления из нее фильтруемых веществ, образующихся в результате нейтрализации.
- если сточные воды содержат осаждаемые вещества, допускается осаждение в подходящих отстойниках, чистая вода сливается, а осажденный осадок удаляется.
- если сточные воды имеют высокое содержание соли, но не содержат избытка кислот, щелочей или осадка, они направляются в сточные воды.
- следует уменьшать количество аммония в сточных водах, перед сбросом в сточные воды.

Наибольший единичный вклад в общий объем сточных вод, сбрасываемых с электростанции, будет составлять продувочная вода из системы циркуляции градирни. Эта продувочная вода обычно будет иметь высокое общее содержание солей, включая высокую концентрацию хлоридов и сульфатов.

Вариант возможного осуществления схемы циркуляции воды на ТЭЦ с целью сокращения объемов её использования и сбрасывания в сточную канализацию показан на рисунке 1.

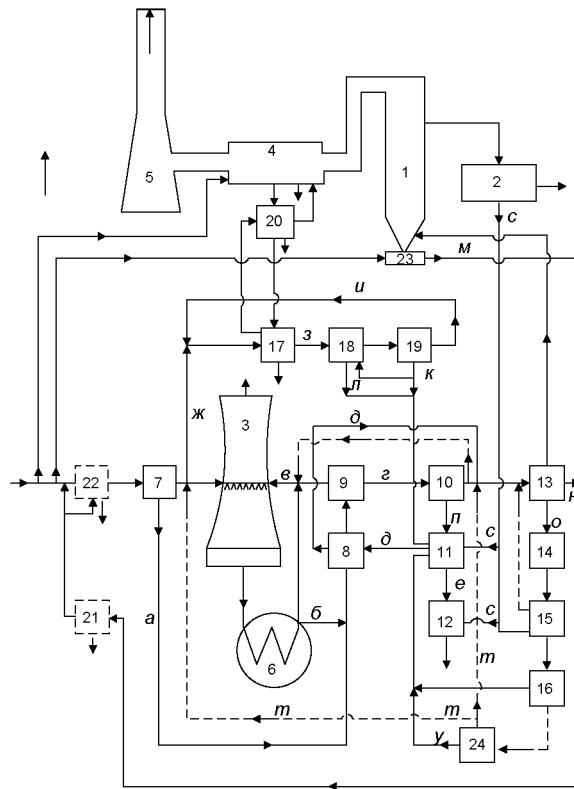


Рис. 1. Технологическая схема циркуляции охлаждающей воды и пара электростанции

Пар, вырабатываемый парогенератором 1, используется для приведения в действие турбины 2. Уходящие газы из 1 подаются через установку 4 очистки газов в дымовую трубу 5. Охлаждающая вода для турбины 2 подаётся в градирню 3. Конденсатор 6 связан с градирней 3, продувочная вода из системы циркуляции градирни обозначенная – "б".

Сырая вода для работы электростанции подается из доступного источника в газоочиститель 4, в систему золоудаления золы 23 и в систему очистки, которая будет описана ниже. Система очистки содержит установку 7 обратного осмоса. Концентрат "а" из установки 7 обратного осмоса, которая работает с эффективностью 75 % удаления пермеата, смешивается с частью продувочной воды "б" из системы циркуляции градирни, и затем смесь подается через теплообменник 8 в другую установку 9 обратного осмоса. Пермеат из установки 7 обратного осмоса функционирует как первичная вода для подачи в градирню 3, и, поскольку этот пермеат будет иметь очень низкое содержание солей, а также низкую концентрацию хлоридов и сульфатов, часть этого пермеата тоже может быть использована.

Установка 9 обратного осмоса, как и установка 7 обратного осмоса, будет состоять из модулей, содержащих мембраны, которые обеспечивают удержание соли на 90 %. Пермеат "с" из осмотической установки 9 подается в систему циркуляции градирни 3 в качестве подпиточной воды. Таким образом, в соответствии с настоящим изобретением необходимая производительность процедуры обработки сырой воды, то есть требуемая производительность установки 7 обратного осмоса, уменьшается на количество опресненной воды, которая содержит пермеат из установки 9 осмоса. Этот пермеат "в" будет добавлен к той части продувочной воды из конденсатора 6, которая не смешивается с концентратом из осмотической установки 7.

Концентрат "г" из установки 9 обратного осмоса будет доставлен в другую установку 10 обратного осмоса. Общее содержание солей в концентрате "г" будет очень высоким и может достигать значения до 10 000 г/т или более. Соответственно, целесообразно использовать мембраны, которые имеют удержание соли 99 % в осмотическом блоке 10. Установка 10 обратного осмоса работает с выпуском пермеата около 40 %, и концентрат "п", выпускаемый из установки 10, будет подаваться в испаритель 11. Источником тепла для испарителя 11 является

пар "с" из турбины 2. В испаритель 11, способом, который будет описан ниже, также подаются другие потоки сточных вод. Испаритель 11 будет получать из пара "с" нагретый конденсат "д" с низким содержанием соли. Этот нагретый конденсат "д" подается в теплообменник 8, в котором он охлаждаясь нагревает смесь, содержащую продувочную воду "б" системы градирни и концентрат "а" из осмотической установки 7.

Выход пермеата из установки 9 обратного осмоса значительно улучшается за счет нагрева за счет использования теплообменника 8. Теплообменник 8 также может быть использован для нагрева пермеата блока 10, который подает его в блок 13 обработки питательной воды для парогенератора. Пермеат из блока 10 обратного осмоса смешивается с охлажденным конденсатом "д" из испарителя 11 после его прохождения через теплообменник 8, и вся или часть этой смеси подается в блок 13 обработки питательной воды для парогенератора 1 электростанции.

Смесь сточных вод, образующаяся в результате нескольких потоков поступления в испаритель 11. Соответственно, концентрат "е" из испарителя 11 может иметь концентрацию соли в диапазоне от 15 до 20 %. Этот концентрат может быть доставлен на установку 12 для сушки, в результате чего высококонцентрированный солевой раствор преобразуется в форму, пригодную для утилизации. В этом случае часть пара "с" из турбины 2 будет использоваться в качестве источника тепла для установки 12.

Сточные воды образуются в результате работы установки блока 13 очистки питательной воды для парогенератора. Этот регенерат сточных вод "о" содержит, в зависимости от конструкции очистной установки, избыток кислот или щелочей и, при щелочном режиме работы электростанции, большое количество аммиака и гидразина. Сточные воды, то есть регенерат "о", обрабатывают хлором в щелочной среде, имеющей значение рН 10, и гидразин окисляют до азота. Осуществление контроля над хлором, добавляемым в сточные воды из установки 13 очистки питательной воды, достигается путем измерения окислительно-восстановительного потенциала в очистном бассейне установки 14 детоксикации. Впоследствии рН очищенной сточной воды корректируют до значения 11–12 добавлением содового щелока, и затем сточные воды подают в систему 15 концентрирования аммония. Система 15 концентрирования аммония может представлять собой отпарную колонну или колонны, в которых сточные воды обрабатываются отработанным паром "с" из турбины 2.

Вода для промывки гипса "з", выпускаемая со стадии 17, насыщается сульфатом кальция. Этот взвешенный сульфат кальция отфильтровывается из воды на стадии 18 умягчения, чтобы ее можно было подавать в установку 19 обратного осмоса. Пермеат "и" из осмотического устройства 19 подается обратно на стадию 17 обезвоживания, где он смешивается с промывочной водой "ж" из осмотического устройства 7. Таким образом, вода для промывки гипса рециркулирует. Концентрат "к" из установки 19 обратного осмоса подается вместе с регенерирующей сточной водой "л" со стадии 18 умягчения в качестве дополнительного потока сточной воды в испаритель 11.

Как упоминалось выше, неочищенная вода, т. е. вода без какой-либо предварительной обработки, подается как в газоочиститель 4 дымовых газов, так и в систему 23 золоудаления. Охлаждающая вода "м" для золы, выпускаемая из системы 23, содержит взвешенные вещества и растворимые вещества из золы. Эти растворимые вещества представляют собой в основном неорганические соли. Вода "м" смешивается с водой обратной промывки "н" из блока 13 обработки питательной воды парогенератора. Вода обратной промывки "н" также содержит взвешенные вещества в результате промывки фильтров, расположенных в блоке 13 обработки питательной воды перед секцией опреснения. Стадия 22 флокуляции и осаждения может быть использована перед установкой осмоса 7, если этого требует состав сырой воды. Если предварительная обработка неочищенной воды не требуется перед осмотическим блоком 7, или если неочищенная вода только фильтруется, объединенные потоки сточных вод "м" и "н" должны быть обработаны в отдельном блоке флокуляции и осаждения 21 перед смешиванием с неочищенной водой, поскольку взвешенные вещества не могут попадать в секцию предварительной очистки осмотической установки 7 [1, 2].

Данная система может быть реализована на промышленных программируемых контроллерах (рисунок 2) [3].



Рис. 2. Контроллер Segnetics Matrix

Для автоматической работы всей системы требуется более сложная схема с применением клапанов с электроприводами и соответствующих датчиков, но вложения бы могли окупиться из-за снижения часов работы персонала или экономии ресурсов. В ходе анализа состояния систем водоподготовки омских ТЭЦ было выяснено, что системы работают в исключительно ручном режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент US № US4347704A, 1980. Thermal power plant water treatment process // Патент US № US4347704A. 1980. Kurt Marquardt Heinz Ludwig.
2. Патент РФ № 2016123987, 12.04.2017. Система подготовки подпиточной воды для контуров котельной или электростанции с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии // Патент России № 2016123987. 2017. Бюл. № 11. / Малахов И. А. Малахов Г. И.
3. Компания ООО "Сегнетикс": официальный сайт : URL: <https://segnetics.com/ru/contacts> (дата обращения 25.11.2022).

Научный руководитель: А.С. Гусаров, ст. пр. ИЭТСЭ ТЭ ОмГУПС.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ ДИСТИЛЛЕРНОЙ ЖИДКОСТИ

Н.А. Терешин<sup>1</sup>, Н.Ш. Исламгиров<sup>2</sup>

Московский энергетический институт

ИЭТЭ, ИЭиОТ, группа Эл-18м-22<sup>1</sup>, группа Эл-18-22<sup>2</sup>

На территории РФ к 2022 году от производства соды образовалось 2,592 млрд. тонн жидкого отхода в виде дистиллерной жидкости. Эта жидкость занимает огромные площади, называемые “белыми морями”, и на данный момент либо не утилизируется предприятиями, либо только начинает подвергаться утилизации. На территории Башкирской содовой компании (БСК) такое “белое море” занимает 460 га. Дистиллерная жидкость в основном состоит из  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ , имеет  $\text{pH}: 10-11$  [1]. “Белые моря” оказывают негативное воздействие на окружающую среду, проникая в грунтовые воды ощелачивая их, из-за чего рекультивация близлежащей почвы ухудшается [2].

Для того, чтобы решить проблему «белых морей» были рассмотрены и проанализированы основные методы утилизации дистиллерной жидкости. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Методы утилизации дистиллерной жидкости

Метод	Преимущества	Недостатки
Производство асбцементных изделий	1) получение качественного вяжущего материала для строительных изделий	1) выбросы парниковых газов 2) образование диоксинов и фуранов
Производство хлористого кальция	1) получение хлорида калия 2) минимизация негативных выбросов 3) получение электроэнергии	1) стоимость оборудования

Анализ показал, что более эффективным методом является метод получения хлористого кальция из дистиллерной жидкости. Технологическая схема представлена на рисунке 1.

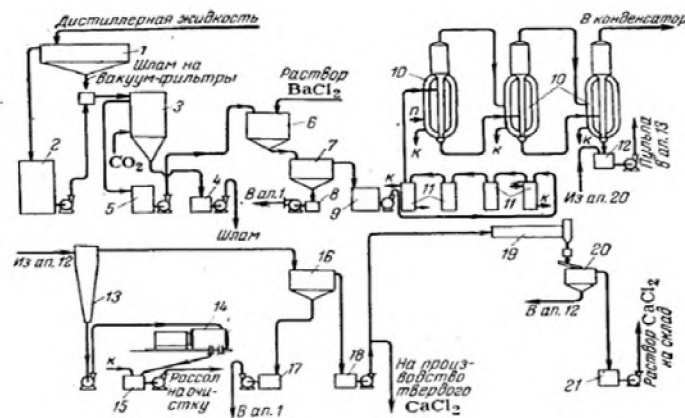


Рис. 1. Технологическая схема утилизации дистиллерной жидкости

Описание работы схемы. Жидкость поступает на осветление в сгуститель (1), где осветлённая жидкость перетекает в приёмник (2), где происходит её перекачка, проходя через вакуум-фильтр в карбонатор (3), на нижнюю часть которого подается углекислый газ, с целью предохранения аппаратуры от инкрустации. Образовавшийся в карбонаторе углекислый кальций поступает на сборник (4), где он перемешивается, а затем возвращается в цикл. Прошедшая карбонатор осветлённая жидкость перетекает в резервуар (5) и с помощью насоса перекачивается в реактор (6), куда вводится раствор  $BaCl_2$ , что предотвращает возможное отложение гипса в выпарных аппаратах. Следующий этап осветления, после очищения от сульфат-ионов, проводится в сгустителе (7). Образующийся в нём шлам, откладывающийся в резервуаре (8), также, как и шлам углекислого кальция, возвращается в цикл. Из сгустителя (7) осветлённая жидкость через приёмный резервуар (9) подается насосом на выпарку в трёхкорпусную батарею (10). Тепло от выпарки поступает на теплообменники (11) с последующей рекуперации тепла. Где в третьем корпусе батареи выпадает в осадок  $NaCl$ , который отделяется от хлорида кальция при помощи отстойника (13) с фильтрацией на центрифугах (14). Затем растворяется в растворителе (15) передается на очистку и дальнейшее использование. Хлористый кальций из отстойника (13) поступает в сгуститель (16), откуда слив перетекает в сборник (18), после чего одна часть перекачивается в барабанный кристаллизатор (19), а другая часть отбирается в цех получения твёрдого продукта. Из кристаллизатора (19) раствор по желобу стекает в сгуститель (20). Затем охлаждённый и осветлённый раствор  $CaCl$  (35% раствор) сливается в резервуар (21), из которого передается на склад готовой продукции [3].

При использовании этого метода, предприятие, производящее соду, сможет направить выделяющийся при производстве соды газ  $CO_2$  на переработку дистиллерной жидкости. Это поспособствует сокращению парниковых газов от производства и накоплению углеродных единиц, которые принесут дополнительную прибыль предприятию.

Хлористый кальций (хлорид калия) – товарный продукт, использующийся в различных областях деятельности человека. Обслуживание зимних дорог (против гололёда), удобрение для сельского хозяйства, предотвращение выдувания пыли с дорог и т. д. Также хлорид кальция необходим в нефтедобыче в качестве основного компонента для буровой жидкости, который позволяет увеличить срок эксплуатации буровой установки и её эффективность [4].

БСК решила реализовать подобный проект, внося в него инновационные технологии, которые позволили увеличить производительность, не увеличивая при этом затраты на электроэнергию и амортизацию. Производительность установки для производства хлористого кальция – 100 тыс. т/год. Объём инвестиций на этот проект составил 7,7 млрд. руб. [5]. Проанализировав рынок, было выявлено, что 1

кг хлорида калия в среднем стоит 46 руб. Проведя эколого-экономический расчёт эффективности данной установки, было определено, что срок окупаемости приблизительно 2 года.

Таким образом, данный метод сможет обеспечить поставку хлорида калия для создания буровой жидкости, освободить большие площади от “белых морей” и принести прибыль для предприятия не нанося вред окружающей среде.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – №6. – С. 85-96.
2. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. – 1 изд. – Екб.: УрГУПС, 2002. – 463 с.
3. Беньковский С.В., Круглый С.М., Секованов С.К. Технология содопродуктов. – 1 изд. – М.: ХИМИЯ, 1972. – 352 с.
4. Кальций хлористый технический – универсальный продукт для всех отраслей промышленности // БСК-Соль URL: <https://bsksalt.ru/blog/kaltsiy-hloristyuy-tehnicheskiy-primenenie-gde-i-kak> (дата обращения: 21.11.22).
5. Башкирская содовая компания пустит отходы своего производства на реагенты для российских дорог // Версия URL: <https://versia.ru/bashkirskaya-sodovaya-kompaniya-pustit-otxody-svoego-proizvodstva-na-reagenty-dlya-rossijskix-dorog> (дата обращения: 21.11.22).

Научный руководитель: Звонкова Н.В. ст. преп. ИЭиОТ МЭИ.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Д.Н. Романюк

Белорусский национальный технический университет  
ЭФ, ЭОЭ, группа 10607121

В современном мире вопросы энергетической безопасности и эффективности использования топливно-энергетических ресурсов являются одними из наиболее актуальных. Повышение эффективности производства, конкурентоспособности товаров и услуг на мировом рынке, увеличение объёмов валового внутреннего продукта не представляется возможным без проведения активной энергосберегающей политики во всех отраслях национальной экономики. Однако постоянный рост объёмов промышленного производства и потребления топливно-энергетических ресурсов домашними хозяйствами обуславливает необходимость в увеличении генерации электрической энергии и производства тепловой энергии, что затрудняет проведение данных мероприятий. Республика Беларусь признаёт ключевое значение рационального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), внедрения энергоэффективных, углеродно-нейтральных технологий для стабильного экономического развития, в связи с чем государством разрабатывается политика и проводятся мероприятия по внедрению в энергетику инновационных технологий.

Существенной проблемой является отсутствие диверсифицированной структуры генерирующих мощностей. В Республике Беларусь по состоянию на 2020 г. 97,2 % электрической энергии было произведено на тепловых электрических станциях, основным топливом которых является газ природный. В совокупности с низким уровнем обеспечения собственным угледородным сырьём работоспособность энергетических предприятий Беларуси практически полностью зависит от поставок импортного сырья: общий уровень зависимости составляет 83,8 %, что обуславливает нахождение Республики Беларусь в топ-20 наиболее энергозависимых стран мира.

Высокий уровень энергетической зависимости и энергоёмкости валового внутреннего продукта является ограничивающим фактором для развития национальной экономики. Отсут-



ствие альтернативных поставок ТЭР создаёт опасность ослабления энергетической безопасности, нарушения бесперебойного снабжения потребителей ресурсами в необходимом объёме и, в итоге, появления кризисных явлений в экономике. При прекращении поставок ТЭР хозяйство республики может понести ущерб от сокращения ВВП, который значительно превышает стоимость энергоресурсов. Нестабильная ситуация на мировом рынке энергоресурсов, складывающаяся в последнее время, отображает необходимость качественного реформирования энергосистемы, включающей в себя различные аспекты.

Энергетический переход – существенная трансформация структуры источников энергии в энергетической системе, сущностью которой является увеличение доли современных и эффективных источников с постепенной заменой устаревших источников энергии в общем объёме энергопотребления.

Данный процесс не представляется возможным осуществить без масштабной перестройки всей системы производства, преобразования, распределения и потребления топливно-энергетических ресурсов. Она включает в себя:

- Диверсификация структуры топливно-энергетических ресурсов;
- Увеличение доли использования местных видов топлива (МВТ) и возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- Повышение эффективности производства и потребления ресурсов;
- Декарбонизация;
- Создание децентрализованной структуры мощностей и др.

Главными целями энергоперехода являются снижение зависимости от импортного сырья, снижение нагрузки на окружающую среду, соблюдение принципов энергетической трилеммы – безопасность, доступность ресурсов, экологическая устойчивость.

Согласно статистическим данным, представленным в топливно-энергетическом балансе Республики Беларусь, в 2020 году валовое потребление ТЭР составило 25 941 тыс. т.у.т. (в нефтяном эквиваленте), отношение объёма производства первичной энергии из ВИЭ к потреблению ТЭР составило 7,8 % при среднегодовом коэффициенте роста 1,073 и темпом роста 42,1 % к уровню 2015 года. Энергоёмкость ВВП составляет 372,8 кг у.т./млн.руб. (в ценах 2005 года), среднегодовой коэффициент роста – 0,997. Исходя из расчёта динамики формирования ТЭР за рассматриваемый период, производство (добыча) собственных ТЭР выросло на 1 198 тыс. т.у.т., за все годы наблюдалась положительная динамика – в среднем ежегодно объём производства увеличивался на 239,6 тыс. т.у.т. (4,3 процентных пункта). Благодаря росту собственного производства удалось значительно сократить импорт ресурсов – среднегодовой абсолютный прирост по импорту составил – 2169,8 тыс. т.у.т.

Помимо возобновляемых источников энергии Республика Беларусь не обладает значительными запасами топливно-энергетических ресурсов, однако, исходя из представленных выше данных о структуре топливно-энергетических ресурсов, можно сделать вывод о том, что развитие ВИЭ находится не на должном уровне. Наиболее перспективным направлением развития исходя из располагаемых ресурсов является биоэнергетика. Развитая система лесного хозяйства и агропромышленный комплекс в будущем могут стать одними из основных поставщиков сырья для энергетики: общая площадь земель лесного фонда составляет 9706,9 тыс. га, из которых более 60 % – эксплуатационные леса; запас древесины – 1878,8 млн. м<sup>3</sup>. Биогазовые установки, устанавливаемые в непосредственной близости к источникам органических отходов (сельскохозяйственные организации, мусороперерабатывающие заводы, очистные сооружения) обеспечивают сокращение выбросов парниковых газов (метана) одновременно с их эффективным использованием в энергетике. Производство биогаза составило 74 тыс. т.у.т., древесного топлива – 1719 тыс. т.у.т. Перспективным также является использование ветряной и солнечной энергетики. На территории республики определено около 1800 площадок со скоростью ветра более 5 м/с для потенциального создания ветроэнергетических станций общей мощностью около 2400 МВт. Наиболее эффективным типом солнечных электростанций для белорусских условий являются плоские модули.

