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

БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Сборник статей
III Всероссийской с международным участием
молодёжной конференции

12–14 декабря 2023 г.

Томск 2023

УДК 621.31(063)
ББК 31л0
Б93

Бутаковские чтения : сборник статей III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Ивашутенко ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2023. − 606 с.

Б93

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

Ивашутенко А.С. – к.т.н., заместитель директора по развитию, ИШЭ ТПУ, председатель
Аршинова О.Ю. – главный технический редактор
Сулайманова В.А. – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Жданова А.О. – к.ф.-м.н., доцент ИШФВП ТПУ
Цибульский С.А. – к.т.н., доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ
Марышева Я.В. – инженер научно-исследовательского центра «Экоэнергетика 4:0» ИШЭ ТПУ
Тютева П.В. – к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Савостьянова Л.В. – к.т.н., зав. лабораторией организационного отдела ИШЭ ТПУ
Шолохова И.И. – ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Гречушников В.В. – ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Секция 1
ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ 15

Цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения
Покацкий М.Ю., Троицкий Е.Д. 15

Оценка перспективы использования систем накопления энергии в задачах регулирования частоты в электроэнергетических системах
Солодников Н.А. 16

Дифференциальная защита трансформатора на основе нейронной сети
Гусаров И.Н. 21

Объединение алгоритмов виртуального синхронного генератора и блока синтетической инерции с целью повышения динамической устойчивости
Радько П.П., Бай Ю.Д. 25

Перспектива использования дифференциальной и дистанционной релейной защиты в линиях 6–35 кВ
Николаев Д.С. 30

Опыт реализации быстродействующей логической защиты линии
Белкин В.Г. 32

Виртуальная инерция в современных энергосистемах
Сарнаков Д.Д. 35

Синхронизация microgrid с внешней изолированной энергосистемой
Киргизалиев Т.А. 38

Использование LVRT характеристик для устойчивости сети
Хромов М.В. 41

Влияние внедрения ВИЭ на параметры ЭЭС
Десятов А.В. 43

Роль автоматизации и контроля несимметрии напряжения в устойчивости процессов сталеплавильных печей
Холихматов Б.Б. 46

Цифровая расчетная модель изолированной энергосистемы нефтегазоконденсатного месторождения
Березный П.В., Федькин А.С., Хошбекян С.М. 49

Автоматизация управления электроснабжением линейных потребителей протяженных нефтепроводов
Корецкая Я.В. 54

Использование языка программирования Python для задач электроэнергетики
Стулей Е.О., Космынина Н.М. 57

Расчёт генерируемой электрической энергии солнечными панелями на сутки вперед
Кузнецов Д.М. 61

Основные проблемы распределительных сетей 6–10 кВ
Шахнович Д.И. 63

Prospects for the development of digital control and protection systems in the energy system of uzbekistan
Melikuziev M.V. 66
Схема выдачи мощности Брест-300
Шадрин А.В. 70
Проблемы отстройки релейной защиты в протяженных линиях электропередач 6(10) кВ
Князев Н.Ю. 72
Исследование работы системы управления виртуального синхронного генератора на базе СНЭЭ
Иванов Н.С. 75
Энергетический менеджмент в современной нефтедобывающей компании
Дементьев Р.А. 78
Экспериментальное исследование электроприводов по схеме «ведущий-ведомый»
Шевченко Д.Е., Баженов Е.С. 81
Динамическая модель расчета оборотов турбогенератора с использованием кодогенератора CMS
Кузитенко М.В. 84
Интерпретация результатов модального анализа для изучения динамических свойств энергосистем при интеграции в них возобновляемых источников энергии
Малюта Б.Д. 87
Анализ влияния объектов виэ на колебательную устойчивость ЭЭС
Малькова Я.Ю. 90
Обзор и сравнение характеристик блоков микропроцессорной релейной защиты компаний, разрабатывающих устройства релейной защиты и автоматики
Нефедов В.М. 93
Прогнозирование потерь электроэнергии в распределительных сетях на основе нейронных сетей
Бибиков В.Д. 96
Определение и классификация видов устойчивости для современных энергосистем. Зарубежный опыт
Старостин М.И. 100
Вероятностный расчёт установившихся режимов электроэнергетических систем методом Монте-Карло
Ефремов М.А., Ручкина А.Д. 103
Исследование качества электрической энергии в сети 0,4 кВ с нелинейной нагрузкой
Валеева Е.Ю. 106
Дистанционное управление энергообъектами. проведение испытаний готовности к дистанционному управлению
Томалев А.А. 111
Обзор методов расчета времени до насыщения трансформатора тока и коррекции их вторичного тока
Татаринов В.Ю. 113
Алгоритмы управления сетевым инвертором на основе виртуального синхронного генератора
Аскаров А.Б. 116
Разработка физической модели и системы управления силовым преобразователем возобновляемых источников энергии
Бай Ю.Д., Радько П.П., Малюта Б.Д. 118
Система охлаждения солнечных панелей на базе ARDUINO
Сорогин А.С. 122

Интеллектуальные подстанции – ключевой элемент цифровой трансформации электросетей
Валюк А.С. 125
Цифровизация и оптимизация управления центробежными насосными агрегатами
Калинкин Я.В. 127
Интеграция возобновляемых источников энергии в электроэнергетическую систему: проблемы и пути их преодоления
Кулькова О.Д., Малькова Я.Ю. 130
Автоматизированное проектирование 3D-моделей рабочего колеса центробежного насоса с помощью NXOpen API
Стасеев А.А., Харитонов М.Ю. 134
Оптимизация потребления ресурсов системой отопления
Иванова А.А., Лягоцкий М.В. 136
Digitalization of energy consumption monitoring systems: current status and prospects
Kurbonov N.N. 139
Анализ влияния изменений физико-механических свойств графита на выбор типа захвата для извлечения графитовых блоков
Риф А.Э. 141
Прогнозирование и планирование потребления электроэнергии энергосбытовыми организациями
Бец А.В., Григорьева Т.А. 145
Разработка новых элементов в программном обеспечении «САПФИР» с использованием теплогидравлического кодогенератора AMS
Крылов М.Э. 148
Methods of teaching technical subjects using artificial intelligence
Kurbonov N.N., Kurbonova R.Sh. 150
Структура и особенности управления нейрорегуляторами
Поснов Д.Д., Токарев А.Д. 152
Моделирование дифференциально-фазной защиты в среде MATLAB
Исоев М.С. 154
Разработка метода частичных разрядов для диагностики изоляции силовых трансформаторов
Лоиков Н.М. 159

Секция 2
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ 162

Влияние геометрических размеров круглого ребра на тепловую эффективность теплообменника при конденсация парогазовой смеси
Бадретдинова Г.Р. 162
Определение характеристик горения и антропогенных выбросов капель водомазутных топлив при добавлении специализированных присадок
Клименко А., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. 165
Новый подход к созданию поверхностей с экстремальными свойствами смачиваемости
Дорожкин А.В., Бондарчук С.П., Котельников Г.Е. 167
Характеристики и условия воспламенения влажных угольных частиц в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов
Косторева Ж.А., Омаров А.А., Сыродой С.В. 169

Измерение температуры гидратного пласта с использованием Planar Laser Induced Fluorescence
Подгорная Е.Р., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. 171

Зажигание водоугольных топлив в условиях радиационно-конвективно-микроволнового нагрева
Малышев Д.Ю., Тамашевич М.С. 174

Анализ влияния числа Вебера на характеристики и условия дробления одиночной капли ВУТ
Замалтдинов Р.Р., Акимов В.С. 176

Характеристики и условия диспергирования капель водоугольного топлива при косом ударе о подложку
Замалтдинов Р.Р., Акимов В.С., Сыродой С.В. 177

Оценка возможности сдвига кризиса теплообмена при охлаждении поверхностей энергонасыщенного оборудования капельным орошением
Козловский Д.С., Лага Е.Ю. 179

Испарение капель жидкости на поверхностях металлов
Тимофеева О.Б., Гулькин К.Н., Бондарчук С.П., Лага Е.Ю. 181

Поверхностные свойства керамики SiC, текстурированной лазерным излучением
Плюснина М.А., Гулькин К.Н., Котельников Г.Е., Дорожкин А.В. 183

Характеристики зажигания и горения композиционных топлив на основе отходов нефтедобывающей отрасли
Карташова К.А., Романов Д.С., Няшина Г.С. 186

Влияние обогрева нескольких рабочих зон газовым инфракрасным обогревателем на тепловой режим помещения
Вяткин А.В. 190

Влияние способа приготовления на характеристики зажигания и горения смесей пиролизной жидкости с углем
Асильбеков А.К. 193

Применение параллельных вычислительных технологий для численного моделирования процессов тепломассопереноса в лесном горючем материале
Вяткина В.А. 195

Ликвидация возгораний с применением самосрабатывающего устройства, содержащего гидрат углекислого газа
Забелин И.В., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. 198

Определение условий эффективной диссоциации гидрата диоксида углерода
Школа М.В., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. 202

Окисление нанопорошков металлов на основе Al и Al-Cu при нагреве в воздухе
Теплов Д.В., Коротких А.Г. 205

The influence of the electron beam treatment on aluminum and iron nanopowders
Badamasi N.M. 208

Структура потока воздуха в зоне действия газового инфракрасного излучателя
Салихов Ф.Ю., Салагаев С.О. 210

Определение концентрации диоксида углерода в зоне влияния газового инфракрасного излучателя
Салихов Ф.Ю., Салагаев С.О. 213

Соударение капель и частиц компонентов водомасляных суспензий
Шуляев С.А. 216

Имитационное моделирование динамического микроклимата для помещения с энергоэффективными оконными блоками
Парфенов Г.И., Абышкин М.О. 218

Исследование процессов зажигания и горения топливных пеллет, выполненных из различных пород древесины
Губин А.В., Ларионов К.Б. 222
Модель термической ионизации молекул углекислого газа в пламени
Баршутина Д.С. 225
Advancing techniques for predicting heat and mass transfer performance in energy devices
Ketter E.K. 228
Параллельная реализация алгоритма расчета воздействия лесных пожаров на объекты инфраструктуры
Малинин А.О. 231
Разработка и экспериментальное исследование систем измерения температуры электродвигателей
Посаднов А.Е., Малышенков В.Д., Исаев В.С. 235
Сжигание непроектного топлива в топочной камере котельной установки мощностью 150 МВт
Абрамов Н.В. 237
Причины микровзрывного диспергирования капель теплоносителей с точки зрения термодинамики смачивания и двухкомпонентной поверхностной энергии веществ
Лага Е.Ю., Клепиков Д.М., Котельников Г.Е., Бондарчук С.П. 239

Секция 3
ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ 243

Меры снижения износа поверхностей нагрева в топках котлов с циркулирующим кипящим слоем
Пузырёв С.А. 243
Нижне-Свирская ГЭС: историческое наследие и современное состояние
Салюков В.С., Космынина Н.М. 247
Влияние изменения сопротивления регенератора на характеристики замкнутой атомной гту с водородным комплексом
Стецов Н.В. 249
Устранение дефектов в тепломеханическом оборудовании с помощью метода радиотрейсинг
Дадашов Р.В., Стецов Н.В. 253
Применение системы безмазутного розжига для воспламенения лигнитов
Почтарь А.С., Виноградов С.В. 256
Оценка эффективности работы градирен одной из кузбасских ТЭЦ
Горина В.З., Тараймович В.А., Темникова Е.Ю. 258
Effect of power excursion on the thermal characteristics of VVER-1200 reactor
Odii C.J., Korotkikh A.G. 261
Системы тригенерации на основе газовых турбин
Вьюгова К.Д. 264
Технологии обеспечения установленых параметров котельных агрегатов
Горячев В.Г., Бирюков Е.А. 267
Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны при армировании сталефибробетоном
Дьячук Е.В. 269
Моделирование производства тепловой энергии в темповой форме записи
Ермакова А.А. 270

Автономные источники энергоснабжения в системе ЖКХ
Газизова Р.Н. 274
Методика подбора оптимального расходомера воды на тепловой электростанции методом TOPSIS
Погодаев М.И. 277
Разработка имитационной модели подогревателя низкого давления
Степин И.А. 282
Применение воздушных сопел для формирования вертикального вихря в камерной топке
Мальцев К.И. 284

Секция 4
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ 287

Био-угольные топливные композиции: эффективность применения в технологиях СВЧ-пиролиза
Калинич И., Табакаев Р.Б. 287
Дозовая нагрузка нейтронного излучения модифицированного ядерного топлива ВВЭР
Веретенников Д.Г. 290
Антропогенные выбросы при сжигании композиционных топлив на основе нефтешлама
Шведов Д.К., Дорохов В.В. 293
Способы обращения с твёрдыми радиоактивными отходами низкой и средней активности
Маленко Д.И., Самохина Е.А. 296
Способы обращения с отработавшим реакторным графитом
Самохина Е.А., Маленко Д.И. 299
Утилизация углекислого газа в плазме дугового разряда
Кротик А.Д. 302
Получение порошка карбида хрома в плазме дугового разряда с применением углерода, полученного при плазменной газификации отходов нефтяной промышленности
Поваляев П.В., Франщина Е.В., Егорова В.В. 304
Modeling of the influence of turbulence diffusion coefficient and wind speed on the volumetric activity of the vertical profile of radon and its progeny
Yeboah E., Yakovlev G.A. 307
Проблематика переработки солнечных панелей
Горшков А.С., Губин А.В., Губин В.Е. 310
Влияние дисперсности отходов на процесс совместного пиролиза
Горшков А.С., Ларионов К.Б., Губин В.Е. 312
Утилизация пирогенетической жидкости в составе водоугольного топлива
Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б., Губин В.Е. 313
О возможности использования углерода, полученного из автомобильных покрышек, в процессе плазменного синтеза карбида бора
Болатова Ж.С., Герасимов Р.Д., Васильева Ю.З. 315
Подход к производству биотоплива из рапсового масла с использованием наномембранного реактора лабораторного масштаба
Чоботова В.М., Пискунова А.Е., Хомутов Н.А. 317
Анализ горения и состава дымовых газов при сжигании биотоплива, получаемого наномембранным способом
Дюпин А.А., Ашихмин А.Е., Верходанов Д.А. 320
Синтез карбида кремния резистивным методом на модернизированной лабораторной установке
Власов А.В., Лавренчук А.А. 324

Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния предприятии угольной промышленности с помощью мхов-трансплантатов
Татаринцева М.А. 327

Актиации процесса горения каменного угля нитратом железа и отходами металлопрокатного производства
Шуатаев М.К., Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б. 330

Методы уменьшения влияния магнитных полей на организм человека
Рогова И.А. 332

Термическая конверсия смесевых торфо-древесных топлив с получением полезных продуктов
Берикболов А.К., Мисюкова А.Д., Янковский С.А. 335

Экологические аспекты пожарной безопасности на нефтеперерабатывающих заводах
Эльман К.А. 340

Секвестирование оксида азота при сжигании влажных углей
Косторева Ж.А., Омаров А.А., Елеусизов А.Г. 343

Возможности рециклинга и переработки материалов лопастей ветроэнергетических установок
Богданова А.Н. 344

Оценка коэффициента собственных нужд для цикла Allam-Z на основе сверхкритического CO_2
Корепанова Е.М. 347

Переработка асфальтенов тяжелой нефти методом высокотемпературной обработки в полезные углеродные материалы
Егорова В.В., Поваляев П.В. 349

Разработка энергоэффективного пылеуловительного устройства с дугообразными элементами
Гильмутдинова Р.И. 353

Эффективность использования альтернативных источников энергии в разрезе мощности, экономики и экологии
Эйстрах Н.В. 355

Утилизация зол тэц при производстве строительных материалов
Пасечников Ю.В. 358

Экспериментальные исследования влияния температуры на процесс переработки полистирола в среде суб- и сверхкритической воды
Каримов Т.М., Гильмутдинов И.И. 360

Механизм реакции электрохимического получения водорода с использованием тиосемикарбазонового комплекса в качестве катализатора
Логвинов Д.А., Баранникова А.С. 363

Анализ влияния ввода озонированного воздуха в топливосжигающее устройство турбоустановки на эмиссию монооксида углерода
Маспанов С.Н. 366

Обоснование состава древесноугольных композиций приминительно к термической переработке
Димитрюк И.Д., Жованик И.А. 369

Анализ выбросов CO_2 на объектах генерации на примере Республики Беларусь
Сильванович М.А., Пильковская М.Р., Мелькова А.С. 372

Секция 5
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....374

Оптимизация систем автономного электроснабжения деревень Линдозеро и Юстозеро
Чернышова М.Д.....374

Увеличение отключающей способности высоковольтного вакуумного выключателя с помощью аксиального магнитного поля
Шабуров С.Ю., Никитенко О.В., Конькова Л.А. 377

Оптимизация процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции
Борисов А.В. 380

Искровое плазменное спекание композитов с алюминиевой матрицей
Кобесов А., Насырбаев А., Циммерман А.И. 382

Снижение коммутационных пульсаций электромагнитного момента БДПТ
Ульянов Д.И.....385

Получение водорода методом электролиза
Гильмутдинова Р.И. 388

Система транспортировки информационных сообщений на основе протяженных сенсорных сетей
Малаева Е.Д. 390

Моделирование динамических процессов каскада ГЭС традиционными и высокоуровневыми средами
Сидорова А.В.....393

Рассмотрение актуальных тепловых схем цикла Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода
Избяков Н.С., Гун Бовэнь, Барсков В.В. 397

Применение аддитивных технологий при создании новых конструкций погружных электродвигателей
Хнычев Д.А.....400

Анализ силовых трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками с функцией ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях
Галеев Р.Г., Поскачин Н.О. 403

Система питания преобразователя сетевого регулятора для управления активной и реактивной мощностями в сети
Чичков А.Е. 407

Современные отечественные термопластичные эластомеры для судовых кабелей
Жульмина М.Д.....409

Связь между током и напряжением в машинах переменного тока при изменении нагрузки
Боронова К.С., Шутемов С.В. 413

Программно-аппаратный комплекс для мониторинга межвитковой изоляции и контактных групп силового трансформатора
Абрамова Ю.Г.....416

Разработка роботизированного комплекса для мониторинга и ремонта ЛЭП под напряжением
Малаева, Е.Д. Давлетшин Р.Р.....418

Влияние устройств плавного пуска асинхронных электродвигателей на работу системы электроснабжения
Жегалин А.Ю.....420

Оценка регулирующего эффекта нагрузки по частоте при росте мощности преобразовательной техники
Блинников М.Е. 423
Пассивация и удаление отложений в системе отопления
Иванкив Е.Р. 426
Датчик для мониторинга состояния изоляции концевых муфт силовых кабелей
Сагиров В.Р. 429
Рациональный выбор способа розжига камер сгорания газотурбинных и топок котлов паротурбинных установок
Маспанов С.Н. 431
Использование эффекта электроимпульсного воздействия на вещества в очистке питьевой воды
Мингажева Ю.Г. 434
Исследование способа диагностики частичных разрядов по коммутационным процессам электрической сети
Кузякин А.В. 436
Метод выявления эксцентриситета ротора синхронного генератора по внешнему магнитному полю
Грачев И.А. 438
Система автоматического регулирования перемещения антенной установки
Иванов Н.С. 440
План и методика проведения эксперимента для комплексной оценки свойств и характеристик магнитных жидкостей
Бакланов В.Д. 445
Моделирование вакуумного выключателя в программной среде MATLAB
Патокин И.С. 448
Оценка теплового состояния кабельных изделий при вакууме
Здорникова В.П. 450
Вопросы изолирования бортовых проводов с токопроводящей жилой из алюминиевых сплавов
Харитонова К.А., Блинова Е.В. 453

Секция 6
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ 455

Энергоэффективная ДЭС с аккумуляторным накопителем электроэнергии
Орешков Д.Г. 455
Энергоэффективность устройства для получения порошка высокоэнтропийных карбидов
Свинухова А.А., Корчагина А.П. 457
Повышение точности уравнения обратных часов на основе актуальных библиотек нуклидов
Дадашов Р.В. 460
Энергоэффективный плазменный метод получения карбида бора
Кузнецова А.А., Васильева Ю.З., Поваляев П.В. 463
Безвакуумный электродуговой синтез и его энергоемкость в сравнении с синтезом в вакуумной печи
Кокорина А.И., Свинухова А.А., Мисюкова А.Д., Поваляев П.В. 465
Получение водорода при использовании электрокаталитических материалов на основе карбида кремния
Суховеев А.А. 467

Применение гидрата метана для интенсификации горения композиционного жидкого топлива
Нагибин П.С., Шлегель Н.Е. 469
CFD-моделирование воздушного потока для экономии электроэнергии при подаче дутьевого воздуха в горелки котла ТГМЕ 464
Горбунов С.В. 473
Изменение теплопритоков к геотермальному теплообменнику в условиях наличия испарения в его засыпке
Шелемехова С.Д., Любивый Е.В., Смоляков Д.Д. 475
Исследования проблем и методов управления тепловыделением в силовой электронике электроприводов
Димитрюк Д.В. 478
Утилизация теплоты и пара на выходе котла-утилизатора $К_{гпу}$ с вводом пара в камеру сгорания
Болдушевский Е.С., Туболев А.А., Галашов Н.Н. 481
Использование виэ для повышения энергоэффективности систем электроснабжения в северных регионах России
Рамазанова Р.И. 484
Алгоритм расчета поверхностного теплоутилизатора
Болдушевский Е.С., Туболев А.А., Галашов Н.Н. 486
Nanomaterials composed of Ag-modified G-C3N4 for use in energy and environmental applications
Maltseva I.V., Smirnov I.S., Piarnits D.Yu. 490
Способ термостабилизации грунта за счет круглогодичного регулирования теплопередачи
Клоков А.В., Бахмадов А.В. 494
Влияние солнечной радиации на потребляемую зданием тепловую энергию
Колосов М.В., Шишкова Е.Е., Липовка Ю.Л. 497
Применение российского программного обеспечения RENGA для создания цифровой модели системы теплоснабжения жилого здания
Даминов Р.Р., Хисамиев Б.Р., Хуснутдинова А.Р. 501
Оценка результативности применения тепловых утилизаторов в вентиляционных системах с целью оптимизации переноса тепла
Колотилкина К.В. 503
Перспективы развития метода усиления сталефибробетоном железобетонную конструкцию
Дьячук Е.В. 507
Влияние пористых вставок из керамики на теплообмен в канале
Сабирова Ю.Ф. 509
Влияние пористых металлических вставок на теплообмен в канале
Сабирова Ю.Ф. 511
Воровство электроэнергии и пути его минимизации в Алтайском крае
Куликов С.Ю. 513
Повышение энергоэффективности погружного электронасоса методом численной оптимизации
Горбатов Д.А. 515
Повышение и интенсификация параметров теплообмена применением оптимального варианта кольцевого внутреннего оребрения трубы
Любимов П.В. 518
Высокотемпературный сверхпроводниковый мотор/генератор для кинетического накопителя энергии
Кущенко Е.А. 522

Применение метода импульсного дефектографирования для контроля частичных разрядов в высоковольтной изоляции
Литунов Р.А. 525
Водородный транспорт: реализация инновационных технологий
Макуева Д.А., Разакова Р.И. 527

Секция 7
НОВАЦИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ 530

Метод кейсов при обучении высшей математике в техническом университете
Проскуряков М.А. 530
Исследование эмпирических формул коэффициента теплоотдачи с целью применения для расчета интенсификации теплообмена
Цыбочкина Ю.С. 532
Влияние инженерных кейсов на образовательный процесс
Барковская А.А. 535
Подходы к взаимодействию с отраслевыми лидерами на инновационной основе
Черных А.А., Воронцова Е.С. 538
Преимущества и недостатки виртуальной реальности как метода и средства обучения студентов инженерных специальностей
Никитенко О.В., Шабуров С.Ю. 540
Сравнение дву- и трехмерной моделей естественной конвекции в замкнутых областях при наличии реберной структуры
Лэ Суан Хоанг Кхоа 542
Prospects for the development of geothermal energy in the tomsk region
Kulikov K.D., Lavrinenko S.V., Tsybulsky S.A. 546
Стенд для исследования фильтра Калмана в системе управления мультикоптером, смоделированным в среде MATLAB
Хай Фам Чонг, Гунько А.М., Батомункуев Б.И., Салмин А.И. 549
Проект диагностики и защиты климата от воздействия потребления энергетических ресурсов
Альчимбаева А.М. 552
Применение математических функций Excel для решения задач естественной конвекции
Смирнов Д.А. 554
Обучение студентов иностранному языку в условиях конкурирующих когнитивных программ
Мерлицкая О.А., Жукова В.В., Копырина В.М. 556
Формирование аутентичной языковой личности при обучении иностранному языку
Меньщикова А.А. 558
Принципы планирования и новации в инженерном образовании
Афанасьев М.В. 561
3D-проектирование и цифровая революция в развитии ременных передач: актуальность и перспективы
Заббаров А.Н., Камалов И.Ф. 563
Инновационные технологии в инженерном образовании
Шипиловских Н.А., Щербенев Н.А. 565
Разработка компьютерной программы для расчета термодинамической эффективности базовых циклов ПТУ
Худяков Н.М. 568

Секция 8
ТВОЙ ПЕРВЫЙ ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ 572

Устройство автоматизированного учета и выдачи электромонтажного оборудования
Ронжин М.И., Кульков А.Т. 572

Разработка алгоритмов и устройств бесперебойной работы электрических объектов
Миськов И.А., Червоненко А.П., Шишкин А.Д. 574

Электростатический генератор Ван де Граафа
Хмелькова А.Н. 577

Цифровой двойник электропотребителя в концепции «Умный город»
Ванюшкин А.С., Горбунов Р.Л., Шишкин А.Д. 579

Способы улучшения работы термо-электрогенераторов и уменьшения потерь тепла
Зволь А.А. 582

Термоэлектрогенератор
Корляков Н.Л. 584

Создание модели портативной гидроэлектростанции для путешественников или жителей отдаленных населенных пунктов
Трушников М.Н. 588

Пьезогенератор – как альтернативный источник энергии
Маслов А.А. 590

Энергонезависмое хозяйство
Волкомуров Г.О., Замалдинов Р.Н., Жиляева Е.В. 593

Система управления водородным топливным элементом для гоночной автомодели масштаба 1:10
Афрузунова Д.А. 596

ЭнергоKIDS
Агафонова Я.Ю. 600

Энергообеспечение в макете частного дома с ландшафтным дизайном
Давыдова А.Н. 603

Секция 1
Цифровизация в электроэнергетике и интеллектуальные энергосистемы

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

М.Ю. Покацкий, Е.Д. Троицкий

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А04

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

Цифровой измерительный трансформатор тока и напряжения – это современное и инновационное устройство, предназначенное для измерения высоких уровней тока и напряжения в электроэнергетических системах с целью передачи устройствам учета, защиты и так далее. Это устройство вносит существенный вклад в сферу измерений и энергетики, обеспечивая более точные и удобные методы измерения, мониторинга и управления электрическими системами.