Таблица 1. Динамика источником формирования топливно-энергетического баланса

ТЭР	2015 г. тыс. т.у.т.	2016 г. темп роста, %	2017 г. темп роста, %	2018 г. темп роста, %	2019 г. темп роста, %	2020 г. темп роста, %
Дрова	1357	107,4	112,9	126,8	131,2	126,7
Биогаз	14	92,9	123,1	121,4	114,3	528,6
биомасса	637	82,1	102,0	92,5	126,4	155,9
Ветро-, гидро-, солнечная и геотермальная энергия	20	150	365	335	435	475
Невозобновляемые отходы	52	86,5	80,8	86,5	53,8	25
Добыча ТЭР	5143	102,5	110,1	116,0	121,7	123,3

Несмотря на активизацию деятельности по внедрению мер, способствующих энергетическому переходу, существует необходимость в существенном расширении нормативно-правовой базы в отношении возобновляемых источников энергии, а также создании мер поддержки субъектов энергетики. За последние годы в Республике Беларусь разработан комплекс документов, определяющих государственную политику в сфере энергетики: Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь, Закон Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии», Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы. В данных актах сформулированы кратко- и долгосрочные цели и задачи для осуществления перехода к устойчивой энергетике. Однако ввиду существования естественной монополии на рынке энергетических услуг, существующая база имеет недочёты, связанные с необходимостью сохранения и поддержки существующей структуры отрасли. Для оптимизации и ускорения процесса энергоперехода в Республике Беларусь целесообразно применить следующие методы:

- Реформирование механизма выдачи квот на возобновляемые источники энергии. На данный момент развитие мощностей ВИЭ ограничено квотами, определяемых ежегодно. Однако выдача квот приостановлена до 1 января 2024 года в связи с принятием соответствующего постановления Советом Министров. Право строительства сохраняется лишь для установок, использующихся исключительно для обеспечения собственной хозяйственной деятельности владельцев. Также существенным недостатком является короткий период планирования – 3 года, что не позволяет инвесторам анализировать возможности развития отрасли;
- Создание рынка возобновляемой энергии. Продажа энергии от источников, использующих ВИЭ, происходит исключительно через государственные энергоснабжающие организации по «зелёным» тарифам, определяемых для каждого вида энергии. Однако данная тарификация не в полной мере компенсирует затраты на производство, что снижает инвестиционную привлекательность. Оптимальным решением станет создание рынка на основе аукционов, благодаря чему будет сформирована рыночная тарификация на основе действительных цен;
- Пересмотр целевых показателей развития. Развитие энергетики в Республике Беларусь определяется государственными программами. Однако существует необходимость интеграции данных актов и создания общего плана развития, включающего все аспекты дальнейшей модернизации отрасли: единые целевые показатели, финансовые механизмы, экологическое воздействие, меры поддержки и преференции;
- Определение мер поддержки и преференций для субъектов возобновляемой энергетики. Заинтересованность государства в развитии возобновляемых источников энергии стимулирует инвесторов к внедрению новейших технологий. Однако высокая стоимость основных средств, процессы лицензирования и сертификации деятельности обуславливают необходимость формирования программы поддержки, которая заключается в увеличении тарифов на энергию, а также кредитные, таможенные и другие преференции;
- Усовершенствование финансирования проектов возобновляемой энергетики. Для активизации реализации проектов возобновляемой энергетики необходимо создать структуру кредитного и акционерного финансирования. Недостаток программ «зелёного» финанси-

ния, высокие кредитные ставки и валютные риски ограничивают инвестиционную привлекательность. Создание чёткой государственно-частной финансовой политики в отношении возобновляемых источников энергии, формирование единых целевых фондов, а также компенсация рисков позволят упростить развитие устойчивой энергетики.

Однако ускорение процессов энергетического перехода может стать причиной кризисов на рынках, примером которых может стать мировой энергетический кризис 2021–2022 г., когда на фоне увеличения спроса на энергию цены на ТЭР увеличились в связи с сокращением поставок сырья из Норвегии, России и США из-за перехода на возобновляемые источники энергии и введением санкций против энергетического сектора России. В то же время, вероятность угроз энергетической безопасности мобилизируют усилия государства к обеспечению эффективной работы отрасли, формированию правовых основ перехода.

Необходимость осуществления энергетического перехода к устойчивой энергетике в Республике Беларусь является неотъемлемой частью государственного развития. Благодаря формированию энергетики с высокой долей производства за счёт возобновляемых источников энергии становится доступна более эффективная модель развития государства, которая приведёт к увеличению валового внутреннего продукта, созданию новых рабочих мест, обусловит экономический рост, повысит конкурентоспособность продукции на мировых рынках и увеличит уровень национальной безопасности государства. При внедрении новых механизмов в государственное планирование и проведении оптимизации методов финансирования проектов Республика Беларусь сможет достичь оптимального уровня энергетической независимости, добиться диверсификации структуры топливно-энергетических ресурсов, улучшить экологическую ситуацию, что даст толчок к дальнейшему развитию государства.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Энергетический баланс Республики Беларусь / И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Нац. Стат. Комитет Республики Беларусь, 2021. – 148с.
2. О государственной программе «Энергосбережение» на 2021 – 2025 годы: Постановление Совета Министров от 24 фев. 2021 г. № 103: с изм. и доп.: текст по состоянию на 12.10.2022 г. [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>. – Дата доступа: 12.10.2022 г.
3. Оценка готовности к возобновляемой энергетике: Республика Беларусь / Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA); редкол.: Г. Гёнюля [и др.]. – Абу-Даби: IRENA, 2021. – 80 с.
4. Романюк, Д.Н., Манцерова, Т.Ф. Развитие предпринимательства в энергетике Республики Беларусь / Д.Н. Романюк // Исследование и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Гомель, 28-29 апр. 2022 г. В 2 ч. Ч.2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2022 – с. 141-144.

Научный руководитель: доцент, к.э.н. Т.Ф. Манцерова, зав.каф. ЭиОЭ БНТУ.

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛА И МОЩНОСТИ ТП В СЭС ЖИЛОГО РАЙОНА ПРИ ПОМОЩИ ПО «MS EXCEL». ПРОГРАММНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С.И. Будко

Самарский государственный технический университет  
ЭТФ, 1-УПНК-2.4.4

В данном докладе рассматривается оптимизация одного из возможных направлений для СЭС жилого района: оптимизация числа и мощности ТП в СЭС микрорайона. Для решения поставленной задачи необходимо учесть ряд экономически зависимых характеристик: стоимость ТП и потери в них, стоимость ЛЭП для двух напряжений (0,4 кВ и 10 кВ), а также потери в эл. сети. Такой подход необходим для отыскания оптимального количества питаемых районных застроек и ТП, которое не приведет к увеличению потерь ЭЭ и эксплуатационных расходов, а также позволит сократить финансовые затраты на их сооружение и прокладку низковольтных КЛ: уменьшить расход цветного материала и снизит потери электроэнергии большой величины, характерной для линий 0,4 кВ. Найти решение предлагается осуществлять на базе компьютерного ПО «MS EXCEL», позволяющего автоматизировать рассматриваемую расчетную методику. Проблема решается путем регулировки входных критериев или ограничений, определенных пользователем.

Рост численности городского населения в настоящее время требует постоянного строительства новых жилых районов, в которые, несомненно, необходима поставка электроэнергии, и наличие экономичной и надежной системы электроснабжения. Наиболее благоприятный выбор числа и мощности ТП в такой сети обеспечит программная алгоритмизация, автоматизация и оптимизация.

Первостепенной задачей оптимизации СЭС жилого района является снижение расходов на ее капитальные вложения и эксплуатацию, что сделает данную систему экономичной и максимально эффективной.

«При выборе числа и мощности трансформаторов учитываются следующие факторы:

1. Категории надёжности потребителей, влияющая на безотказность и бесперебойность работы системы.
2. Перегрузочная способность трансформаторов в нормальном и аварийном режимах;
3. Шкала стандартных мощностей трансформаторов;
4. Экономичные режимы работы трансформаторов в зависимости от коэффициента загрузки» [10].

Для проведения оптимизации, необходимо выделить этапы решения поставленной задачи:

- «обработки и сбора исходных данных;
- математического представления реального объекта оптимизации;
- выбора методики решения;
- выполнения математических вычислительных действий» [10];
- реализация путем программирования;
- анализа решения поставленной задачи;

За основу математического моделирования был взят минимум приведенных затрат (МПЗ), который является целевой функцией, математическая модель выглядит следующим образом [10]:

$$Z_{\text{пр}} = E_{\text{н}} \left( \sum (K_{\text{тр}} + K_{0,4} + K_{10}) \right) + (\sum \cdot C_0) \left( \sum (\Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{0,4} + \Delta p_{10}) \right) + (\sum \cdot (Z_{\text{тр}})) + (\sum \cdot (Z_{\text{лэп}})) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности, принятый 0,223;  $K_{\text{тр}}$ ,  $K_{0,4}$ ,  $K_{10}$  – капиталовложения на ТП и ЛЭП 0,4 кВ и 10 кВ;  $C_0$  – стоимость потерь в электрической сети;

$\Delta p_{ТР}$ ,  $\Delta p_{0,4}$ ,  $\Delta p_{10}$  – потери в трансформаторах и ЛЭП 0,4 кВ и 10 кВ;  $Z_{ТР}$ ,  $Z_{ЛЭП}$  – затраты на КЛ (0,4 кВ и 10 кВ) и силовые трансформаторы [3, 4].

При решении оптимизационных задач, целевая функция дополняется ограничениями, которые возникают при практическом формировании рассматриваемого объекта. «Модель оптимизации имеет следующие граничные условия и ограничения» [1], которые также вносятся в программу:

$$N_T \rightarrow S_{н.тр}, \quad (2)$$

$$S_{н.тр} \geq \frac{S_p}{K_{э,п.т}}, \quad (3)$$

$$N_T \geq 0, \quad (4)$$

$$N_T = \text{целое число}, \quad (5)$$

$$S_{н.тр} \leq 2500 \text{ кВА}. \quad (6)$$

В программном аппарате весь перечень расчетов полностью автоматизирован, это достигается использованием машинных функций платформы, выполняющие математическую обработку данных.

За исходные данные принимается генеральный план жилого района, а именно: месторасположение зданий с их характеристиками. С их помощью ведется расчет потребляемой мощности, располагаются вводные распределительные устройства (ВРУ) в зданиях, а также подстанции 110/10 кВ, рассчитываются удельные стоимости кабелей, стоимость трансформаторных подстанций и стоимость потерь электрической энергии [6].

Говоря о целевой функции, программная реализация осуществляется в блоке «Оптимизации» на отдельном листе – МПЗ вручную в целевые ячейки. Функции «Поиск решения», «Индекс» и «ПоискПозиций» помогают отыскать наиболее благоприятный вариант оптимизации, а именно: оптимальное число и мощность ТП. Работа заключается в математическом переборе данных, предварительно занесенных в программу, ведется поиск данных из заложенной базы данных. Перебор вариантов начинается с рассмотрения максимального количества ТП, установленных в каждом здании в непосредственной близости к ВРУ. Далее определяется наименее полезная ТП, с позиции минимального коэффициента загрузки, которая исключается из расчета, а здание подключается к ближайшей ТП. Процесс повторяется пока приведенные затраты уменьшаются или рассматриваются все варианты пока не останется одна подстанция.



Рис. 1. Программный блок «Оптимизация» с целевой функцией

Ячейка целевой функции имеет формульный вид, что позволяет автоматизировать расчет при помощи функций ПО и выполнять корректировку заданных параметров.

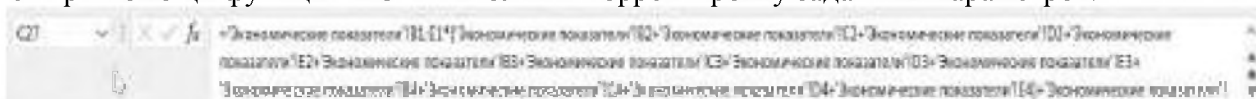


Рис. 2. Ячейка с формульным видом целевой функции

Суммарные значения капиталовложений на ТП, ЛЭП НН и ВН, стоимость потерь ЭЭ, а также потери в трансформаторах, КЛ НН и ВН, заложены в именные ячейки, предназначенные для ввода и корректировки представленных характеристик. Расчет инвестиционных вложений на сооружение или реконструкцию микрорайонных сетей необходим для оценки эффективности и рациональности конкретного оптимизационного проектирования.

U <sub>TP</sub>	категория: напряжение на трансформаторной подстанции
P <sub>TP</sub>	категория: мощность на линии электропередачи 0,4 кВ
N <sub>TP</sub>	категория: мощность на линии электропередачи 10 кВ
S <sub>TP</sub>	мощность патера в электрической сети
U <sub>TP1</sub>	мощность в трансформаторе
S <sub>TP2</sub>	патера в линии электропередачи 0,4 кВ
S <sub>TP3</sub>	патера в линии электропередачи 10 кВ

Рис. 3. Табличная форма переменных целевой функции и их математическое обозначение

Граничные же условия вносятся в программу при переходе в системное окно «Данные», с использованием инструмента «Поиск решения»: принимается ячейка к оптимизации, после чего определяется путь оптимизации и сходимостью к «Минимуму».



Рис. 4. Системное окно «Данные» с программным инструментом «Поиск решения»

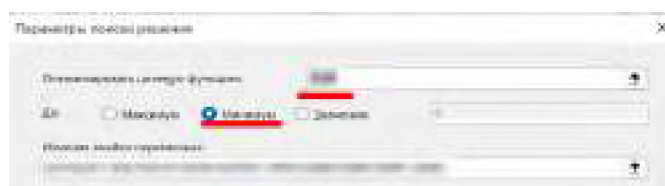


Рис. 5.1. Системное окно «Параметры поиска решения»

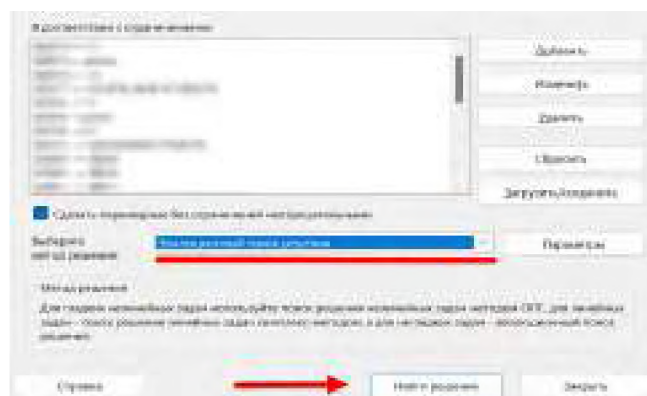


Рис. 5.2. Системное окно «Параметры поиска решения»

Добавляются ячейки изменяемых переменных: количество ТП и их номинальная мощность.

Выбор числа и мощности силовых трансформаторов напрямую зависят от расчетной мощности ТП. Получение расчетной мощности автоматизировано.

ТП			ЛЭП			ТП		
Категория: количество ТП	Категория: номинальная мощность ТП	Категория: расчетная мощность ТП	Категория: номинальная мощность ТП	Категория: расчетная мощность ТП	Категория: номинальная мощность ТП	Категория: количество ТП	Категория: номинальная мощность ТП	Категория: расчетная мощность ТП

Рис. 6. Ячейки с параметрами трансформаторных подстанций и силовых трансформаторов

Изменение переменных производится в соответствии с ограничениями, вводимыми в определенное окно, где можно изменять, добавлять и удалять граничные условия в искомой функции, ссылаясь на необходимые ячейки. Также следует выбрать метод решения задачи: нелинейный, симплекс-метод или эволюционный поиск решения.

Решение поставленной задачи осуществимо «Поиском решения линейных задач симплекс-методом». Метод представляет собой целенаправленный перебор опорных решений задачи линейного программирования, который позволяет отыскать оптимальное решение за конечно число шагов, либо установить, что решение отсутствует. При взаимодействии и задавании определенных параметров, программа подстраивается под пользователя и автоматически предлагает наиболее благоприятный вариант из представленного массива информации.

Наличие граничных условий и ограничений необходимо для избегания ошибочных программных операций, способствующих отображению некорректных решений.

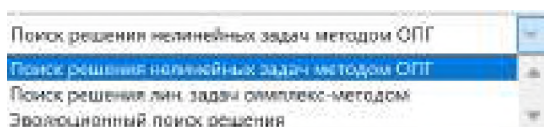


Рис. 7. Выбор метода решения поставленной задачи в программном инструменте «Параметры поиска решения»



Рис. 8. Вносимые в программный вид ограничения решаемой задачи

Коэффициент загрузки трансформаторов предварительно принимается пользователем. Этот параметр существенно влияет на срок службы трансформатора и определяет степень его перегрузки в реальных условиях. Описание и математический вид вынесены в именные ячейки этого параметра ячейки.

В материале доклада определены все этапы постановки описанной оптимизационной задачи. Теоретические положения являются развитием методики постановки оптимизационной задачи и отыскания пути ее решения, сопровождающееся приведением затрат к глобальному минимуму. При постановке целевой функции, выстраивается математическая модель, а как следствие, и способы ее решения. Использование методики позволяет отыскать наиболее благоприятные варианты и конфигурации конкретных микрорайонных сетей, необходимых для принятия рационального и наиболее экономичного вариант развития, произведения оценки эффективности и обоснования тех или иных компромиссных решений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тульчин И.К., Нудлер Г.И. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 480с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7), Норматика, 2020.
3. Кудрин Б.И. «ЭПП» / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
4. Федоров А.А. Курсового и дипломное проектирования по ЭПП. / А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
5. Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети. Шведов.Г.В/Шведов Г.В. - 1-ое издание Москва: МЭИ, 2012. – 268 с.
6. «Актуальные проблемы энергетики»/ «Математическая модель оптимизации числа и мощности трансформаторных подстанций в системах электроснабжения жилого района», Будко С.И., Клочкова Н.Н./ Саратов, 2021, Изд-во: ООО «Амирит», с. 27-30.

Научный руководитель: к.т.н. Н.Н. Клочкова, доцент СамГТУ.

## ИССЛЕДОВАНИЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Е.В. Сидоров

Ульяновский государственный технический университет  
ЭФ, ЭП и АПУ, группа ЭАмд-21

В настоящее время основными объектами управления промышленной и коммерческой деятельности являются асинхронные электродвигатели, которые потребляют около 60 % производимой в мире электроэнергии, где примерно половина из них приводят в движение насосные установки. У большинства насосных установок используются традиционные способы регулирования подачи: дросселирование, байпасирование и двухпозиционное регулирование [2].



Рис. 1. Традиционные способы регулирования насосных установок

Данные способы регулирования имеют простую конструкцию, удобны в эксплуатации и являются экономически эффективными, однако, у них есть недостатки. Они не позволяют получить необходимую производительность, существует опасность повреждения и высокие эксплуатационные расходы, поэтому **актуальной проблемой** является неэффективность процесса работы насосных установок с энергетической и экономической точек зрения.

В связи с тем, что насосные агрегаты работают ежедневно и от их работы зависит все энерго и ресурсосбережение страны, то **основной целью** является повышение энергетических и экономических показателей эксплуатации электроприводов насосных установок путем применения IGBT-транзисторов в качестве пуско-регулирующего устройства.

На рисунке 2 показана зависимость характеристик насосной установки при изменении частоты, где заметна эффективность данного способа регулирования. Характеристика номинальной частоты вращения насосного агрегата обусловлена точкой 1 на графике, соответственно остальные точки обусловлены своими значениями частоты вращения от номинальной, как видно из рисунка 2. На основании данного графика можно сказать, что энергосбережение напрямую зависит от регулирования частоты вращения двигателя. Чтобы добиться снижения потребляемой мощности до 30 %, необходимо снизить частоту на 15 % [3].

Добиться возможности регулировать частоту вращения двигателя удалось с помощью IGBT-транзисторов.

IGBT-транзистор представляет собой биполярное полупроводниковое устройство с изолированным затвором, элемент из двух транзисторов, устроенных по каскадной схеме в общей полупроводниковой структуре. Он используется в качестве полупроводникового ключа, устанавливаемого в инверторы, источники питания и системы управления электроприводом [6].

На рисунке 3 представлена упрощенная эквивалентная схема биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

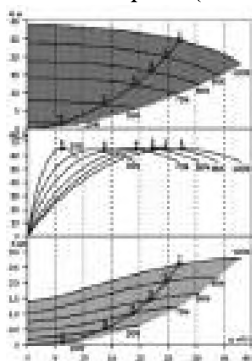


Рис. 2. Зависимость характеристик насосной установки от переменной частоты

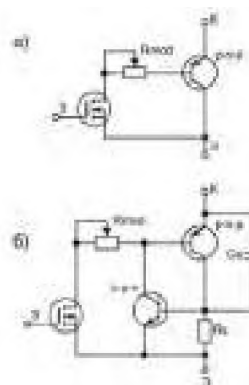


Рис. 3. IGBT-транзистор

Главным достоинством IGBT-транзисторов является способность работать с достаточно высокими токами и напряжениями, при этом они имеют способность выдерживать продолжительную нагрузку и импульсные воздействия [5]. Сегодня IGBT-модули, рассчитанные на высокие токи, успешно применяются в работе многих установок, в том числе, насосных с номинальными токами до 4000 А.

IGBT-транзисторы имеют существенные преимущества: простую систему управления, высокое входное сопротивление, отлично справляются с защитой от токов КЗ и перегрузок,



при этом несут относительно малые потери. Поэтому сегодня популярностью пользуются частотные преобразователи на основе IGBT-модулей.

Использование частотных преобразователей с IGBT-модулями сопровождается небольшими потерями в обмотках двигателя, снижением нагрева и момента двигателя. Они реализуют полную защиту от токов КЗ и от скачков напряжения, что существенно снижает вероятность отказов и повреждений, тем самым, продлевая срок службы двигателя.

Применение на практике частотных преобразователей на основе IGBT-модулей и соблюдении соотношения:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = const . \quad (1)$$

Механические характеристики асинхронных двигателей насосных установок будут иметь вид, которые представлены на рисунке 5.

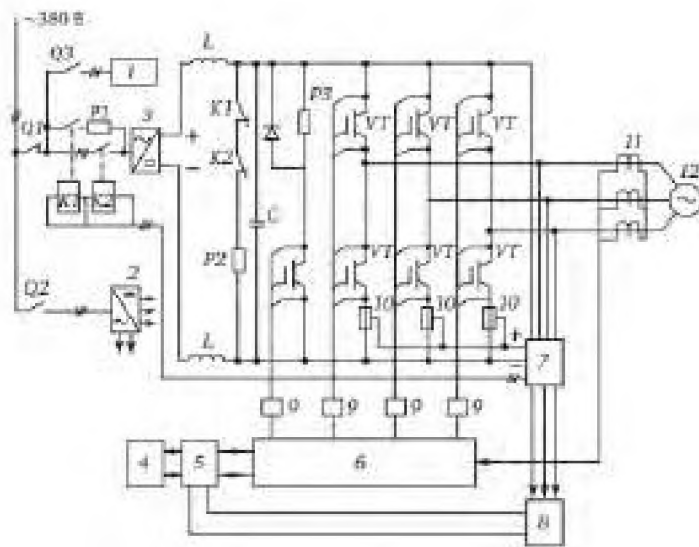


Рис. 4. Схема частотного преобразователя на IGBT-модулях:

- 1 – блок вентиляторов; 2 – источник питания; 3 – блок выпрямителей; 4, 5 – блок управления;
- 6 – блок управления широтно-импульсной модуляцией; 7 – преобразователь напряжения; 8 – блок регулирования частоты; 9 – модульные драйверы; 10 – плавкие предохранители;
- 11 – трансформаторы тока; 12 – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- Q1-Q3 – автоматические выключатели; K1, K2 – магнитные пускатели; C – блок конденсаторы батареи; R1-R3 – резисторы; VT – IGBT-модули; L – дроссель [3]

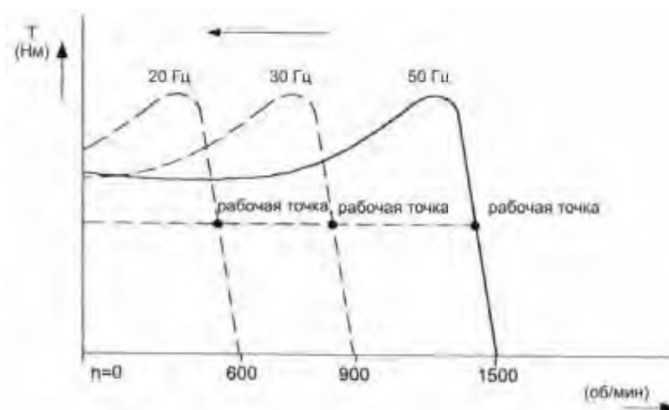


Рис. 5. Механические характеристики асинхронного двигателя

Как видно из рисунка 5, при регулировании частоты вращения  $f_2$  изменяется механическая характеристика двигателя. При уменьшении частоты вращения уменьшается мощность и момент двигателя [3].

Стоит отметить, что важным параметром IGBT-модуля является энергия потерь при переключении, которая определяется по формуле:

$$E_{п.} = E_{вкл.} + E_{откл.} \text{ (Дж)}, \quad (2)$$

где  $E_{вкл.}$ ,  $E_{откл.}$  – энергия потерь в IGBT-транзисторах при включении и отключении [3].

На рисунке 6 представлена зависимость энергии потерь от тока коллектора. Согласно проведенным исследованиям, видим, что энергия потерь имеет относительно небольшую величину потерь при использовании IGBT-транзисторов – при токе 80 А, значение  $E_{п.}$  равно всего 25 мДж [1].

Устойчивость IGBT-модулей к токам КЗ и перегрузкам очень важна для применения их в схемах электропривода. При этом биполярный транзистор должен выдерживать перенапряжения и высокие значения  $dv/dt$ , которые могут достигать до 10 кВ/мкс. На рисунке 7 представлена осциллограмма испытаний током [1].

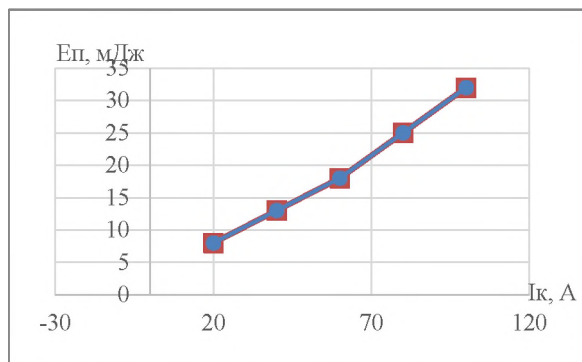


Рис. 6. Зависимость суммарной энергии потерь от тока коллектора

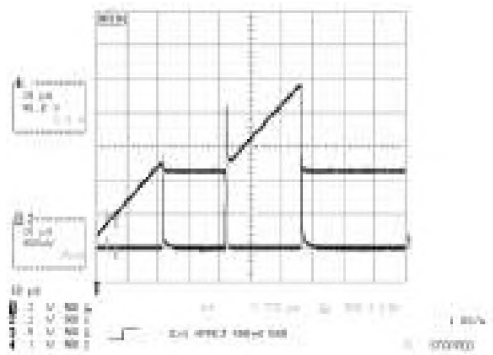


Рис. 7. Осциллограммы испытания транзистора двойным импульсом

IGBT-транзисторы демонстрируют стойкость к току КЗ и перегрузка без ухудшения характеристик двигателя и преобразователя частоты при повышении значения напряжения и тока в три раза относительно допустимых значения.

Представленные в данной статье результаты исследований доказывают нам, что применение IGBT-транзисторов в системе управления электроприводом насосного агрегата обеспечивает высокие показатели регулирования: низкое напряжение насыщения, малые потери, полная защита от токов КЗ и перегрузок.

Благодаря возможности регулировки электропривода с помощью частотного преобразователя на основе IGBT-модулей технология транспортировки воды стала энерго и ресурсоэффективной без ухудшения технологических процессов работы предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Мартыненко В.А., Мускатиньев В.Г., Бормотов А.Т., Тогаев М.А. Современные IGBT-модули на напряжение 1200-1700 В компании ОАО «Электровыпрямитель» для энергосберегающих электроприводов широкого применения // VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. – М.: МГУ, 2014. – 495 с.
2. Корпоративный технический журнал группы АББ. Силовая электроника // IGBT: маленькие кристаллы с большой перспективой. – 2008. – 80 с.
3. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
4. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудовных установках. – М.: Машиностроение, 2006. – 360 с.
5. Каскадно-частотное управление асинхронными двигателями на насосных станциях // НТЦ Энерго-ресурс. 2022. URL: <https://en-res.ru/stati/kaskadno-chastotnoe-upravlenie-pumps-st4.html> (дата обращения: 05.11.2022).

6. IGBT-транзисторы. Устройство и работа. Параметры и применение // Электросам.ру. 2022. URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/igbt-tranzistory/> (дата обращения: 04.11.2022).
7. IGBT-транзистор. Биполярный транзистор с изолированным затвором // Go-radio. 2022. URL: <https://go-radio.ru/igbt-transistor.html> (дата обращения: 04.11.2022).

Научный руководитель: к.т.н. Я.К. Старостина, доцент кафедры ЭП и АПУ УлГТУ.

## **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

С.Н. Павлов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ18

Высоковольтные испытания используют, чтобы экспериментально определить качественные или количественные характеристики свойств испытуемого объекта. Данные испытания, проводятся с определённой достоверностью и точностью, чтобы определить технического состояния электрооборудования. Проводятся при условии подачи либо возникновении на оборудовании следствием обратной трансформации напряжения 1000 В и выше.

От точности проводимых высоковольтных испытаний зависит насколько точно экспериментально можно определить срок службы оборудования. Для этого постоянно создаются новые методы высоковольтных испытаний и их улучшение.

Пучок ярких искровых каналов представляет собой искровой разряд. Под действие разряда вещество электродов активно испаряется, что приводит к тому, что в состав плазмы заполняющей эти каналы входят не только ионы исходного газа.

Для электроизоляционных материалов и изделий, если они применяются в электрической аппаратуре, важны такие свойства как время противостоянию воздействию дугowych, искровых или коронных разрядов, так как они могут приходить в соприкосновение. Основными материалами для электроизоляционных элементов являются композиционные материалы органического и неорганического происхождения. При взаимодействии материала и дуги будет происходить частичное разрушение материала на поверхности, что приводит к изменению его характеристик, так же наблюдаются такие последствия как: частичное прогорание материала в месте воздействия дуги, уменьшение массы, увеличение поверхностной электрической проводимости и другие процессы.

Иногда во время эксплуатации на электроизоляционный материал воздействует не дуговой, а искровой разряд по поверхности, что приводит к неравномерному нагреванию, а в случае некоторых материалов и к эрозии. Искровой разряд может привести к пробое изоляции или серьезному повреждению. Под искростойкостью понимают способность электроизоляционного материала противостоять в течении определенного времени разряду в искровой форме по поверхности, сохраняя требуемые физические и электрические свойства, в частности электрическую прочность.

Способность материалов противостоять разряду связано со способностью образовывать проводящие мостики под воздействием электрического искрового разряда по поверхности, что приводит к тому, что дуга не может в тело электроизоляционного материала.

Для определения искростойкости и дугостойкости материала используют различные испытания, так как характер воздействий на образец отличается. При определении искростойкости на материал должен непрерывно воздействовать поток искр вдоль поверхности, не переходящих в дугу. Для этой цели предусматривается такое дополнительное активное или реактивное сопротивление, которое подключается последовательно со вторичной обмоткой повыша-

ющего трансформатора, при котором выполняется это условие. В случае испытания материалов, их оценка производится качественно, т. е. оценивается их состояние по истечению времени приложения испытательного напряжения.

Метод испытания на короностойкость.

Метод характеризует устойчивость поверхности материала к воздействию коронного разряда.

Основа метода в том, что на образце создается корона и поддерживается до пробоя образца.

Параметрами, используемыми для сравнительной оценки материалов в условиях короны служат: начальное напряжение короны  $U_a$  – минимальное напряжение, при котором наблюдается корона; критическое напряжение короны  $U_{кор}$  – напряжение, при котором процесс заканчивается пробоем образца через определенное для данных условий испытаний время  $t_{кор}$ ; время  $t_{кор}$  – время от начала воздействия короны до момента пробоя.

Материалы могут классифицироваться в зависимости от характеристики  $U_{кор}(t_{кор})$  или  $E_{кор}(t_{кор})$ , где

$$E_{кор} = E - m l g t_{кор}, \quad (1)$$

где  $E$  – электрическая прочность диэлектрика при плавном подъеме напряжения.

Для построения характеристики следует снять ряд точек при разных значениях  $E_{кор}$ . Испытания начинают с наибольшего значения  $U_{кор}$  и затем уменьшают его до значения, несколько превышающего  $U_a$ . При каждом значении напряжения зажигания короны испытывается 10 образцов и берется среднее значение  $t_{кор}$ . По результатам испытаний строят график  $E_{кор}(l g t_{кор})$ , на основании которого определяется коэффициент  $m$ .

Порядок работы

1. Собрать электрическую схему экспериментальной установки для проведения испытаний материалов на постоянном напряжении (рисунок 1).

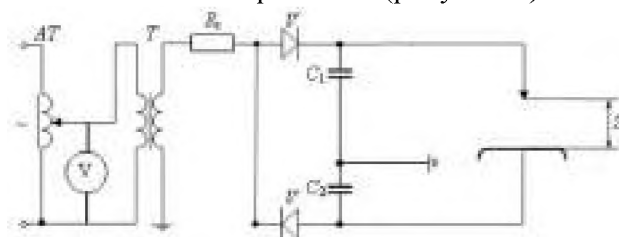


Рис. 1. Электрическая схема установки для опыта на постоянном напряжении (двухполупериодная схема):

$T$  – высоковольтный трансформатор;  $AT$  – автотрансформатор;  $R_z$  – защитное сопротивление;  $S$  – межэлектродное расстояние;  $C$  – конденсатор;  $V$  – выпрямитель

2. Для 3–5 значений межэлектродного расстояния выполнить пробой воздушного промежутка системы электродов «острие – плоскость», и измерить значения пробивного напряжения  $U_{пр}$ .

3. Подготовить образцы испытуемых материалов, зафиксировать их исходные параметры и состояние до проведения опытов.

4. Зафиксировать на электроде «плоскость» испытуемый материал и выставить значение межэлектродного расстояния аналогично п.п. 3.

5. Производится повышение напряжения до тех пор, пока не произойдет пробой промежутка с используемым материалом, и записывается значение  $U_{пр}$ . Ввиду того что диэлектрическая проницаемость испытуемого материала много больше чем у электрода, то перекрытие промежутка будет происходить по поверхности изоляционного материала в непокрытые им места электрода, что имитирует воздействие искровых разрядов.

6. Испытание продолжается в течении 5 минут, после которого производится качественная оценка состояния материала.

7. Испытания, указанные в п.п. 4–6 проводится для 3–5 значений межэлектродного расстояния. В случае если испытуемый материал поврежден, перед продолжением эксперимента необходимо заменить образец на новый.

8. Выбирается следующий материал и производится повторение действий, указанных в п.п. 3–7.

9. Собрать электрическую схему экспериментальной установки для проведения испытаний материалов на переменном напряжении (рисунок 2).

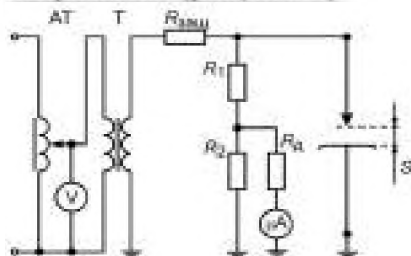


Рис. 2. Электрическая схема установки для опыта на переменном напряжении:  
*AT* – автотрансформатор; *T* – высоковольтный трансформатор; *R<sub>д</sub>* – добавочное сопротивление;  
*R<sub>зщ</sub>* – защитное сопротивление; *R<sub>1</sub>*, *R<sub>2</sub>* – высоковольтный омический делитель; *V* – вольтметр,  
*μA* – микроамперметр; *S* – межэлектродное расстояние

10. Производится повторение шагов, указанных в п.п. 3 – 8, с использованием схемы для испытаний на переменном напряжении.

Испытания электроизоляционных материалов и изделий на стойкость к воздействию всех видов ионизационных процессов, которым они подвергаются в течение всего срока эксплуатации один важнейших этапов создания надежной и безотказной конструкции. В результате выполненных и описанных выше исследований усовершенствована методика высоковольтных испытаний электроизоляционных материалов на стойкость к негативному воздействию короны, искрового и дугового разрядов. Усовершенствованная методика позволит осуществить отбраковку заведомо ненадежных материалов на этапе испытаний и избежать использования ненадежных с точки зрения электрической прочности материалов в производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. А. А. Воробьев, Техника высоких напряжений. – Москва - Ленинград, ГосЭнергоИздат, 1945.
2. Бутенко В.А. Техника высоких напряжений: учебное пособие/ В.А. Бутенко, В.Ф. Вазов, Ю.И. Кузнецов, Г.Е. Куртенков, В.А. Лавринович, А.В. Мытников, М.Т. Пичугина, Е.В. Старцева – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 118с.
3. ГОСТ 10345.1-78 Материалы электроизоляционные твердые: Метод определения стойкости к действию электрической дуги малого тока высокого напряжения.
4. Казарновский Д.М., Тареев Б. М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий: Учебник для техникумов. - 3-е изд., перераб. и доп.- Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 216 с., ил.
5. Земсков Ю.П., Квашинин Б.Н., Дворянина О.П. Конструкционные упаковочные материалы: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2021. – 248 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
6. Куртенков Г.Е. Высоковольтные испытания изоляции: Учебное пособие. Предназначено для магистров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 91 с.

7. ГОСТ 27473-87 (МЭК 112-79) Материалы электроизоляционные твердые: Метод определения сравнительного и контрольного индексов трекинговости во влажной среде.

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДО ПРОБОЯ СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ МОДУЛИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

С.В. Колесников, П.А. Петренко, Ю.С. Талдыкина  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ18

Высокая нагревостойкость и надежность в эксплуатации проводов со стекловолоконной изоляцией подтверждает их применение при создании обмоток электрических машин, которые могут использоваться в тяжелых условиях (тяговые, крановые, шахтные, металлургические, а также сухие трансформаторы). Межвитковая изоляция таких обмоток является важным элементом, главным образом, обеспечивающим необходимую надежность всей электрической машины.

В последнее время широкое распространение получил частотный метод управления электроприводами переменного тока. Его работа основана на коммутации полупроводниковых ключей по закону широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Этот метод позволяет плавно и точно регулировать скорость вращения асинхронного электродвигателя (АД). Опыт эксплуатации также показывает негативные моменты, которые могут быть вызваны применением частотного регулирования. Используемые полупроводниковые ключи в регулируемых электроприводах имеют высокую скорость коммутации (порядка десятков микросекунд). Как правило, на обмотку статора подаются импульсы прямоугольной формы, которые вызывают протекание волновых процессов в обмотке и питающем кабеле. Такие процессы сопровождаются импульсными перенапряжениями в изоляции статора, что может плохо сказываться на изоляцию обмотки [2], в первую очередь межвитковую. Эти процессы приводят к возникновению коронных разрядов в обмотке, что приводит к ускорению процессов электротермического старения и выводу изоляции из строя. В сегодняшние дни в современной технической литературе имеется недостаток информации касательно опыта использования обмоточных проводов со стекловолоконной изоляцией в системах с частотным регулированием.

Определение способности систем межвитковой изоляции выдерживать такие нагрузки позволит дать рекомендации по применению обмоточных проводов со стекловолоконной изоляцией в обмотках специальных электрических машин с частотным регулированием. Критерием оценки может служить среднее время до пробоя испытываемых образцов при действии электротепловых нагрузок, характерных для работы асинхронного двигателя в системах частотно-регулируемого электропривода (ЧРП). Так как изоляция из стекловолокна недостаточно эластична, то рекомендации по эмалированным проводам неприемлемы: изготовление скруток приводит к нарушению изоляционного слоя и быстрому пробоем образца [3]. В работе предложено в качестве образцов использовать попарно увязанные отрезки обмоточного провода. Были изготовлены образцы двух типов: прямые отрезки и отрезки, свернутые в форму кольца (рисунки 1).

Оценивалось среднее время до пробоя образцов обмоточных проводов в состоянии поставки и в сочетании с пропиточными составами. Режимы отверждения соответствовали нормативно-технической документации на пропиточный состав. Определение стойкости к действию модулированного напряжения проводилось по методике [2] на учебном лабораторном стенде.



Рис. 1. Общий вид макетных образцов



Рис. 2. Учебно-лабораторный стенд для испытаний на короностойкость

Макетные образцы после пропитки и термообработки помещаются в термошкаф инагреваются до температуры класса нагревостойкости. После этого подается испытательное напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В, частоты 400 Гц с несущей частотой 5 кГц с крутизной нарастания переднего фронта 4 мкс. При испытаниях отмечается синее свечение коронного разряда по поверхности образца. Подобные условия проведения эксперимента адекватно воспроизводят уровень воздействующих нагрузок на межвитковую изоляцию при частотном управлении. Обобщенные результаты среднего времени до пробоя испытанных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения среднего времени до пробоя образцов обмоточных проводов со стекловолоконистой изоляцией

Марка провода / пропиточный состав	Тип образца	Среднее время до пробоя, минут
ПСДКТ / без пропитки	прямой	35
ПЭТВСД / без пропитки	прямой	222
ПСДКТ / без пропитки	прямой	менее 1
ПСДКТ / ЭЛПЛАСТ 180-ИД	прямой	98
ПЭТВСД / ЭЛПЛАСТ 180-ИД	прямой	1602
ПСДК / ЭЛПЛАСТ 180-ИД	кольцевой	231
ПСДК / ЭЭС-1	кольцевой	317
ПСДК / УП-5-162	кольцевой	313

Результаты позволяют отметить: наибольшей короностойкостью обладает провод марки ПЭТВСД. Только в конструкции данного провода есть слой эмали по жиле провода помимо двух слоев стекловолоконистой изоляции (с подклейкой и пропиткой каждого слоя). Наличие слоя эмалевой изоляции обеспечивает повышенную стойкость к электротепловым нагрузкам. Так же отмечено: применение пропиточных составов во всех случаях увеличивает среднее время до пробоя. Без пропитки (в состоянии поставки) провод марки ПСДКТ обладал очень малым временем до пробоя. Пленка отвержденного пропиточного состава образует изоляционный слой, препятствующий разрушению изоляции. Испытания как на прямых образцах, так в форме кольца позволяют оценить способность обмоточных проводов со стекловолоконистой изоляцией выдерживать действие модулированного напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. А.А. Степанов, Д.П. Петров, ЗАО «Москабель-Электротехника». Обмоточные провода для трансформаторов. Современные требования к качеству проводов. Энерго INFO, №2, 2010.– С.60-65.
2. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / А.А. Коробцов, А.П. Леонов, Ю.П. Похолков, Е.Ю. Солдатенко, И.А. Кочетков// Кабели и провода. – 2013. - № 3. С. 16-18.
3. Устройство для определения стойкости стекловолоконистой или пленочной изоляции обмоточных проводов к коронным разрядам // Патент РФ №2723227 опубл. 9.06.2020.