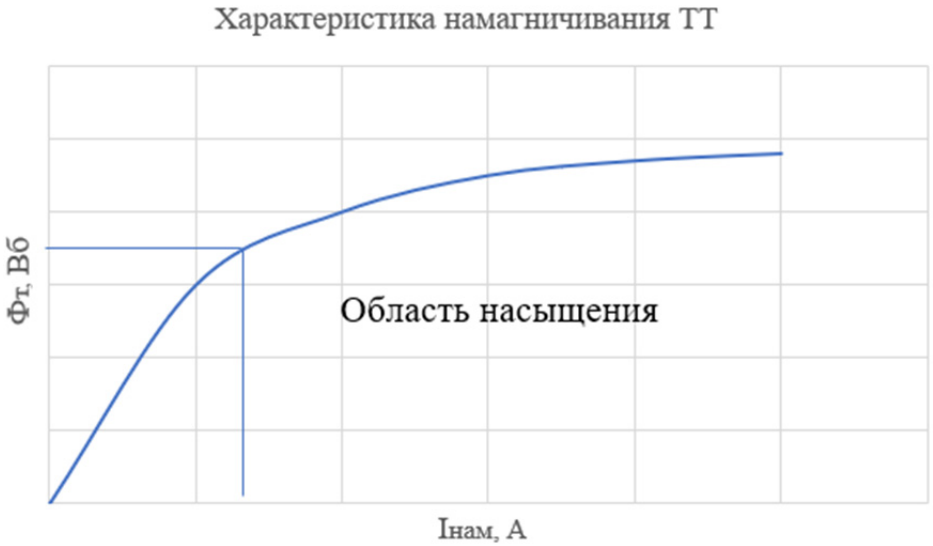


Рис. 1. Характеристика намагничивания измерительного трансформатора тока

Есть несколько аспектов, благодаря которым цифровые измерительные трансформаторы являются очень перспективным решением для энергетики: возможность интеграции в системы цифрового обмена данными, то есть, цифровизация позволяет следить за состоянием

электрооборудования и сетей с более высокой надежностью, следствием этого является минимализация отказов и сокращению времени простоя оборудования; снижение массогабаритных характеристик и себестоимости благодаря реализации разного вида гальванических развязок, повышение точности измерений.

Цифровой трансформатор преобразует высоковольтные и высокотоковые сигналы в цифровой формат, что делает их более удобными для обработки, хранения и передачи данных. Это позволяет легко интегрировать устройство в цифровые системы мониторинга и управления. Суть внедрения таких систем – оптимизация и улучшение управления производством, передачей и потреблением электроэнергии. Сбор и анализ данных позволяет собирать большое количество данных о работе энергетических систем, включая информацию о производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии. Эти данные затем анализируются для выявления паттернов, аномалий и возможных улучшений. Также цифровые системы позволяют оптимизировать распределение и использование электроэнергии, что ведет к экономии энергоресурсов и сокращению потерь.

Цифровые трансформаторы меньше своих классических аналогов за счёт внедрения оптической гальванической развязки. Такой метод проектирования позволяет уменьшить использование изоляционных материалов в измерительной части, что снижает стоимость, массогабаритные характеристики и издержки на эксплуатацию такого вида устройств. Также стоит учесть, что применение масла или элегаза, в качестве изоляционной диэлектрической среды, не требуется, что также влияет на массогабаритные показатели устройства, снижаются затраты на обслуживание. За счёт конструкции, где вторичная обмотка гальванически связана с измеряемой токоведущей частью, потенциал первичной и вторичной обмотки практически равны, в таком случае нам не нужна сложная изоляция, которая удорожает конструкцию и требует трепетной эксплуатации.

Добавление пояса Роговского позволяет избежать насыщение магнитопровода при больших токах КЗ, это является следствием роста токов ХХ и дальнейшему пробою, что не позволяет устройствам РЗиА увеличить время срабатывания и исключить неселективное действие.

Протокол МЭК 61850 стандарт «Сети и системы связи на подстанциях» является международным, что позволяет интегрировать разработки, которые поддерживают этот протокол в большинство энергосистем мира. Данный факт открывает перспективы для крупного производства, выход на рынки не только СНГ, но и мира.

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКПОЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ЗАДАЧАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н.А. Солодников

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ91

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

Внедрение возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) влечет за собой ряд сложностей, одной из которых является поддержание баланса мощности для регулирования частоты в сети, т. к. генераторы возобновляемых источников не обладают достаточным моментом инерции для обеспечения запаса устойчивости, а мощность, вырабатываемая ВИЭ, зави-

сит от нерегулируемых параметров. Следовательно, необходимо применение систем регулирования.

Одним из вариантов решения проблемы первичного регулирования частоты, применимым для возобновляемых источников электроэнергии, является использование систем накопления энергии, в частности, *Battery Energy Storage Systems* (*BESS*). *BESS* представляют собой аккумуляторные батареи, которые могут накапливать энергию из разных источников и высвобождать ее при необходимости поддержания баланса генерируемой и потребляемой мощности. *BESS* состоит из одной или нескольких батарей и может использоваться для обеспечения резервного питания и повышения стабильности сети [1].

Для оценки возможности применения систем накопления энергии было произведено моделирование электроэнергетической системы в программной среде *MATLAB*. Для этого составлена система, состоящая из синхронного турбогенератора, линий электропередачи, шины бесконечной мощности (ШБМ), системы накопления энергии, нагрузки и трансформаторов (рис. 1). В узлах сети установлены блоки для измерения перетока мощности и частоты. Параметры оборудования были выбраны согласно модели, взятой за основу исследования и описанной в статье [2].

Система производит векторное управление выходным напряжением. При векторном управлении управление осуществляется по мгновенным значениям переменных [4]. Изменяя уставки, задаваемые в блоке управления можно изменять модуль напряжения и угол между направлением вектора напряжения сети и вектором напряжения на выходе СНЭ. Таким образом, изменяется величина, направление и характер перетоков мощности. Система управления осуществляет контроль и регуляцию заряда/разряда батареи. Согласно задачам выполняемым СНЭ в данной работе, необходимо, чтобы батарея разряжалась при снижении частоты в сети, выдавая активную мощность и поддерживая тем самым баланс мощности в энергосистеме. При избытке же генерируемой мощности и, как следствие, повышении частоты, аккумулятор должен заряжаться, снижая избыток активной мощности в сети. Важно, чтобы батарея работала в надлежащем рабочем диапазоне для обеспечения длительного срока службы. Так, минимальный предел разряда достигается при величине заряда 20 %, максимально же допустимой величиной заряда принимается величина 70 %.

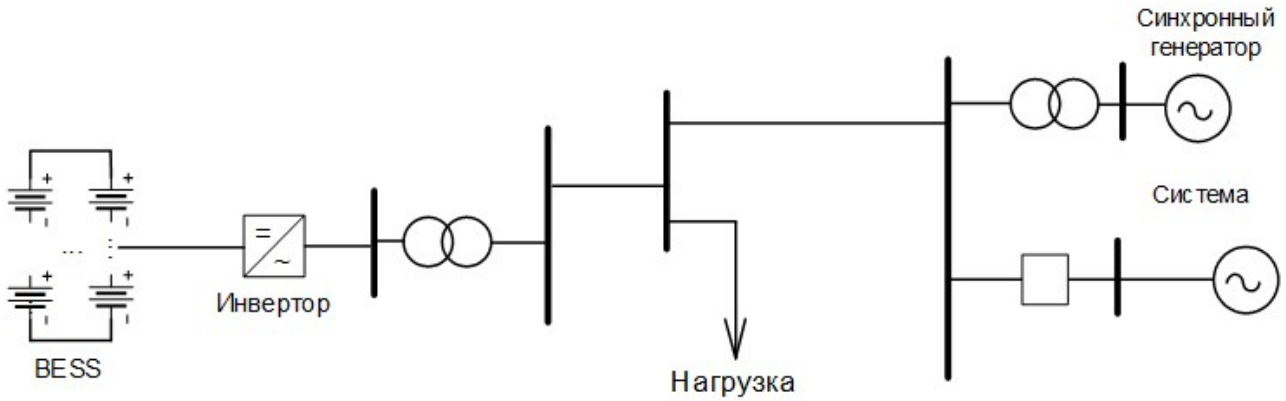


Рис. 1. Распределение температуры по толщине листа березы при воздействии лесного пожара низкой интенсивности в момент времени

Блоки контроля в системе управления построены на базе пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов).

Для оценки эффективности системы накопления энергии проведены следующие опыты:

- отключение ШБМ от сети для оценки предела мощности нагрузки, при котором система способна ограничить снижение частоты не ниже минимально допустимой величины;

- моделирование трехфазного короткого замыкания (КЗ) на нагрузке при подключенной ШБМ с установленной мощностью короткого замыкания;
- моделирование работы накопителя при низкой величине заряда аккумулятора.

Первым рассматриваемым сценарием является отключение ШБМ от системы в момент времени равный 1,2 с и последующая работа энергосистемы в изолированном режиме. Для оценки эффективности применения СНЭ, моделирование проводится при наличии СНЭ и без нее. Мощность генератора во всех опытах равна 7,5 МВт.

В качестве максимально допустимого отклонения примем предельную величину кратковременного динамического отклонения в первой синхронной зоне равную 0,8 Гц, согласно [3].

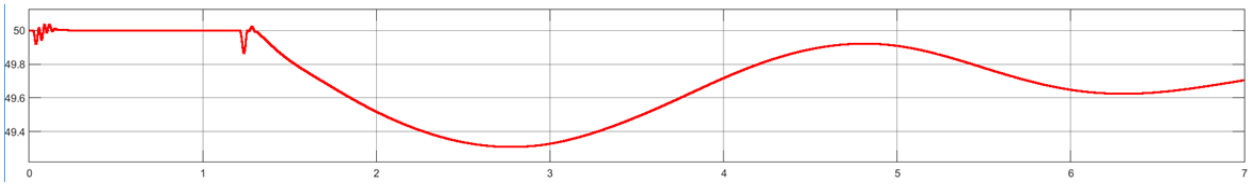


Рис. 2. Частота в сети при Рн = 7,5 МВт при отсутствии СНЭ

Из полученных графиков можно наблюдать, что активной мощности генератора не хватает, чтобы поддержать баланс мощности при частоте 50 Гц. Как итог, частота снижается пике более чем на 0,6 Гц и устанавливается на новом значении, меньшем чем 50 Гц.

Выполнив аналогичный опыт, но с применением СНЭ, наблюдается меньшее максимальное отклонение. Также значение частоты в новом установившимся режиме более близко к 50 Гц.

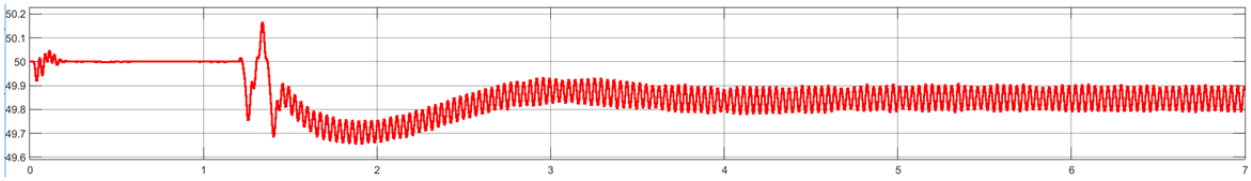


Рис. 3. Частота в сети при Рн = 7,5 МВт с СНЭ

Зададим мощность нагрузки (Рн) равной 8 МВт и повторим предыдущий сценарий.

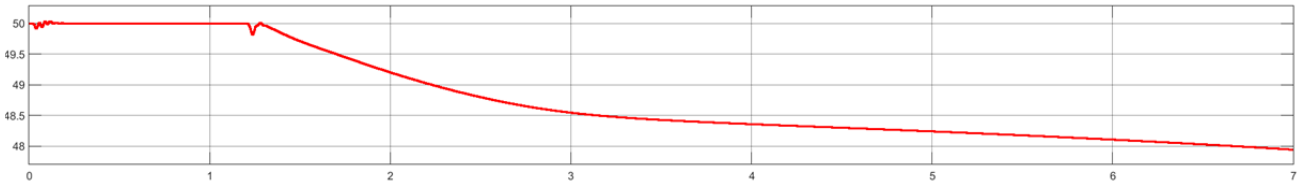


Рис. 4. Частота в сети при Рн = 8 МВт при отсутствии СНЭ

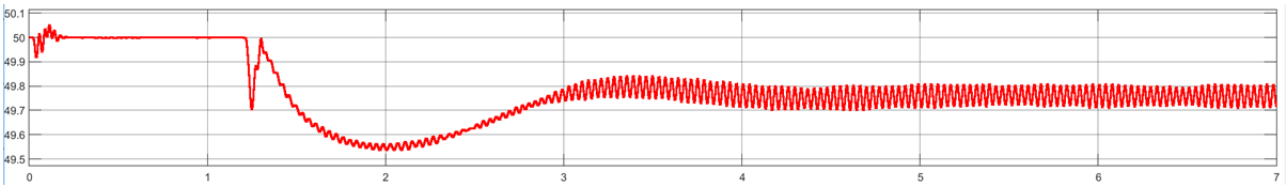


Рис. 5. Частота в сети при Рн = 8 МВт с СНЭ

Синхронный генератор без СНЭ не справляется с возникшим дефицитом активной мощности, частота в сети безвозвратно снижается ниже минимально допустимой величины.

Выполнив аналогичный опыт, но с применением СНЭ, наблюдается сохранение частоты в пределах допустимых отклонений.

Для оценки переходного процесса, возникающего в сети с СНЭ при трехфазном коротком замыкании и его последующем отключении, в цепь подключены синхронный генератор, ШБМ с мощностью короткого замыкания 500 МВА в качестве объединенной энергосистемы, нагрузка мощностью 7,5 МВт и СНЭ. Короткое замыкание возникает в момент времени равный 1,5 с и отключается через 0,1 с. Для сравнения отдельно моделируется короткое замыкание в сети без СНЭ.

В случае КЗ на нагрузке при отсутствии СНЭ в системе наблюдается изменение частоты, представленное в виде графика на рис. 6.

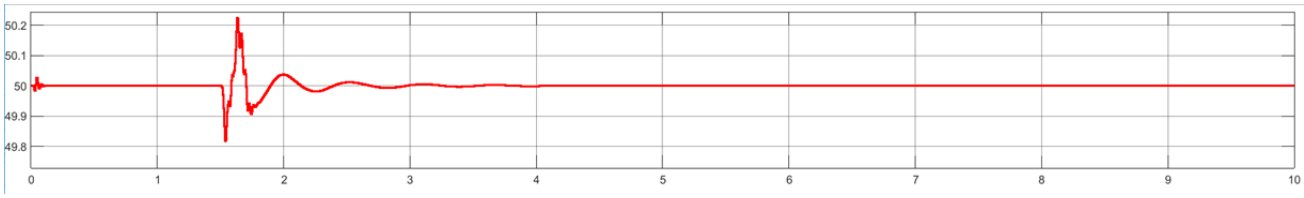


Рис. 6. КЗ на нагрузке в системе без СНЭ

Наблюдается возникновение затухающих колебаний, которые демпфируются ШБМ.

Смоделируем трехфазное короткое замыкание на нагрузке в сети с подключенной системой накопления энергии. Полученный график изменения частоты в сети (рис. 7) представлен ниже.

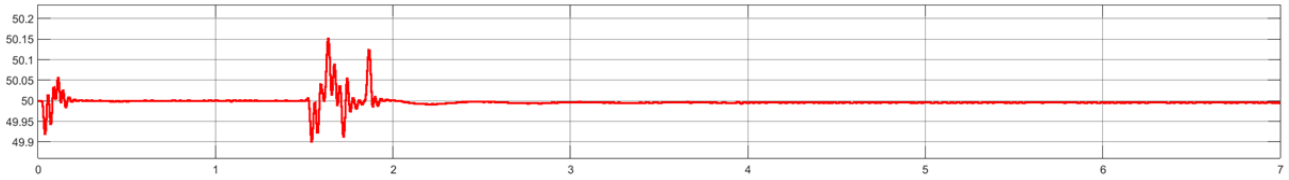


Рис. 7. КЗ на нагрузке в системе с СНЭ

По результатам моделирования видно, что применение СНЭ способствует меньшему снижению частоты, т. к. батарея, разряжаясь, выдает мощность в сеть.

Уменьшим мощность КЗ ШБМ до 300 МВА и проведем аналогичные опыты.

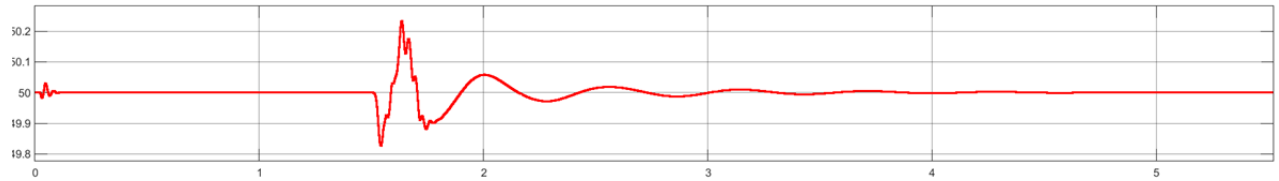


Рис. 8. КЗ на нагрузке в системе без СНЭ

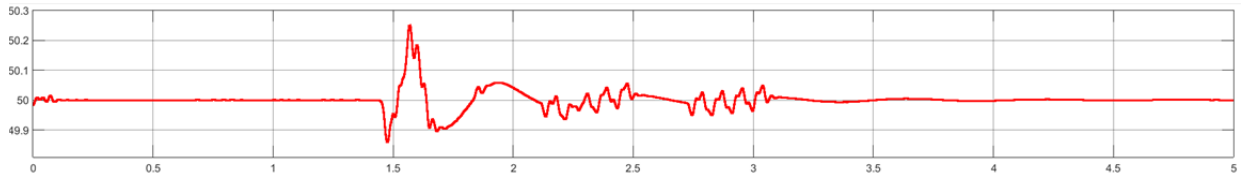


Рис. 9. КЗ на нагрузке в системе с СНЭ

Сравнив графики частоты, можно сделать вывод, что применение системы накопления энергии уменьшает снижение частоты в момент короткого замыкания, но генерирует дополнительные колебания несинусоидальной формы до момента наступления нового установившегося режима. Данное явление связано с неидеальной системой управления. Для устранения колебаний требуется усложнение системы управления или применение защиты, которая будет ограничивать выдачу мощности батареей при возникновении такого рода колебаний.

Изменим процент заряда аккумуляторной батареи. Исходные данные для опытов: емкость батареи 100 А·ч, нагрузка 8,5 МВт, заданная частота 50 Гц, ШБМ отключается на 1,2 с. На рис. 10 представлен график частоты и параметров СНЭ при начальном заряде батареи *SOC* (*state of charge*) равном 21 %.

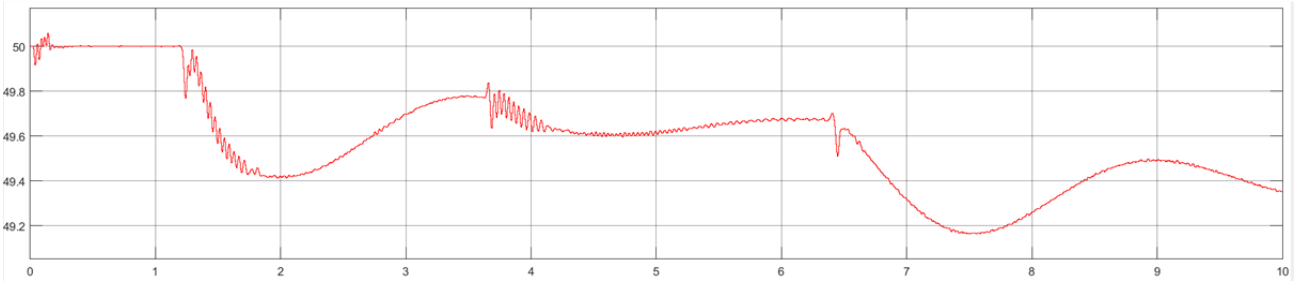


Рис. 10. Частота в сети

Наблюдается разряд батареи при отключении ШБМ, при этом снижается заряд аккумулятора. В момент достижения *SOC* 20 % (6,5 с) накопитель перестает высвобождать мощность в сеть, частота начинает стремиться к новому установившемуся значению меньшему по значению, т. к. общая мощность генерации в сети уменьшилась. Таким образом, накопитель ограничивает разряд аккумулятора до предельно малой величины согласно логике, заложенной в систему управления, в целях увеличения срока службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Battery energy storage. – Siemens Energy. URL: https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/storage-solutions/battery-energy-storage.html (дата обращения: 05.11.2022)
2. King K.G. A three phase transistor class-b driver inverter with sinewave output and high efficiency // Inst. Elec. Eng. Conf., 1974. – P. 204–209.
3. ГОСТ Р 55890–2013. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 05.12.2013 N 2164-ст) (ред. от 25.12.2019).
4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И.Н. Гусаров

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ31

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Введение

Релейная защита выполняет автоматическое обнаружение повреждений и аномальных режимов в электрических системах энергосистемы и является важной автоматикой, которая обеспечивает надежную и стабильную работу этих систем.

Задачей данной работы является разработка программы, способной определять по графику тока нормальный режим и аварийный режим, подобно человеку. Для этой цели мы будем использовать программное пространство Python. Кроме того, для обучения и проверки правильности работы программы будет использован программный комплекс RSKAD, в котором будет реализована данная схема.

Разработка программы

В данной работе мы сосредоточимся на использовании классификатора нейронной сети, способного различать два режима: нормальный режим и аварийный режим. Для этого нейронная сеть будет состоять из трех слоев нейронов, связанных друг с другом через весовые коэффициенты.

Расчет весовых коэффициентов является ключевой задачей для нейронной сети. Для упрощения процесса можно использовать случайные значения, генерируемые с помощью функций случайных чисел. Такой метод расчета может быть долгим, поэтому для ускорения работы нейронной сети используется нормальное распределение Гаусса.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (1)$$

Выбор функции активации

Для работы с нейронными сетями выбирается функция активации, которая усиливает слабые сигналы и ослабляет сильные сигналы. В данном исследовании мы выбираем функцию активации – сигмоида. Эта функция имеет особенность быстрого изменения значений в около нулевом диапазоне и медленного изменения на «краях» функции. Такая особенность позволяет работать с гармоническими сигналами, приводя каждое значение к одинаковому влиянию на обучение нейронной сети.

Метод градиентного спуска

Для оптимизации процесса обучения нейронной сети на больших объемах данных используется метод градиентного спуска. Этот метод помогает оптимизировать расчет ошибки и уменьшить время работы и число итераций.

Исследование схемы

Для выполнения начальной работы был выбран силовой трехфазный трансформатор с блочной конструкцией и соединением обмоток в виде звезда-треугольник. Его высшее напряжение составляет 220 кВ, а низшее – 10,5 кВ.

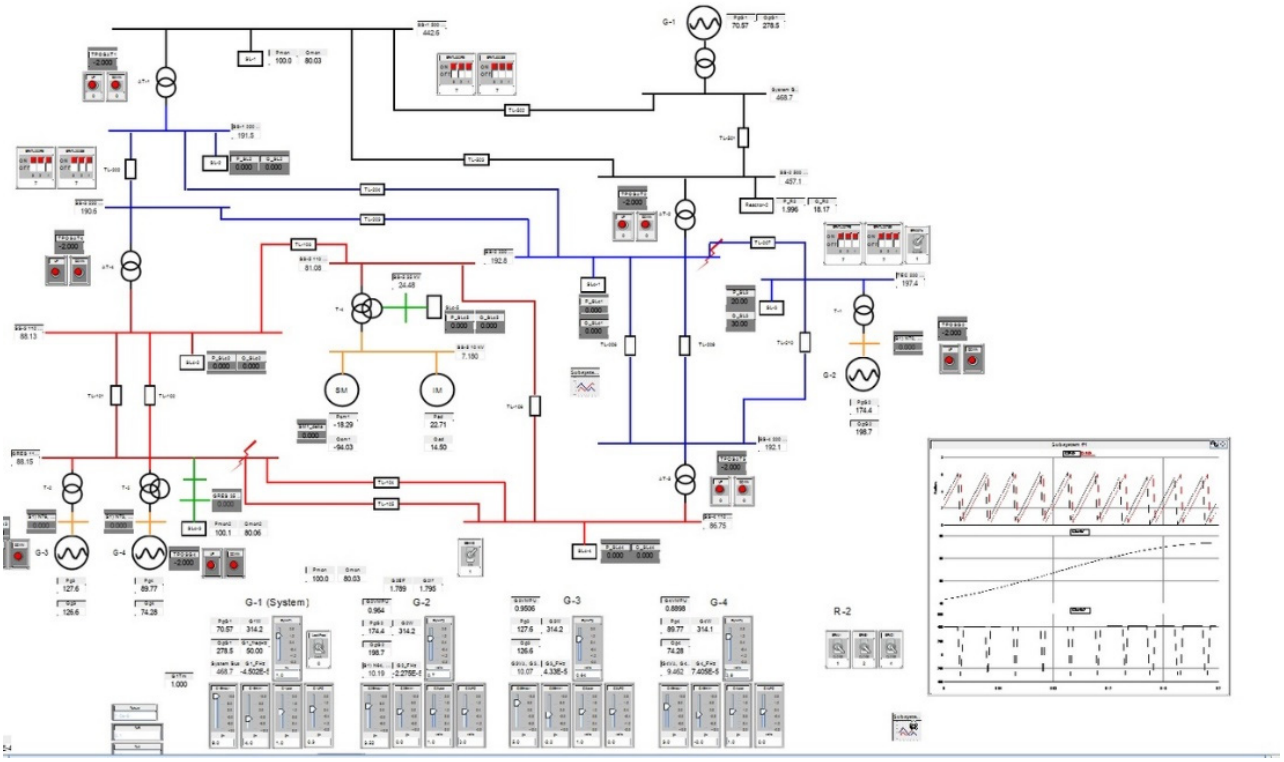


Рис. 1. Схема в программе

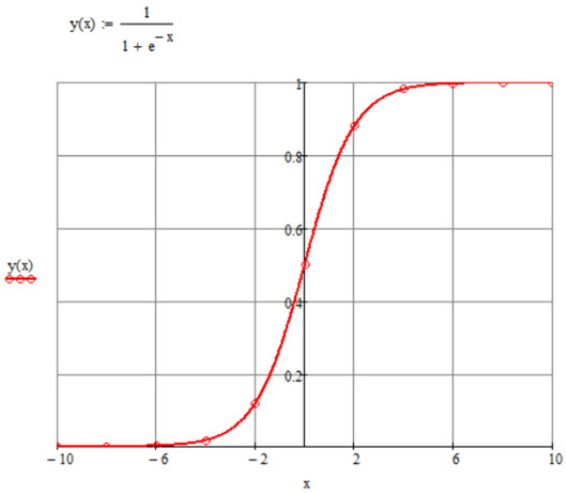


Рис. 2. Функция активация – сигмоида

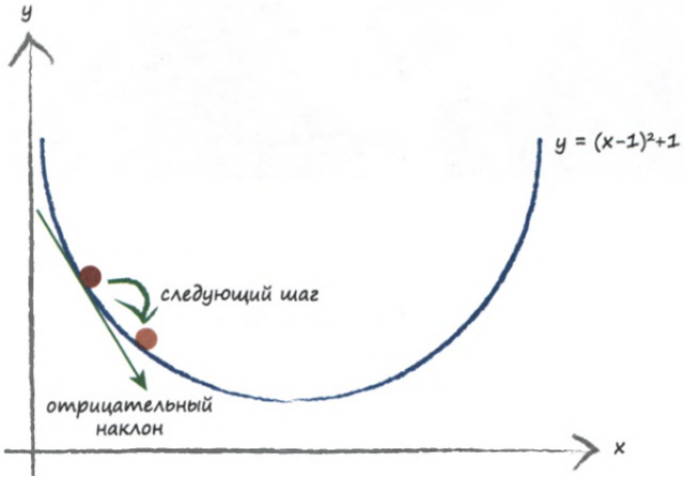


Рис. 3. Метод градиентного спуска [2]

На рис. 4: генератор с напряжением 10 кВ, силовой трансформатор мощностью 200 МВА, короткозамыкатель и шины. Также здесь присутствуют измерительные трансформаторы тока. Для обеспечения нормального режима работы необходимо определить коэффициент трансформации трансформаторов тока. Следовательно, максимальный рабочий ток на низшей стороне составляет 22±2 кА, а на высшей – 1±0 кА. Трансформатор позволяет получать мгновенные значения токов.