Научный руководитель: к.т.н. А. П. Леонов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ СТУДЕНЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

И.А. Крутовский, Ю.С. Цыбочкина  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5081

В процессе обучения в техническом вузе студенту любой инженерной специальности предстоит выполнение курсовых проектов, в рамках которых необходимо подготовить чертежи основного оборудования и устройств по специальности. Для успешного выполнения данной задачи необходимо рассчитать все требуемые параметры рассматриваемого устройства и выполнить его чертеж по своим (ранее посчитанным) данным. Расчётная часть курсового проекта обычно не вызывает особых сложностей, ведь чаще всего известна методика расчета, которой стоит придерживаться.

Основные сложности возникают при переходе к чертежу проектируемой детали. Они связаны с тем, что студенту необходимо хорошо знать конструкцию исследуемого объекта – все его элементы, назначение каждого из них, крепление относительно друг друга, и как они взаимодействуют между собой. Для общего понимания конструкции, существует множество чертежей, на которых изображены различные виды, разрезы, сечения элементов. Но иногда даже такого количества информации может быть недостаточно для понимания материала.

Исходя из вышесказанного, можно сформулировать поднимаемую в данной работе проблему – недостаточное количество наглядной и доступной для восприятия студентами информации, необходимой для изучения конструкций технического оборудования и устройств.

Данная проблема может быть решена несколькими способами:

### **1. Использование макетов оборудования**

Данный способ уже длительное время применяется в учебных заведениях. В процессе обучения используются макеты оборудования, при помощи которых наглядно возможно изучить его конструкцию. В качестве дополнения возможно изготовление макета в разборном исполнении, чтобы обучающийся мог ознакомиться с внутренним устройством, оценить относительные пропорции, крепление элементов. В этом случае, процесс теоретического изучения материала в какой-то степени более привязан к практической составляющей, что повышает эффективность обучения в целом.

Однако, использование макетов имеет свои недостатки:

- может не обладать необходимой достоверностью;
- несёт дополнительные затраты для образовательного учреждения;
- с течением времени отражаемая на нём информация будет устаревать и др.

### **2. Внедрение цифровых технологий**

На данный момент активно развиваются цифровые технологии, которые, несомненно, обладают рядом преимуществ перед натурными моделями [1].

2.1. 3D-моделирование. Применение трехмерного моделирования в образовании стимулирует у учащихся интерес к получению знаний, развивает пространственное мышление и воображение, повышает творческий потенциал личности [2]. Одним из вариантов является разработка моделей и узлов аппаратов в программах для 3D-моделирования, таких как Autodesk Inventor, Siemens NX, Solid Edge. В качестве учебно-исследовательской работы студентам, обладающим пространственным мышлением, достаточным для проектного моделирования, может предлагаться к выполнению моделирование узлов какого-либо устройства. Выполненное задание загружается на специальную платформу, доступную для студентов инженерных спе-



циальностей. Каждый преподаватель и студент имеет возможность воспользоваться библиотекой деталей или узлов. Также преподаватель может дополнить электронный курс необходимыми моделями.

Например, проектирование жалюзийного сепаратора для вертикальных парогенераторов в рамках дисциплины «Парогенераторы АЭС» (рисунок 1).



Рис. 1. Модель секции жалюзийного сепаратора для вертикальных парогенераторов

Таким образом студент на более детальном уровне знакомится с устройством проектируемого оборудования. В свою очередь, преподаватель получает более наглядные и современные материалы, которые в дальнейшем могут быть использованы в рамках своей дисциплины, электронного курса, написания пособия и т. д.

2.2. Также моделирование позволяет не ограничиваться на конструкции какого-либо аппарата и дает возможность увидеть то, что раньше можно было только представить. Потoki газов, жидкостей, нейтронов и других исследуемых сред.

2.3. Дополнением к моделированию оборудования может служить печать смоделированной модели на 3D-принтере. Функции у этого способа те же самые, что и у первого способа, но затраты на производство натурального образца на 3D-принтере минимальны, а вариации проектирования обширнее.

2.4. Есть возможность применение аналога моделирования – VR-технологии. Обзор деталей шире, а значит понимание лучше. Здесь открывается ещё больше возможностей, поскольку удастся реализовать и оценить масштабы устройства. Благодаря VR-технологиям расстояние между представлением и реальностью исчезает.

Необходимо с самого начала обучения знакомить обучающихся с современными возможностями технологий. В этом случае, при окончании обучения в вузе они будут обладать компетенциями, более привязанными к технологическому оборудованию.

При этом, для каждого вуза, направления подготовки, и даже отдельно взятого студента, процесс использования подобных технологий может варьироваться.

В качестве примера, был разработан вариант внедрения и использования новых технологий в образовательный процесс специальности 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг (таблица 1).

Таблица 1. Вариант внедрения современных технологий в образовательный процесс

<b>1 курс</b>	
Информатика	Знакомство с пакетом программ для моделирования
Начертательная геометрия и инженерная графика	Освоение навыков работы в программах для 3D моделирования
Творческий проект	Чертёж небольшого элемента/узла и его печать на 3D принтере
<b>2 курс</b>	
Курсовой проект по дисциплине «Механика»	3D-проектирование редуктора
Цифровая практика	Знакомство с программными продуктами, позволяющими моделировать гидравлические и тепловые потоки с использованием 3D моделей
<b>3 курс</b>	
Курсовой проект по дисциплине «Турбомашины АЭС»	3D-проектирование элементов турбины
УИРС	Моделирование процессов теплообмена в проточной части турбины
<b>4 курс</b>	
Основы проектирование и САПР	Более глубокое изучение пакета программ для моделирования
Курсовой проект по дисциплине «Парогенераторы АЭС»	3D-проектирование элементов парогенератора
УИРС	Моделирование процессов теплообмена в парогенераторе

## **Заключение**

Технологический прогресс стремительно движется вперед. Введение в процесс обучения цифровых технологий способствует дополнительному развитию и становлению современного специалиста. Это особенно важно для повышения уровня подготовки кадров, которые напрямую вовлечены в процесс развития технологий. Современные методы обучения должны быстро и в доступной форме доносить будущим специалистам всю необходимую информацию. Информационные технологии позволяют снизить затраты на технологическое оборудование, повысить уровень образного мышления и восприятия информации, а также позволяют сделать процесс обучения более эффективным и привлекательным для студентов.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Лавриненко, С. В. Цифровизация подготовки кадров для предприятий атомной энергетики в современном техническом вузе / С. В. Лавриненко // Реализация образовательных и профессиональных стандартов в психологии и педагогике : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Пермь, 29 апреля 2022 года. – Стерлитамак: ООО "Агентство международных исследований", 2022. – С. 88-90. – EDN EHXFNN.
2. Дорохова Ж.В. Развитие 3D мышления средствами компьютерного моделирования // Znanstvena misel journal. – 2020. – №42. – С. 26-27.

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **LIFE AFTER GRADUATION AND THE DIFFICULTIES WHICH MABE FACED**

M.A.E. Hegazy

Egyptian russian university, Tomsk polytechnic university  
Butakov research center, group 507I

Who among us, as students, does not dream of this day when we will graduate from the university and receive a certificate of completion of this stage and crown years of fatigue and effort with this joy and ceremony, but with the completion of this beautiful picture, do you see the details of the path that leads to this stage? Do you see what life will look like after graduation?

Life is choices, and each age stage has its limited choices. In childhood, we cannot be independent in our lives or make decisions that are best suited to us. In old age, we are also governed by similar circumstances that sometimes force us to give up some of our desires and goals. There is one stage in your life that opens the doors of all options wide to the point of insanity. It is the post-graduation stage at the university. At this stage of life, you can live as a child or an old man, or assume the life of others, or carve for yourself your own life that you have always wanted and dreamed of it [1].

As this is your choice which all your next life will depend on let us see what are the characteristics and difficulties of the post-graduation period?

### **Career problem**

The first type of problems which you will face is your career problem since we have become living in a world that does not link between study and work [2]. In some situations, you find a person who has studied a field, but when he graduated from the university, he found work in another field and suitable for him, so he decided to make a career shift, and there are many examples around us after The great expansion that took place in the field of online working, so the work became through the Internet, whether in digital marketing or completing tasks and obtaining money remotely. This

type of work does not require a certificate from the university, as sometimes students work while they are in the stage of study in such work. So you will find yourself asking should you work on your field or you will simulate what the world around you may require?

### **Emotional Problems**

The other types of problems which you will face after graduation will be Emotional Problems like feeling of lost or losing passion towards everything and all these things are normal at this period of time [2], so don't hesitate to visit a psychologist and pass some tests to understand your career preferences better. Talk about your needs and opportunities. Show all your fears, and be sure that everything runs its course.

Maybe you can find another problems with your friends or family like your friends may find the job faster than you [2] and this leads you to the most important advise you should do, never compare yourself to your friends. Show them that you're glad when they are happy, say words of support when they are disappointed, but never make parallels with your life. Follow your heart and be strong enough to stay higher than all your friends' comments.

### **Lack of experience**

And even if you decided to stay at the same career which you studied you will face another problem which is the lack of experience. Unfortunately, many faculties during the study lack practical training, which is the basis of work and the basis of life later maybe not all the fields but most of them depend more on theoretical study. In order for you to deal with such problems, let's see some tips that can help you:

- Be proactive by knowing your passion and the field in which you want to work. If you can see job opportunities before entering the university and choose the field that you will study, do so. If you have passed this stage, start from where you stand now, see all the opportunities and choose exactly which one you want to continue on it.
- Develop a clear plan to reach what you want and start implementing from where you stand, if you have already graduated or even if you are still a student at the university.
- Practical training is more important, as when you start at any work. You will find things that are completely different from what you thought, as practical life has many secrets. So be careful that you have more practical opportunities on the real life.
- Be patient and persistent, if you find the field and practical opportunities, do not be bored, but rather fight and do your best to reach the highest of what you dream of.
- And the last thing, the field of business is open to everyone now more than ever before, as it may be difficult to find a suitable job at the beginning of your life. If you are passionate about self-employment, you will find more than one field in which you can fight and create your business opportunity instead of waiting for this opportunity from others.

### **Conclusion**

Talking about life after graduation makes us see the youth with their enthusiasm. Some of them find the opportunity quickly and set off, and some of them find a lot of obstacles, and some of them lose hope and are shattered. Therefore, every person who went through this stage must give his experience to the generations that come after him, and people must also be kinder with these youth, they are in a phase of disorientation. And speaking of businessmen, they can also make it easier for these young people by giving them greater opportunities and benefiting from their energy and minds.

But finally even if no one helped you it is still your way, your life and your choice, so be sure that you do all your best so you don't regret one day.

### **REFERENCES:**

1. Life after graduation, by Wendy Hargreaves, USQ Australia site
2. What Post Grad Problems Students Face after Graduation, pro essay writer site

Supervisor: S.V. Lavrinenko, Candidate of Pedagogical Sciences, Butakov RC, TPU.

## НОВАЦИИ НОВОГО ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

З.Д. Попов, С.К. Попов  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А26

Сейчас, благодаря внедрению новых технологий, рынок и отдельные компании постоянно стремятся к привлечению к работе больше квалифицированных кадров – инженеров новой эпохи. Главная цель – повысить эффективность проекта, а также функционирование объекта в целом. Для этого нужны инженеры, которые готовы не только работать в новой научной деятельности, но и с первого взгляда быть ее проводниками, и постоянно поддерживать развитие инноваций. Заказчикам не должны восполнять недостатки базового образования вчерашнего выпускника вузов. Работодатели теперь ожидают, что выпускник готов сразу включиться в рабочий процесс. Нужны те, кто способен не только выявить технические задачи и предложить рациональные решения, но и умеет увидеть полную структуру работы, определять и развивать связи между технологиями и производством. Студенту уже недостаточно давать знания в специальных дисциплинах, важно и научить его мыслить, как инженер и технологический бизнесмен. Первое, что промышленные компании обращают на себя – навыки разработки проектов на основе кейсов из индустрии, которые являются основой для проектной деятельности. Для решения этих кейсов студент нуждается в инженерном мышлении.

Модель высшего образования, которая существует в нашей стране, имеет ряд плюсов и минусов. Традиционная модель образования заключается в том, что студент бакалавриата первые два года проходит общую программу обучения. Классическая дисциплина дает будущему механику широкий спектр знаний, возможность понять многие аспекты отрасли. Он может самостоятельно понимать физические процессы и делать необходимые расчеты. У выпускника есть возможность достаточно широкого выбора конкретной специализации, а также, в случае каких-либо ошибок в рабочем процессе, заметить эти ошибки и предотвратить более тяжкие последствия от них. Но что в этом плохого? Большое количество классических дисциплин. Сейчас некоторые явно лишние для сегодняшней цифровой экономики. Отказ от них или сокращение их часов для вуза невозможно по некоторым причинам: для того надо признать, что они менее нужные и значимые, а преподаватели, которые знают только их, станут менее востребованы. Поэтому, пока старые дисциплины «в строю», для новых – нет места. В традиционной модели присутствует явный перевес в сторону теоретической подготовки. Рассматривается мало примеров применения знаний, не говоря уже о полноценных реальных проектах. Большинство учебного процесса направлено на изучение материала на лекционных занятиях, применение их на практических занятиях и доказательство явлений на лабораторных работах. При этом полученные знания никак не рассматриваются в применении на различных производственных отраслях. Так, получив хорошее фундаментальное образование, большинство выпускников не в полной мере готовы к текущим требованиям отрасли и рынка, в особенности коммерческих проектов. Компании оплачивают расходы на дополнительное обучение. Еще более печальным фактом является то, что многим специалистам «очень трудно принять принцип необходимости непрерывного обучения, совершенствования новых умений и навыков, изменения сути и ожидания от своей деятельности в рамках развития технологий. Как итог, гораздо меньше возможностей на карьерном пути.

Поэтому сейчас распространена новая образовательная модель, которую использует Томский политехнический университет. Её цель – появление высококвалифицированных специалистов, готовых к работе в рамках развития передовой технологической отрасли. Одной из основных задач является интеграция в образование, науку и индустрии. Это значит, что инженерам нужно быть готовым к запросу ведущих компаний рынка, когда они выходят из университета. Новая модель включает различные образовательные центры, образовательные порталы, часто сочетающие функции онлайн-курсов и площадок взаимодействия потенциального

работника и работодателя с автоматизированными возможностями проверки навыков, профессиональные образовательные центры, стремящиеся учить не только конкретным продуктам, но и сути процессов отраслевого развития. В ТПУ преподаватели создали специальные методические навигаторы для введения в инженерную деятельность для студентов, которые более подробно дают понимание о будущей профессии. Например, методический навигатор «Введение в энергетику» дает понимание о работе энергетической отрасли в единстве и взаимосвязи всех происходящих в ней процессов; иметь общее представление об электромеханических установках, применяемых в энергетике, их принцип действия и внешний вид; понимать связь дисциплин базовой подготовки с задачами будущей профессиональной деятельности; представлять объекты профессиональной деятельности для разных специализаций. Система интегрированной подготовки представляет собой сочетание теоретического обучения с практической инженерной деятельностью на базовые предприятия, где реализация учебных программ осуществляется через сетевое взаимодействие с предприятиями, если у обучающего есть индивидуальные договоры с партнерским предприятием. В этой системе студент получает профессиональные и теоретические знания, которые сразу закрепляются практической деятельностью в параллельной работе-стажировке на базовом предприятии, что позволяет достичь высокий уровень трудоустройства студентов и укрепления кадров на предприятии. Для предоставления услуг промышленности высококвалифицированными специалистами, инновационными научными разработками в университетах создаются инжиниринговый центр, выполняются проекты пилотных проектов в рамках программы развития региональных инновационных кластеров.

Подготовка большого количества квалифицированных кадров, инженеров нового времени, сегодня является одной из самых важных задач. Решение этого вопроса невозможно без существенных изменений в высшем образовании. Сегодня для вузов есть возможность вовлечься в процесс изменения и формирования компетенций, которые востребованы в современном мире цифровых технологий. Чтобы достичь эффективного взаимодействия в рамках этого проекта, вузам нужно самим стремиться меняться и предлагать студентам реально востребованные знания и практическую подготовку.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Жураковский, В. М. Модернизация инженерного образования: российские традиции и современные инновации / В. М. Жураковский, М. Ю. Барышникова, А. Б. Воров // Вестник Томского государственного университета, 2017. – № 416. – С. 87-93. – DOI 10.17223/15617793/416/13. – EDN YLYBOP.
2. Математика для инженеров: поиск оптимального сочетания интерактивных и традиционных методов / Е. А. Беляускене, О. Н. Имас, С. В. Кривяков, Е. В. Царева // Высшее образование в России, 2020. – Т. 29. – № 7. – С. 22-31. – DOI 10.31992/0869-3617-2020-29-7-22-31. – EDN JGXDGW.

Научный руководитель: Беляускене Е.А., ст. преп. ОмИИ ШБИП ТПУ.

## ВВЕДЕНИЕ В ИСТОРИЮ ЭНЕРГЕТИКИ

Н.А. Чаплыгин<sup>1</sup>, О.О. Лукавцов<sup>1</sup>, Н.М. Космынина<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ<sup>1,2</sup>, группа 5А91<sup>1</sup>, к.т.н., доцент<sup>2</sup>

**Цель:** Внедрение в учебный план новой учебной дисциплины «Введение в историю энергетики» для первого курса Инженерной школы энергетики (ИШЭ).

### Задачи:

1. Изучение учебного плана первого курса ИШЭ;
2. Проведение опроса среди учащихся ИШЭ об их осведомленности в истории энергетики;
3. Предложение по оптимизации учебного плана под внедрение новой дисциплины.

Задачи дисциплины «Введение в историю энергетики»:

1. Формирование знаний об истории направления обучения 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника;
2. Краткий исторический экскурс по основным событиям в развитии энергетики;
3. Формирование понимания первокурсника о его будущей профессии;
4. Ответ на вопрос первокурсника: «А что мне предстоит изучать?».

### Введение

Поступая на первый курс Инженерной школы энергетики, студент сталкивается с большим количеством новых дисциплин и малопонятной ему информации. На фоне нового образа жизни и образа учебы, многие студенты теряют понимание, куда они поступили и что им предстоит изучать.

Для того чтобы первокурсник знал, что ждет его в будущем, мы предлагаем внедрение в учебный план новой дисциплины «Введение в историю энергетики».

Данная дисциплина должна сформировать у студента понимание о его выборе профессии, развить интерес к истории специальности и сформировать базу для получения новых знаний на инженерных дисциплинах старших курсов.

### Анализ заинтересованности

Для получения подтверждения тезисов, выдвинутых во введении, мы провели опрос среди студентов ИШЭ. В нем участвовали студенты всех курсов направления обучения 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Для проведения опроса использовались Google Forms. Опрос состоял из трех вопросов, а именно: «Как хорошо Вы ориентируетесь в истории энергетики?», «Было бы Вам интересно пройти курс истории энергетики во время первого семестра обучения?», «Должен ли энергетик хорошо знать историю своей профессии?».

В опросе прошли участие 233 студента. Результаты представлены на рисунках 1–3.

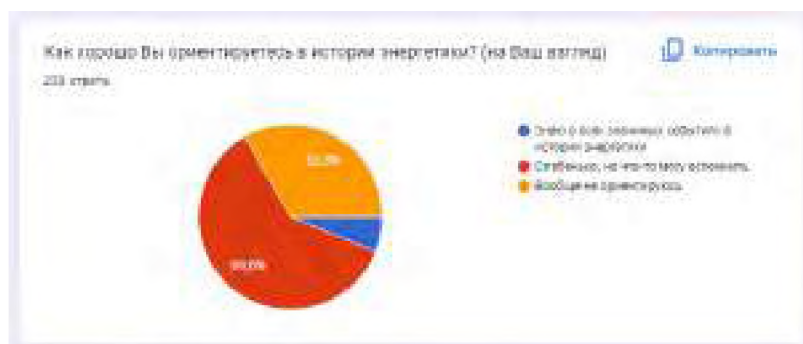


Рис. 1. Вопрос № 1

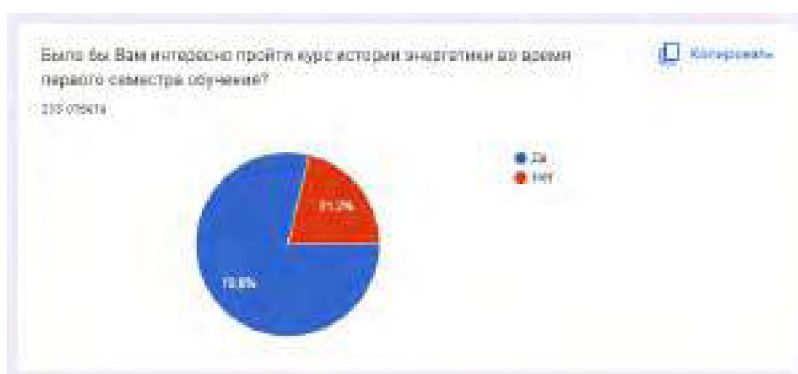


Рис. 2. Вопрос № 2

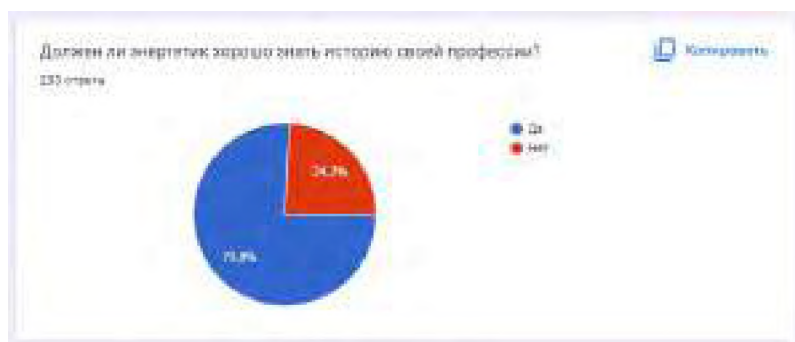


Рис. 3. Вопрос № 3

Ключевыми вопросами являются вопросы №1 и №2. Из вопроса №1 можно сделать вывод, что подавляющее большинство студентов слабо ориентируется или, совсем ничего не знают об истории энергетики. Во втором вопросе, так же, большинство студентов выражают интерес к теме истории энергетики и были бы согласны пройти такой курс в течение первого семестра обучения.

#### Учебный план

За пример взят учебный план группы 5A21, представленный на рисунке 4.

№	Наименование	Формы контроля				Кредиты (МЕТ/учеб. курс)	Объем работы			Нагрузка (аудиторной работы)		
		Зач	Зач	ЭР	ЭТ		Семес	Контр-офт	СРС + Контр-офт	Лек	ЗС	Дом (ЭР)
	Семестр 1	3	9			27	972	432	948	144	99	232
51.02.01.1	История		1			3	72	24	48	8		16
51.02.01.3	Введение в инженерную деятельность		1			1	36	18	24	8		8
51.02.01.4	Социальные основы инженерного проектирования		1			2	72	36	48	8		16
51.02.01.5	Информация (коммуникация)		1			1	36	18	24			16
51.02.01.7	Информационные технологии (информатика)		1			3	108	54	72			48
51.02.01.10	Национально-культурные традиции и ценности народов России	1				3	108	54	72	16		32
51.02.01.14	Информатика 1.1		1			3	108	54	72	16	12	48
51.02.01.20	Математика 1.1		1			9	216	108	144	48	24	96
51.02.01.23	Физика 1.1		1			9	216	108	144	48	24	96
51.02.01.24	Элементы дисциплины по физической культуре и спорту		1				36	18	24			16

Рис. 4. Учебный план группы 5A21, 1 курс, 1 семестр

Изучив план, мы пришли к выводу, что есть возможность внедрения дисциплины «Введение в историю энергетики» не как отдельный предмет, а совмещение его часов с дисциплиной «Введение в инженерную деятельность», т. к., «Введение в историю энергетики» тоже подразумевает под собой адаптацию студентов первого курса в университете.

Мы предлагаем ограничить данный экскурс в историю энергетики четырьмя лекциями, которые будут проводиться один раз в две недели первой части первого семестра (до ломки).

### **Заключение**

В итоге, дисциплина «Введение в историю энергетики» будет состоять из четырех лекций, обязательных к посещению для получения зачета по предмету «Введение в инженерную деятельность».

Каждый инженер-энергетик должен знать историю своей профессии. Предложенная дисциплина пойдет на пользу не только в плане получения хронологических знаний истории энергетики, но и поможет привить студентам навыки самообразования, т. к. краткость курса спровоцирует заинтересованного студента хотя бы «загуглить» информацию, при изучении совершенно нового и напрямую затрагивающего его предмета.

Научный руководитель: к.т.н. Н.М. Космынина, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## **КОМПЛЕКС ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ САМООБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МАТЕМАТИКА**

П.Е. Немкина, М.Е. Демченко  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5A28

В настоящий момент трудно представить современное обучение без его самостоятельной части. Человеку необходимо учиться самому искать информацию, самому разбирать темы и искать ответы на вопросы, с которыми он сталкивается. В работе описывается проект организации самостоятельной деятельности студентов в электронном курсе на платформе Moodle.

Электронный курс «Математика 1 курс» адаптирован для удаленной работы студентов и содержит материалы, соответствующие учебному плану дисциплины Математика 1.1. Каждый модуль курса представляет собой комплекс тематически подобранных интерактивных тренажеров системы STACK. STACK был разработан в Эдинбургском университете Кристофером Сангвином (Christopher Sangwin) [1] и устанавливается, как дополнительный плагин к MOODLE или ILIAS [2, 3]. Этот плагин связан с системой компьютерной алгебры (CAS) Maxima, благодаря чему в качестве ответов для оценивания можно вводить символьные выражения. Задания типа STACK способствуют развитию индивидуального обучения и отличаются от обычных тестов LMS Moodle тем, что:

каждый студент получает свой набор задач с параметрами, отличными от параметров аналогичных заданий одногруппников,

- во время ответа предоставляется мгновенная обратная связь,
- в вопросах реализована система подсказок,
- в качестве развернутого отзыва предоставляется подробное решение задачи,
- ответ можно вводить в виде аналитического выражения.

Работа каждого тренажера построена в вопросно-ответной форме. Пользователю необходимо решить задачу и дать правильный ответ на заданный вопрос либо ввести верное выражение. При этом система не сравнивает введенный ответ с ответом, заложенным разработчиком, а проходит проверку в два этапа:

- 1) проверка правильности ввода выражения;
- 2) проверка математических свойств ответа.

В качестве обратной связи система предоставляет полезную информацию об ошибках (синтаксических и математических). При неправильном или частично правильном ответе система укажет в каком именно месте допущена ошибка, а также предоставит подсказку и возможность ещё раз ответить на вопрос. Полное решение задачи разбивается на несколько частей, каждая из которых открывается по очереди после введенного неправильного ответа. Если студент не догадается, как решить задачу, то ему будет показана следующая подсказка. В каждом задании разное количество попыток, которое система предоставляет для решения.



Гибкие настройки оценивания учитывают, сколькими из предоставленных попыток воспользовался студент, и исходя из этого, выставляется итоговый балл. В любом случае, студент будет предоставлено правильное и полное решение задачи. В этой работе описывается наш опыт взаимодействия с электронным курсом “Математика 1 курс”. При первом знакомстве появляется много вопросов о том, как с ним правильно работать и как правильно вводить ответы. Сначала система кажется сложной и непонятной. Однако вводный урок даёт возможность получить ответы на важные организационные вопросы. После прохождения вводного урока открывается доступ к основным модулям курса. Работать в электронном курсе не только полезно, но и интересно, с его помощью можно закрепить пройденный материал, узнать новые способы решения задач. Кроме того, можно выделить следующие достоинства электронного курса:

1. Работа в электронном курсе помогает хорошо усвоить и закрепить пройденный материал. Для каждой темы, пройденную на лекциях, имеется свой набор разнообразных заданий, отличающихся между собой по типу и уровню сложности.

2. Электронный курс достаточно лоялен к новичкам. При синтаксически неправильном вводе ответа система его не примет и даст подсказку, как ввести правильно.

3. Подсказки. В случае математической ошибки студент поэтапно получает правильный ход решения задачи. Также система подскажет, какая и где именно совершена ошибка.

С другой стороны, кроме достоинств электронный курс имеет ряд недостатков:

1. Maxima (система компьютерной алгебры). Возможности системы обширны, однако она имеет некоторые ограничения. Например, система не может вычислить пределы некоторых последовательностей. Кроме того, Maxima не способна понять, что иррациональные числа  $2\sqrt{2}$  и  $\sqrt{8}$  одинаковые. Система считает, что эти числа разные.

2. Трудоемкость. Электронный курс богат различными тренажерами, но их выполнение отнимает большое количество времени. С нашей точки зрения, необходимо количество заданий в курсе.

3. Подсказки. Чаще всего они действительно помогают разобраться с решением задания, но в некоторых случаях они могут совершенно запутать ход решения. Также бывают случаи, когда в подсказках решение написано непонятно.

4. Отображение в браузере. Еще одним немаловажным минусом, влияющий на работу в электронном курсе, является то, что не во всех браузерах, а также не на всех мобильных устройствах курс работает корректно. Некоторые задания не прогружаются полностью, а некоторые и вовсе не открываются и это очень сильно затрудняет работу, ведь из-за этого ты не можешь спокойно поработать вне дома, что в свою очередь замедляет процесс.

Таким образом, “Математика 1 курс” – хорошее решение для организации самостоятельной работы студентов, подготовки к контрольной работе и изучение методов решения различных задач. Тренажеры предоставляют быструю обратную связь при решении задач в модулях, что помогает студентам находить решение и исправлять ошибки. Мотивационной составляющей является получение баллов, которые идут в рейтинговую систему, что несомненно может положительно повлиять на успеваемость. Ко всему прочему, преподаватель может отслеживать успеваемость учеников, смотреть, кто и как работает по темам пройденного материала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Sangwin, Chris, Computer Aided Assessment of Mathematics (Oxford, 2013; online edn, Oxford Academic, 17 Dec. 2013), URL: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199660353.001.0001>, (дата обращения 11.11.2022).
2. <https://moodle.telt.unsw.edu.au/question/type/stack/doc/doc.php/> (дата обращения 11.11.2022).
3. <https://stack-assessment.org/> (дата обращения 11.11.2022).

Научный руководитель: Е.А. Беляускене, ст. преп. ОМИ ШБИП ТПУ.

# СТУДЕНЧЕСКОЕ СОУПРАВЛЕНИЕ КАФЕДРЫ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

А.В. Безбородов  
Сибирский федеральный университет  
ПИ, ТЭС, группа ФЭ20-01б

Теплоэнергетика – это достаточно широкая отрасль, где будущие выпускники университета могут найти себя, например, в турбинном цехе или цехе водоподготовки, на разных позициях, или стать инженером проектировщиком теплотехнических сооружений. Для того чтобы студенты могли успешно реализовать себя в будущем, уже во время обучения им необходимо осуществлять пробы в различной деятельности.

Согласно пункту 3.2 Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (уровень бакалавриат): «Выпускник, освоивший программу бакалавриата, должен обладать следующими универсальными компетенциями:

- системное и критическое мышление;
- разработка и реализация проектов;
- командная работа и лидерство;
- коммуникация;
- межкультурное взаимодействие;
- самоорганизация и саморазвитие» [1].

Формирование универсальных компетенций у студентов в вузе зависит от организованных форм учебной и внеучебной деятельности, а также степени заинтересованности и вовлеченности в нее обучающихся [2]. На кафедре ТЭС Политехнического института Сибирского Федерального университета (далее ТЭС ПИ СФУ) формирование и развитие универсальных компетенций осуществляется через цикл дисциплин гуманитарной направленности, таких как: «Деловые коммуникации», «Основы профессиональных коммуникаций», «Ответственные инновации. Этика. Безопасность», «Управление изменениями». В рамках каждой из дисциплин обучающиеся осваивают основы проектирования и реализовывают социальные проекты разного уровня (кафедральные, университетские, региональные) с учетом запросов на формирование компетенций и выстраивание исходя из этого индивидуальных траекторий развития. Кроме того, реализуемый цикл предполагает установление междисциплинарных связей внутри, а также, со смежными дисциплинами на трех курсах обучения студентов с такими дисциплинами как: «Основы проектной деятельности», «Управление проектами».

Как известно, компетентность формируется в деятельности, таким образом, можно предположить, что реализация проектов способствует формированию компетенций. Стоит также отметить, что студенты могут выбирать направленность проекта исходя из запроса и желания развивать ту или иную компетенцию.

На кафедре ТЭС ПИ СФУ реализуется проектная деятельность студентов во внеучебное время в рамках Органа студенческого самоуправления (далее ОСС). Целью ОСС является создание пространства возможностей и реализации проектов для развития универсальных компетенций студентов, необходимых им в их будущей профессиональной деятельности.

Поскольку ОСС создан и функционирует в рамках одной кафедры, это позволяет напрямую выполнять задачи (проекты), формулируемые стейкхолдерами (выпускающей кафедрой

и компаниями партнерами), а также развивать компетенции студентов, повышая уровень их квалификации и востребованности среди потенциальных работодателей.

Деятельность ОСС реализуется по следующим направлениям (отделам):

– Кураторский отдел, который помогает студентам первых курсов быстро адаптироваться в новых для них условиях университета и, как следствие, позволяет сохранять контингент кафедры, через мероприятия, направленные на сплочение учебной группы, мониторинг успеваемости, оперативное реагирование на запросы студентов.

– Отдел организации мероприятий, помогает реализовывать такие задачи стейкхолдеров как: привлечение студентов к созданию и организации культурно-массовых мероприятий, например, таких как: посвящение первокурсников на Красноярской ТЭЦ; профессиональный праздник – День энергетика; адаптационное мероприятие для первокурсников «Прошу слова». В деятельность отдела входит: разработка структуры и составление сценария мероприятия, распределение ответственных, непосредственно проведение мероприятий и повышения уровня организации.

– Отдел корпоративной культуры, формирует новые и поддерживает имеющиеся традиции на кафедре, будь то поздравление выпускников и преподавателей, или ведение клубной деятельности, в рамках которой студенты объединяются в «клубы» интересам, таких как: клуб настольных игр, книжный и шахматный клубы.

– Информационный отдел, занимается освещением жизни кафедры через создание информационной среды, для осведомленности студентов и повышения лояльности выпускников. Задачи, которые решает отдел: ведение социальных сетей, фото/видео сопровождение мероприятий, сопровождение сайта ТЭС ПИ СФУ, создание информационного бренда кафедры за пределами университета.

– Рекламный отдел, который поддерживает будущих абитуриентов в выборе профессионального пути и информирует о поступлении на ТЭС ПИ СФУ, а также занимается созданием таких мероприятий: «День открытых дверей», выездные профориентационные мероприятия в школах Красноярского края, профессионально-ориентированные настольные игры.

– Научно-исследовательский отдел, развивает научно-исследовательскую деятельность среди студентов, путем участия в научных конференциях, кейс-чемпионатах, инженерных конкурсах и создания обучающей базы в научной деятельности для студентов направления.

– Отдел по работе с Молодежными советами компаний-партнеров кафедры, позволяет наладить работу и совместную деятельность с молодежью предприятий и будущими коллегами выпускников кафедры, организовывать совместные мероприятия и сформировать отношения между студентами и сотрудниками будущих работодателей. Отдел занимается созданием таких мероприятий как: «День компаний СГК», профессиональный праздник – День энергетика, корпоративные игры и мероприятия с представителями Молодежных советов.

Все отделы ОСС взаимосвязаны между собой, что позволяет повысить качество реализуемых проектов, а также обеспечивает взаимодействие в них студентов разных курсов и выбирать роли (волонтер, реализатор, наставник). Внутри каждого направления реализуются проекты, позволяющие каждому из участников органа брать на себя различного рода ответственность, тем самым развивать такие компетенции как:

- 1 – системное и критическое мышление;
- 2 – разработка и реализация проектов;
- 3 – командная работа и лидерство;
- 4 – коммуникация;
- 5 – самоорганизация и саморазвитие.



Рис. 1. Структура ОСС

В настоящее время, требования к уровню квалификации рабочего персонала и конкуренция на рабочие места возрастает, все больше востребован профессионал, который имеет опыт в реализации групповых проектов и развитые универсальные компетенции. Одновременно, ключевым условием реализации и успешности студенческих проектов во внеучебной деятельности на кафедре, является желание саморазвития студентов и понимание значимости реализуемой деятельности уже в студенчестве. Вовлечение студентов в Орган студенческого самоуправления формирует личные отношения студентов к ответственности, умение коммуницировать и работать в команде, проявлять лидерские качества. Иными словами, студенческое самоуправление как форма внеучебной воспитательной деятельности способствует формированию необходимых в будущей профессии личностных качеств и компетенций [3].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника. Приказ Минобрнауки России от 28.02.2018 N 143 (ред. от 08.02.2021)
2. Бойко, Е. А. Формирование универсальных компетенций у инженерных кадров на примере реализации многоуровневой модели проектно-ориентированной подготовки / Е. А. Бойко, А. А. Пикалова // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2021. – № 4(44). – С. 145-152. – DOI 10.54509/22203036\_2021\_4\_145. – EDN DRKFYN.
3. Пикалова, А. А. Студенческое самоуправление как фактор формирования личностных качеств студента / А. А. Пикалова // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 1-2. – С. 90-93. – EDN XBTQCD.

Научный руководитель: к.п.н. А. А. Пикалова, доцент кафедры ТЭС ПИ СФУ.

# ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

М.П. Домарацкая  
Томский политехнический университет  
ШБИП, ОИЯ, группа А1-61

В статье изучается проблема интегрированного обучения иностранному языку студентов технических специальностей. Рассматривает преимущество интегрированного подхода на уроках иностранного языка, обозначается польза данного подхода в учебном процессе для студентов технического вуза.

Ключевые слова: интегрированный подход; интегрированное обучение; студенты технических специальностей; смежные дисциплины.

Современное высшее образование совершенствуется на регулярной основе, применяя интегрированное обучение, которое с каждым днем становится более актуальным. Интегрированный подход довольно таки часто используют в системе образования для преподавания профильных дисциплин. У студентов в процессе обучения в рамках данного подхода, активно формируются профессиональные качества, появляется устойчивый интерес к изучаемым предметам.

Простыми словами, интегрированное обучение – это объединение предметов с целью разностороннего изучения заданной темы. То есть, обучение выстраивается вокруг выбранной темы с точки зрения разных предметов. Интеграция дает возможность проанализировать полученные знания и объединить их в одно целое. В результате такого обучения у студентов формируется целостное восприятие мира, со всеми взаимосвязями.

По мнению Николашина Е.А., интегрированный подход означает взаимосвязь всех компонентов процесса обучения, обеспечивает систему и непрерывность педагогического процесса [3, 18-24.]. Интеграция в обучении иностранного языка предполагает выбранную дисциплину, определение содержания обучения, развитие межпредметных связей.

Применяя методику интегрированного обучения у студентов:

- активизируется познавательная и творческая деятельность;
- создаются оптимальные условия для развития мышления и логики;
- формируются профессиональные и общекультурные компетенции.

В данной работе предпринята попытка изучить роль и место интегрированного подхода в обучении иностранному языку студентов технических специальностей. Интегрированное обучение повышает мотивацию студентов, делая их более компетентными в технических сферах.

На данный момент интегрированный подход является одной из современных методик преподавания в обучении иностранного языка. Интегрированный подход помогает решить проблему взаимодействия смежных дисциплин. Это является причиной усиления практической направленности обучения иностранному языку. Умение свободно выражаться на иностранном языке, делает специалиста более уверенным в своей профессиональной среде.

Г.М. Кулешова трактует этот термин как слаженное взаимодействие личных и профессиональных аспектов языковой деятельности [2, 231-237.]. Это коммуникативные, языковые и речевые умения.

Основным компонентом образовательной интеграции для студентов является практическая составляющая в речевой и коммуникативной деятельности через рецептивные навыки (чтение или аудирование) с продуктивными (говорение или письмо), а также совместное применение традиционных и дистанционных учебных средств.

Использование интегрированного обучения помогает рассмотреть многоаспектные объекты, которые являются предметом изучения различных учебных дисциплин. Интеграция позволяет формировать новый интерактивный метод мышления современного студента.

Базовым элементом в образовательной интеграции является подготовка к уроку. Сюда относится точка соприкосновения учебной дисциплины и иностранного языка. Интегрированный урок позволяет студентам получить общее представление по изучаемым предметам.

Согласно мнению авторов, применение интегрированного подхода на уроках иностранного языка:

- повышает качество знаний;
- расширяет кругозор студентов;
- улучшает мировоззрение учащихся;
- развивает практические навыки применения теоретического материала;
- воспитывает влечение к изучаемой дисциплине;
- развивает умения и навыки работать в коллективе и выразить свои мысли.

Интегрированное обучение пользуется спросом на втором уровне высшего образования – магистратуре. Интегрированное обучение производится с помощью изучения профильных дисциплин посвящённых исследованиям студентов. Данный подход показывает учащимся применение навыков и умений различных преподаваемых дисциплин для изучения иностранных языков.

А. А. Загороднова заметила, что интегрированный подход на занятиях по иностранному языку носит научный характер. Автор уверена в том, что система педагогических явлений входит в образовательную интеграцию [1, с. 183.].

Для проведения занятия по иностранному языку с использованием интегративного подхода, следует для начала определить ведущую дисциплину, на которой будет построен урок. На уроках используется специальная лексика, рассматривается чтение и написание технических текстов, обсуждаются профессиональные задачи. Тексты для чтения и аудирования подбираются для студентов в соответствии с их уровнем и интересами. Подготовка к урокам настоятельно рекомендует учащимся пользоваться научным подходом в выполнении технических исследований, отслеживания и осмысления найденной информации, направленные на формирование и функционирование интегрированных навыков.

На занятиях, связанных с интегрированным подходом, у студентов есть возможность самостоятельно изучать иностранный язык, что способствует развитию стремления к приобретаемым знаниям. Несмотря на самостоятельное изучение и стремление к получению новых умений и навыков, методика интегрированного подхода влияет на мотивацию студентов к изучению разных дисциплин.

Начиная подготовку к уроку, используя интегрированный подход в обучении иностранного языка, необходимо выбрать профильную дисциплину для изучения, важно определить систему междисциплинарных понятий и подготовить главные этапы образовательной деятельности. Этот подход подразумевает построение общей схемы, стратегии и комплексное рассмотрение учебного процесса.

Важно отобрать подходящий материал для изучения предмета, установить междисциплинарную связь для возможности реализовать основу интегрированного образовательного процесса.

Согласно вышеперечисленному материалу, междисциплинарность профильных дисциплин в университете является одной из перспективных направлений высшего образования. Интегрированный подход дает необходимость использовать его в образовательном процессе, в нашем случае именно в техническом вузе.

Применение методики интеграции на уроках иностранного языка побуждает студентов развивать творческий потенциал и усиливать интерес к профильным дисциплинам. Кроме того, данный подход помогает студентам получить теоретический и практический багаж знаний, который поможет реализовать потенциал обучающихся по изучаемой дисциплине в профессиональной образовательной деятельности.

Хочется отметить, что с использованием образовательной интеграции у студентов формируется профессиональная компетенция, основной целью которой является обучению иностранному языку как средству общения. Профессиональная компетенция помогает обучающимся получить коммуникативные навыки на интегрированных занятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Загороднова А.А. Педагогические основы профилирования курса иностранного языка в процессе подготовки учителя начальных классов: дис. канд. пед. Наук. – Ярославль, 1997. – 183 с.
2. Кулешова Г.М. Условия реализации индивидуальной образовательной траектории ученика в дистанционном обучении // Смыслы и цели образования: инновационный аспект. – М.: Научно-внедренческое предприятие «ИНЭК», 2007. – С. 231-237.
3. Николашина Е.А. Интегрированный подход в обучении иностранному языку. – Р.: Научно – методический электронный журнал «Концепт», 2017. – С. 18-24.