В программе предусмотрена работа генератора в режимах ШБМ и натурального моделирования, где частота вращения генератора зависит от его механического момента. Путем подключения генераторов в режим реального моделирования и соединения их с сетью можно смоделировать режим броска тока намагничивания.

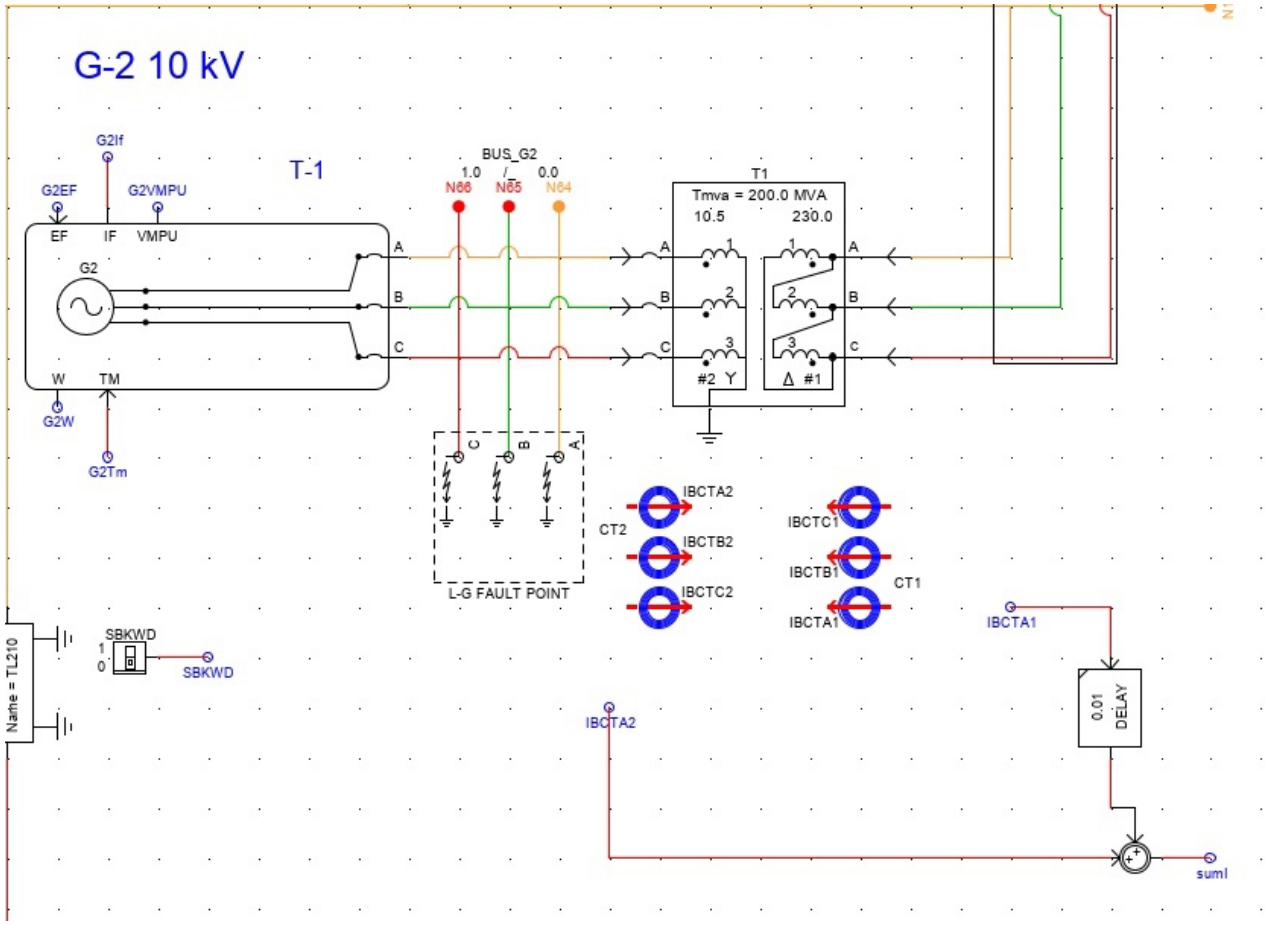


Рис. 4. Рабочий трансформатор для исследований

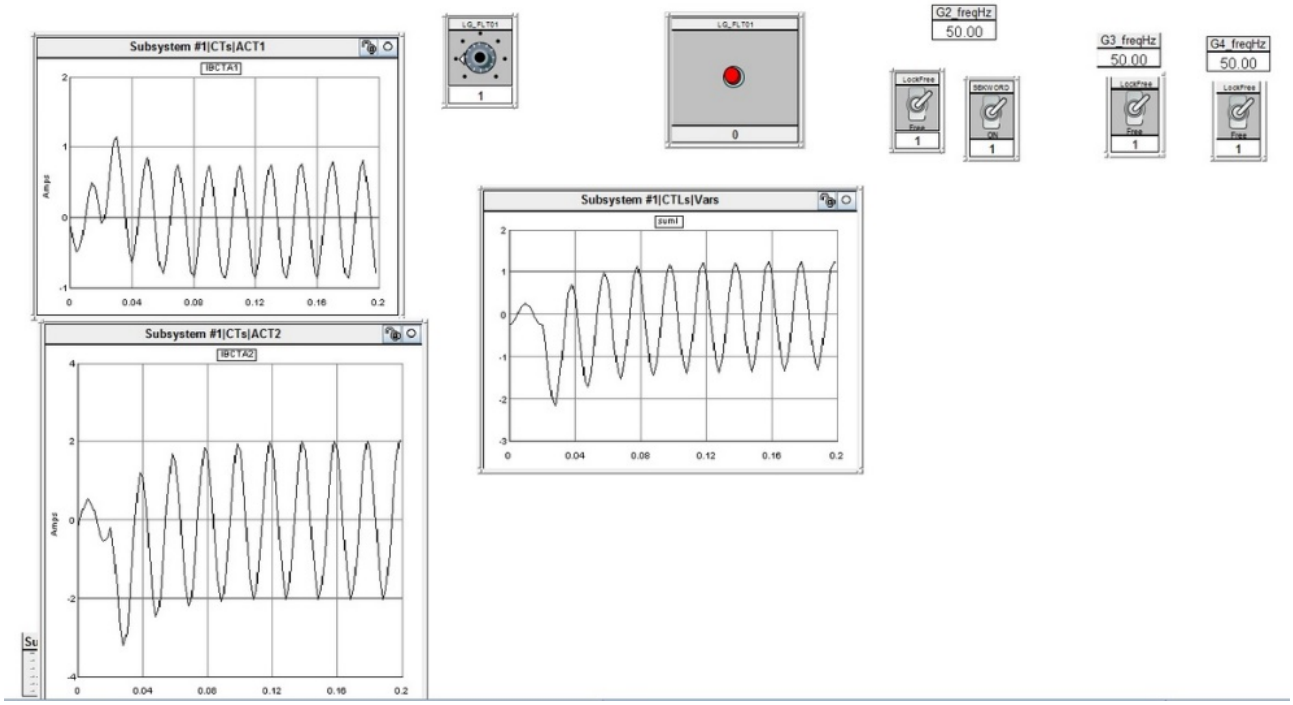


Рис. 5. График однофазного короткого замыкания

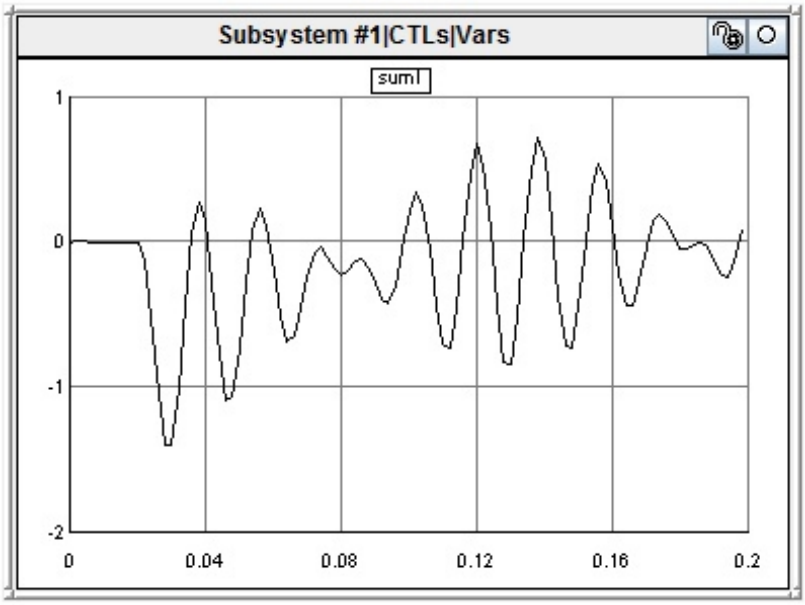


Рис. 6. График БНТ, смоделированный в программе

Далее полученные данные сохраняются в формате Excel и преобразуются в требуемый для нейронной сети вид. Таким образом, формируются два файла: тренировочный и тестовый.

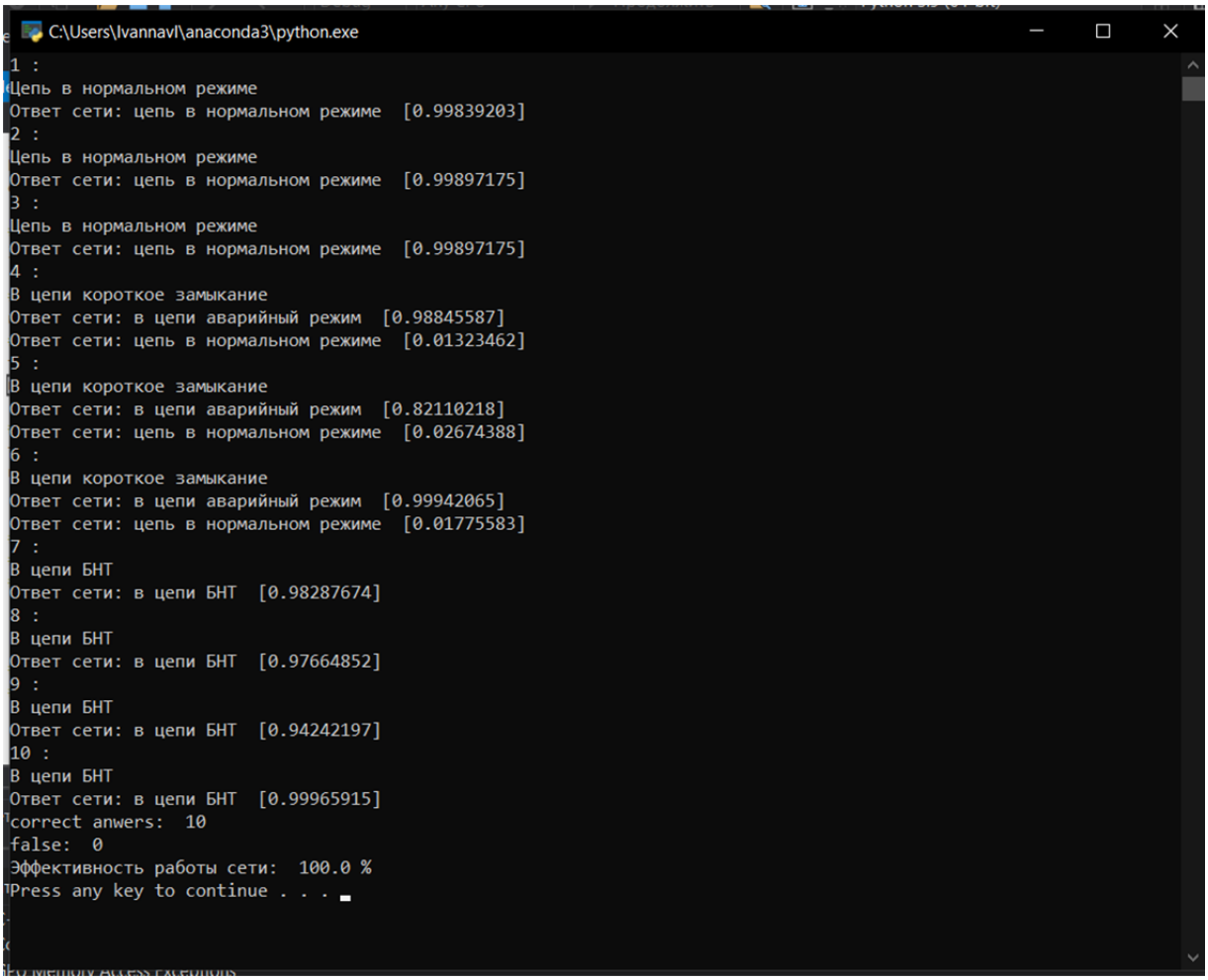


Рис. 7. Результаты работы сети

Заключение

В результате проведенных экспериментов была разработана нейронная сеть, способная распознавать несколько режимов с высокой точностью: нормальный режим, режим короткого замыкания и режим броска тока намагничивания. Такой алгоритм может служить как основной автономный защитный механизм, так и дополнительная защита для трансформатора. Оценка возможности применения данного алгоритма в электроэнергетической индустрии требует дальнейших серьезных исследований.

Дальнейшее развитие данного исследования может быть связано с разработкой алгоритмов дифференциальной защиты для трансформаторов с различными типами обмоток и заземлений, а также совмещением традиционных методов защиты с новыми технологиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

ОБЪЕДИНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

П.П. Радько[1], Ю.Д. Бай[2]

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ21[1]; ИШЭ, ОЭЭ[2]

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

Введение

В связи с глобальной тенденцией перехода к возобновляемым источникам процент их внедрения в электроэнергетические системы постоянно растет. Однако динамика внедрения ВИЭ приводит к уменьшению постоянной инерции, что проявляется в появлении более стремительных переходных процессов, особенно связанных с изменением частоты при использовании традиционной системы управления силовым преобразователем.

В России проблема встает более остро, поскольку из-за большой территории много энергорайонов являются удаленными или даже изолированными (рис. 1) от единой энергосистемы [1]. Следовательно, при наличии объектов ВИЭ в таких районах любые возмущения будут приводить к резким изменениям режимных параметров, которые могут в свою очередь привести к тяжелым авариям.

Таким образом встает задача обеспечить на объектах ВИЭ, в данном исследовании на солнечной электростанции, инерционного отклика, сравнимого с тем, что наблюдается на традиционных источниках энергии, в сильных (в составе ЕЭС) и слабых (удаленных) сетях.

Существующие направления решения

Сгладить кривые мощности можно применением накопителей энергии, но это требует как капитальных, так и эксплуатационных расходов и в данной работе этот метод не рассматри-

вается. Вместо этого лучше увеличить инерцию станции с помощью алгоритмов ее управления.

Есть два основных способа это сделать: использование блока синтетической инерции (СИ), который представляет собой дополнительный контур системы управления, кратковременно увеличивающий вырабатываемую мощность при возникновении тормозящего момента (рис. 2), и использование виртуального синхронного генератора (ВСГ), являющегося более комплексной системой управления, имитирующей работу традиционной генерирующей установки при большем количестве сценариев (рис. 3) [2].

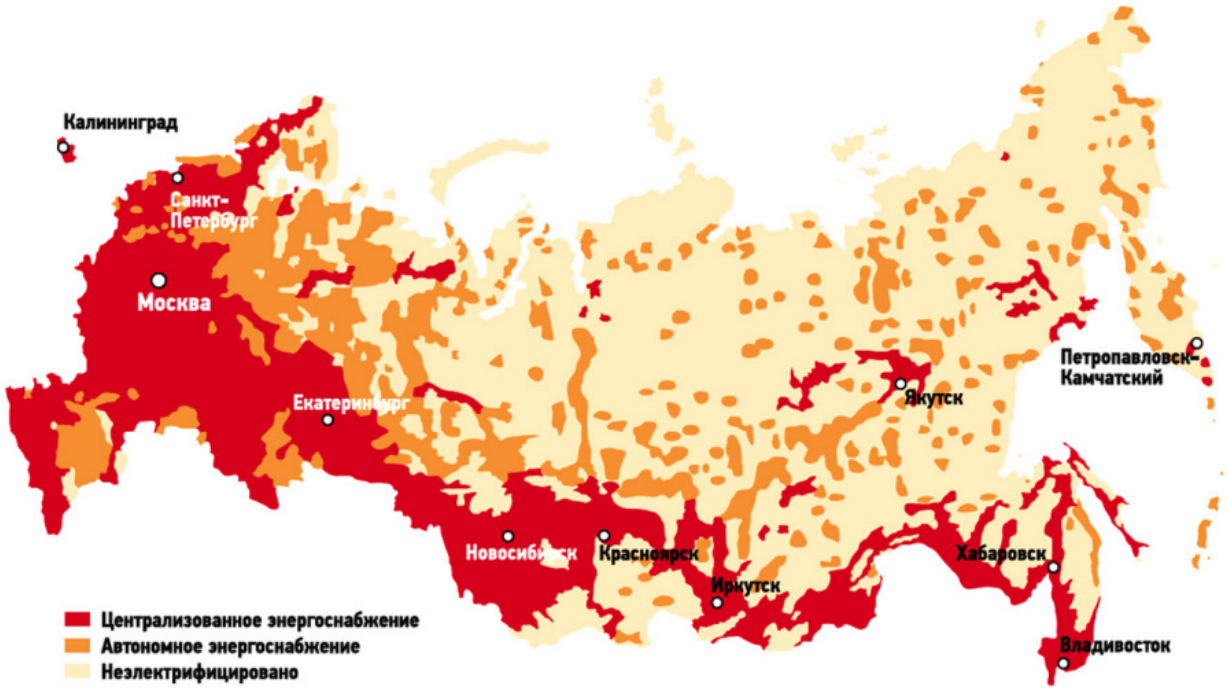


Рис. 1. Рынок автономных энергосистем РФ

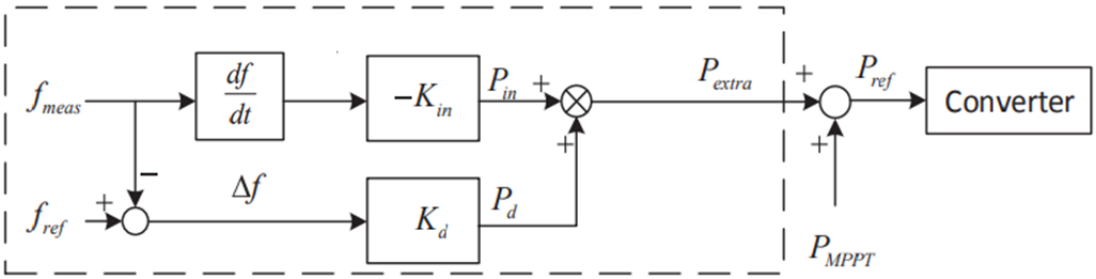


Рис. 2. Структурная схема модуля синтетической инерции

Как видно из описания, оба решения весьма ситуативные, т. е. их применение будет сопровождаться разной эффективностью в зависимости от условий и запросов. Из анализа отечественных и зарубежных литературных источников, а также исходя из собственных работ можно сделать ряд выводов о работе блока СИ и ВСГ.

В сильной сети оба метода показывают свою эффективность без проявления негативных факторов, поэтому в случае, если есть возможность разгрузить фотоэлектрические установки, применение блока синтетической инерции может оказаться вполне подходящим способом повысить устойчивость системы.

В слабой же сети работа блока СИ приводит к возникновению гармонических высокочастотных колебаний режимных параметров, из-за чего его применение в таких сетях не явля-

ется целесообразным. В это же время виртуальный синхронный генератор не имеет таких проблем, ко всему прочему эффективно участвуя в регулировании частоты.

Таким образом закономерным развитием рассмотренных мер является их синтез, т. е. разгрузка фотоэлектрической установки, управляемой инвертором с виртуальным синхронным генератором, с возможностью использовать образованный резерв через блок синтетической инерции. Исследованию описанной системы управления и посвящена данная работа.

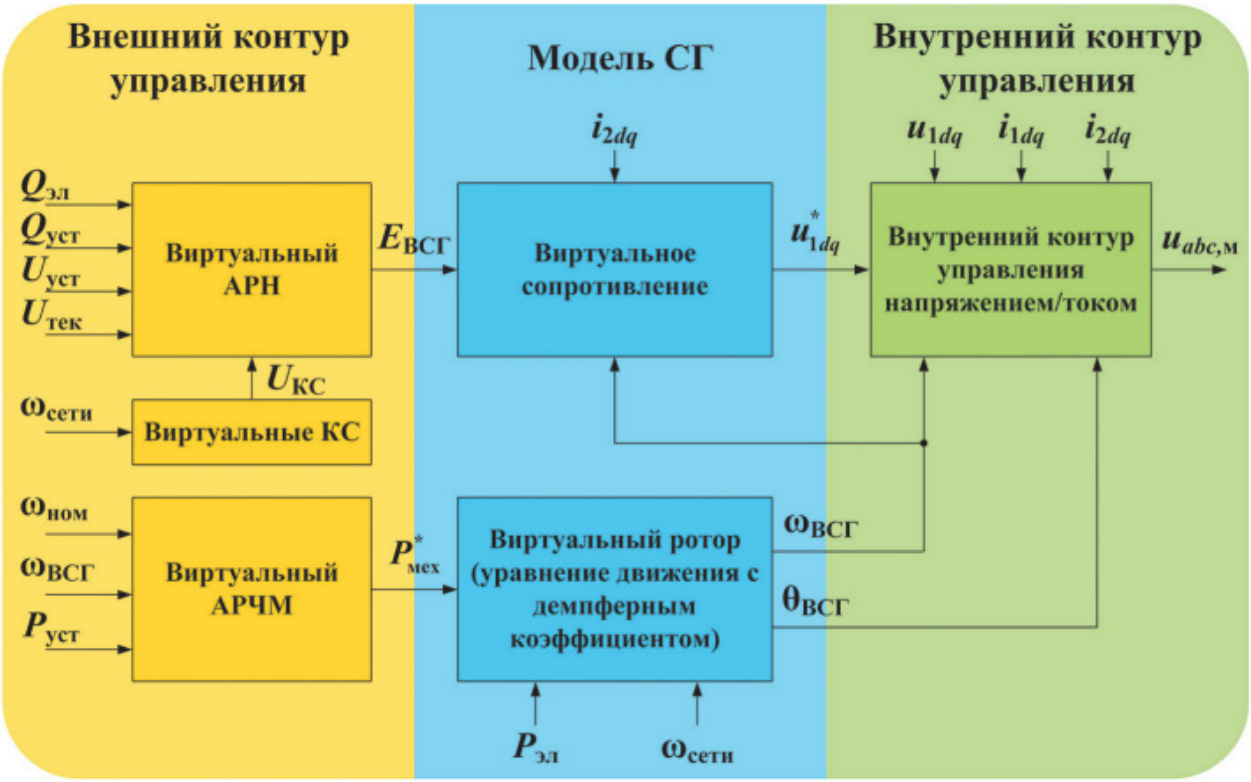


Рис. 3. Классическая структура управляемого по напряжению ВСГ (ВСГ-Н)

Исследуемая модель

Исследуемая модель представляет собой одномашинную систему, приведенную на рис. 4. Шина *4* представлена шиной бесконечной мощности. Стоит отметить, что линия Л1 значительно длиннее линии Л2. Это приводит к тому, что при работе обеих линий сеть считается сильной, а при отключенной Л2 сеть становится слабой. Затем, в качестве возмущения, проводится увеличение нагрузки Н1.

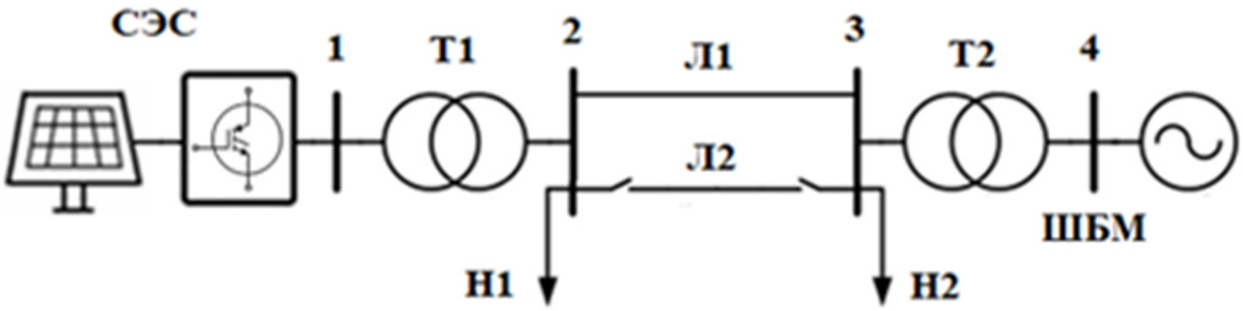


Рис. 4. Схема исследуемой энергосистемы

Эксперименты проводятся для случая применения ВСГ-Н (виртуальный синхронный генератор с контролем по напряжению) и при использовании ВСГ с адаптивной разгрузкой (ВСГ+СИ) в программно-аппаратной среде RTDS/RSCAD.

Результаты опытов

Не смотря на создание резерва мощности (10 %) при использовании случая применения ВСГ+СИ, мощность СЭС до возмущения в обоих случаях была одинаковой. Это необходимо для того, чтобы производимый наброс нагрузки (10 МВт) имел одинаковое влияние на переходный процесс во всех экспериментах.

На рис. 5 представлены осциллограммы частоты после увеличения нагрузки в сильной сети. Из осциллограмм видно, что скорость изменения, а также предельное отклонение частоты при внедрении блока синтетической инерции не изменились, в то время как демпфирующие свойства станции улучшились значительно. Данные результаты можно объяснить инертностью системы управления: из-за апериодических звеньев сигнал на увеличении мощности после появления небаланса приходит не сразу, что теоретически можно решить более точной настройкой блока СИ. Улучшение демпфирования колебаний объясняется наличием дифференциального звена в контуре управления синтетической инерции, реагирующем на скорость отклонения частоты.

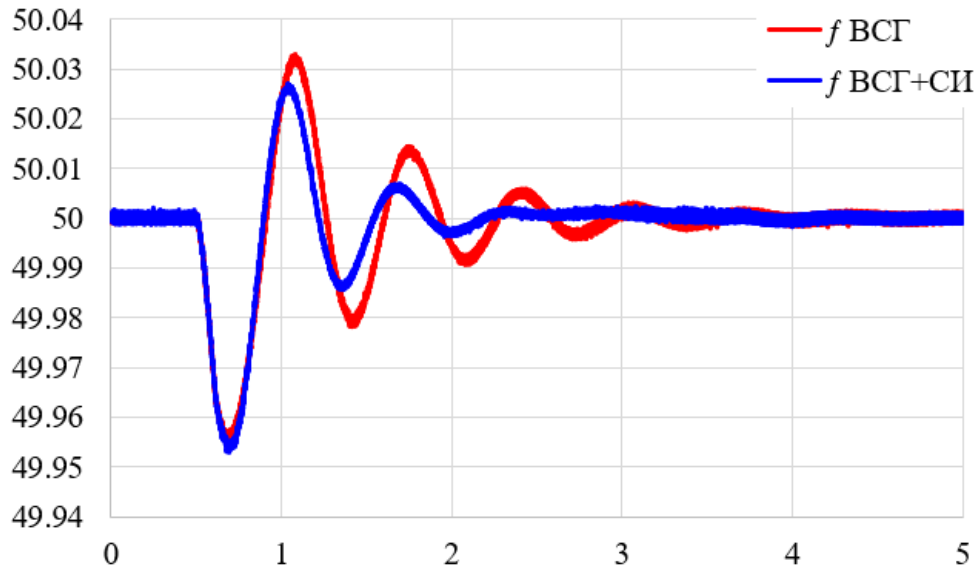


Рис. 5. Осциллограммы частоты после изменения нагрузки в сильной сети

Осциллограммы частоты после наброса нагрузки в слабой сети приведены на рис. 6. Из результатов экспериментов видно, что без блока СИ виртуальный синхронный генератор перестает правильно формировать сигнал после значительных увеличений нагрузки. Очевидно, что при замене ШБМ даже на идеальный источник с собственными регуляторами подобные условия приведут к потере устойчивости системы в целом.

В то же время внедрение контура СИ позволяет увеличить диапазон возмущений, при которых виртуальный синхронный генератор работает корректно, в том числе и при больших набросах нагрузки.

Количественное сравнение применения ВСГ и ВСГ+СИ в сильных и слабых сетях приведено в табл. 1. Анализ проводился с помощью интегрального показателя качества I, оценивающего среднее отклонение от номинальной частоты на протяжении всего переходного процесса (чем значения показателя меньше, тем лучше).

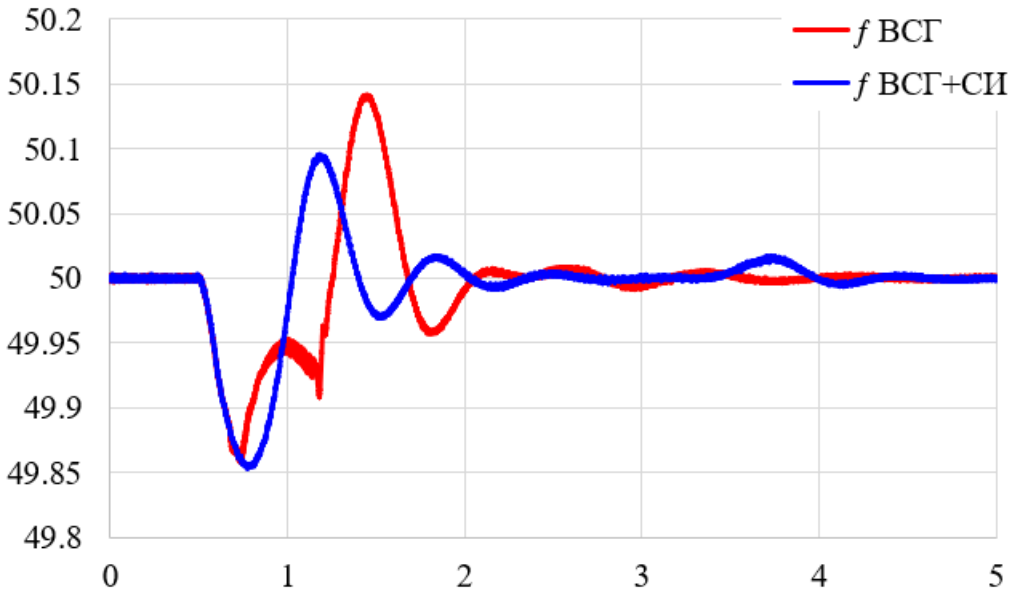


Рис. 6. Осциллограммы частоты после изменения нагрузки в сильной сети

Таблица 1. Сравнение влияния ВСГ и ВСГ+СИ на переходный процесс

Система управления / Плотность сети	*I*(ВСГ), о.е.	*I*(ВСГ+СИ), о.е.	Улучшение в зависимости от системы управления, %
Сильная сеть	$2{,}094 \cdot 10^4$	$1{,}168 \cdot 10^4$	44,21
Слабая сеть	$36{,}045 \cdot 10^4$	$19{,}6 \cdot 10^4$	45,56

Заключение

Основными методами обеспечения инерционного отклика на СЭС являются применение блока синтетической инерции и виртуального синхронного генератора, однако в разных условиях степень влияния на переходные процессы этих методов может разительно отличаться. Для того чтобы усилить преимущества данных методов можно объединить их в один комплексный.

Применение ВСГ с адаптивной разгрузкой позволяет добиться улучшенного демпфирования возникающих колебаний. Качество переходного процесса увеличилось приблизительно на 45 % как в сильной, так и в слабой сети.

Из этого можно сделать вывод, что в случае, если есть возможность разгрузить фотоэлектрические установки, или же если есть необходимость обеспечить на солнечной электростанции резерв, применение виртуального синхронного генератора совместно с применением блока синтетической инерции может оказаться весьма целесообразным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников Р., Холкин Д., Чаусов И. Оптимизация систем энергоснабжения удаленных и изолированных территорий за счет управления энергетической гибкостью // Энергетическая политика. – 2023. – № 1(179). – С. 94–106. – DOI: 10.46920/2409-5516_2023_1179.94. – EDN CRQLOW.
2. Wang M., Meng K., Yuan L., Liang Z. Comparative Synthetic Inertia Assessment Between Droop And Virtual Synchronous Generator Control For Weak Grids Integration // IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). – 2022. – P. 4493–4498. – DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9845936.

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЛИНИЯХ 6–35 КВ

Д.С. Николаев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А01

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

Защита объектов электроэнергетики всегда являлась одним из основных вопросов при проектировании введения новых мощностей, линий передачи и пунктов распределения. В связи с этим выбор надёжной, быстрой, селективной и чувствительной релейной защиты является необходимостью.

В этой работе будут рассмотрены преимущества и недостатки использования дифференциальной и дистанционной защиты в линиях 6–35 кВ, также будут рассмотрены наиболее используемые защиты в данных классах напряжения и проведён сравнительный анализ.

Виды рассматриваемых защит:

- Дифференциальная защита делится на 2 вида – продольная и поперечная. В продольной защите сравниваются значения фаз и токов, а поперечной токи включенных параллельно. Также поперечная дифференциальная защита может быть и направленной – это частный случай для ЛЭП в которой присутствует самостоятельный выключатель на каждой линии.
- Дистанционная защита основана на сравнении сопротивления линии с эталонным сопротивлением, которое задаётся характеристикой, выдержка времени варьируется в зависимости от удаленности места КЗ от места установки защиты.

Исходя из табл. 1 видны преимущества и недостатки каждой защиты, а также основные классы напряжения, на которых используются данные защиты. Можно сказать, что в классах напряжения 6–35 кВ из 4 рассматриваемых защит только 1 применяется в качестве основной. Наиболее распространены максимальная токовая защита, токовые ступенчатые защиты.

Таблица 1. Достоинства и недостатки рассматриваемых защит

	Достоинства	Недостатки	Основная сфера использования
Дифференциальная продольная защита	Быстродействие, простота, надёжность	Высокая стоимость	ЛЭП 110 и 220 кВ длиной до 10–15 км
Дифференциальная поперечная защита	Абсолютная селективность, быстродействие, надёжность	Мёртвая зона, сложность конструкции, необходимость отключения РЗ при отключении одной из линий, необходима доп. РЗ действующую при КЗ на шинах и в мёртвой зоне	Параллельно подключённые ЛЭП 110 и 220 кВ
Направленная поперечная дифференциальная защита	Простота, стоимость, отсутствие выдержки времени, защита от качания	Каскадное действие, мёртвая зона, необходимость вывода РЗ при отключении одной из ЛЭП	ЛЭП 110 и 220 кВ как дополнительная 6–10 кВ как основная
Дистанционная защита	Селективность, стабильность зон действия, большая чувствительность, защита от качаний и внешней нагрузки	Медленное срабатывание, ложные срабатывания при неисправности в цепи напряжения, качаниях и колебаниях внешней нагрузки, сложность схем	ЛЭП 110 кВ и выше

Согласно ПУЭ в сетях 3–10 кВ допускается использовать: дистанционную защиту в простейшем исполнении, поперечную (для сдвоенных кабельных линий) и продольную дифференциальную защиту, но для продольной дифференциальной защиты длина кабеля должна быть не более 3 км.

В сетях 20 и 35 кВ должны быть установлены преимущественно ступенчатые защиты, но если они не удовлетворяют требованиям чувствительности или быстродействия, то допускается дистанционная ступенчатая защита.

Классы напряжений 6, 10, 20 и 35 кВ используются при проектировании новых систем электроснабжения на нефтегазовых месторождениях по стандартам ПАО «Газпром» и ПАО «Новатэк». Класс напряжения 20 кВ получает всё большее распространение, связано это с сопоставимыми затратами на 6 или 10 кВ, но при использовании 20 кВ можно передавать большую мощность.

С уменьшением длины линии уменьшается сопротивление и изменение его при аварии будет более чётко видно для автоматики, а при использовании микропроцессорных блоков можно использовать многоугольные сложные характеристики, что создаёт возможность более гибкой точной настройки защиты. Но при этом имеются очень серьёзные недостатки, например, сложная настройка для избегания ложных срабатываний при неисправностях и качаниях. Также к минусам относится невозможность мгновенного отключения.

Дифференциальные защиты также могут использоваться в сетях 6–35 кВ на нефтегазовых месторождениях в качестве основного комплекта защиты, благодаря абсолютной селективности и направленности на небольшие участки сети. Но сложность конструкции и дороговизна делают этот вид защиты менее привлекательным.

Исходя из всех перечисленных факторов дифференциальная и дистанционная защиты могут использоваться в качестве основной защиты для линий 6–35 кВ т. к. обладают достаточным быстродействием, селективностью и надёжностью, но высокая стоимость, сложная конструкция и настройка данных защит делают их менее привлекательными. В условиях изолированных энергосистем нефтегазовых месторождений надёжность является одним из ключевых факторов и уже в этом случае дистанционная защита может не подойти, т. к. большая часть располагается в районах с тяжёлыми климатическими условиями, что делает необходимым регулярную настройку конфигурации защиты, данную проблему можно решить прибегая к использованию микропроцессорных устройств релейной защиты в которых настройка будет производиться в автоматическом режиме в зависимости от погодных условий. В условиях умеренного климата настройка конфигурации становится проще из-за меньших перепадов температур и колебаний сопротивлений линий

Говоря о дифференциальных защитах, в условиях нефтегазового или горного промысла актуальность её использования встаёт под вопрос, т. к. между инфраструктурными объектами могут быть достаточные расстояния для появления мёртвой зоны защиты и это не отвечает требованиям надёжности. В условиях городской среды этот недостаток нивелируется сравнительно небольшими длинами линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособия для техникумов. – Екатеринбург: Изд-во ЮЛАНД, 2016. – 800 стр.: ил.
2. Библия электрика. ПУЭ, ПОТЭЭ, ПТЭЭП. – 10-е изд. – Москв : Эксмо, 2023. – 624 с.
3. Абдюкаева А.Ф., Фомин М.Б., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Федотов Д.С. Релейная защита – проблемы и перспективы // Известия ОГАУ. – 2018. – № 2 (70).
4. СТО Газпром НТП 1.8-001-2004. Нормы технологического проектирования объектов газодобывающих предприятий и станций подземного хранения газа. – ООО «ИРЦ Газпром», 2004 – 146 с.
5. Готман В.И. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 240 с.

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ

В.Г. Белкин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ21

Научный руководитель: Н.М. Космынина, к.т.н. доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

АО «Востсибнефтегаз» входит в группу компаний НК «Роснефть». Предприятие ведет разработку Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения (ЮТМ), расположенного в Эвенкийском муниципальном районе Красноярского края.

Электроснабжение месторождения осуществляется с помощью газопоршневой электростанции «ВЭЦ» (временный энергоцентр) установленной мощностью 37 МВ·А и газотурбинной электростанции – «ЭСН» (электростанция собственных нужд) с проектной мощностью 36 МВт. В качестве энергоносителя для указанных генерирующих электроустановок используется попутный нефтяной газ.

На рис. 1 представлена схема сети, прилегающей к станции «ЭСН» с уставками срабатывания токовых защит линий данного участка. В данном случае интерес представляют устройства РЗА ф.20-205 и ф.20-305 (длина линий 400 метров). В качестве основных защит выбраны максимальные токовые защиты (далее МТЗ). Защиты с абсолютной селективностью для указанных линий отсутствуют. В РУ 6 кВ «ЭСН» секционный выключатель в соответствии с режимными указаниями нормально включен.

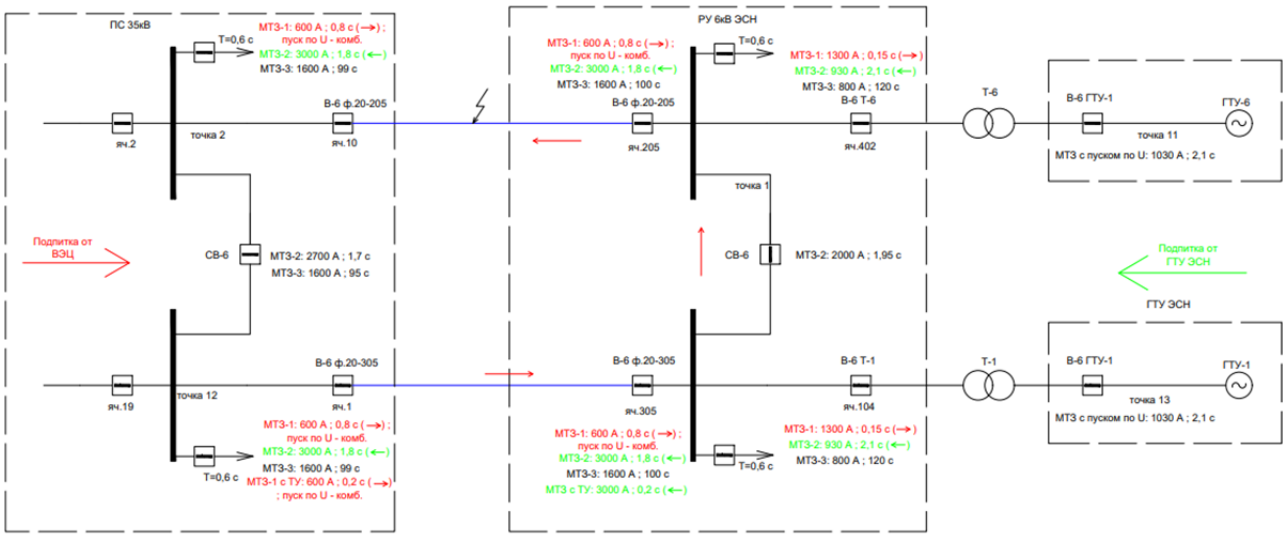


Рис. 1. Схема сети, прилегающей к РУ 6 кВ «ЭСН»

При анализе выбранных уставок была выявлена возможность неселективного отключения яч.1 ПС 35 кВ, яч. 305 РУ 6 кВ «ЭСН» при коротком замыкании на ф.20-205 и яч.10 ПС 35 кВ и яч.205 РУ 6 кВ «ЭСН» при коротком замыкании на ф.20-305, по причине отсутствия быстродействующих защит на данных линиях и включенном секционном выключателе в РУ6 кВ «ЭСН». Предусмотреть токовую отсечку также не представляется возможным в связи с частым изменением количества работающих генераторов «ЭСН» по причине регулярных включений/отключений потребителей (двигатели, системы обогрева), соизмеримых по мощности с генерирующим оборудованием.

Для решения указанной проблемы необходимо оборудовать указанные линии быстродействующими защитами, которые будут отключать повреждение до срабатывания МТЗ. Одним из наиболее известных методов является установка дифференциальной защиты линии. Для реализации необходима закупка дополнительного оборудования, прокладка токовых цепей либо оптической связи, что в свою очередь потребует финансовые и временные затраты.

Альтернативным решением было принято реализовать логическую защиту линии (далее ЛЗЛ) [1, 2]. По концам линии устанавливаются комплекты цифровых РЗА с функцией максимальной токовой направленной защиты, ориентированной на срабатывание при КЗ на линии.

Установка дополнительных устройств РЗА по факту не требовалась. В ПС 35 кВ ЗРУ 6 кВ яч.1, 10 установлен терминал «Сириус-2-В»; в РУ 6 кВ «ЭСН» яч. 205, 305 установлен терминал «БЭМП РУ-02» с функцией свободно программируемой логики. Свободно программируемая логика (СПЛ) позволяет реализовать дополнительные цепи взаимодействия основных функций РЗА, организовать специальное взаимодействие дискретных входов и выходных реле, а также реализовать новые функции, требуемые в связи изменением условий эксплуатации.

При КЗ на линии мощность КЗ направлена от шин электростанции и шин подстанции энергосистемы в линию. Обмениваясь информацией обе защиты с помощью, разработанной и реализованной в терминалах логики дают команду на отключение линии. Таким образом, обеспечивается абсолютная селективность ЛЗЛ. Время действия защиты с учетом работы привода выключателя составляет не более 150 мс.

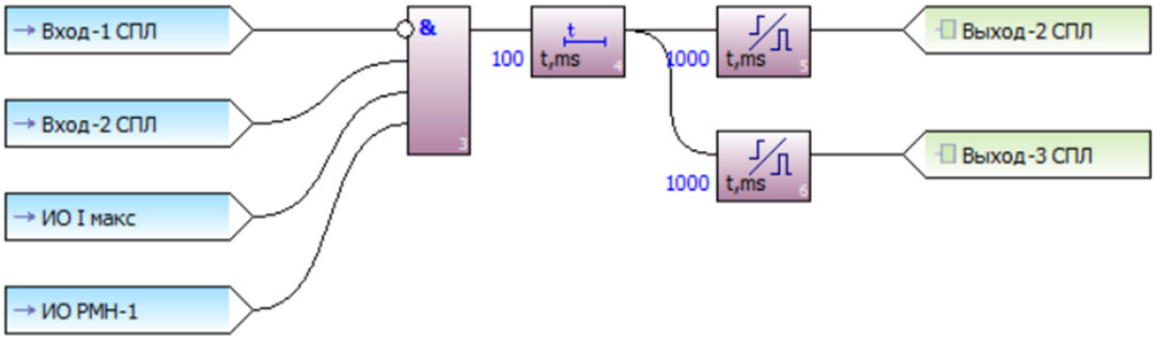


Рис. 2. Скриншот логики защиты линии в конфигураторе БЭМП

Логика работы (рис. 2) была реализована в терминале «БЭМП РУ-02». При коротком замыкании на линии терминал РЗА «Сириус-2-В» формирует направленный в сторону ЭСН сигнал «Пуск МТЗ». В терминале БЭМП также формируется сигнал «Пуск МТЗ», направленный в сторону ПС 35 кВ, и по схеме «&» с приходящим от терминала «Сириус-2-В» сигналом дает команду на отключение своего выключателя и выключателя на противоположном конце линии. Для связи между терминалами использовался медный экранированный контрольный кабель длиной 400 метров. Схема подключения изображена на рис. 3. Дополнительно в логике реализована блокировка при неисправностях в цепях напряжения.

Обозначения в логической схеме следующие: «Вход-1 СПЛ» – контроль исправности цепей напряжения; «Вход-2 СПЛ» – пуск МТЗ от ПС 35 кВ в сторону РУ 6 кВ «ЭСН»; «ИО I макс» – пуск МТЗ терминала РЗА БЭМП РУ 6 кВ «ЭСН»; «ИО РМН-1» – реле направления мощности терминала РЗА БЭМП РУ 6 кВ, срабатывающее в сторону ПС 35 кВ; «Выход-2 СПЛ» – отключение выключателя 6 кВ яч.205(305) РУ 6 кВ «ЭСН»; «Выход-3 СПЛ» – отключение выключателя 6 кВ яч.1(10) ПС 35 кВ. Дополнительно на отключающие воздействия добавлены формирователи импульса для исключения отказа защиты в случае разновременности отключения выключателей и снятия одного из сигналов «Пуск МТЗ».

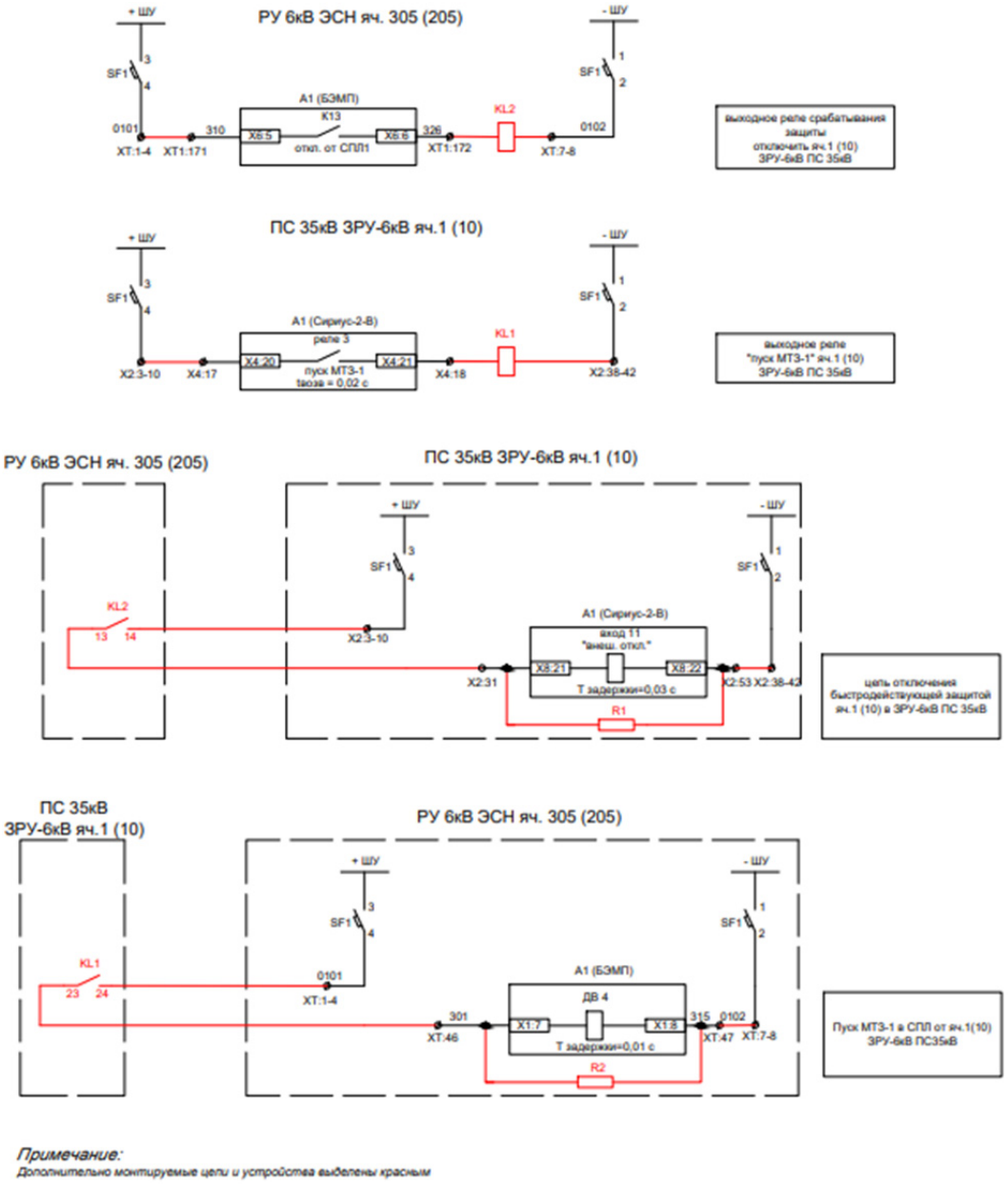


Рис. 3. Схема подключения

Реализованная логическая защита линии отличается простотой исполнения и по принципу действия является абсолютно селективной. Основным преимуществом является отсутствие необходимости приобретения комплектов дифференциальной защиты линии, оптической связи со специальными преобразователями или контрольного кабеля большего сечения по сравнению с использованным, в зависимости от мощности трансформаторов тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Беляев А.В., Юрганов А.А. Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики: учебное пособие. В 3 ч. – Ч. 1. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПБ.: ПЭИПК, 2016. – 72 с.

ВИРТУАЛЬНАЯ ИНЕРЦИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Д.Д. Сарнаков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

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

Современная энергосистема переходит от использования синхронных машин к преобладанию инверторов с возобновляемыми источниками энергии, такими как ветер и солнце. Это приводит к нестабильности частоты, поэтому требуется использование инверторов с алгоритмами управления виртуальной инерцией (ВИ) для поддержания стабильности системы. Спрос на экологически чистую энергию постоянно растет из-за цен на топливо и законодательства. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) начинают доминировать в производстве электроэнергии, вытесняя традиционные источники, такие как уголь и атомная энергетика. Распределенные фотоэлектрические станции также становятся все более популярными. Отчеты показывают, что стабильность частоты вызывает озабоченность из-за отсутствия инерционной реакции ВИЭ. Это приводит к увеличению нарушений частоты, коррелирующих с ростом использования ВИЭ. Как результат, инерционный отклик ветротурбин становится обязательным во многих странах, а эта тенденция распространяется и на фотоэлектрические станции.

В энергосистеме применяются различные методы управления в течение различных временных интервалов. Основное управляющее воздействие происходит на протяжении 10–30 с, которое используется для уменьшения отклонения частоты. После этого, происходит управляющее воздействие, которое восстанавливает частоту до исходного значения.

Необходимость виртуальной инерции заключается в том, что при дисбалансе между потребляемой и генерируемой энергии, система не может сбалансироваться мгновенно. Из-за неспособности мгновенной реакции на изменение в системе, увеличивается скорость изменения частоты, тем самым низкая частота достигается в очень короткое время. Поэтому первичное регулирование частоты не всегда успевает среагировать за короткий промежуток времени (обычно менее 10 с), чтобы остановить изменение частоты системы

В случае дисбаланса между производством и потреблением электроэнергии возможно срабатывание частотных реле, что может привести к низкочастотному отключению нагрузки и даже к каскадному отключению. Для предотвращения подобных ситуаций в систему можно добавить виртуальную инерцию, которая будет работать автономно в течение очень короткого времени (менее 10 с) и повысит устойчивость системы, позволяя более эффективно использовать возобновляемые источники энергии.

При подключении к сети частота регулируется основной сетью, и отклонения частоты невелики. Однако с ростом интеграции крупномасштабной безынерционной генерации сценарий постепенно меняется. IEEE рекомендует работать с частотой ±0,006 % для систем, которые подключены к сети. NERC рекомендует запускать первый уровень защиты при снижении частоты системы ниже 1,2 %. Активация защиты является последней автоматизированной мерой обеспечения надежности для противодействия снижению частоты и восстановления баланса системы. Рекомендуемые NERC управляющие воздействия отключают генераторы при снижении частоты ниже 5 % или повышении выше 3 %.

Существует несколько топологий для создания виртуальной инерции, рассмотрим самые популярные из них.

Синхронный преобразователь (СП)

После возмущения уравнение частоты может быть аппроксимировано, как показано в уравнении (1):

$$P_{\text{ген}} - P_{\text{п}} = J \cdot \omega \cdot \frac{d(\omega)}{d(t)}. \quad (1)$$

где $P_{\text{ген}}$ – генерируемая мощность, $P_{\text{п}}$- потребляемая мощность, J – момент инерции, ω – частота.