Научный руководитель: к.п.н. Л.А. Гончарова, доцент ШБИП ОИЯ НИ ТПУ.

## EDUCATION IN ERU AND TPU DURING STUDYING SPECIALIST IN NUCLEAR POWER PLANT DESIGN AND OPERATION

I.M. Ibrahim

Egyptian russian university, Tomsk polytechnic university  
Butakov research center, group 507I

### Introduction

A double degree is a program of study run by two distinct universities in which students finish their studies simultaneously at both institutions, or finish their studies at one institution and then begin at the other.

As long as there is an agreement between the universities, a dual degree can be earned from separate colleges, in different countries, or even in different academic subjects. You can pick to study things like business and law, engineering and computer science, history and political science, and so on [1].

A dual degree program could provide certain difficulties. Although dealing with two distinct school systems may be challenging at first, doing so will teach you how to overcome obstacles and acclimate to a completely new environment.

A double degree program has numerous benefits for ambitious students as well as some drawbacks (table 1).

Table 1. Advantages and Disadvantage of a double degree program

Advantages	Disadvantage
Get two certificates	Get nothing , If there are difficulties in one of the universities
Experiment and integrate two learning environments	Leaves Little Time for Other Things
Double your professional network	You'll have a ton of work.
Get a double major in a shorter time	You won't have any experience, and juggling employment and school will be challenging for you.
Best use of your study hours	Compared to a conventional degree, university-related costs are greater.
Get a great job	That you will eventually land a well-paying job is not a given.
They help us learn to overcome difficulties and get used to a completely new	-

For example, for studying specialist in Nuclear power plant design and operation [2], the total course is 5,5 years the first three years will be in Egypt and last will be in Tomsk. So will talk about each one separately and after will compare [2, 3].

### Education in ERU

Table 2. Approaches to the organization of the educational process

Type of educational activity	ERU (1-3 years of study)	TPU (4-6 years of study)
Number of points per semester	Fail 0-49 Pass 50-55 Good 55-70 Very good 70-84 Excellent 85-100	Fail 0-54 Satisfactorily 55-69 Good 70-89 Excellent 90-100
Rating system	Pass 2-2.39 Good 2.4-2.79 Very good 2.8-3.39 Excellent 3.4-4 Total rate 4	Pass 3 Excellent 4.75-5 Total rate 5
Subjects rating	50 semester works including 30 for section part and laboratory, 20 for mid-term and 50 final exam Total 100%.	80 semester works It includes the distribution of grades on exams, laboratories, and attendance 20 final exam Total 100%.
Redone the subject	Should to pay to redone the subject and this be in summer course.	Not pay, during the exam if the student not make exam very good and he want to retune it the professor put to him another time to redone it without any decrease of his point.
Lectures	The day in the university is divided into three main times: from 8 am to 10 pm, from 10 to 12 pm, from 12 pm to 1 pm, and from 1 pm to 3 pm. During these times, lectures are always in the early hours of the day.	The lectures are divided during the day and between each one and the other a rest time according to a divisional schedule known to the student at the beginning of the semester.
Laboratory	The practical application takes place in accordance with the tools provided by the university to students, usually at the end of the day after lectures.	The practical parts are studied on the theoretical parts, which are done through practical training on laboratory equipment such as measurement devices or on computer programs that were designed by the university itself.
Consultant	Just after lecture and small time	Every week all professor doing it at time he put it like a lecture
Projects	A number of students like a team work on one project through the follow-up of one or two supervisors, according to the parts that make up the project and the specialization of each supervisor	One student works on the project with the follow-up of one supervisor of his own, where the student must choose his supervisor at the beginning of the semester, where each supervisor monitors his own project

### What problems foreign students face when studying at TPU

1. The translators do not have the ability to translate correctly and deliver the information from the professor.

### The things do improve of the dual degree program is:

1. Hiring English-proficient nuclear educators to provide very detailed knowledge to pupils
2. For professors who do not speak English, bring in interpreters who have experience in the nuclear industry.
3. Working with Rosatom to locate students training in nuclear power plants
4. The university helps exceptional students obtain employment when they have finished their education.
5. Organizing a number of seminars to describe the university's offerings.

### Conclusion

Dual degree programs allow you to specialize in two different courses at the same time



You get two degrees with two majors. The program can combine any two fields at any level of bachelor, diploma or master and specialist from two different universities and thus learn in different ways with different cultures

The biggest benefit of joining in the dual degree courses is that you'd complete two degrees quickly than other students might have finished one.

The learning process is more fun when both courses are engaging to you and can be completed at once. By concentrating on the two concurrent classes, the learner develops rearranges fragmented. Your skill to multitask will be proven to the company by the fact that you finally passed two courses at once.

Of course, dual degree have some problem and this problem if solved dual degree will be good opportunity for student.

#### LITERATURE:

1. "What Is a Dual Degree Program? Should You Do One?" <https://blog.prepscholar.com/dual-degree-programs> (accessed Nov. 08, 2022).
2. "Томский политехнический университет". <https://abiturient.tpu.ru/direction/140502> (accessed Nov. 08, 2022).
3. "Preparatory Year – Egyptian Russian University." <https://www.eru.edu.eg/mathematical-and-natural-sciences-department/> (accessed Nov. 08, 2022).
4. "Egyptian Russian University – ERU." <https://www.eru.edu.eg/> (accessed Nov. 08, 2022).
5. "National Research Tomsk Polytechnic University (TPU): fields of study, specialties and tuition fees at the university." <https://studyinrussia.ru/en/study-in-russia/universities/tpu/programs/> (accessed Nov. 08, 2022).

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С УСПЕВАЕМОСТЬЮ И ПОИСК ИХ РЕШЕНИЯ**

К.Д. Куликов, Д.Е. Фирсова  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5011, 5012

### **Введение**

Тема повышения успеваемости студентов с помощью внедрения различных мероприятий, направленных на поддержку неуспевающих студентов, имеет большое значение для обеспечения и сохранения высокого уровня обучения. В том числе и от количества, и от качества проводимых мероприятий зависит степень подготовленности выпускников университета к работе по своей специальности.

### **Постановка цели и задач**

В этом году в Томском политехническом университете была введена новая система поддержки обучающихся – академическое консультирование [1]. Одной из функций академического консультанта является консультирование студентов по вопросам ликвидации академических задолженностей. Своими действиями университет демонстрирует стремление к расширению возможностей студентов и их поддержку, при переходе от дистанционного формата обучения, реализуемого из-за пандемии, вызванной коронавирусом, к очному.

Для формирования рекомендаций и путей к повышению эффективности обучения необходимо прежде всего проанализировать текущую ситуацию с успеваемостью студентов.

Поставленная цель реализуется с помощью решения нескольких задач:

1. Выявление причин возникновения академических задолженностей;
2. Анализ уже имеющихся в ТПУ мероприятий для неуспевающих студентов;
3. Поиск новых решений для увеличения числа студентов, успешно проходящих промежуточные аттестации.

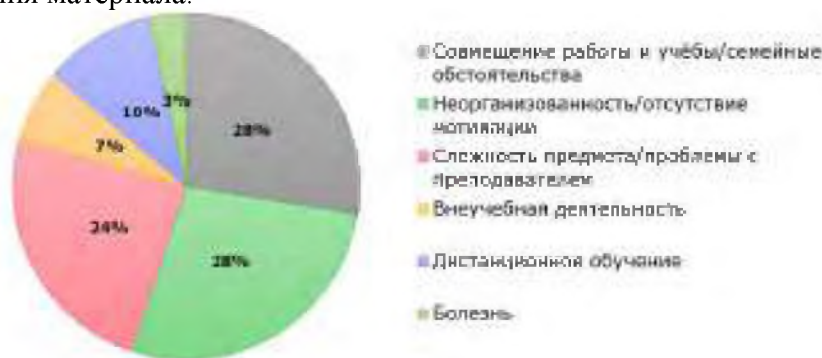
#### **Анализ успеваемости студентов**

В Национальном исследовательском Томском политехническом университете был проведен опрос среди студентов, который был направлен на отслеживание долгов у учащихся.

В связи с наличием студентов с академическими задолженностями на всех курсах обучения и попытке выявления основной причины сложившейся ситуации. Участников опроса просили указать причины появления долгов. С учетом прошедшей пандемией, можно было бы предположить, что болезни играют ключевую роль в возникновении задолженностей. Но на практике оказалось, что это недостоверное суждение. После проведения анализа собранных данных были выявлены наиболее часто встречаемые причины (рисунок 1). Главными причинами неуспеваемости студентов являются: совмещение работы и учебы/семейные обстоятельства; неорганизованность/отсутствие мотивации; сложность предмета/проблемы с преподавателем.

#### **Анализ имеющихся и поиск новых мероприятий для неуспевающих студентов**

Для помощи студентам у каждого преподавателя существуют консультации, на которых можно разобрать интересующие учащихся вопросы, а также существует возможность передать необходимые контролирующие мероприятия [2]. Но имеются и минусы данного формата, они заключаются в том, что не все обучающиеся способны воспринимать информацию от своего преподавателя, им проще это сделать у своих сверстников или у преподавателей с другими изложения материала.



*Рис. 1. Причины возникновения академических задолженностей*

Также организуются летние и зимние школы, в рамках которых, должники в течение каникул изучают дисциплины, по которым они отстают. Но эти школы являются платными, и не все студенты способны найти дополнительное финансирование на учебу. Кроме того, для организации подобных школ, необходимо, чтобы количество участников было не менее 10 человек. Если количество человек меньше, группа не формируется, и школа для отстающих студентов не проводится.

Для решения данной проблемы существует комиссия по качеству образования ТПУ. Одним из проектов данной организации является «Скорая образовательная помощь». В рамках данной помощи, комиссия по качеству образования ТПУ проводит дополнительные занятия по основным инженерным дисциплинам для студентов 1 и 2 курсов [3]. Но из-за того, что данная программа нацелена на подтягивание знаний по базовым инженерным направлениям, студенты имеющие долги по узкоспециализированным предметам не могут обратиться туда за помощью.

Одним из вариантов оказания помощи отстающим студентам, может стать создание клуба помощи по более узкоспециализированным предметам в отдельной области. Но так как по данным направлениям относительно мало обучающихся студентов, очень трудно найти лю-

дей способных и желающих обучать по ним. Для привлечения успевающих студентов в качестве помощников, можно ввести дополнительную материальную поддержку. Такая мера будет актуальна, так как по результатам опроса некоторый процент неуспевающих студентов накапливал долги из-за плохого материального положения и необходимости заработка при помощи выполнения учебных работ на заказ. При наличии такой меры они бы могли преподавать в данном клубе и помогать студентам разбираться в теме, а не просто продавать готовые работы.

Ещё одно мероприятие для помощи неуспевающим студентам заключается в проведении обучения старшего преподавательского состава основам использования современных информационных технологий для организации видеоконференций, в виде лекций и практических занятий. Данное мероприятие будет полезно не только самим преподавателям, но и студентам, так как одной из основных причин получения задолженностей стало именно дистанционное обучение.

К тому же, чтобы повысить организованность учащихся, можно ввести правило, заключающееся в следующем: для того, чтобы участвовать в какой-либо организационной деятельности (стройотряды, актив университета и т. д.) или проходить производственную практику за пределами университета и города, студентам необходимо закрывать задолженности в течение двух учебных семестров. В случае невыполнения, будет рассматриваться вопрос о приостановке их участия в организационной деятельности на время ликвидации долгов и не выделение финансирования для прохождения практики.

### **Заключение**

На основе проведенного анализа успеваемости студентов технического профиля в Национальном исследовательском Томском политехническом университете были выявлены основные причины неуспеваемости. Также были проанализированы уже имеющиеся мероприятия для неуспевающих студентов: консультации преподавателей, зимние и летние школы, “Скорая образовательная помощь”. Предложены новые пути для повышения эффективности обучения, такие как клуб помощи по узкоспециализированным предметам; обучение преподавателей использованию современных образовательных технологий; введение нового правила для участия в организационной деятельности. Данные мероприятия могут поспособствовать повышению качества образования в университете.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Приказ по ТПУ от 08.09.2022 № 251-3/од “Об утверждении Положения об академическом консультанте (кураторе)”.
2. Приказ по ТПУ от 25.07.2018 № 59/од “Об утверждении и введении в действие новой редакции “Положения о проведении текущего контроля и промежуточной аттестации в ТПУ”.
3. Комиссия по качеству образования ТПУ // URL: <https://vk.com/kkotpu> (дата обращения 10.11.2022).

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# INTERNSHIP OPPORTUNITIES FOR INTERNATIONAL STUDENTS STUDYING UNDER THE NUCLEAR POWER PLANTS PROGRAM

Mohamed Sayed  
Egyptian-russian university, Tomsk polytechnic university  
Butakov research center, group 507I

## Introduction

One of the most important issues that constitutes an obstacle for a foreign student studying in nuclear engineering is linking the extensive scientific knowledge that we obtain with practical reality and effective vocational training, while training in institutions and companies, such as Rosatom, is difficult, because nuclear energy institutions are secret and do not accept foreign students for practice.

Digital technologies are being actively introduced to solve this problem [1]. But, it is a serious problem of the lack of the possibility of consolidating theoretical knowledge in practice (real production). The purpose of the work is to find a solution to the existing problem, hence the START program was one of the most important solutions through which one can release creative charges and explore what is new.

Advanced Research Training for Students (START programme) Participation in the Joint Institute for Nuclear Research's curriculum (JINR), entails working on a high-level research project under the guidance of a JINR specialist. Within the indicated time frame, invited students are given a 6- to 8-week stay in Dubna (Russia). They write a report on the work they did during their visit that is placed on the program website after they leave.

From their third year of undergraduate studies through their first year of PhD studies, students from all over the world who specialize in science, engineering, and IT are welcome to apply to START, an on-site JINR student program. Our main objective is to help JINR laboratories discover young, talented specialists so they can continue working there.

The Joint Institute for Nuclear Research (JINR) is an international, intergovernmental body created by a Convention that was ratified by eleven founding States on March 26, 1956, and registered with the UN on February 1, 1957. JINR is located in the Russian Federation's Moscow Region in the city of Dubna. JINR, a renowned scientific institute, is a pioneer in fusing fundamental theoretical and experimental research with the creation and use of cutting-edge technologies and academic instruction. JINR has a very good reputation in the scientific community [2].

## Participation requirements:

- worldwide enrollment of students;
- specialized in IT, science, and engineering;
- from their third year of undergraduate studies through their first year of doctoral studies;
- Those who have never participated in the START program before (JINR Summer Student Programme).

## The available scientific fields [2].

- **Theoretical Physics:** Laboratories:  
Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics (BLTP)
- **Elementary Particle Physics and Relativistic Nuclear Physics:** Laboratories:  
Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics (VBLHEP)
- **Nuclear Physics:** in one of this Laboratories:  
Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP)  
Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR)  
Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems (DLNP)
- **Condensed Matter Physics, Radiation and Radiobiological Research:** Laboratories:  
Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP),  
Laboratory of Radiation Biology (LRB).
- **Networking, Computing, Computational Physics:** Laboratories:





*Fig. 2. Our group*

### **Acknowledgement**

I also extend my thanks and gratitude to all the supervisors who helped me without hesitation and with all effort and dedication, Professor Maksim Bulavin, Dr. Alexander Verhoglyadov, and Professor Dimitri.

And I can't fail to mention my university TPU and especially to my scientific supervisor: Professor Lavrinenko Sergey, for his support and letters of recommendation.

### **LITERATURE:**

1. Лавриненко, С. В. Цифровизация подготовки кадров для предприятий атомной энергетики в современном техническом вузе / С. В. Лавриненко // Реализация образовательных и профессиональных стандартов в психологии и педагогике : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Пермь, 29 апреля 2022 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 88-90. – EDN EHXFNN.
2. START - STudent Advanced Research Training at JINR. <https://students.jinr.ru/index.php#projects> (accessed Nov. 13, 2022).
3. Joint Institute for Nuclear Research | Science brings nations together. <http://www.jinr.ru/main-en/> (accessed Nov. 13, 2022).

Научный руководитель: к.пед.н. С.В. Лавриненко, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

# ГИБРИДНАЯ ФОРМА ОБУЧЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

А.А. Меньшикова

Сибирский государственный медицинский университет  
ИИЗ, кафедра ИЯ, ассистент

Изменение реальности и современных потребностей рынка, профессиональных компетенций и возможностей, развитие коммуникационных систем и цифровой реальности приводят к изменению образовательных подходов. Появляется термин «образовательные технологии» [1; 2; 3], содержание которого выходит за пределы референции исключительно концептуально-логического методологического подхода. Новшеством в системе образования в целом, подготовке специалистов, в частности, можно считать уверенное внедрение гибридной формы обучения.

Апробация отдельных сценариев гибридной формы обучения (на примере обучения студентов иностранному языку с включением на занятии прямой эфир конференции, разработку самостоятельных стратегий-путеводителей обучения, в которых магистральной интенцией становится решение сложной проблемы, выраженной комплексом поисковых и практических заданий, рефлексией, философским осмыслением подходов) показывает готовность современного поколения выпускников школ осваивать образовательную программу нового поколения.

Современные формализованные программы цифрового и дистанционного образования требуют экспертной оценки на предмет безопасности для здоровья. Практика освоения онлайн программ повышения квалификации, сопровождающаяся повышением давления, показывает необходимость ограничивать аналитический и формальный показатель стандартов разработки подобных проектов, изменение позиции нарративного подхода в качестве основополагающего для разработки курса, углубления онтологии и возврата к традиции советской школы в области содержания и репрезентации материала.

Современные информационные технологии позволяют использовать гибридный дистанционный формат обучения в дополнении к очному – устанавливать телемосты с предприятиями, брать интервью у специалистов непосредственно во время занятия в процессе практического обучения студентов. Возможности интерактивного подхода при гибридном обучении позволяют посредством специального оборудования подключаться к архивам мастер-классов, конференциям, принимать участие в дискуссиях и обсуждениях проектов непосредственно на занятии, что позволяет повысить качество и эффективность практико-ориентированного обучения, экономить время и пересмотреть саму онтологию образовательной среды.

В условиях импликации гибридной формы обучения появляется возможность развивать гибридное обучение как систему новых технологий и подходов. Ввод интерактивных платформ предоставляет возможность организовать связь между университетами и проводить совместные занятия со студентами в таком формате, делясь опытом в прямом эфире, развивать подобные проекты в случае успеха.

Благодаря гибриднему подходу студенты могут получать производственные задания непосредственно от предприятия. Таким образом, система образования выходит на качественно новый уровень. Появляется возможность организовать производственную практику во время практических занятий по учебному плану. Соответственно исключается необходимость юридической партикуляризации производственной практики. Зачет по данному виду практики можно получить уже в курсе обучения, на занятии. Даже в случае сохранения производственной практики как типа в учебном плане качество выполнения работ на любом предприятии при гибридном подходе обучения будет повышаться.

Преимущество и перспективные возможности гибридной формы обучения связаны с тем, что интерактивные платформы предоставляют возможность для импликации других компетенций и аспектов обучения, в частности, для решения задач по экономике. Контаминация

положений наук и практического опыта, а также интерсубъектность и интерференция различных парадигм науки и образования позволяют создать основание для развития качественно новой онтологии науки. Под влиянием интерференции профориентированного и экономического кластера создаются предпосылки, теоретическая и компетентностная база для расширения профессиональных возможностей учащихся, приобретения новых квалификаций. В перспективе гибридная форма обучения предполагает качественное изменение онтологии образования, которая приведет к размыванию границ между научными и образовательными парадигмами, со временем исключит традиционно установленные разграничения между дисциплинами, ориентированными на партикуляризацию. Новые научно-практические парадигмы предполагают смещение акцента внимания с компетентностных областей на философскую онтологию.

С учетом потенциала цифровых технологий, прикладного аспекта цифровых технологий в социальной сфере инженеры-энергетики получают возможность получать экономическое знание с метафизическими основаниями социальной философии, обоснованной данным направлением онтологии экономической реальности другого плана – в большей степени связанной с социальными процессами и явлениями общественной жизни (в теоретическом и методологическом аспекте понятия, соотносимые с социальной онтологией, становятся частью онтологии социально-экономических процессов).

Гибридная форма обучения способна в настоящее время, в особенности в условиях наметившихся реформ российской системы образования, послужить новыми метафизическими основаниями идеологии и систему образования. На уровне научной парадигмы гибридная форма образования предоставляет возможность признания новых социо-экономических реалий в условиях меняющейся онтологии. Такой подход будет способствовать формированию навыков выполнения нестандартных задач в нестандартных ситуациях, а также способствовать интеллектуальному обогащению учащихся, возможности поощрений за вклад в профессиональную деятельность и развитие человечества. В онтологии социо-экономических явлений все больше внимания уделяется диссипативным процессам, определяемым языком формализации или указанием на пережитую ситуацию.

В практике развития международных отношений появляется возможность организовывать вышеописанную практику на уровне международного сотрудничества и партнерства – устанавливать связь с аналитическими центрами и зарубежными предприятиями. Существует возможность предложить практику подобного образовательного проекта зарубежным коллегам.

Оценивая гибридную форму обучения критически, следует указывать на риски понижения качества обучения вследствие ускорения процессов обработки информации, спецификой работы сознания учащихся, отсутствием синхронизации между сознанием учащихся и запрашиваемым уровнем теоретического материала учебного плана. Тем не менее, разумное сочетание широты возможностей электронных ресурсов, онтологии и метафизики содержания учебных программ приводят к оптимальному решению проблемы в данном направлении. Все риски гибридной формы обучения решаются благодаря умеренной пропорции. Однако потенциал объема информации в телекоммуникационных системах не исключает разумность ее подачи и адекватность распределения во времени и пространстве.