Данное уравнение преобразуется и решается системой, для регуляции частоты. В результате снимаются такие показания как, выходной ток инвертора и напряжение, а задаются такие параметры как, момент инерции и коэффициент демпфирования. С помощью данных параметров формируется виртуальная частота синхронизации, которая в последующем используется для широтно-импульсной модуляции. Результирующие уравнение образует контур с фазовой автоподстройкой. Но использование данного контура в небольших сетях является нецелесообразным. Также, результирующее уравнение не требует производную по частоте, что значительно облегчает обработку уравнения, т. к. сложность данных уравнений может привести к неустойчивости системы. Таким образом, данная модель воспроизводит динамику синхронного генератора для регулирования частоты и реализация виртуальной инерции.

Топология Ise lab

Топология Ise lab, похожа на топологию синхронного преобразователя, но вместо того, чтобы использовать модель синхронного генератора, данная топология решает уравнение колебаний частоты каждый раз, таким образом регулируя частоту. Как и в случае с синхронным преобразователем снимаются такие показания как, выходной ток инвертора и напряжение, и рассчитывается частота и активная мощность инвертора. В результате чего, решается уравнение, и формируется фазовая команда θ. Опять же, для решения уравнения не требуется производная от частоты.

Виртуальный синхронный генератор (ВСГ)

Основная идея виртуальных синхронных генераторов заключается в способности реагировать на изменение частоты. По сравнению с традиционными регуляторами, обеспечивающими только регулирование частоты, подход ВСГ позволяет осуществлять динамическое управление частотой.

Это динамическое управление основано на производной от измерения частоты. Несмотря на сложность данной топологии из-за использования производной по частоте, эта топология используется европейской исследовательской группой VSYNC, которая продемонстрировала эффективность эмуляции инерции с помощью топологии VSG с помощью моделирования в реальном времени и нескольких экспериментов. [2]

Сравнение топологий

Проведём сравнение топологий синхронного генератора, Ise Lab и виртуального синхронного генератора. Для этого в работе [1] смоделировали ступенчатое увеличение нагрузки на 2 кВт. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Для сравнения представлены такие параметры, как максимальная просадка частоты, максимальное увеличение скорости изменения частоты, пиковая мощность. В эксперименте считалось, что частота вернулась в нормальный диапазон в пределах изменения 0,25 Гц от конечного значения эксперимента до увеличения нагрузки. Из результатов в таблице, можно увидеть, что пиковая мощность различалась незначительно, самая высокая была у ВСГ. Необходимо заметить, что при исполь-

зовании виртуальной инерции время установления увеличивается в 1,1–1,6 раз. Это происходит из-за того, что добавление виртуальной инерции замедляет динамику частоты. Тем не менее, стандарт для генераторных установок рекомендует время установления 10 с, а в данный стандарт ни одна топология не укладывается.

Таблица 1. Сравнение производительности систем без виртуальной инерции (ВИ) и с ВИ, реализованной с помощью топологий синхронного преобразователя, Ise lab и ВСГ

Параметр	Без ВИ	Синхронный преобразователь	Ise lab	ВСГ
Минимальная частота, Гц	57,3	58,1	58,6	58,3
Максимальная скорость изменения частоты, Гц/с	1,9	1,5	1,6	1,7
Время установления процесса, с	11,3	13,2	17,7	17,9
Пиковое значение мощности, Вт	0	1825	1800	1929

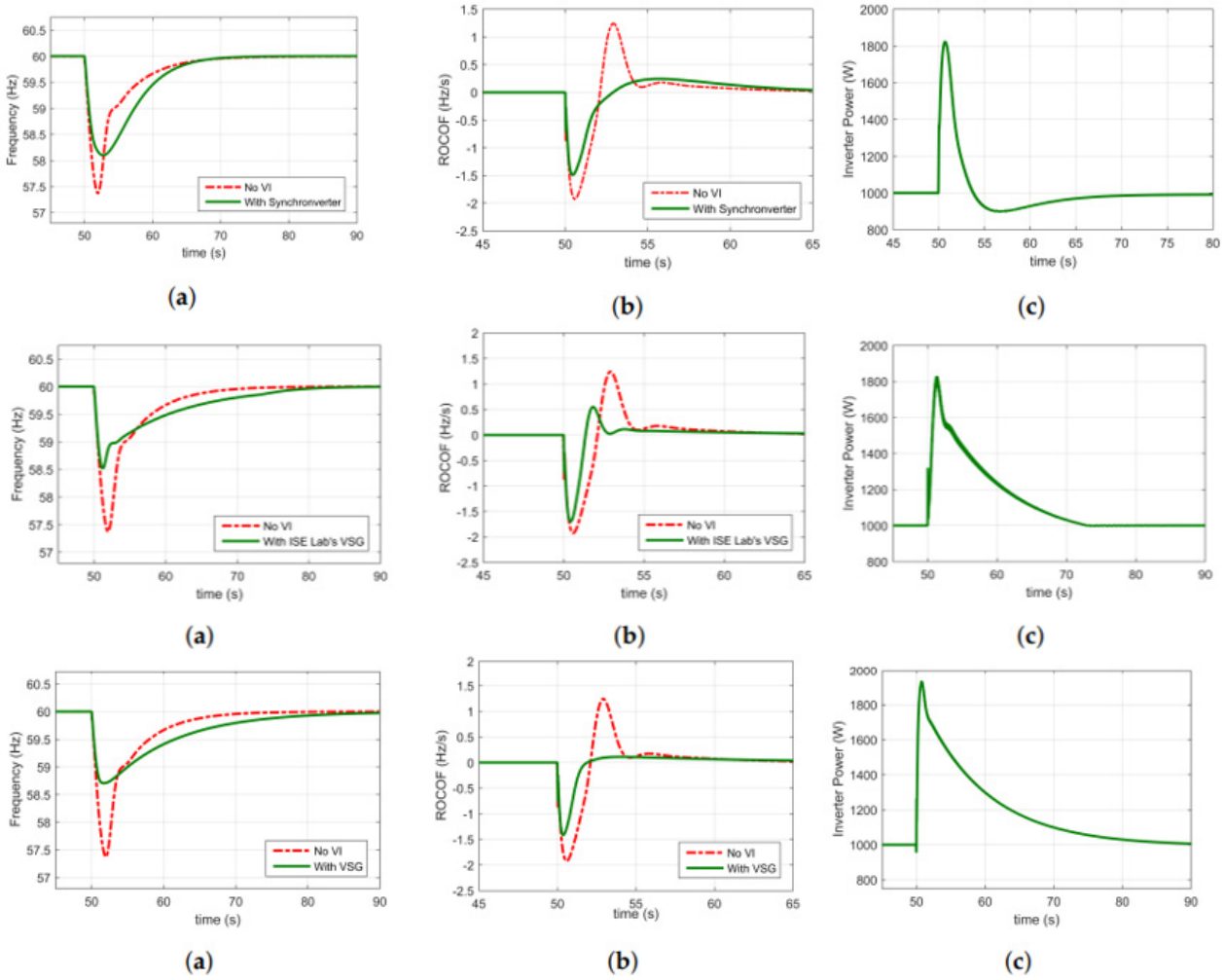


Рис. 1. Результаты моделирования работы синхронного преобразователя – 1 строка, Ise Lab – 2 строка, виртуальный синхронный генератор – 3ья строка, (а) частота системы после ступенчатого увеличения нагрузки на 2 кВт; (б) увеличение скорости изменения частоты после ступенчатого увеличения нагрузки на 2 кВт; (в) увеличение мощности преобразователя в ответ на увеличение мощности системы

Выбор конкретной топологии зависит от области применения и желаемого уровня воспроизведения динамики СГ. Такие топологии, как СП и топология лаборатории Ise могут быть более подходящими для изолированных энергосистем, так как они могут работать автономно как устройства, образующие сеть. Топология VSG с другой стороны, по своему по-

ведению больше похожа на устройство слежения за сетью с дополнительными возможностями инерционного реагирования и больше подходит для взаимосвязанных операций, т. к. реагирует на изменение частоты.

В настоящее время, данные топологии стараются активно усовершенствовать. Так для топологии СП было предложено увеличение индуктивности фильтра СП и вспомогательный контур вокруг частотного контура, что повысит его скорость реакции на возмущение. Для топологии Ise Lab предложен подход, который основан на эмуляции переменного момента инерции, что уменьшит колебания мощности. Для уменьшения колебаний мощности также предложен приём с регулированием «виртуального реактивного сопротивления статора». Для ВСГ была разработана самонастраивающаяся система, использующая метод онлайн-оптимизации для настройки параметров алгоритма управления ВСГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrakar U. Et al. Current Trends and Future Directions // Applied siences. – 2017. – № 4. – P. 1–29.
2. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 373–378.

СИНХРОНИЗАЦИЯ MICROGRID С ВНЕШНЕЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Т.А. Киргизалиев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

Микросеть представляет собой небольшую локализованную систему электроснабжения, которая может работать независимо от центральной электросети или быть интегрированной с ней. Времена, когда энергетическая система была представлена только большими централизованными электростанциями, уходят в прошлое. Сегодня микросети становятся все более распространенными, и именно поэтому вопрос об их синхронизации с внешней системой является столь актуальным. В наше время в качестве объединяющего элемента внешней сети с микросетью применяются реклоузеры, множество из которых не имеют функцию синхронизации, необходимой для работы в сетях с генерацией. Так как реклоузеры устанавливаются на участках сети, расположенных далеко от генераторов, синхронизацию необходимо выполнять на самих реклоузерах, а не на генераторных выключателях. В связи с этим, требуется совершенствовать функциональные возможности реклоузеров, например, с помощью блока синхронизации, который, как следует из вышесказанного, целесообразно установить в шкаф управления реклоузера, тем самым сделав реклоузер компонентом интеллектуальной сети.

При синхронизации микросети с большой внешней сетью очень часто возникают трудности, связанные с невыполнением условий синхронизации, главной причиной которых является частое изменение мощности нагрузок в microgrid. Данная причина является важной для учёта, потому что во время объединения внешней сети с microgrid нагрузка в микросети может измениться в момент подачи сигнала на включение объединяющего выключателя, что окажет влияние на несоответствие условий синхронизации еще до того момента, как объединяющий выключатель полностью включится, тем самым приводя к свдигу угла фаз между векторами напряжений микросети и внешней сети. Так как угол сдвига фаз будет намного

больше допустимого, возникнет уравнительный ток, за которым последует резкий момент, приводящий к срабатыванию механизмов защиты и, соответственно, к отключению генераторов микросети. Из-за образующегося момента срок службы генераторов может сократиться, кроме того, может произойти аварийная ситуация.

На рис. 1 изобразим алгоритм работы блока синхронизации на реклоузерах. Данный алгоритм помогает уменьшить воздействие ударных моментов при подключении microgrid к внешней изолированный сети.

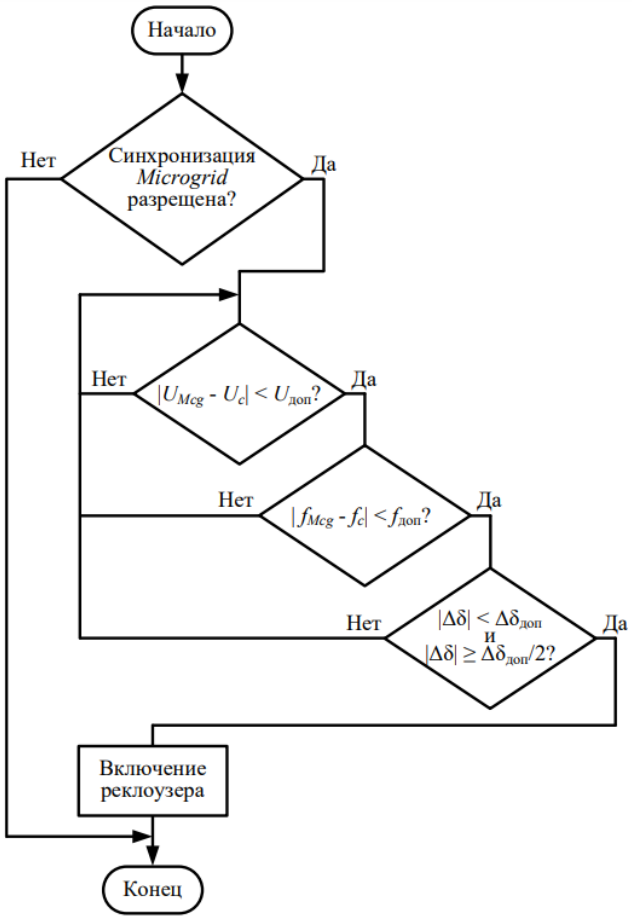


Рис. 1. Блок-схема алгоритма синхронизации

Суть метода работы алгоритма заключается в том, что если первые два условия синхронизации выполнены, необходимо дождаться выполнение третьего. Сигнал на включение реклоузера не будет выдаваться до тех пор, пока угол сдвига фаз напряжений не будет равен $|\Delta\delta| \geq \Delta\delta_{доп}/2$, в свою очередь угол свдига фаз напряжений должен соответствовать следующему неравенству: $|\Delta\delta| < \Delta\delta_{доп}$.

При учете знака скольжения (S) условие № 3 будет иметь вид:

При $S \geq 0$:

$$0 \geq \Delta\delta \geq -\Delta\delta_{доп}/2.$$

При $S < 0$:

$$\Delta\delta_{доп}/2 \geq \Delta\delta \geq 0.$$

Ниже на рис. 2 можно увидеть, что при подаче сигнала на включение угол сдвига фаз не должен быть больше допустимого угла, соответственно, для этого необходимо иметь некоторый запас по времени для включения реклоузера $t_{вкл.}$ Если вышеупомянутое условие не выполняется, то сигнал на включение реклоузера заблокируется, тем самым присоединение микросети с внешней не произойдет.

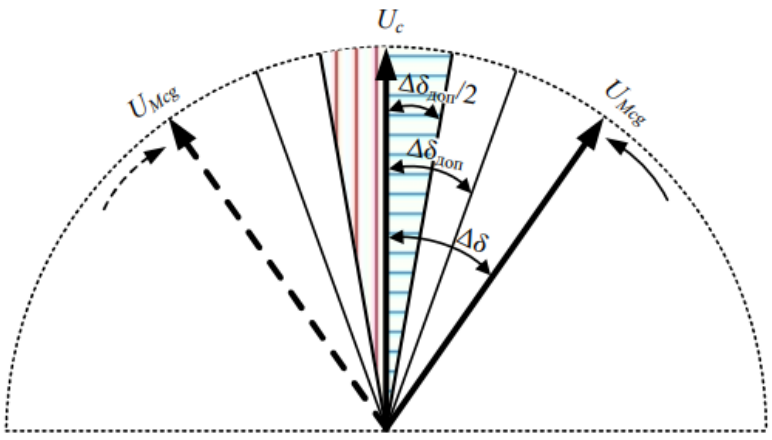
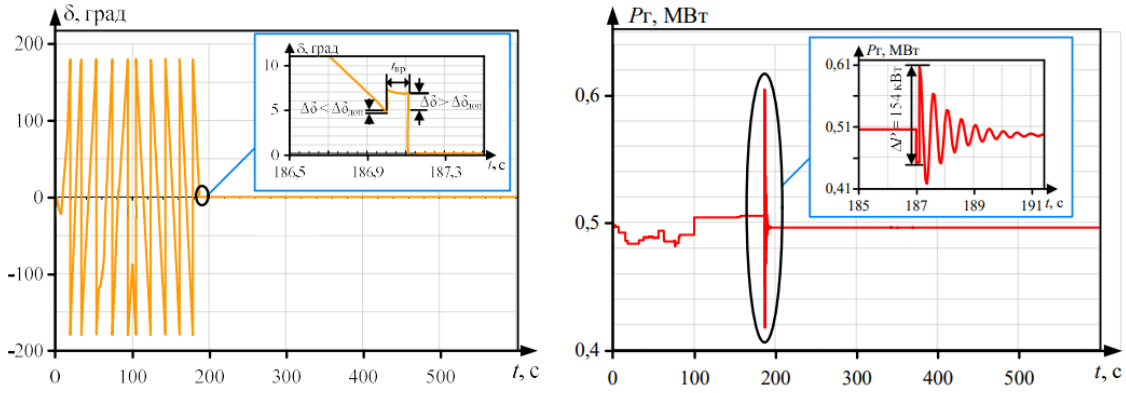


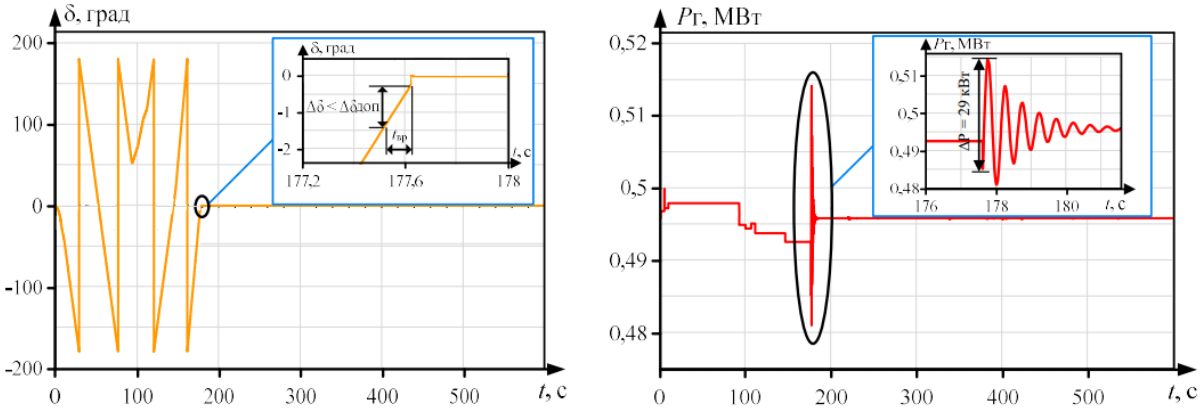
Рис. 2. Пояснение алгоритма работы

Работоспособность алгоритма можно увидеть на рис. 3 и 4.



а *б*

Рис. 3. Графики изменения взаимного угла (а) и мощности генератора (б) до использования алгоритма



а *б*

Рис. 4. Графики изменения взаимного угла (а) и мощности генератора (б) после использования алгоритма

По рис. 3 и 4 можно сделать вывод, что алгоритм отлично справляется со своей задачей. Если до его использования угол включения Microgrid к внешней сети был равен $\delta \approx 7°$ (что не допустимо в ударный момент) и скачок мощности был $\Delta P = 154$ кВт, то после использования алгоритма угол понизился до 0,3° и мощность стала $\Delta P = 29$ кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hossaina M.A. et al. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities // Elsiver. – 2019. – P. 1–27.
2. Гуломзода А.Х., Сафаралиев М.Х., Люханов Е.А. Модифицированный способ синхронизации Microgrid с внешней изолированной энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 72–80.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LVRT ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ

М.В. Хромов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

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

За последние несколько лет развитие возобновляемых источников энергии внесло большой вклад в составление энергетической сети России. На момент октября 2022 года доля генерации возобновляемых источников энергии составляет 2,2 % по России. По данным ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ), совокупная мощность объектов ВИЭ-генерации в России составила 5,51 ГВт [1]. После 2020 года наблюдается активный прирост использования возобновляемых источников энергии. Это связано развитием новых возможности добычи электроэнергии без затрат и так истощаемых запасов ископаемого топлива, роста спроса на энергию и экологические проблемы. Исходя из постановления Правительства РФ от 29 августа 2020 г. N 1298 «О вопросах стимулирования использования возобновляемых источников энергии, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» можно утверждать, что развитие ВИЭ занимает определенные участки генерации в энергосистеме [2]. В числе Российских регионов наибольший прирост замечен в Ставропольском крае. «С постоянным увеличением объемов подключения энергии ВИЭ к электрическим сетям, точность управления параметрами фотоэлектрических систем генерации становится залогом стабильной работы энергосистемы. В приказе министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. N 548 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики» акцентируется внимание на том, что с появлениями новых методов генерации требуют новые методы защиты для поддержания устойчивости энергосети [3]. Одним из таких методов контроля изменения характеристики поведения напряжения является LVRT характеристика.

До применения LVRT характеристик в случае возникновения неисправностей в сети, генерация ВИЭ полностью прекращалась, и энергетическая сеть теряла больше количество генерации в моменте, что пагубно сказывалось на устойчивости и качество электроэнергии.

LVRT (Low voltage ride through) – это способность инвертора отслеживать снижение напряжения и в зависимости от продолжительности снижения напряжения отключать или же удерживать в работе альтернативные источники энергии и выдавать мощность в систему.

Схема работы LVRT характеристики обычно включает следующие этапы:

1. Обнаружение снижения напряжения: Инвертор постоянно анализирует напряжение в электрической сети в РРС. Когда происходит снижение напряжения ниже определенного порогового значения, срабатывает функция LVRT.

2. Анализ условий: После обнаружения снижения напряжения, инвертор анализирует текущие условия в сети и определяет, какие меры должны быть приняты для поддержания нормальной работы.

3. Динамическое регулирование мощности: Инвертор с помощью широтно-импульсной модуляции может динамически регулировать выходную мощность, чтобы удерживать ее на оптимальном уровне при снижении напряжения.

4. Поддержание сетевой стабильности: Одной из главных целей LVRT является поддержание стабильности электрической сети во время снижения напряжения. Инвертор может принимать меры, такие как управление реактивной мощностью или внедрение дополнительных устройств, чтобы удерживать стабильность и предотвращать возможные проблемы сети.

5. Восстановление работы: Когда напряжение в сети восстанавливается до нормального уровня, инвертор возвращается от режима характеристик LVRT к нормальному режиму работы и продолжает генерировать электрическую энергию.

Кривая LVRT характеристика представлена на рис. 1.

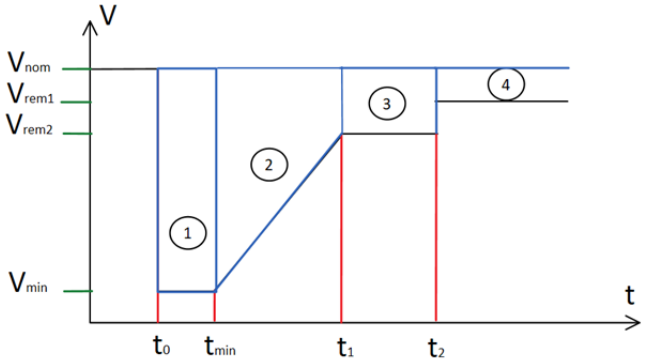


Рис. 1. Требуемая проходная способность по напряжению

Характеристику можно разделить на четыре основных зоны зависимости напряжения от времени работы системы.

Для системных неисправностей (падения напряжения), длящихся от 0 до $t_{\min}$ при условии, что напряжение находиться в промежутке от $V_{\min}$ до V_{nom} ВИЭ-генерация должна быть подключена к сети.

К области 2 относиться линейный рост напряжения от $V_{\min}$ до V_{rem1} на промежутке от $t_{\min}$ до t_1. Данная настройка обеспечивает устойчивость выработки генерации в сеть, но большинство реле предоставляет возможность работы только с дискретными временными интервалами времени, а не с линейным и непрерывным ростом, как в данной характеристике.

Данная область предназначена для восстановления системы, при этом просадка напряжения разрешена от V_{rem2} до V_{rem1} на промежутке времени от t_1 до t_2.

Четвертая область предназначена для полного восстановления режима работы сети и ВИЭ-генерации. Возможно минимальное снижение напряжения от V_{nom} до V_{rem2}, в данном случае защита не должна сработать.

Для изменения характеристик требуется подача реактивной мощности для поддержания напряжения в зависимости от падения напряжения.

Значительное снижение напряжение особенно пагубно сказывается на IGBT контроллере, в следствие которого увеличивается ток, приводящий к перегоранию ключей в нем. Для контроля отключения генерации от сети используется защитное цифровое реле, оно защищает от падения или скачков напряжения в сети. Данные по напряжению берутся с точки общего соединения (PPC). Если напряжение в точке общей связи находится выше кривой LVRT, станция остается подключенной и должна быть отключена только в том случае, если напряжение принимает значения ниже кривой. Во время сбоев и провалов напряжения станция должна обеспечивать максимальный реактивный ток в сети, не превышая переходного номинала станции. Базовые значения напряжения, определенные системным оператором [4].

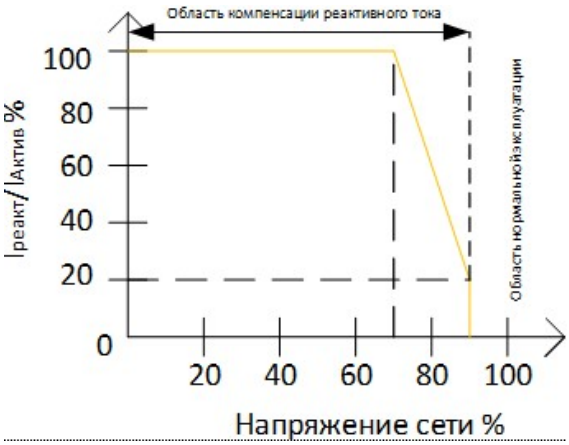


Рис. 2. Настройка выдачи реактивной мощности во время работы LVRT

Исследования и моделирование LVRT характеристик могут помочь в оптимизации проектирования и эксплуатации энергетических систем, а также в разработке новых методов и технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Зеленые» кадры решают все. – URL: https://xn-----glcfccctdci4bhow0as6psb.xn--p1ai/novosti/zelenye-kadry-reshayut-vse/ (дата обращения 01.11.2023).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.08.2020 г. № 1298
3. «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики”». Приказ Министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. N 548
4. Hannan A.M., Ammar A.A., Pin J.K. Power Quality Assessment of Grid-Connected PV System in Compliance with the Recent Integration Requirements, 2020.

ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ВИЭ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЭС

А.В. Десятов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

Научный руководитель: Ю.Д. Бай, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В соответствии с мировым технологическим прогрессом в области возобновляемых источников энергии интеграция производства электроэнергии с использованием энергии солнца и ветра в национальную энергосистему очень важна, поскольку это будет способствовать снижению зависимости от внешних источников энергии и созданию экономически оправданных альтернатив, позволяющих сократить общие расходы на электроэнергию без каких-либо негативных последствий для энергоэффективности и местного населения.

Актуальность для России

Значительная часть территорий России, в особенности районы Дальнего Востока, Арктики и Крайнего Севера, а также малые поселения и районы с низкой плотностью населения, не имеют централизованного энергоснабжения. Главной причиной является невыгодность экономической стороны постройки линий электропередач, это вызвало проблемы с энергетическим обеспечением этих районов. Развитие возобновляемой энергетики, в том числе использование солнечной энергии, является одним из способов решения этой проблемы.

Темпы внедрения

В РФ был принят федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», а также утверждена Стратегия социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, согласно которой реализация целевого сценария позволит Российской Федерации достичь баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 года.

В 2021 году Правительством РФ принято решение о продлении программы поддержки возобновляемой энергетики (ДПМ ВИЭ 2.0). Целевой объём ввода СЭС составляет 3,5 ГВт, который планируется достичь уже к 2035 году.

Постановка задачи

По сравнению с традиционными турбинными установками, солнечные имеют иные технические характеристики. При их подключении они создают дополнительные проблемы

поддержания устойчивости систем электропередачи как при нормальной работе, так и в случае аномальных возмущений. Соответственно, ожидаемые сценарии работы, должны быть заранее определены и изучены для поддержания устойчивости сети электропередачи и поддержания поставок в течение дня и ночи.

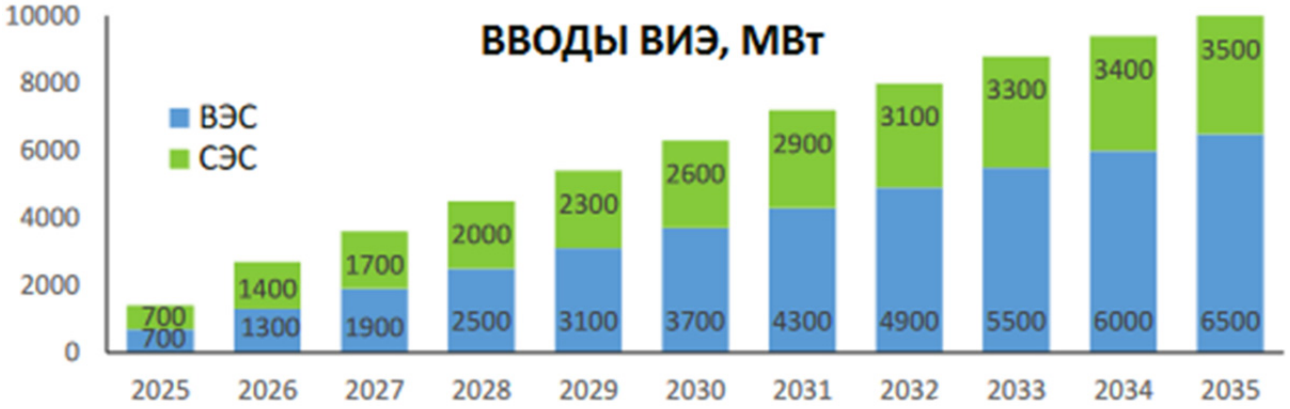


Рис. 1. Основные параметры будущей программы поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг.

Влияние внедрения СЭС

В отличие от источников энергии на базе синхронных генераторов, солнечные электростанции (СЭС) отделены от сети и не оказывают ей инерционной поддержки, так как взаимодействуют с сетью через силовые электронные инверторы. Снижение инерционности энергосистемы может привести к возникновению ряда эксплуатационных проблем и вопросов для операторов энергосистем, особенно в части стабильности частоты и напряжения. Сеть становится более восприимчивой к таким событиям, как внезапная потеря генерации, изменение нагрузки, короткое замыкание, а также способность сети реагировать и останавливать изменения частоты после возмущения снижается. В свою очередь, возрастает риск нестабильности частоты сети и каскадных сбоев.

Помимо проблем со стабильностью частоты, к числу других значимых проблем, связанных с малоинерционной энергосистемой, относятся низкий коэффициент короткого замыкания и прочность системы, изменение настроек защитных устройств, снижение способности к прохождению КЗ. Дополнительная инерционность и быстрая поддержка частоты станут необходимыми для обеспечения масштабного проникновения возобновляемых источников энергии в энергосистему.

Используемая модель

С целью исследования влияния ВИЭ на режимы ЭЭС смоделируем поведение системы с помощью создания схемы замещения солнечной панели в программе Matlab Simulink. На данный момент известно большое количество математических моделей СП, однако в рамках данной работы будет использоваться эквивалентная двухдиодная модель, считающаяся наиболее достоверной и распространённой. Представленная двухдиодная модель фотоэлектрического модуля (рис. 2) показывает аналогичные результаты в рамках стандартных условий.

Данная модель описывается следующим уравнением:

$$I_c = I_p - I_{d1} exp\frac{e(U_c+I_cR_п)}{n_1kT} - I_{d2} exp\frac{e(U_c+I_cR_п)}{n_2kT} - \frac{(U_c+I_cR_п)}{R_ш},$$

где I_p – фототок, I_{d1} – ток протекающий через неидеальный p-n-переход, I_{d2} – обратный ток насыщения.

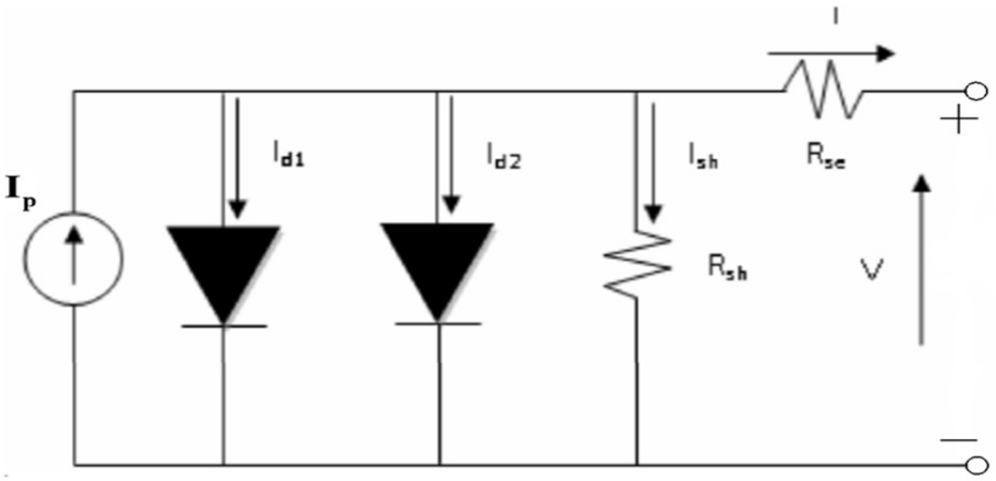


Рис. 2. Схема замещения солнечного элемента

Сбор модели осуществлялся согласно приведённому математическому уравнению в программном комплексе Matlab. Модель в Matlab собрана в виде следующих блоков: блок фототока, блоки диодных токов, блок тока через шунтирующее сопротивление, решающий блок Solve. Также для создания модели использовались блоки умножении и сложения.

Основные блоки модели представлены на рис. 3.

С целью дальнейшего исследования влияния СЭС на характеристики ЭЭС была реализована описанная выше математическая модель солнечной панелей Kyocera KC130TM в программном комплексе MATLAB Simulink. Реализованная математическая модель с допустимой степенью адекватности воспроизводит ВАХ СП. ВАХ двухдиодной математической модели практически совпадает с ВАХ СП в точках ХХ и КЗ. В дальнейших исследованиях будем полагать, что данная модель является эталонной.

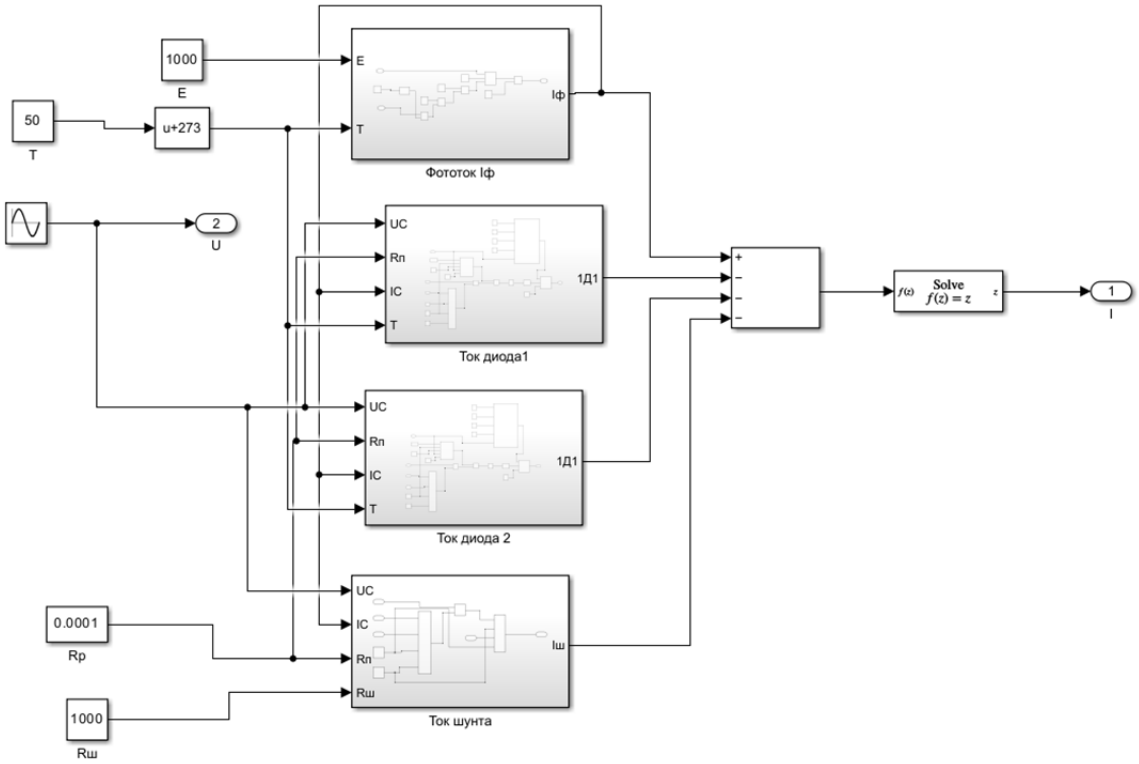


Рис. 3. Схема математической модели солнечной панели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eftekharnejad S., Vittal V., Heydt G.T., Keel B., Loehr J. Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – Vol. 28. – Iss. 2. – P. 893–901. – URL: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216294
2. Renewables 2019 Global Status Report // Ren21.Renewables now. – URL: https://www.ren21.net/gsr2019/chapters/chapter_03/chapter_03/ (01.11.2023).
3. Nema S., Nema R.K., Agnihotri G. MATLAB/Simulink based study of photovoltaic cells /modules / array and their experimental verification // International journal of Energy and Environment. – 2010. – Vol. 1. – No. 3. – P. 487–500.
4. Abd Alrahim Shannan N.M., Yahaya N.Z., Singh B. Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules: A Comparison. In: Control System, Computing and Engineering: International Conference. 2013. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/6719960 [Accessed 27th February 2020].
5. Российский союз промышленников и предпринимателей / Программа поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг. Руководитель инвестиционного дивизиона ВИЭ ООО «УК «РОСНАНО» А.Б. Каланов. – URL: file:///C:/Users/ %D0 %90 %D0 %BB %D0 %B5 %D0 %BA %D1 %81 %D0 %B5 %D0 %B9/Downloads/2502ae1262d70e4e020677e29ad60c23-2.pdf
6. Kyocera KC130TM Solar Panel // SOLAR ELECTRIC SUPPLY, INC. – URL: https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc130tmsolar-panel [01.11.2023]

РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ И КОНТРОЛЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Б.Б. Холихматов

Ташкентский государственный технический университет,
ЭЭ, ЭС

Научный руководитель: И.У. Рахмонов, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭС ТГТУ

В данной статье рассматривается актуальная проблема несимметрии напряжения в электроснабжении сталеплавильных предприятий. Несимметрия напряжения, вызванная неравномерным распределением нагрузки и неисправностями в электрооборудовании, может привести к серьезным повреждениям оборудования и снижению качества производимой стали. В статье рассмотрены причины несимметрии напряжения, а также подробно рассмотрены стратегии автоматизации и контроля этого явления, включая математическое моделирование, алгоритмы машинного обучения и системы управления энергопотреблением. Освещены выгоды от внедрения систем автоматизации и контроля, такие как стабильность производства, снижение эксплуатационных расходов и улучшение качества продукции. Также рассмотрены перспективы развития данной области и возможности для инноваций в сталеплавильной промышленности.

Ключевые слова: Несимметрия напряжения, сталеплавильные предприятия, автоматизация, контроль, электроэнергия.

Введение

В эпоху стремительных технологических изменений и постоянного роста потребительского спроса, сталеплавильные предприятия сталкиваются с новыми вызовами и возможностями. Одним из ключевых аспектов, определяющих эффективность сталеплавильных процессов, является качество и стабильность электроэнергии. В данной статье мы рассмотрим не только технические аспекты несимметрии напряжения в сталеплавильных печах, но и углубимся в роль автоматизации и контроля, предоставив всесторонний анализ современных инноваций в данной области [5].

Несимметрия напряжения: Причины и влияние

Несимметрия напряжения, часто вызванная неравномерным распределением нагрузки в электрической сети или неисправностями в электрооборудовании, представляет собой серьезный технический вызов для сталеплавильных предприятий. Рассмотрим более подробно причины этого явления и его влияние на работу сталеплавильных печей [1].

Причины несимметрии напряжения:

- *Неравномерное распределение нагрузки:* Несимметрия напряжения может возникнуть из-за неравномерного распределения электрической нагрузки между фазами системы.
- *Неисправности в электрооборудовании:* Повреждения трансформаторов, выключателей, или другого электрооборудования могут вызвать несимметрию напряжения.
- *Внешние воздействия:* Грозы, молнии, и другие атмосферные явления могут вызвать временные колебания напряжения в сети.

Влияние несимметрии напряжения на сталеплавильные печи:

- *Повреждение электрооборудования:* Несимметрия напряжения может привести к избыточному тепловыделению в оборудовании, вызывая его перегрев и повреждение. Это особенно критично для систем управления и силовых трансформаторов, что может привести к длительным простоям и серьезным экономическим потерям [7].
- *Снижение эффективности процессов:* Несимметрия напряжения может привести к неравномерному нагреву материалов внутри печи. Это влечет за собой неоднородность температуры и состава стали, что ухудшает качество продукции.
- *Потери в энергосистеме:* Перекосы напряжения могут вызывать дополнительные потери в энергосистеме из-за неэффективного использования электроэнергии.
- *Сложности в обслуживании и ремонте:* Постоянные сбои из-за несимметрии напряжения требуют частых обслуживаний и ремонтов оборудования, что повышает операционные затраты и временные потери.

Понимание этих причин и влияния несимметрии напряжения позволяет разработать более точные и надежные системы контроля и автоматизации, что в свою очередь обеспечивает устойчивость и эффективность сталеплавильных процессов.

Автоматизация и контроль: Стратегии и подходы

Современные сталеплавильные предприятия все больше прибегают к автоматизации и контролю процессов для обеспечения стабильности в условиях сложных энергетических сетей. Рассмотрим конкретные стратегии и подходы к автоматизации и контролю несимметрии напряжения [2, 4]:

- *Усовершенствованные системы мониторинга.*

Современные системы мониторинга оснащены высокочувствительными сенсорами, способными обнаруживать даже незначительные изменения в напряжении. Эти сенсоры позволяют непрерывно отслеживать параметры электропитания в реальном времени, что является основой для быстрого реагирования на несимметрию напряжения.

- *Адаптивные алгоритмы управления.*

Использование адаптивных алгоритмов управления позволяет системе быстро реагировать на изменения в электросети. Эти алгоритмы способны автоматически корректировать параметры работы оборудования, чтобы компенсировать несимметрию напряжения, обеспечивая стабильность в работе сталеплавильных печей.

- *Использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения.*

Системы, основанные на технологиях искусственного интеллекта и машинного обучения, способны анализировать большие объемы данных и предсказывать возможные колебания напряжения. Используя данные из прошлых событий и факторы, такие как погодные усло-

вия, эти системы могут предотвратить возможные сбои, предпринимая необходимые корректирующие меры заранее.

- *Развертывание систем управления энергопотреблением.*

Интеграция систем управления энергопотреблением позволяет оптимизировать распределение нагрузки между фазами системы. Эти системы способствуют более эффективному использованию электроэнергии, снижая тем самым неравномерность напряжения в сети.

- *Реакция в реальном времени и автоматическая компенсация.*

Системы автоматической реакции в реальном времени способны быстро корректировать напряжение и токи, поддерживая их в рамках допустимых значений. Это обеспечивает непрерывную и стабильную работу сталеплавильных печей даже в условиях переменного электропитания [6].

Эти подходы к автоматизации и контролю несимметрии напряжения обеспечивают сталеплавильным предприятиям возможность эффективно управлять энергопотреблением, снижать риски повреждения оборудования и обеспечивать стабильность в производственных процессах.

Прогнозирование и превентивные меры [3]

В условиях нестабильности напряжения в электросетях сталеплавильные предприятия все чаще прибегают к использованию продвинутых методов прогнозирования и превентивных мер для минимизации рисков и обеспечения непрерывности производства. Рассмотрим подробнее, какие стратегии могут быть использованы в этой области:

- *Математическое моделирование и анализ больших данных.*

Использование математического моделирования и анализа больших данных позволяет предсказывать возможные колебания напряжения на основе исторических данных и актуальных показателей. Сбор и анализ больших объемов данных о напряжении, нагрузке и погодных условиях позволяют выявить закономерности и тренды, что полезно при прогнозировании возможных перепадов напряжения.

- *Применение алгоритмов машинного обучения.*

Алгоритмы машинного обучения могут обрабатывать сложные и многомерные данные для прогнозирования несимметрии напряжения. Нейронные сети, методы кластеризации и регрессионный анализ могут быть использованы для создания точных моделей, которые предсказывают возможные сценарии нестабильности напряжения в будущем.

- *Использование системы управления энергопотреблением.*

Интеграция системы управления энергопотреблением с алгоритмами прогнозирования позволяет предварительно распределять нагрузку и резервировать ресурсы, исходя из предсказанных показателей. Это позволяет минимизировать риски и гарантировать стабильность энергоснабжения в условиях возможных колебаний напряжения.

- *Превентивные меры и быстрое реагирование.*

На основе прогнозов можно разрабатывать превентивные меры, такие как автоматическое включение резервных источников питания, временное отключение нагрузки или резервирование ключевых систем. Быстрое реагирование на предсказанные сценарии позволяет избежать возможных аварий и уверенно управлять энергетическими рисками.

Прогнозирование и превентивные меры на основе анализа данных становятся ключевыми инструментами для обеспечения устойчивости сталеплавильных процессов. Их интеграция в системы управления позволяет предотвращать простои и повышать эффективность производства в условиях нестабильности электропитания.

Заключение

Автоматизация и контроль несимметрии напряжения представляют собой ключевые факторы в обеспечении устойчивости и эффективности сталеплавильных процессов. Инновационные технологии в этой области не только содействуют повышению производительности, но и создают устойчивую основу для будущего развития сталеплавильных предприятий, что делает их более конкурентоспособными в современном промышленном мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson P. M., Fouad A.A. Power System Control and Stability // John Wiley & Sons. – 2003.
2. Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – Vol. 38. – Issue 5. – P. 1399–1407.
3. Sutanto D., Jovanovic M., Shahidehpour M. Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow: A Comprehensive Review // IEEE Transactions on Power Systems. – 2001. – Vol. 16. – Issue 1. – P. 25–32.
4. Vittal V., Fu Y., Ting T.O. A Framework for Voltage Stability Monitoring, Analysis, and Enhancement // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18. – Issue 2. – P. 596–603.
5. Rakhmonov I.U., Kholikhmatov B.B. Analysis of stress asymmetry in steelmaking. ISJ Theoretical & Applied Science. – 2023. – Vol. 07. – Issue 123. – P. 257–260. – URL: http://s-o-i.org/1.1/TAS-07-123-31. – DOI: https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2023.07.123.31
6. Xolixmatov B.B., Kodirov Zh.U., Rakhimzhonov Zh.S. Application of thyristor voltage stabilizers at metallurgical enterprises // ISJ Theoretical and Applied Science. – 2022. – Vol. 06. – Issue 110. – P. 289–292. – URL: http://s-o-i.org/1.1/TAS-06-110-49 DOI: https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2022.06.110.49
7. Rakhmonov I.U., Xolixmatov B.B. Influence of voltage asymmetry on the intensity of the melting process // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 10. – Issue 7. – P. 20833–20836.

ЦИФРОВАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

П.В. Березный[1], А.С. Федькин[2], С.М. Хошбекян[2]

[1] Департамент энергетики блока разведки и добычи ПАО «Газпром нефть»
[2] Томский политехнический университет

Научный руководитель: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Введение

Основные районы добычи и переработки нефти и газа в России на протяжении многих лет неоднократно менялись, и, в настоящее время, они перемещаются в отдалённые регионы, что ведёт к децентрализации источников электрической энергии, так как передавать электроэнергию из единой энергосистемы (ЕЭС) и объединённых энергосистем (ОЭС) становится проблематично как технологически, так и финансово.

Нефтегазоконденсатным месторождениям (НГКМ) становится выгодным осуществлять производство собственной электрической энергии, особенно в изолированных энергосистемах (ЭС) [1].

Изолированная ЭС – это ЭС, не имеющая электрических связей для параллельной работы с другими ЭС [2]. Для поддержания её устойчивой работы необходимо постоянное поддержание равенства генерируемой и потребляемой мощностей, чтобы избежать нарушения баланса мощностей и частоты, поэтому создание цифровой расчётной модели изолированной

ЭС НГКМ для исследования, анализа и прогнозирования режимов работы изолированных ЭС является актуальной задачей.

Представленная в докладе модель НГКМ была создана в программном пакете Matlab Simulink [3], который в отличие от программных комплексов для расчёта электрических режимов, предоставляет возможность выполнения трёхфазного имитационного моделирования объектов, состоящих из блоков с заданными параметрами. Пакет расширения SimPowerSystems предназначен специально для моделирования электротехнических устройств в ЭС. В модель могут включаться блоки элементов ЭС, виртуальных регистрирующих приборов, графические средства анимации. Simulink является «виртуальной лабораторией», позволяющей собирать и исследовать работу электрических цепей и устройств. Получившаяся в результате виртуальная модель, позволяет проводить этапы исследования, присущие экспериментальному или опытному образцу [3].

Создание модели

Модель имитирует изолированную ЭС Новопортовского НГКМ. При построении модели некоторые узлы были сэквивалентированы, согласно правилам эквивалентирования для сокращения времени проведения расчётов.

Для создания модели использовались следующие блоки:

- Three-Phase Programmable Voltage Source (трехфазный источник переменного напряжения);
- Three-Phase Transformer (Two Windings) (трехфазный двухобмоточный трансформатор);
- Three-Phase Pi Section Line (линия электропередачи с сосредоточенными параметрами);
- Distributed Parameters Line (линия электропередачи с распределенными параметрами);
- Three-Phase Series RLC Load (трехфазная нагрузка).

Для расчета установившегося режима использовался блок Powergui, необходимый для определения на каждом участке электрической сети ЭС величин тока, напряжения и фаз. Без этого блока невозможно идентифицировать остальные блоки и произвести расчет.

Расчет установившегося режима производился с помощью опции Steady-State, фрагмент результатов представлен на рис. 1.

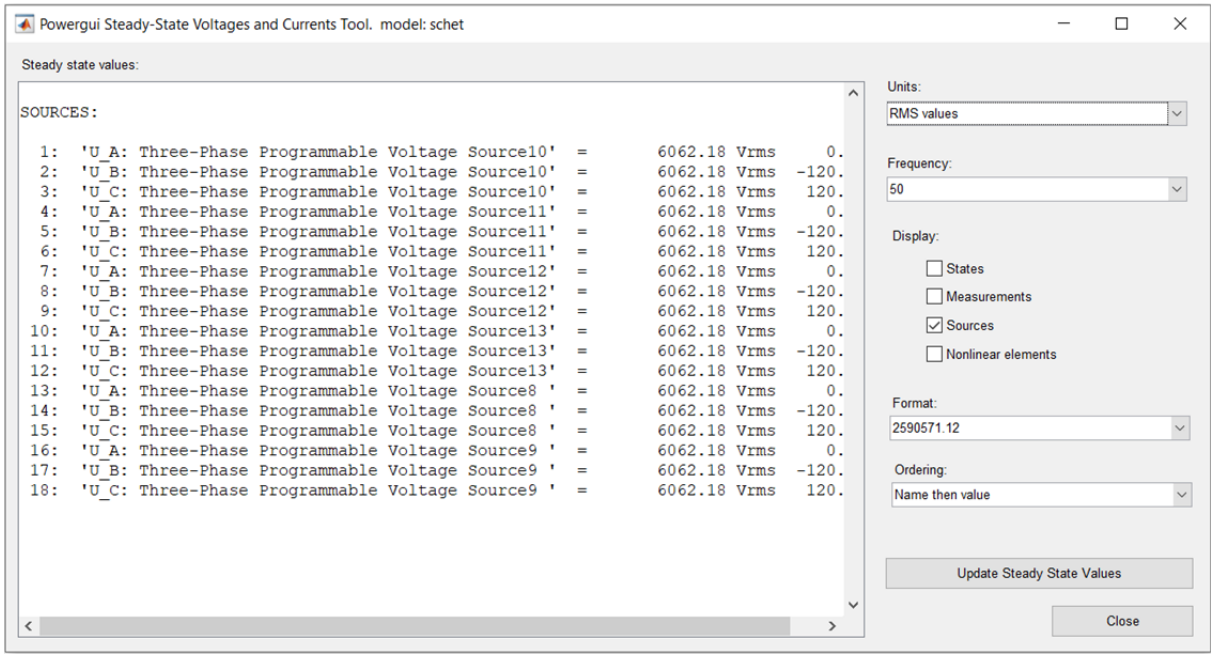


Рис. 1. Фрагмент результатов расчета установившегося режима

На рис. 1 представлено фазное напряжение на выводах обмоток генераторов, угол сдвига фаз относительно фазы А. В правом верхнем углу под надписью Units предлагается вывести действующее значение физической величины, либо амплитудное. Частота электрического тока по умолчанию задана 50 Гц.

Расчет установившегося режима можно производить стандартным методом. Для этого необходимо настроить параметры расчета в настройках программы Simulation/Model configuration parameters/Solver (рис. 2).

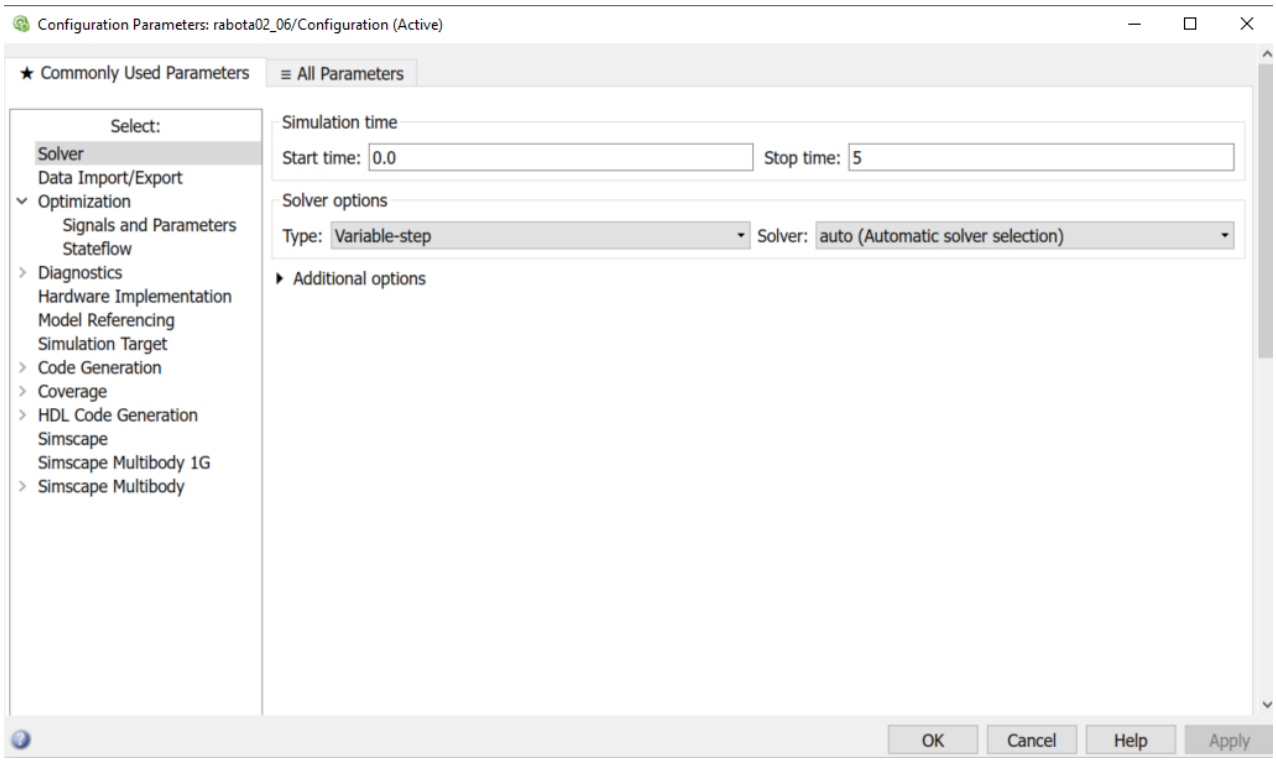


Рис. 2. Model configuration parameters/Solver

С помощью стандартного метода расчета можно получить не только режимные параметры в установившемся режиме, но и задать сценарий изменения схемно-режимной ситуации, увидеть осциллограммы изменения режимных параметров.