Возникает ли в ситуации внедрения гибридной форму обучения риск развития клипового мышления, деструктивных процессов для когнитивных способностей и психики учащихся? Данное положение также зависит от содержания программы и организации учебного плана. Необходимо соотносить пропорцию нарративных конструкций и концептуально-фактического содержания – 3:1. Информативность содержания должна соотноситься с прагматикой высказываний и не соответствовать положению «текст ради текста», размещению информации в качестве оторванных кусков текста.

Можно ли совмещать подобные образовательные технологии с другими распространенными в настоящее время практиками и подходами, наподобие выполнения групповых зада-



ний? С этим связаны определенные риски. Но решение проблемы и поиск оптимального выхода возможны в случае увеличения личностного расстояния и корректной организации командной работы (исключающей ускорение, влияние личности).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кизилова А. С. Гибридное образование: оценка в категориях информационно-аксиологического подхода / А. С. Кизилова // Вестник Мининского университета. – 2018. – Т. 6. – №1. – С. 210–238.
2. Краснова Т. И. Смешанное обучение: опыт, проблемы, перспективы / Т. И. Краснова // В мире научных открытий. – 2014. – №11. – С. 10–26.
3. Рудинский И. Д., Давыдов А. В. Гибридные образовательные технологии: анализ возможностей и перспективы применения / И. Д. Рудинский, А. В. Давыдов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2021. – Т. 7. – №1. – С. 1–8.

## INTRODUCTION OF VR&AR TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF TRAINING STUDENTS OF SPECIALTIES IN THE FEC

S.I. Luppov<sup>1</sup>, M.Yu. Sambulova<sup>2</sup>

Irkutsk national research technical university<sup>1,2</sup>

IVT, KFT im. N.I. Yaropolova, HTTb-22-1<sup>1</sup>, KAiU, aUPPop-22-1<sup>2</sup>

Every year more and more technologies appear in the world. One of the latest innovations is augmented and virtual reality technology: VR&AR. Basically, this innovation is used for entertainment. Against this background, the introduction of VR&AR in the process of teaching students and staff of the fuel and energy complex is a promising idea. At the moment, Russian universities do not use VR to train technical specialists. This industry is just getting started. In terms of market size for the current year, it can be noted that education is the least developed area of application of VR technologies.

Table 1. Market sizes by industries using VR and AR technologies

	Технология	Текущий годовой размер рынка (2021)
Videogames	VR/AR	\$106 billion
Live Events	VR	\$44 billion
Movies and series	VR	\$44 billion (Netflix)
Sale property	VR	\$107 billion
Sales	VR/AR	\$4,5 billion
Education	VR/AR	\$12 billion
Healthcare	VR/AR	\$16 billion
Design	VR/AR	\$20 billion
Military industry	VR/AR	\$9 billion

Virtual reality technology (virtual reality, VR) is a complex technology that allows you to immerse a person in an immersive virtual world using specialized devices (virtual reality helmets) Augmented reality technology (AR) is a technology that allows you to integrate information with real objects world in the form of text, computer graphics, audio and other representations in real time.

Virtual reality is a rapidly advancing computer technology. Progress in the field of information processes, means of data transmission, tools for interaction between humans and information machines, as well as the collection of information about the human environment has led to the creation of realistic immersive virtual worlds. The user's work with virtual reality began to be called immersion. Current computers are able to form a live virtual (simulated by a computer system) environment for the user, with which the user interacts using a wide range of specialized input / output information

devices - headphones, a microphone, computer glasses, specialized gloves and suits for transmitting tactile interaction and etc.

Using specialized display and interaction tools, a person is immersed in a virtual world created by a computer, can move freely in it, fully feel the changes taking place in it, and has the ability to interact with virtual objects.

The technology, which superimposes computer-generated information on top of images of the real world, is now well-established by programmers and digital system designers.

The basic meaning of AR technology is relatively simple: it recognizes a given image of the real world (for example, a building or equipment) and overlays this image into the virtual world. At the same time, it allows each user to carry out interesting projects with it, such as creating a tour of production, a detailed study of a single functional installation

The advantages of VR&AR technologies in the learning process include new emotions from learning, respectively, knowledge will be better absorbed. Also, we note the visibility of the learning process.

The introduction of virtual and augmented technologies consists in conducting tours of production and factories. Initial staff training is also possible. The main advantage of VR and AR technologies lies in the possible remoteness and accessibility of training. For clarity, let's analyze the process of passing industrial practice by 1st year students of the specialty "Chemical Technology" of the Irkutsk National Research Technical University. At the end of the first year, students have an internship at petrochemical plants, an excursion, acquaintance with functional units and equipment. However, some plants are located at a great distance from the city of Irkutsk, VR / AR technologies will allow you to dive into the production, being thousands of kilometers from the actual location of the plant. Practice can be taken directly from the place of training from a specially equipped auditorium.

To create a training platform for students of the fuel and energy complex using VR / AR technologies, it is necessary to develop a program. For this purpose, the VARWIN system is ideal, which allows you to learn how to create programs for using augmented and virtual reality.

Varwin Education provides features such as a 3D world editor. This allows you to fill the virtual world with objects, in the case of tours of production, to fill virtual tours with realistic factory premises, that is, to arrange equipment, industrial buildings. With the help of the editor, you can place objects in the right place, transform and set the basic properties of physics, material and interaction of students with the world augmented by virtuality.

Visual programming language. When the scene is filled with objects, the visual logic editor will help you create scripts for what happens in the application. Use simple puzzle blocks to assemble the use cases. And immediately test the result: recompilation takes a couple of seconds.

Built-in libraries for creating VR projects on subjects. The Varwin Education license includes packages with ready-made objects and scene templates by subject.

Ability to upload and use third-party 3D models in the project. Import third-party 3D models into your Varwin Education project, place them on the stage and use them in logic along with pre-installed objects.

In the course of studying the issue, we created a cost estimate for the development and implementation of a program for the introduction of VR & AR technologies in the process of teaching students and staff.

Table 2. Cost estimates for program development and implementation

Equipment and services	Prices
15.6" Notebook ASUS TUF Dash F15 FX516PC-HN558 gray	149990 rub
VIVE Pro 2 Virtual Reality System Full kit	78199 rub
VARWIN license 1 year	35000 rub
Outcome::	263189 rubles

Thus, the development of a laboratory project using VR and AR technologies for teaching students of fuel and energy specialties has a number of important features: it combines technologies into a single laboratory as a tool in the process of teaching students; provides students with the opportunity

to continue working in their own development projects of the laboratory. Also, the laboratory becomes a link between students and fuel and energy companies interested in personnel and the introduction of 4.0 technologies.

#### LITERATURE:

1. Vasenkov D.V. Methods of training artificial neural networks //Computer tools in education, 2007. – No. 1. – pp. 20-29.
2. Golovko V.A. et al. Integration of artificial neural networks with knowledge bases //Design ontology, 2018. – T. 8. – №. 3 (29). – Pp. 366-386.
3. Jane A.K., Mao J., Moiuddin K.M. Introduction to artificial neural networks //Computer, 1996. – Vol. 29. – No. 3. – pp. 31-44.
4. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 676 dated July 26, 2017 "On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power transmission lines of electric stations and electric networks" // Collection of Legislation of the Russian Federation, 2020 – No.52.
5. Sambulova M.Yu., Zaikova A.P., Shulunova T.A. Artificial intelligence and engineering business // Actual research, 2022. – №. 19(98). – Pp. 46-48.
6. Sambulova M.Yu. VR and AR-technologies in the fuel and energy complex // Current research, 2022. – №. 29 (108). – Pp. 18-20.
7. Khalyasmaa A. I. et al. Diagnostics of electrical equipment of power stations and substations: a textbook, 2015.
8. Yasnitskiy L.N., Cherepanov F.M. Artificial Intelligence. 2012.

Scientific supervisor: Candidate of Technical Sciences V.Y.Konyukhov, Professor of the Department of Automation and Control of INRTU.

### **CASE STUDY IN THE CONTEXT OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION OF GEOLOGISTS**

M.M. Tsyplenko  
Tomsk polytechnic university  
School of Earth Sciences & Engineering, Department of Geology, postgraduate student of group A2-72

The development of case methods plays an important role in the framework of the educational process, including the training of geological specialists. Geology as a fundamental science has a vast theoretical base, the useful application of which requires constant training. Such a training for students can be a case-competition which can help them to apply newly learned knowledge and skills to data, to develop additional ideas and study questions for future studies. There are different variations and examples on case-studies connected with geological sciences such as:

- Searching data observations from a published papers;
- Recent and timely geological events;
- Social responsibility as a geologist;
- Events, problems and hazards affecting local territory;
- Scientific debates on geological problems.

Learning through the task "without a correct answer" allows us to view from a different angle on knowledge, gained before, as well as independently determine what knowledge and information is still needed to correctly provide the unique solution to a specific geological problem. Case studies is a useful research tool, but it is necessary to use them wisely.

The best way to organize a case study is to work in small groups, in which each of the participants will perform certain tasks and share experience with class mates.

To organize information, it is very useful to draw up mind maps (figure 1). Such maps can be absolutely diverse, depending on the task. For example, the fundamental factor may not be the area, but the type of mineral.

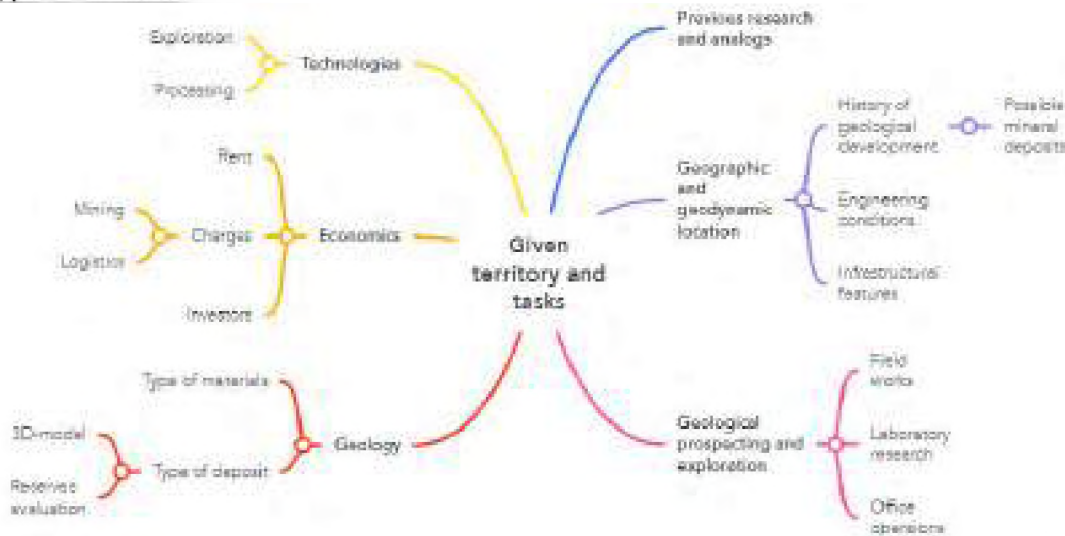


Fig. 1. Example of a mind map for geological case

First of all, it is important that the tasks of the cases are close to real production situations, including the lack of information about the object, errors in filling out field documentation, and drawing up plans as when learning occurs around a real problem, material is better retained and can be applied to another situation. Such aspects are helpful for learning the selection of useful and reliable information and require students to consider various perspectives and think critically about potential solutions.

An analysis of previously conducted works involves working with literature and authentic data, which can help substantiate the prospects of a given territory.

With the repeated conduct of cases involving various territories, types of minerals, forms of occurrence of ore bodies, a geological outlook and erudition are developed, which, in the future, helps students and specialists to analogize and offer ideas that are non-standard for such objects. Moreover, the repeated and systematic practice solidifies knowledge and long-term retention of skills.

The third positive aspect is the improving of competencies in the use of digital information systems: starting from the search for maps of a smaller scale to determine the regional geological features of the territory, ending with the construction of complex 3D models with automatic calculation of mineral reserves.

In combination with a three-dimensional view of the proposed object, used the procedure for composing a plan of geological exploration, the distinguishing feature of which is a strict sequence.

When planning exploration work, both classical and innovative methods of geophysical and mining operations are studied.

Then, when the student or team face the task of commodity-value assessment of production, it is required to collect the most up-to-date information about the demand, cost and availability of processing of the ore into an intermediate stage or final product. Such an analysis allows to convert knowledge gained from sciences such as mineralogy, petrography, chemistry etc. into a range of useful production competencies. Using various methods, the vocabulary and skills students practice to be real scientists. This process is very important for the future specialist to realize his place and his own knowledge in the profession.

The analysis of logistics for the resource movement from the place of production to the processing site, and subsequently, to the consumer, allows you to study with the state of infrastructure at the time point and plans for its development in the near future. This affects such important parameters

as the cost of raw materials, the payback of the project and the timing of its implementation from the very beginning to the final liquidation. An important part of the case solution is the preparation and presentation: graphics, numbers and text have to be on the right places. It improves public speaking skills. If you have a large class you may use different options for this within the case:

- to break the class into groups and give each group a part of a case to work in collaboration;
- to use a jigsaw, dividing the case study into “puzzle” pieces and teams of students study their individual pieces and then regroup to tackle a group question and to put the full case together;
- to use one-minute papers to get all students participating in the discussion and help them to make a self-assessment.

In general, solving cases helps students to prepare for work in production both methodologically (facilitates quick learning and immersion in the specifics of work) and psychologically. It could be also useful to incorporate short cases in the semester to help students to practice working in groups, brainstorming, and discussing before starting extended cases.

Therefore, the solution of cases is an activity on the verge of science and fantasy, an analysis of the past and an approximation of the future for a complete immersion in reality...

#### LITERATURE:

1. Heale R., Twycross A. What is a case study? //Evidence-based nursing, 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 7-8.
2. Yin R. K. Case study methods. – 2012.
3. Knödel K., Lange G., Voigt H. J. Environmental geology: handbook of field methods and case studies. – Springer Science & Business Media, 2007.
4. Thomas G. How to do your case study //How to Do Your Case Study. – 2021. – С. 1-320.
5. Galaktionova N. A., Gorbunov P. A., Tolstoukhova I. V. Case method as a modern technology for professional training of students in geology // Ped.Rev. 2018. No. 4 (22).

Academic advisors: candidate of philology Liudmila M. Bolsunovskaya, associate professor of the Division for Foreign Languages, Core Engineering School, TPU, doctor of geological and mineralogical sciences Egor G. Yazikov, Professor of the Geology Department, School of Earth Sciences and Engineering, TPU.

## РОЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО И ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ

Д.Д. Суханов, М.И. Бердыева, В.Н. Бакшаев  
Международный университет нефти и газа

**Аннотация.** Новейшие методы изучения полевых геофизических структур определяют использования сложного математического аппарата. Решение нетривиальных задач требует нетривиальных методов подготовки будущих инженеров, включая современные психотехнологии и физическую подготовку.

**Ключевые слова:** Объект исследований, предмет исследований, наукоемкость, психотехнологии, деконцентрация, фоновое мышление, базовые знания, настольный теннис, концентрация, инсайт, триггер.

Бегназарова Наргюль – серебряный призер межвузовских республиканских соревнований по настольному теннису в личном разряде, чемпионка страны в парных играх. Она – будущий инженер-геофизик, ныне – студентка третьего курса факультета геологии Международного университета нефти и газа им. Ягшигельды Какаева.

Сложности в подготовке современного геофизика обусловлены особенностями предмета изучения.

Геофизика – наука междисциплинарная. Она имеет отношение практически ко всем наукам о Земле.

Геофизика появилась как самостоятельная дисциплина в 19 веке на пересечении физики, геологии, метеорологии, физической географии и астрономии.

Геофизика – наука о строении, физических свойствах и процессах, происходящих в твердой, жидкой и газообразной оболочках Земли. Задача геофизики – получение надежных, подтвержденных практикой сведений о недрах Земли, водной и воздушной оболочек нашей планеты; изучение происхождения и развития Земли.

Объект исследований геофизики – Земной шар в целом: земная кора, гидросфера, атмосфера и их сложнейшие взаимодействия. Исследуется и влияние ближнего космоса.

Геофизика находится на стыке ключевых естественных и точных наук. Имеет с ними общие объекты исследований. Но предметы исследований различаются.

Предмет исследования геологических методов – минералы, породы, глобальные структуры.

Предмет исследования гидрогеологических методов – подземные воды.

Предмет исследования геофизических методов – полевые структуры – физические поля и их свойства.

Например, отслеживая скорости распространения наведенной сейсмической волны в земной толще, мы можем многое сказать о залегании геологических слоев исследуемой территории. Сейсморазведка используется и гидрогеологами для определения структуры залегания подземных вод.

Геофизика изучает объект по тонким «следам», оставленным этим объектом в окружающей среде. Это подобно невероятно сложному детективу.

Дополняя прямые подходы названных наук косвенными, геофизика повышает тем самым их информативность, наукоемкость, привнося в них сложную аппаратную базу. Новые условия ставят перед необходимостью использования сложного математического аппарата. Физические эксперименты, подтверждающие теоретические наработки, также требуют высоких профессиональных качеств исследователей.

Объем информации, необходимый студентам для проработки, огромен. Для освоения материала нужно привлекать дополнительные ресурсы мозга.

Катастрофическая нехватка времени для обработки информации при практически полной ее доступности. Философ Мишель де Монтень писал: «Мозг, хорошо устроенный, стоит больше, чем мозг, хорошо наполненный».

Татьяна Черниговская, представитель когнитивной психологии, говорит о необходимости развития комплексного восприятия информации через развитие органов восприятия. Ресурсы мозга безграничны. В наших силах увеличить коэффициент полезного действия его использования. Черниговская опровергает общепринятое мнение физиологов, что мозг – это структура, в составе которой отсутствуют мышцы. Она утверждает, что все мышцы принадлежат мозгу. То есть, в каком-то смысле, мы мыслим всем телом. Нет разделения на «думающую», моторную и чувствующую часть. И, вообще, голова – это самый верхний позвонок, сидящий на «атланте» (первый шейный позвонок), «выдутый» изнутри неведомым «стеклодувом». В нее и на нее Природа поместила практически всю «периферию» – устройства ввода-вывода информации и координационный центр. Так вот, когнитивисты выдвигают гипотезу: чем тоньше «заточено» (извинения за невольную тавтологию и обилие кавычек, т. к. рабочая терминология – в процессе становления) восприятие, тем «гениальнее» мышление. Следовательно, если мозг думает, в том числе, всем телом, необходимо, в том числе, тренировать мышечную, сухожильную, фасциальную и другие системы организма. Необходима психофизиологическая программа-технология, обеспечивающая интерфейс между «физикой» и «психикой» нашего думающего био-скафандра.

В качестве такой программы мы выбрали программу-методику О.Г. Бахтиярова по развитию деконцентрации внимания.

Техника деконцентрации внимания (дКВ) была разработана в 80-е годы в рамках программ подготовки операторов для деятельности *в сложных, неопределенных и экстремальных условиях* [1]. Создатель техники – Олег Георгиевич Бахтияров, очень известный психотехнолог. Олег Георгиевич не претендует на авторство методики. В книге «Активное сознание» он отмечает «ряд соответствий, а иногда и прямых совпадений» своей методики с традиционными практиками. Он подчеркивает, что его технология – это просто техника, свободная от околонуточных и мистических наслоений.

Мы мыслим двумя разными способами. Сфокусированным и рассеянным. Как у фонарика с двумя режимами. При одном – сфокусированный луч четко высвечивает ограниченное пространство, при другом – рассеянный свет освещает большую область пространства без акцентирования на деталях.

У Барбары Оакли [2] – это мышление сфокусированное и мышление рассеянное. У Бахтиярова сфокусированное мышление обозначено как мышление при *концентрации внимания* (КВ), рассеянное – при *деконцентрации внимания* (дКВ). Бахтияров вводит понятия локус внимания и фокус взгляда. Это означает, что можно смотреть, не видя, и видеть, не смотря.

Олег Георгиевич Бахтияров разработал техники, развивающие устойчивый процесс дКВ.

Деконцентрация представляет собой равномерное распределение внимания по всему перцептивному полю. Обычно изучения дКВ начинается с работы с визуальным полем. Приемы, провоцирующие дКВ, используют в качестве начального звена, спонтанные переживания дКВ, возникающие в двух ситуациях – при попытках использования для восприятия периферийных частей поля зрения, для которых характерны восприятия именно фонового типа и при попытках одновременно сосредоточения внимания на 5–9 объектах, ведущих к возникновению кратковременных интервалов дКВ. Этим определяются формы упражнений, направленных на обретение устойчивых навыков дКВ [1].

Основное упражнение, формирующее устойчивое состояние дКВ – просчет двухцветной числовой таблицы Шульте-Горбова (размером 7x7), разработанной по заказу специалистов в области авиакосмической медицины. Вам предлагается таблица с красными и чёрными числами. Ваша задача отыскивать красные и чёрные числа попеременно, причём красные – в убывающем порядке от 25 до 1, а чёрные – в возрастающем от 1 до 24. Упражнение начинается с красных цифр.

В обычных условиях скорость просчета для данного обучаемого является постоянной величиной, с трудом поддающейся тренировке [1].

Субъективно для оператора упражнение состоит из двух стадий. Во время первой стадии сглаживаются, взаимно растворяются, а затем и исчезают цветовые различия (белый, черный, красный). В продолжении второй – числа превращаются в однородный фон, составленный из их фрагментов. Это похоже на процесс «отмывки» при работе с тушью. Здесь многое зависит от типа и размеров шрифта (при мониторе 21 дюйм для черных и красных чисел мы используем шрифт Arial, обычный, 70 пт, для отмеченных чисел – синий цвет, шрифт Arial, обычный, 14 пт, программа из серии «Psy Games»). Когда состояние дКВ достигнуто, взгляд становится стабильным. На продвинутых этапах достаточно стабилизировать взгляд, чтобы «свалиться» в дКВ.

При стабилизированном взоре таблица воспринимается одновременно во всех своих элементах и при выполнении задания происходит не поиск с перебором чисел, а непосредственное выделение числа из общего фона [1]. Таким образом, развивается фоновое мышление.

Барбара Оакли в книге «Думай как математик. Как решать любые задачи быстрее и эффективнее» пишет: «Если вы пытаетесь понять или усвоить что-то новое, то лучше выключить точное сфокусированное мышление и включить рассеянный режим, позволяющий видеть широкую картину – на столько времени, сколько понадобится для поиска свежего, более продуктивного подхода. Как мы увидим, рассеянное мышление своевольно – ему нельзя приказывать включиться» [2].

Приказать нельзя! Как же его «уговорить»? Оакли уточняет: «Чтобы изучать математику и обращаться с ней творчески, нужно научиться использовать и сфокусированный, и рассеянный способ мышления» [2].

Бахтияров отмечает высокую результативность дКВ при работе с большими объемами информации, а также при необходимости выявления слабых и скрытых признаков процесса. А это уже эвристическое мышление. В данном случае результат использования техники дКВ способствует возникновению навыков трудно достижимых при помощи других техник.

Но настольный теннис – это тоже невероятно мощная и «изошренная» психотехника.

Блистательный математик Григорий Яковлевич Перельман – профессиональный игрок в настольный теннис. В кабинете Григория установлен теннисный тренажер. Это половина теннисного стола, прислоненная к стене. Мыслительная стратегия Григория заключается в следующем. Сначала долгая подготовка, декларирование задачи, загрузка проблемы. Затем «мощный сеанс» у теннисного стола. И фиксация результата. Недаром в недавние времена во всех интеллектуально ориентированных конторах обязательно стоял теннисный стол.

По утверждению Григория доказательство теоремы Пуанкаре – результат «теннисного инсайта».

В работе с Наргюль мы сочетаем развитие навыков деконцентрации внимания по методике О. Г. Бахтиярова с игрой в настольный теннис.

Что дает правильная тренировка теннисисту?

Развивается оперативное и аналитическое мышление.

Ваша подача, например, во многом предопределяет сценарий розыгрыша. Это ваша домашняя заготовка. Но ответные действия соперника вносят стремительные коррективы. Ваша тактика должна быть реактивной и гибкой. Решения приниматься молниеносно. Игрок в состоянии «здесь и сейчас».

Стрессоустойчивость и самоконтроль. Борьба ведется за каждый розыгрыш. Сет быстротечен. На протяжении всей встречи – контроль эмоционального состояния. В результате – развитие самообладания.

Сила воли и самодисциплина. Занятия спортом тренируют не только мышцы, но и волю, хотя механизм их тренинга примерно одинаковый. Регулярность тренировок – необходимое условие высоких результатов. Способность реализации своих целей позволяет ставить перед собой новые, еще более высокие цели. Включается мощная внутренняя мотивация.

Высокая сосредоточенность и концентрация (и деконцентрация) внимания.

А вот здесь интересная интерференционная картинка. У Наргюль после проработки таблиц Шульте-Горбова во время игры появилось новое достаточно четкое ощущение пространства. Это трудно выразить словами. По ее объяснению шарик появляется из «фона», но она точно знает – где он появится и что с ним делать. Вернее, не знает, а просто делает то, что нужно делать лучше всего в данных условиях. Появляется – не значит, что он куда-то пропал или его до этого не было. Наргюль ведет шарик периферией взгляда все время. Контролирует «фон». В дКВ она входит, установив точку зора на уровне чуть выше уровня глаз посередине стола, включив периферийный «видео-режим». Ну точно, как в походке силы у Карлоса Кастанеды [3]. Да и китайские, японские и корейские теннисисты (и бадминтонисты) широко и глубоко используют в своих тренировках техники из арсенала традиционных боевых искусств. У них деконцентрация – это Инь, концентрация – Ян.

Во время игры в настольный теннис невозможно думать о чем-то другом, кроме самой игры. Для других мыслей просто не остается ресурса оперативной памяти. Это «безмыслие» и интенсивная физическая нагрузка снимают эмоциональное напряжение.

Но все вышеописанное, говоря языком математики, условие необходимое, но, отнюдь, не достаточное. Мы лишь настраиваем наш био-инструмент приема-передачи и обработки информации. Необходимо создание базы знаний. А иначе с чем будет работать наш отточенный, проапгрейденный суперприбор. А вот когда студент полностью погрузится в задачу, переработает тонну материала по проблеме, тогда малейшие блестящие озарения (по профессиональной терминологии – триггеры инсайта), проявившиеся из «фона», могут стать решающими для ее решения, причем, оригинального решения.

Невозможно в данной области поставить чистый эксперимент. Какие критерии использовать для формализации и оценки этого процесса? Мы не можем заново «переживать» жизнь



испытуемого, изменяя некоторые параметры при прочих status quo. А что было-бы, если бы этого не было бы? Или вот этого?

Это подобно «черному ящику». Знаем, что на входе, видим, что на выходе. То, что и как происходит в «ящике» – это и есть процесс обучения, процесс эксперимента. А умение уловить связи между входом и выходом – мастерство экспериментатора: педагога, тренера. Самый важный критерий – результат. Периферийное зрение, концентрация внимания, мгновенная «вживаемость» в ситуацию, и самое главное, результативность Наргюль и в учебе, и в спорте значительно улучшились. И это сомнению не подлежит.

Наш эксперимент продолжается ...

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Олег Бахтияров, «Деконцентрация внимания», монография, Киев, ЭКСПИР.
2. Барбара Оакли, «Думай как математик. Как решать любые задачи быстрее и эффективнее», Альпина Паблишер, Москва, 2015.
3. Карлос Кастанеда, «Путешествие в Икстлан», «София», Киев, 1997.

## ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА УГЛОВ ЗАХВАТА КАДРОВ НА КАЧЕСТВО ЦИФРОВОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

А.М. Мугинов

Казанский государственный энергетический университет  
ИТЭ, ЭО-1-21

В данный момент происходит четвёртая промышленная революция, включающая в себя развитие индустрии 4.0 – массовое внедрение киберфизических систем в производство [1]. Другими словами, на нынешний момент цифровизация – это основное направление развития современных производств. Реверсивный инжиниринг – это метод создания цифровых двойников. 3Д сканирование – это частный случай реверсивного инжиниринга, поэтому является важным направлением для научного исследования.

Был рассмотрен 3Д сканер EinScan-SE.

Качество получаемой модели при 3д сканирования на 3Д сканере EinScan-SE зависит от нескольких факторов, например, освещение, цвет детали, форма детали (имеет ли деталь сетчатую форму), количество углов захвата кадра сканируемой детали.

Очевидно, что с числом углов захвата кадров растёт и качество получаемой 3Д модели, однако также увеличивается время, затрачиваемое на сканирования детали. Необходимо найти компромисс между количеством углов захвата кадров и качеством сканирования.

В качестве детали для исследования была взята фигурка, напечатанная на 3Д принтере Anycubic Photon Zero из PLA пластика синего цвета (#205579).

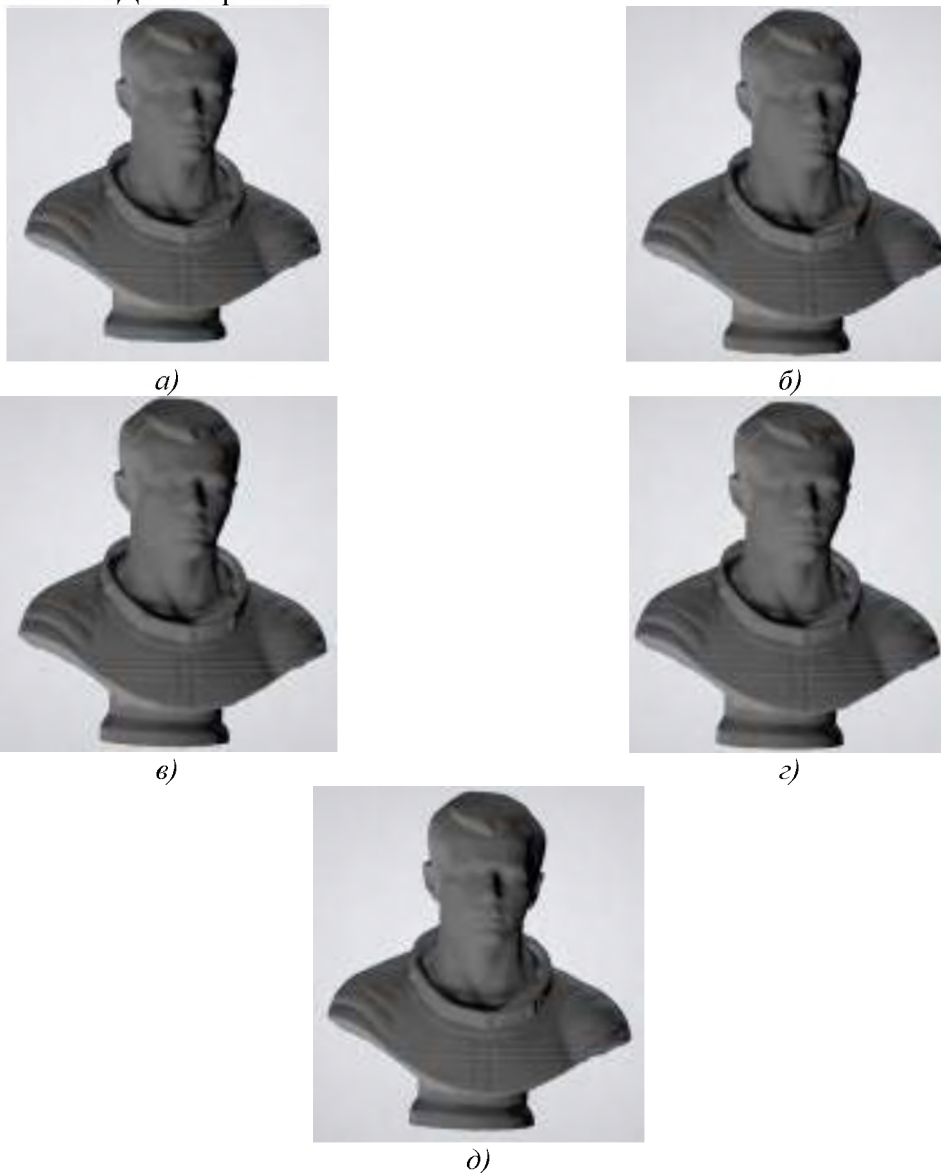


Рис. 1. 3Д сканер EinScan-SE



Рис. 2. Исходная деталь

Была проведена серия сканирований с количеством углов захвата кадра: 8, 9, 18, 27, 36. 8 – это минимальное доступное количество углов захвата кадра, которое можно задействовать при 3Д сканировании 3Д сканером EinScan-SE.



*Рис. 3. Результаты 3D сканирования:*

*а), б), в), г), д) результаты 3Д сканирования при 8, 9, 18, 27, 36 углов захвата кадров соответственно*

Из полученных данных можно сделать вывод, что при сканировании закрытой, без открытых полостей, без сложного рельефа поверхности детали достаточно 8 углов захвата кадра.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Четвёртая промышленная революция: интернет вещей, циркулярная экономика и блокчейн URL: <http://www.furfur.me/furfur/changes/changes/216447-4-aya-promyshlennaya-revolyuksiya> (дата обращения 20.10.2022).

Научный руководитель: к.т.н. В.А. Рукавишников, доцент кафедры ИГ ИЦТЭ КГЭУ.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБУЧЕНИИ ПРИНЦИПАМ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Е.А. Лийн, О.В. Хомутская  
Московский авиационный институт  
Институт № 3 СИУЭЭ, кафедра 307 ЦТИС

На текущий момент, несмотря на повсеместное внедрение технологий Индустрии 4.0, методы обучения организации производства практически не потерпели изменений. Использование уже привычных классических методов преподавания такой дисциплины с каждым годом становится менее эффективным в силу отсутствия возможности оценить студентом на практике преимуществ эффективной организации производства, при учёте перманентного развития производственных ресурсов. В качестве целостного подхода концепция обучения должна фокусироваться не только на принципах бережливого производства, но и на технологиях Индустрии 4.0, а также – на их сочетании. Оптимальным вариантом обучения считается совокупность теоретической наполненности с практическими отработками полученных знаний.

Отработка на практике принципы бережливого производства в обычном представлении является невозможной, так как требует работы непосредственно на предприятиях, что, в свой черёд, влечёт за собой необходимость приложения усилий и принятия больших рисков от предприятий, которые в данном случае будут выполнять роль тренировочных полигонов. Ещё одним вариантом, не менее ресурсозатратным, является создание собственных учебно-тренировочных цехов и фабрик [1]. Недостатком такого подхода остаётся ограниченность системы единой производственной областью. Для более подробного рассмотрения различных типов технологических процессов необходимо создавать дополнительные производственные сегменты под каждую отдельную специфику, что также является невозможным. Однако, современные информационные технологии позволяют создать новые интерактивные методы обучения, которые позволят наглядно и без значительных финансовых вложений преподнести материал.

В процессе обучения студентам необходимо не только освоить теоретический материал, но и понять, как процессы работают в реальном мире, и что за каждое решение приходится иметь дело с последствиями. Ценность обучения определяется прежде всего не столько в количестве полученных знаний, а в качестве и переводе их в плоскость действия и представлении через призму жизненного опыта, что классические методы обучения включают в себя достаточно редко. Для решения данной проблемы предлагается использовать методы геймификации, получившие в последние годы особое внимание в сфере обучения детей. Методика игрового подхода прежде всего направлена на вовлечение обучаемого в научно-познавательную деятельность, с целью не только научить, но и замотивировать на дальнейшее развитие в тематике [2].

Для более глубокого погружения в представленную тематику предлагается разработать методы визуализации для технологических процессов. При помощи внедрения в процесс обучения интерактивного подхода удаётся повысить уровень наглядности демонстрации влияния выполняемых действий с производственным участком, а также возможность пошаговой оценки ситуации на каждом этапе. Именно эти факторы помогут в оценке правильности расстановки оборудования и принятии решений о необходимости оптимизации технологического процесса. Обозначенную проблему возможно решить с помощью применения методов имитационного моделирования к технологическим процессам. Однако подобное решение требует разработки подхода к созданию имитационных моделей технологических процессов, определения образующих модель элементов и взаимосвязей между ними, а также анализа возможных

допущений и накладываемых ограничений для обеспечения адекватности получаемых моделей.

При последовательном подходе первым этапом будет формализация процесса производства. Использование методов генерализации в процессе подготовки имитационной модели позволяет на началах упростить общее видение каждого процесса до сохранения его общей узнаваемости, но исключения максимально возможного количества деталей, что позволяет обратить внимание прежде всего на общую схему и суть работы производственного участка. После разбиения участка на различные процессы и определения каждого внутреннего состояния, определяются последовательные связи между ними. В процессе определения состояний и типов процессов, появляется возможность разнесения каждого классификационного параметра по идентичным группам, за счёт чего, выбрав определённый уровень абстракции, готовую структуру можно наполнить необходимым уровнем конкретики и детализации. Готовая имитационная модель сохраняет в себе вариативность представления системы, как при учёте всех описанных деталей каждого процесса, так и представив их совокупность в виде «чёрного ящика» (рисунок 1).

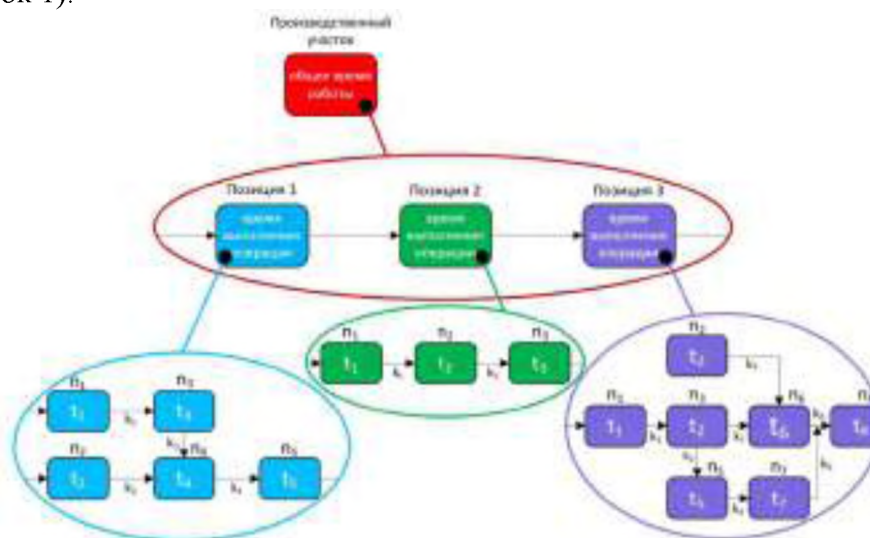


Рис. 1. Производственный участок с разделением на блоки позиций с внутренней составляющей

Для описания работы позиций введены состояния для определения текущей задачи в каждый момент времени, их взаимосвязи и условия переходов описаны при помощи методов конечных автоматов (рисунок 2).

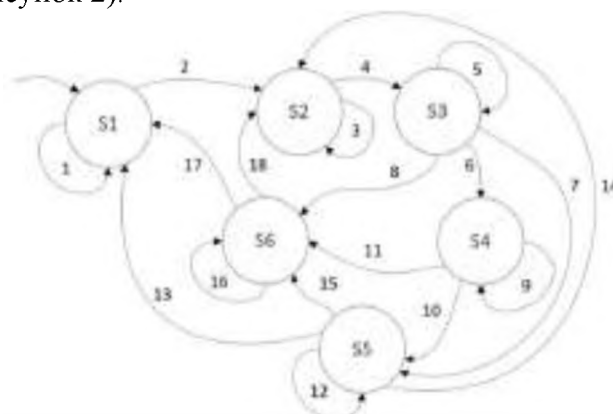


Рис. 2. Диаграмма состояний позиции

Сформированные правила определяют область многообразия моделируемых производственных процессов, разработанная диаграмма состояний определяет, как поведение одной позиции в каждый момент времени, так и возможное изменение этого поведения в процессе работы. Состояние модели в каждый момент времени за определённый период представляется в виде план-графика (рисунок 3а), что позволяет не только визуально оценить эффективность

работы и узкие места, но и провести полноценный анализ работоспособности каждой позиции, правильности расположения их относительно друг друга и количества простоев. При применении системы в совокупности с критериями оптимизации значительно упрощается процесс корректировки параметров производственного участка с целью сокращения потерь (рисунок 3б).

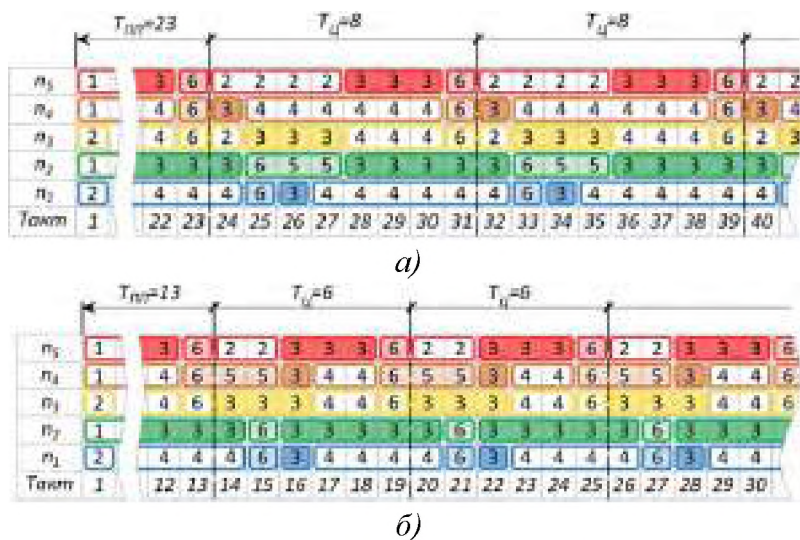


Рис. 3. План график работы:

а) неоптимизированного производственного участка; б) производственного участка после оптимизации

В работе исследована возможность построения имитационных моделей технологических процессов для обеспечения практического обучения методам организации производства. Разработан принцип формализации производства с последующим представлением алгоритма функционирования позиций производственного участка для построения план-графиков. Он позволяет не только наглядно показать узкие места конфигурации моделируемых технологических процессов, но и предоставляет возможности для его улучшения. Данный подход позволяет избежать лишних трудозатрат в оценке производственных процессов и использовать ресурс на цели и задачи организации производства.

Следует отметить, что описанный в работе алгоритм подходит лишь для описания производств с определённой структурой, например, в технологическом процессе недопустимо наличие обратных связей, а также одна позиция может обрабатывать только один вид деталей, однако, данный подход может являться основой для построения полноценной системы моделирования технологических процессов, в которой, с помощью добавления новых взаимосвязей и ограничений, возможно реализовать недостающие элементы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world / С.Prinz, N.Kreggenfeld, В. Kuhlentötter // Procedia Manufacturing, 2018. – V. 23, P. 21-26.
2. Лийн Е.А. Анализ методов оптимизации производственных процессов // Гагаринские чтения – 2022. Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVIII. – Москва: Московский Авиационный Институт, 2022. – С. 261-262.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (МК-582.2022.4).

Научный руководитель: к.т.н. О.В. Хомутская, доцент МАИ.

Научное издание

## **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей

II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции

Компьютерная верстка *Л.В. Савостьянова*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ  
Размещено на корпоративном портале ТПУ  
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета**

---



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