На рис. 3 и 4 приведена часть схемы для расчета стандартным методом и для Powergui/Steady-State соответственно.

Результаты расчета стандартным методом и с помощью Powergui/Steady-State идентичны, но время расчета установившегося режима с помощью Powergui гораздо меньше, чем с помощью стандартного метода, поэтому было принято решение использовать Powergui/Steady-State, а схему для стандартного метода имеет смысл использовать для расчетов динамических процессов в ЭС.

Верификация расчетной модели

Для достоверизации полученных в установившемся режиме параметров, производилось их сравнение с результатами, полученными для той же самой модели ЭС с помощью программно-вычислительного комплекса RastrWin3 [1].

В качестве примера в табл. 1 приведено сравнение расчетного напряжения в основных узлах ЭС.

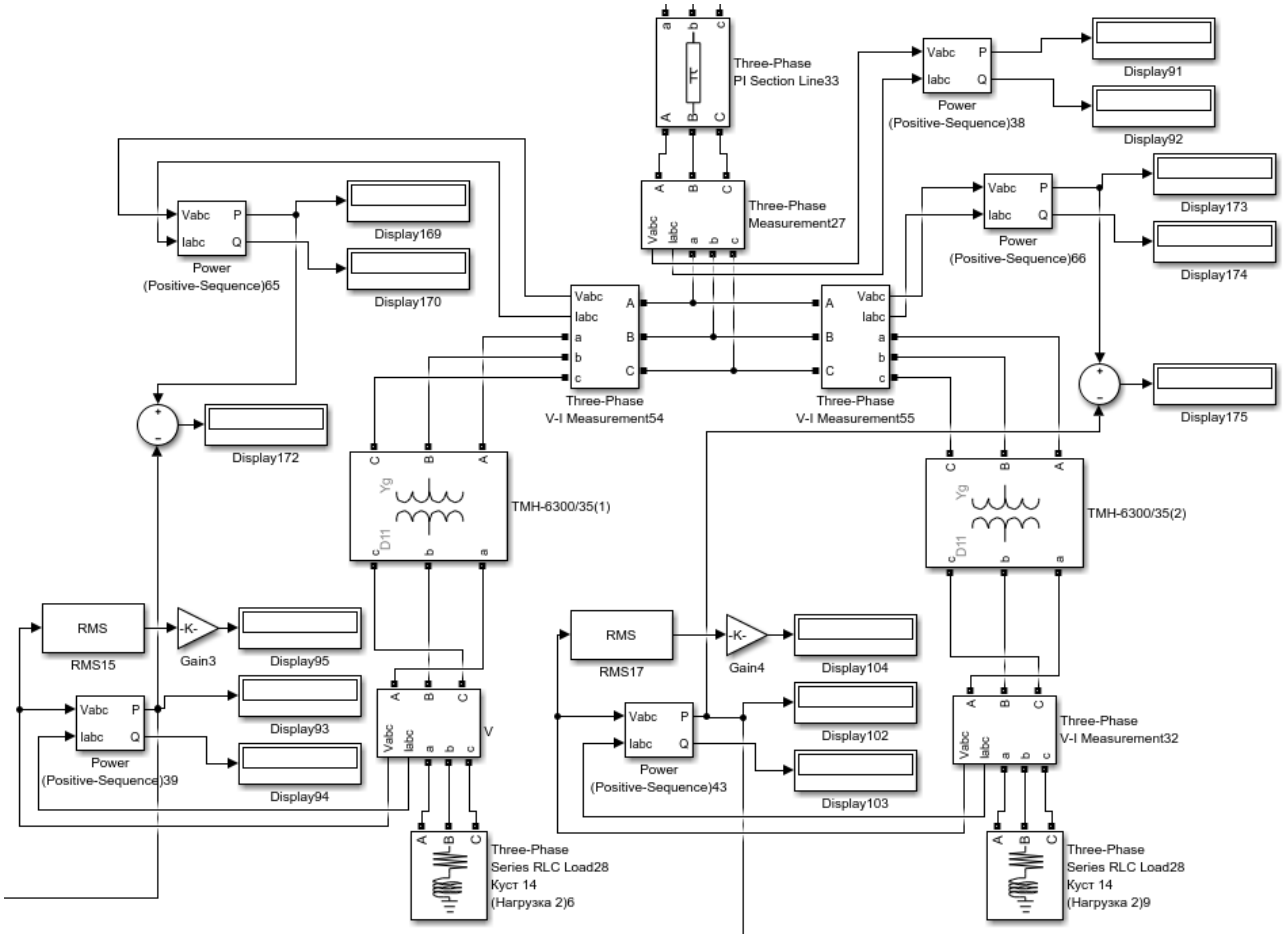


Рис. 3. Часть схемы, подготовленная для расчета стандартным методом

Таблица 1. Верификация результатов

Наименование узла	U_{RW3}, (кВ)	U_{matlab}, (кВ)	ΔU (%)
УКПГ (1)	10,245	10,516	2,577
УКПГ (2)	10,268	10,592	3,059
Куст-14 (1)	10,236	10,762	4,887
Куст-14 (2)	10,223	10,668	4,171
Куст-9 (1)	10,292	10,768	4,420
Куст-9 (2)	10,318	10,864	5,026
ЦПС (1)	6,331	6,225	1,674
ЦПС (2)	6,335	6,071	2,554
Куст-11 (1)	10,261	10,487	2,155
Куст-11 (2)	10,264	10,487	2,126

По значению погрешности можно сделать вывод о том, что модель, созданная в Matlab Simulink, может быть использована для расчета и анализа установившегося режима ЭС НГКМ.

Развитие темы

Создание и верификация модели для расчёта и анализа установившегося режима в Matlab Simulink является первым шагом научной темы по внедрению геотермальных источников энергии в изолированные ЭС для сохранения собственных нужд электростанции и питания ответственных потребителей при авариях с нарушением баланса мощности. В настоящее время производятся работы по замене блоков источников электрической энергии на полно-

ценные модели газотурбинных агрегатов, интеграции системы автоматической быстрой разгрузки для проведения экспериментов, связанных с сохранением динамической устойчивости, а также блока, имитирующего геотермальную станцию.

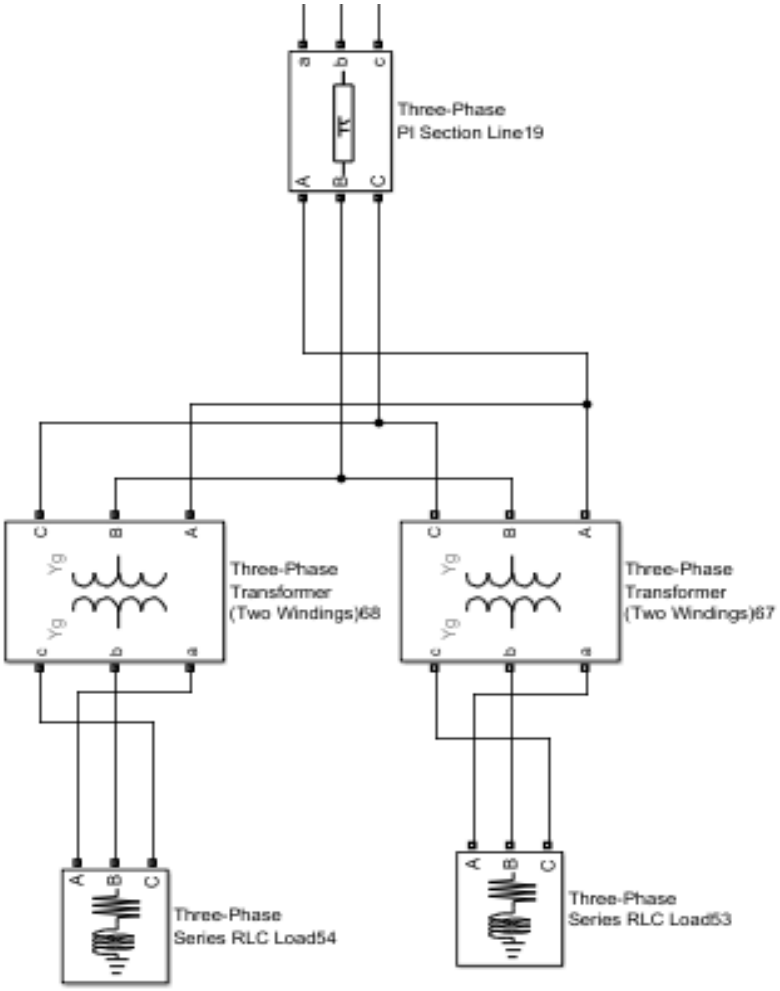


Рис. 4. Часть схемы, подготовленная для расчёта в Powergui/Steady-State

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бацева Н.Л., Федькин А.С., Хошбекян С.М. Исследование работы автоматической частотной разгрузки в изолированной энергосистеме нефтегазоконденсатного месторождения // Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения, 2023. – С. 5–11.
2. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта от 24-09-2008 СТО 59012820.29.240.008-2008 // АО «СО ЕЭС», 2008. – 62 с.
3. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2012. – 215 с.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРОТЯЖЕННЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Я.В. Корецкая

АО «ТомскНИПИнефть»

Научный руководитель: М.В. Лавринович, главный специалист АО «Томск НИПИ Нефть»

Система электроснабжения является сложным электротехническим комплексом и ее надежное и экономичное функционирование возможно только при корректном управлении, которое не допускало бы создания аварийных ситуаций при любых повреждениях, возникающих в этой системе [1].

Задачей автоматизации устройств электроснабжения является обеспечение бесперебойности и максимальной экономичности питания потребителей. Под автоматизацией устройств электроснабжения понимается оснащение их автоматизированными и автоматическими устройствами, управляющими процессами получения, преобразования параметров, передачи, распределения и потребления электроэнергии в нормальных и аварийных условиях [2]. Требования к объему автоматизации устройств электроснабжения изложены в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [3]. Автоматизация управления электроснабжением в свою очередь подразумевает именно централизованное и автоматизирование управление малоответственными электроприемниками. В дальнейшем систему автоматизации управления можно внедрять в регулирование других технологических процессов без нарушения надежности, бесперебойности и качества электроснабжения.

В работе рассматривается система электроснабжения линейных потребителей на примере, нефтепровода общей протяженностью около 600 км, а длина участков достигает более 200 км, которые находится в Северной части страны. Цель работы заключается в рассмотрении возможности использования автоматизации системы электроснабжения с функцией централизованного управления электроприемниками линейных потребителей протяженного нефтепровода. В первую очередь необходимо определить статистику по работе оборудования на площадке узла запорной арматуры, актуализировать нормативные документы в области электроснабжения нефтепровода, ввести доказательную базу при аргументации решений, создание математической модели установки. И как итог внедрение оптимизации с возможностью управления нагрузкой.

Особенность объекта заключается в наличии большого количества маломощных электроприемников (33 шт.), подключенных к одной вдольтрассовой ВЛ протяженностью 200 км и территориально разрозненных относительно друг друга. Сложность представленной системы состоит в отсутствие какой-либо смежной инфраструктуры, которая смогла бы выступать независимым и взаимно резервирующим источником электропитания, т. е. в необходимости обеспечения первой категории надежности электроснабжения, а также в сложных климатических условиях.

Линейный потребитель представляет собой площадку с участком трубопровода длиной примерно от 1 до 15 км, где устанавливаются электроприводные задвижки, выступающие в качестве запорной арматуры, отсекающие участки нефтепровода при пересечении водных преград, в случае аварии на нем, для защиты окружающей среды. Помимо электроприводных задвижек на площадке линейных потребителей (далее площадка узла запорной арматуры [УЗА]) устанавливаются: блок обогрева вахтового персонала (БОВ) для возможности базирования персонала при выполнении ремонтных работ в сложных климатических условиях, блок резервной ДЭС для питания оборудования связи и БОВ, и мачта связи.

Планировка площадки УЗА представлена на рис. 1.

Для электроснабжения линейных потребителей в составе площадок предусматривается установка блочно-модульного здания двухтрансформаторной КТП. КТП выступает главным источником электроснабжения площадки линейных потребителей. Помимо электротехнического оборудования, в КТП предусмотрено отдельное помещение для размещения оборудования автоматизации и связи.

Основной перечень нагрузки площадки линейных потребителей:

- электрообогрев помещений (КТП и БОВ);
- электроснабжение шкафов связи и автоматизации;
- электроприводная арматура;

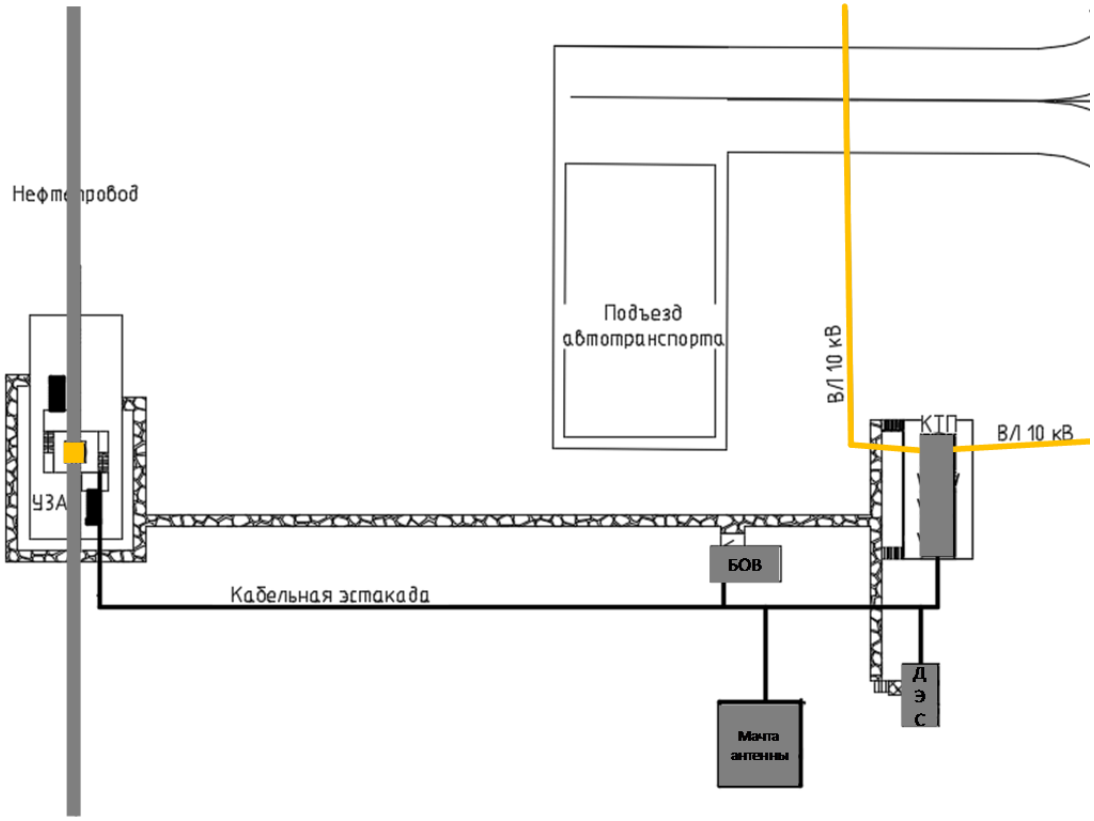


Рис. 1. План площадки УЗА

Однолинейная схема электроснабжения представлена на рис. 2.

Главной сложностью в разработке решений по системе электроснабжения такой сети оказалось корректно определить потребляемую расчетную мощность каждой площадки УЗА, поскольку электроприемники, в которых основной нагрузкой выступает электрообогрев помещений и оборудование автоматизации, не исследовались [1, 2] в части упорядоченных диаграмм такого рода нагрузки, а принятые решения на одной площадке УЗА, оказывают критическое влияние на итоговом значении суммарной расчетной мощности рассматриваемого объекта, так как таких площадок вдоль трассы 200 км насчитывается до 33 шт.

В дальнейшем, даже при наличии опыта проектирования, но отсутствие нормативной базы и статистики, не позволяет обосновать принятые проектные решения перед экспертами. Приняв во внимание основной перечень электроприемников и род нагрузки, средняя расчетная электрическая мощность площадок линейных потребителей получилась около 46 кВт. Исходя из проделанных расчетов суммарная потребляемая расчетная мощность участка нефтепровода (200 км) составляет 1300 кВт.

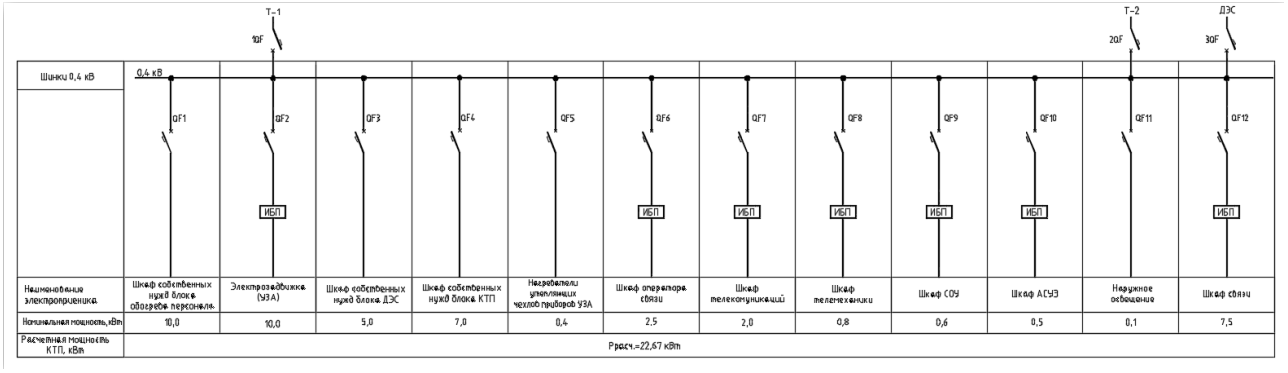


Рис. 2. Однолинейная схема электроснабжения 0,4 кВ УЗА

В рамках разработки системы автоматизации управления электроснабжения линейных потребителей нефтепроводов были рассчитаны нагрузки на УЗА методом коэффициента расчетной мощности, основываясь на указания по расчету электрических нагрузок [4].

Из полученных расчетных значений, представленных в табл. 1, видно, что расчетная мощность на площадке примерно равна установленной мощности, и большая часть нагрузки исходя из диаграммы, указанной на рис. 3, приходится на электрообогрев и автоматику, из 46 кВт (11 кВт – обогрев, 20 кВт – автоматика, 15 кВт – задвижка с электрическим приводом, которая питается от источника бесперебойного питания [ИБП] и может не учитываться в суммарной расчетной мощности площадки УЗА).

В табл. 1 представлен пример расчета нагрузок по одной площадке УЗА.

Таблица 1. Расчет нагрузок на площадке УЗА

	ЭП	Кол-во ЭП			Мощность ЭП		$К_и$	Средняя нагр			$n_{эф}$	гр. к-т	Расчетная мощ-ть		
		уст. общее	**cosф**	**tgф**	**общая**	**Раб.**	**ЭП**	**P**	**Q**	**S**	**ЭП**	**макс.**	**P**	**Q**	**S**
№		шт.			кВт	кВт		кВт	кВАр	кВА			кВт	кВАр	кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17
1	ШСН БОВ	1	0,95	0,33	10,00	10,00	0,81	8,10	2,66	8,53					
2	ИБП	1	0,7	1,02	15,00	15,00	0,90	13,50	13,77	19,29					
3	Э1	0	0,8	0,75	10,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00					
4	ШСН	1	0,95	0,33	7,00	7,00	0,81	5,67	1,86	5,97					
5	ССО	1	1	0,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,00	0,98					
7	НК-КК	1	1	0,00	0,40	0,40	0,98	0,39	0,00	0,39					
8	Утепляющий чехол	0	1	0,00	0,10	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00					
9	ТСО	1	1	0,00	2,00	2,00	0,90	1,80	0,00	1,80					
10	ШОС	1	1	0,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,00	0,90					
11	КК-30	1	1	0,00	0,30	0,30	0,90	0,27	0,00	0,27					
12	ТМ	1	1	0,00	0,80	0,80	0,90	0,72	0,00	0,72					
13	СОУ	1	1	0,00	0,60	0,60	0,90	0,54	0,00	0,54					
14	АСУЭ	1	1	0,00	0,50	0,50	0,90	0,45	0,00	0,45					
15	КК-НО	1	1	0,00	0,03	0,03	0,90	0,02	0,00	0,02					
16	НО-1	0	1	0,00	0,03	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00					
17	ИБП-ШС	1	0,7	1,02	7,50	7,50	0,90	6,75	6,89	9,64					
	ИТОГО	**13,00**		**0,27**	**m>3**	**46,13**	**0,87**	**40,09**	**10,63**	**41,48**	**13,00**	**1,03**	**41,30**	**11**	**42,73**

Электроприемники площадки УЗА электроснабжаются по 1 категории надежности без разделения на категории, но обогревательные элементы, располагаемые на узлах, не являются ответственными и могут быть запитаны по 3 категории надежности, так как являются

вспомогательными элементами в системе электроснабжения. Поэтому с использованием системы автоматизации управления электроснабжением появляется возможность управления малоответственными электроприемниками без риска в работе всей площадке УЗА, для этого необходимо внедрение системы автоматизации управления электроснабжением.

Исследуемая система автоматизации управления электроснабжением может выступать в качестве регулирования нагрузкой малоответственных электроприемников. Алгоритм такой системы может состоять в поочередном включении и выключении обогревательных элементов, на четных и нечетных площадках УЗА. Пока на четных площадках обогреватели включены, на нечетных в этот момент времени помещения будут остывать. Такой алгоритм работы электрообогревателей поможет сократить мощность потребления электроэнергии сети на представленной площадке УЗА с 11 до 5,5 кВт, т. е. сократить нагрузку на 50 %. За время отключения электрообогревателей, отапливаемые помещения не будут успевать остывать до критически низких температур. Расчет времени остывания представлен в [7]. Согласно расчетам, представленных в статье [7], линейный трубопровод диаметром 150 мм допускается оставлять без электрообогрева на время от 3 до 6 часов, что позволяет использование нашей системы автоматизации управления электроснабжением без существенных капитальных затрат.

В заключении стоит отметить, что предлагаемая автоматизация управления системы электроснабжения электроприемников третьей категории надежности электроснабжения может потенциально уменьшить количество потребляемой мощности на протяженном линейном трубопроводе без рисков в работе технологических процессах площадок УЗА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряков А.С., Семенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика : учебник и практикум для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 476 с.
2. Веркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. Автоматика энергосистем : учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
3. Правила устройства электроустановок. – М.: КноРус, 2009. – 488 с.
4. Руководящий технический материал. Указания по расчёту электрических нагрузок. РТМ 36.18.32.4.-92. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект,, 1992. –26 с.
5. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок. – М. : ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1990. – № 114. – С. 11.
6. Указания по расчету и регулированию электрических нагрузок и электропотребление предприятий нефтяной промышленности РД 39-0147323-803-89-Р.
7. Мирзоян А.В. Итоги VII Международного форума «Промышленный электробогрев и электроотопление» // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2012. – № 2. – С. 20–23.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON ДЛЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Е.О. Стулей, Н.М. Космынина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А01

Научный руководитель: Н.М. Космынина, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Язык программирования Python (питон) – это высокоуровневый интерпретируемый язык программирования, который был разработан Гвидо ван Россумом и впервые выпущен в конце 1980-х гг. Под интерпретируемым языком понимается то, что исходный код программы,

немедленно выполняется, не создавая промежуточного машинного кода. Преимуществом интерпретируемых языков является более быстрый процесс разработки.

Он стал одним из наиболее популярных языков программирования в мире. Python хорошо подходит для научных и инженерных вычислений благодаря библиотекам, таким как NumPy, SciPy и Matplotlib. NumPy предоставляет инструменты для выполнения вычислений, решения задач линейной алгебры и обработки данных. Matplotlib предназначена для создания высококачественных графиков и визуализации данных. SciPy основана на библиотеки NumPy, расширяет возможности решения математических задач и добавляет возможность обработки изображений и построения графиков.

Простой синтаксис и обширный набор библиотек делают Python одним из наиболее доступных и мощных инструментов для программирования.

Высоковольтные выключатели – это автоматические коммутационные аппараты, предназначенные для выполнения операций включения и отключения электрических цепей при номинальных режимах работы и автоматического размыкания этих цепей при аварийных режимах. Основной и наиболее ответственной задачей выключателя является автоматическое и достаточно быстрое отключение цепи при коротком замыкании, другой функцией является создание надежной цепи, обеспечивающей протекание тока через аппарат во включенном состоянии и сохранение надежного изоляционного промежутка в отключенном положении [1].

Процесс выбора выключателя является не сложным, но крайне времени затратным мероприятием. Выключатель выбирается по 5 параметрам, таким как: 1) номинальное напряжение; 2) номинальный ток; 3) проверка на симметричный ток отключения; 4) проверка возможности отключения апериодической составляющей тока КЗ; 5) проверка по условию теплового импульса тока КЗ.

Автоматизация процесса выбора выключателя является важной задачей, позволяющей исключить счетные ошибки и сократить время выбора.

Для программы для автоматического выбора выключателя, был написан код на языке Python. Для этого были использованы две библиотеки pandas и NumPy. Первая для работы с таблицами, вторая для математических вычислений.

Также составлены две таблицы. Первая таблица содержит в себе выключатели и их параметры [2], такие как:

- тип;
- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ (кВ);
- номинальный ток $I_{\text{ном}}$ (кА);
- номинальный ток отключения $I_{\text{откл}}$ (кА);
- нормированное содержание апериодической составляющей $B_{\text{ном.}}$ (%);
- наибольший пик предельного сквозного тока $I_{\text{у}}$ (кА);
- начальное действующее значение периодической составляющей сквозного тока $I_{\text{ПО}}$ (кА);
- Ток термической стойкости $I_{\text{т.ст.}}$ (кА);
- допустимое время действия тока термической стойкости $t_{\text{т.ст.}}$ (с);
- собственное время отключения $t_{\text{сво}}$ (с).

Таблица 1. Фрагмент составленной таблицы на 129 строк

Тип	$U_{\text{ном}}$ (кВ)	$I_{\text{ном}}$ (кА)	$I_{\text{откл}}$ (кА)	$B_{\text{ном}}$ (%)	$I_{\text{у}}$ (кА)	$I_{\text{ПО}}$ (кА)	$I_{\text{т.ст}}$ (кА)	$t_{\text{т.ст}}$(с)	$t_{\text{сво}}$(с)
МГУ-20-90/6300У3	20	6,3	90	20	300	105	90	4	0,15
МГУ-20-90/1120У3	20	9,5	90	20	300	105	90	4	0,15
ВГМ-20-90/11200У3	20	11,2	90	20	320	125	105	4	0,15
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
ВГУ-500Б-40/3150У1,ХЛ1	500	3,15	40	36	102	40	40	2	0,04

Для выбора выключателя проводится проверка на симметричный ток отключения по условию:

$$I_{rt} \leq I_{\text{откл.ном.}} \quad (1)$$

Для определения затухания периодической составляющей тока КЗ I_{rt} используют типовые кривые рис. 1 [3], в качестве примера были выбраны кривые для генератора с диодной бесщеточной системой. В табл. 2 для каждой кривой записаны значения I_{rt}/I_{r0} от времени *t*.

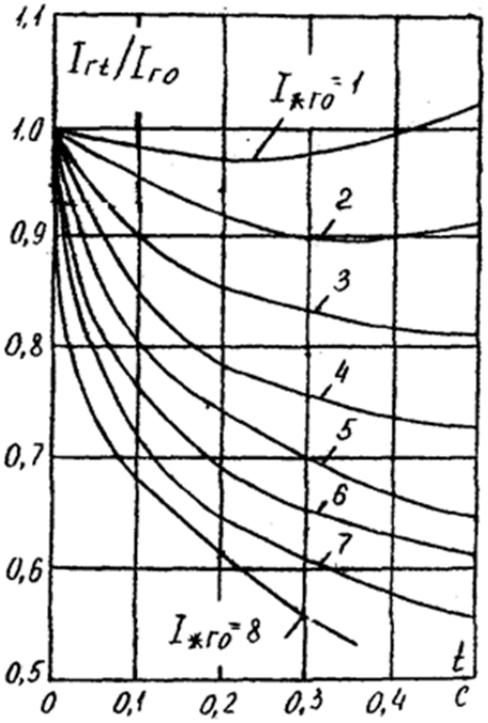


Рис. 1. Типовые кривые для определения затухания периодической составляющей тока КЗ от генераторов диодной бесщеточной системой возбуждения

Таблица 2. Фрагмент составленной таблицы по типовым кривым

t	I_{rt}/I_{r0} для кривых 1–8							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	1	1	0,98	0,98	0,96	0,97	0,91	0,85
0,02	1	0,99	0,97	0,95	0,94	0,96	0,86	0,8
0,03	0,99	0,98	0,95	0,93	0,91	0,88	0,83	0,78
0,04	0,99	0,98	0,93	0,91	0,89	0,85	0,8	0,76
0,05	0,99	0,97	0,92	0,9	0,87	0,82	0,78	0,74
…	…	…	…	…	…	…	…	…
0,5	1,01	0,91	0,81	0,74	0,67	0,62	0,55	0,52

Принцип работы программы.

1. Программа объединяет таблицы 1 и 2 в единую и преобразует для дальнейшей работы.

```
data = data.assign(t = data['tсво'] + 0.01)
data['t'] = data['t'].round(decimals=2)
dataa = data.join(data1.set_index('t'), on='t')
```

2. Запрос от пользователя на ввод параметров:

Номинальное напряжение (кВ), номинальный ток (кА), периодическая составляющая тока КЗ (кА), ударный ток КЗ (кА), постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ(с).

```
#Исходные данные
Uномі = float(input('Введите Uном(кВ) = ')) #Номинальное напряжение, кВ
Iномі = float(input('Введите Iном(кА) = ')) #Номинальный ток, кА
Iпоі = float(input('Введите Iпо(кА) = ')) #Периодической составляющей КЗ, кА
Iуі = float(input('Введите Iу(кА) = ')) #Ударный ток КЗ, кА
Tai = float(input('Введите Ta(с) = ')) #Постоянная времени, с
```

3. По формулам (1–6) определяет номер кривой и производит расчет.

$$I_{*\text{ГО}} = I_{\text{ПО}}/I_{\text{ном}} \quad (2)$$

$$I_{\text{гt}} = I_{*\text{ГО}} \cdot I_{\text{ПО}} \quad (3)$$

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{\frac{-\tau}{Ta}} \quad (4)$$

$$i_{a,\text{ном}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{н}} \cdot I_{\text{отк.ном}}}{100} \quad (5)$$

$$\text{В}_{\text{К}} = I_{\text{ПО}}^2 \cdot (t_{\text{откл}} + \text{T}_{\text{a}}) \quad (6)$$

$$\text{В}_{\text{каталож}} = I_{\text{т.ст}}^2 t_{\text{т.ст}} \quad (7)$$

```
#Номер кривой
curve = round(Iпоі / Iномі)
if curve > 8:
 curve = 8
else:
 curve = curve
Ipt = round(dataa[curve] * Iпоі, 2)
#Проверка возможности отключения апериодической составляющей
iat = round(np.sqrt(2) * Iпоі * np.exp(- dataa['t'] / Tai), 2)
#номинальное допустимое значение апериодической составляющей
ian = round((np.sqrt(2) * data['Вном'] * data['Iоткл'] )/ 100, 2)
#Проверка по условию теплового импульса
Bk = round(Iпоі ** 2 * (data['tт.ст.'] + Tai), 2)
Bkat = round(data['Iт.ст.'] ** 2 * (data['tт.ст.']), 2)
```

4. Удаляет из первой таблицы значения времени t и добавляет к ней все расчетные значения, полученные из формул 1–6.

```
df = data.assign(UномИсх = Uномі, IномИсх = Iномі, Iпт = Ipt, Iат= iat, Iаном= ian, Вк = Bk, Вкат = Bkat).drop(['t'], axis=1)
```

5. На финальном этапе создается столбец, который будет содержать строки, прошедшие проверку по столбцам

```
if 10 <= Uномі <=20:
df['result'] = df.apply(lambda row: 10 <= row['Uном'] <=20 and row['UномИсх'] <= row['Uном'] and row['IномИсх'] <= row['Iном'] and row['Iпт'] <= row['Iоткл'] and row['Iат'] <= row['Iаном'] and row['Вк'] <= row['Вкат'], axis=1)
else:
df['result'] = df.apply(lambda row: row['UномИсх'] == row['Uном'] and row['IномИсх'] <= row['Iном'] and row['Iпт'] <= row['Iоткл'] and row['Iат'] <= row['Iаном'] and row['Вк'] <= row['Вкат'], axis=1)
# Выводим строки, прошедшие проверку
df[df['result']]
```

6. На выходе получаем подходящие выключатели и их каталожные и расчетные данные.

	Тип	Uном	Iном	Iоткл	Bном	Iу	Iпо	Iт.ст.	tт.ст.	tсво	UномИсх	IномИсх	Iпт	Iат	Iаном	Bк	Bкат	result
56	ВВД-330Б-40/3150У1	330.0	3.15	40.0	20.0	102.0	40.0	40.0	2.0	0.060	330.0	0.35	3.54	5.92	11.31	59.76	3200.00	True
59	ВВДМ-330Б-50/3150У1	330.0	3.15	50.0	23.0	128.0	50.0	50.0	2.0	0.060	330.0	0.35	3.54	5.92	16.26	59.76	5000.00	True
60	ВВ-330Б-31,5/2000У1	330.0	2.00	31.5	23.0	80.0	31.5	31.5	3.0	0.050	330.0	0.35	3.59	6.07	10.25	84.66	2976.75	True
70	ВНВ-330А-40/3150У1	330.0	3.15	40.0	45.0	102.0	40.0	40.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	25.46	84.66	4800.00	True
71	ВНВ-330Б-40/3150У1	330.0	3.15	40.0	45.0	102.0	40.0	40.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	25.46	84.66	4800.00	True
72	ВНВ-330А-63/3150У1	330.0	3.15	63.0	45.0	162.0	63.0	63.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	40.09	84.66	11907.00	True
73	ВНВ-330Б-63/3150У1	330.0	3.15	63.0	45.0	162.0	63.0	63.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	40.09	84.66	11907.00	True
74	ВНВ-330А-40/4000У1	330.0	4.00	40.0	45.0	102.0	40.0	40.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	25.46	84.66	4800.00	True
75	ВНВ-330Б-40/4000У1	330.0	4.00	40.0	45.0	102.0	40.0	40.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	25.46	84.66	4800.00	True
76	ВНВ-330А-63/4000У1	330.0	4.00	63.0	45.0	162.0	63.0	63.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	40.09	84.66	11907.00	True
77	ВНВ-330Б-63/4000У1	330.0	4.00	63.0	45.0	162.0	63.0	63.0	3.0	0.025	330.0	0.35	3.79	6.39	40.09	84.66	11907.00	True
127	ВГУ-330Б-40/3150У1	330.0	3.15	40.0	36.0	102.0	40.0	40.0	2.0	0.040	330.0	0.35	3.69	6.23	20.36	59.76	3200.00	True

Рис. 2. Пример результата работы программы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старшинов В.А., Пираторов М.В., Козинова М.А. Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие. – Москва: МЭИ, 2019. – с. – ISBN 978-5-383-01261-1.
2. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учебное пособие. – 5-е изд., стер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 607 с.
3. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Ростехрегулирование, 2007. – 39 с.

РАСЧЁТ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ ПАНЕЛЯМИ НА СУТКИ ВПЕРЕД

Д.М. Кузнецов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А02

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., ст. преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Солнечные панели стали неотъемлемой частью стремительно развивающейся сферы энергетики, предоставляя эффективное и устойчивое решение для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. В свете современных вызовов изменения климата и стремления к устойчивости, важно увидеть перспективы развития солнечных технологий в России. В России активно развивается инфраструктура для солнечной энергии. Проекты по строительству солнечных ферм и инновационные технологии содействуют увеличению доли солнечной энергии в общем энергетическом балансе страны.

Точные расчеты количества генерируемой электрической энергии солнечными панелями на сутки вперед, обеспечивают более эффективное использование солнечной энергии, что в свою очередь снижает затраты на производство и распределение электроэнергии.

Для крупных государственных или частных энергетических компаний, очень важно знать факт, какое количество электрической энергии их солнечные электростанции смогут сгенерировать. При электроснабжении какой-либо территории, от солнечных электростанций, компании, важно знать, хватит ли этой электроэнергии для всех потребителей этой территории, предварительно зная их среднее потребление. Необходимо ли заказывать дополнитель-

но электроэнергию для питания всех потребителей, если генерация солнечной электростанции будет недостаточна? Именно на этот вопрос и даст ответ, возможность расчета генерируемой энергии на сутки/неделю вперед.

Для такого расчета необходимо знать некоторые входные данные в систему. Широта и долгота, позволяют определить координаты солнечной панели, место, в котором и необходимо сделать расчет. Порядковый номер дня (1 – первое января, 41 – десятое февраля). Порядковый номер дня, необходим для дальнейшего расчета солнечного угла склонения. В формуле солнечного угла склонения (1), n – порядковый номер дня.

$$\delta = 23{,}5^{\circ} \cdot \sin\left(360^{\circ} \cdot \frac{284+n}{365}\right). \quad (1)$$

Также необходимы входные данные, такие как время, в часах, т. к. прогноз будет почасовым. Технические характеристики самой панели: КПД панели, площадь панели, максимальная мощность панели, температурный коэффициент панели. Необходимы данные о солнечной высоте в конкретных координатах расположения солнечной электростанции и значение общей солнечной инсоляции (рис. 1). Важны погодные данные, такие как температура окружающей среды и балл облачности. Необходимо знать угол солнечной панели, глобальную солнечную радиацию в заданных координатах и альбедо – коэффициент отражения местности.

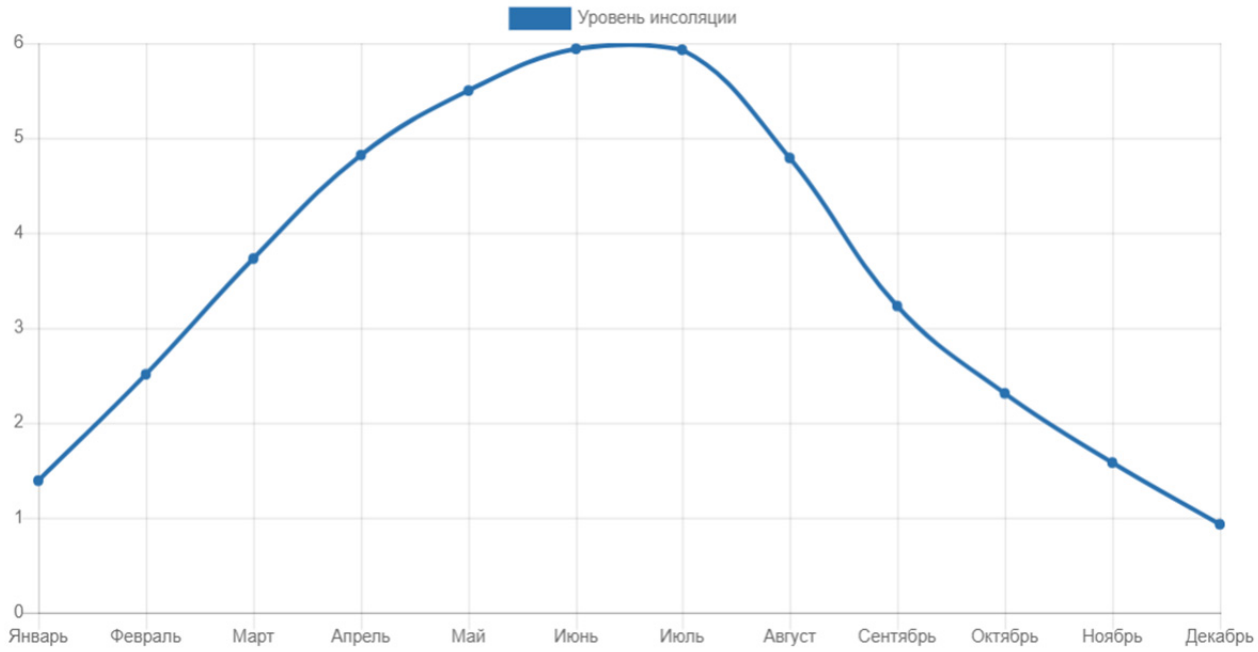


Рис. 1. График уровня солнечной инсоляции в Томске по месяцам

Для упрощения интерфейса пользователю, необходимо предпринять некоторые программные решения.

Ввод долготы и широты, преобразовать в выбор города. Ввод технических характеристик солнечной электростанции, в список заранее запрограммированных солнечных панелей, уже со своими техническими характеристиками. Порядковый номер дня запрограммировать в календарь. Погодные данные подгружать в автономном режиме. Глобальную солнечную радиацию, данные о солнечной высоте и общей инсоляции подгружать так же автоматически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А. и др. Дневные вариации радиационных характеристик и температуры воздуха в окрестностях.

2. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 693 с.
3. Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации // Проблемы региональной энергетики. – 2008. – № 1. – С. 23–30.
4. Акулинин А., Смирнов А., Смыков В., Эк Т., Поликарпов А. Наземный многофункциональный измерительный комплекс для мониторинга атмосферной радиации в Кишиневе, Молдова // Международный симпозиум стран СНГ.
5. Атмосферная радиация (МСАР-04). – С. Петербург, 2004. – 22–25 июня 2004 г.
6. Anand V.P., Mohd. Meraj Khan et. Al. Performance Improvement of Solar Module System using Flat Plate Relectors // ICAEE, 2014.
7. Arshad R., Tariq S., Niaz U.M., Jamil M. Improvement in solar panel efficiency using solar concentration by simple mirrors and by cooling // iCREATE, 2014.
8. Duffie (Deceased) J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes // Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, John Wiley & Sons, Inc., 2013.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 КВ

Д.И. Шахнович

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А02

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Низковольтные распределительные сети предназначены для передачи электроэнергии на небольшие расстояния и являются важной частью электроснабжения различных потребителей. Однако их автоматизация и защита являются сложными задачами, что часто приводит к эксплуатации этих сетей в радиальном или разомкнутом режиме. Работа в режиме холостого хода позволяет упростить управление и снизить ток короткого замыкания.

Для оптимизации работы распределительных сетей существуют два основных метода. Первый метод заключается в достижении минимальных потерь при оптимальном распределении трафика. Второй метод направлен на максимизацию общей надежности сети путем применения элементов с лучшими показателями надежности. Эти показатели обычно охватывают параметры потока неисправностей и время восстановления.

При снижении потерь в штатном режиме путем изменения положения распределительного устройства резервирование известных вариантов конфигурации распределительной сети остается практически неизменным. Однако это может увеличить вероятность аварийного выхода из строя отдельных элементов.

Распределительные сети имеют важное значение для обеспечения электроснабжения потребителей. Однако существует проблема возможных перебоев электроснабжения, вызванных аварийными режимами. Для минимизации таких режимов и обеспечения нормального функционирования сети необходимо проводить оптимизацию системы электроснабжения.

Одним из способов решения данной проблемы является максимизация продолжительности нормальных режимов и сокращение аварийных режимов. Однако при этом возникает риск снижения эффективности потерь электроэнергии исходящей из долговременного нормального режима. Это связано с конфигурацией сети и надежностью ее компонентов.

Другой проблемой является неидеальность конфигурации распределительных сетей. В связи с минимизацией затрат на капитальное строительство и реконструкцию, длины линий в послеаварийном и ремонтном режимах могут превышать допустимые значения. Это приводит к значительным потерям напряжения при передаче электроэнергии и ограничивает возможности оптимизации при отключении сети в штатном режиме и в послеаварийном режиме.

Для решения этих проблем можно применять различные подходы. Классическим способом является возведение разукрупняющих подстанций. Однако этот подход требует значительных затрат и применяется только в случаях значительного увеличения нагрузки потребителей.

Одной из основных причин аварийных отключений электроэнергии являются повреждения линий электропередачи и распределительных устройств на трансформаторных подстанциях и трансформаторного оборудования. Также отключения могут быть связаны с несвоевременными отключениями линий. Однако большинство повреждений можно предотвратить через качественное обслуживание линий электропередачи и внедрение средств диагностирования технического состояния оборудования.

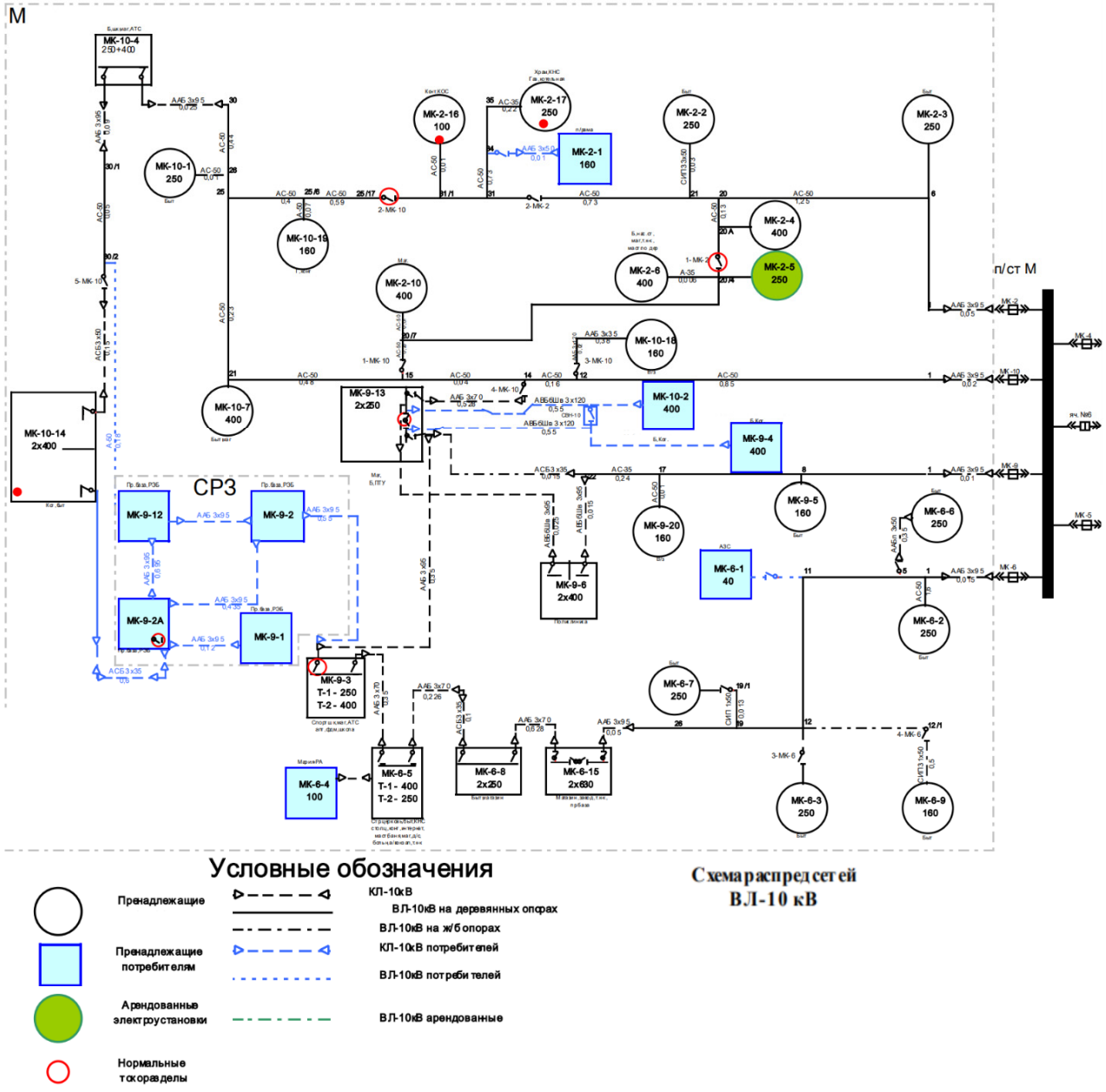


Рис. 1. Схема распределительных сетей

Если линия электропередачи не секционирована из-за повреждений или других причин, то все подключенные к этой линии потребители остаются без электроснабжения. Это суще-

ственно снижает надежность электроснабжения и увеличивает перерывы в электроснабжении потребителей. Таким образом, эффективное управление линиями электропередачи и распределительными сетями имеет большое значение для обеспечения стабильного электроснабжения потребителей.

Средства автоматизации сети, включая секционирование, резервирование и диагностику технического состояния, имеют значительный потенциал для улучшения надежности электроснабжения. Однако, практика показывает, что резервирование линий сети 6–10 кВ является недостаточно эффективной мерой. Это связано с трудностями в обслуживании и снижением безопасности при наличии запасных перемычек.

Ситуация усложняется также проблемами защиты и автоматизации сети 6–10 кВ. Основная защита сельских распределительных сетей осуществляется с помощью электромеханических реле энергоцентров и неавтоматизированного оборудования переключения. Отсутствие телеметрии в данных сетях приводит к необходимости отправлять оперативную бригаду на объекты при повреждении, что замедляет процесс поиска аварии и восстановления электроснабжения.

Повышение надежности электроснабжения потребителей в сети 10 кВ может быть эффективно решено с помощью автоматизации. Секционирование линий позволяет уменьшить нагрузку и отключить поврежденные участки в случае сбоя. Использование устройств автоматики позволяет быстро и автоматически отделить поврежденный участок от остальной линии при коротком замыкании (КЗ). Таким образом, совершенствуя средства автоматизации сети и резервирование, можно значительно улучшить надежность электроснабжения пользователей и предотвратить перебои в работе сети. Так, согласно требованиям ПУЭ [1]:

- электроустановки должны быть оборудованы устройствами релейной защиты, предназначенными для автоматического отключения поврежденного элемента от остальной неповрежденной части электроустановки с помощью выключателя (п. 3.2.2а);
- должен отключаться только поврежденный элемент (п. 3.2.5).

Эти требования достигаются многократным секционированием с помощью вакуумного реклоузера, представляющего собой совокупность вакуумного коммутационного модуля со встроенной системой измерения токов и напряжения и шкафа управления с микропроцессорной системой релейной защиты и автоматики.

Данная проблема рассмотрена на объекте ПАО «ТРК»/Производственное отделение «Центральные электрические сети»/Рыбаловский РЭС/Моряковский сетевой участок (рис. 1).

Рассмотрим и опишем схему распределительных сетей сетевого участка, представленного на рис. 1.

Питание потребителей данного сетевого участка производится от подстанции М. Данная подстанция имеет класс напряжения 35 кВ и 10 кВ. На подстанции установлено ОРУ 35 кВ, и ЗРУ 10 кВ. Так же на подстанции установлено два силовых трансформатора установленной мощностью 6,30 МВА.

От подстанции М напряжение распределяется до потребителя данного сетевого участка по воздушным и кабельным линиям 10 кВ (МК-2, МК-6, МК-9, и т. д.), в воздушных линиях преимущественно использует сталь алюминиевый провод.

Подробнее рассмотрим трансформаторный пункт МК 9–13, нормальная схема электрических соединений ТП МК 9–13, предназначен для распределения и транспонирования электроэнергии. Данный пункт может быть запитан от ВЛ: МК-9, МК-10. В здании ТП расположены распределительные устройства 10 и 0,4 кВ, соединенных между собой двумя силовыми трансформатора ТМ 10/0,4 кВ 250 кВА.

После силовых трансформаторов установлены трансформаторы тока с номинальными первичными токами 600 и 200 А, вторичным током 5 А. К трансформатору тока присоединены ваттметр служащие для отражения активной мощности участка цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск: «Норматика», 2020. – 499 с.
2. Вуколов В. Ю., Майстренко Г.В. Проблема длинных фидеров в задаче повышения надежности распределительных сетей 6–35 кВ // В сб.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 177–181.
3. Васильев А.Н., Виноградов А.В., Виноградова А В., Большев В.Е., Скитева И.Д. Анализ количества и причин отключений в электрических сетях 0,38–10 кВ // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 4 (29). – С. 8–18.
4. Виноградов А.В., Колесов М.А. Способ автоматического восстановления питания потребителей электрической сети 6–10 кВ // В сб.: Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК. Материалы Международной научно-практической интернет-конференции. – 2008. – С. 130–134.
5. Максимов Б.К., Воротницкий В.В. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей 6–10 кВ // Электротехника. – 2005. – № 10. – С. 7–22.
6. Куценко Г.Ф., Ус А.Г., Парфенов А.А., Бутенко А.В. Повышение надежности электроснабжения потребителей АПК при использовании пунктов автоматического резервирования // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 53–58.
7. Виноградов А.В., Виноградова А.В. Повышение надежности электроснабжения сельских потребителей посредством секционирования и резервирования линий электропередачи 0,38 кВ: монография. – Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2016. – 224 с.
8. Андриевский Е.Н. Секционирование и резервирование сельских электросетей. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
9. Медведько Ю.А., Медведько А.Ю. Научные исследования: учебное пособие. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 134 с.
10. Таврида Электрик. Официальный сайт. – URL: https://www.tavrida.com

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL CONTROL AND PROTECTION SYSTEMS IN THE ENERGY SYSTEM OF UZBEKISTAN

M.V. Melikuziev

Tashkent State Technical University,
Electric Power faculty, Power Supply department

Scientific supervisor: A.D. Taslimov, DSc. Professor, professor of the department of Power supply

Annotation. The article examines the current state of digitalization of the energy system of Uzbekistan, the development of digital control and protection systems through the use of modern technologies in the energy system, their impact on efficiency indicators and prospects for development. The regulatory documents of digital control and protection systems are sufficiently developed to use them in the urban, industrial and agricultural power supply system and obtain practical results, issues are considered on the structure of the structural elements of the system.
Keywords: power supply, SCADA, EMS, digitized control, protection system, digital relay protector, smart technologies, energy losses.

Introduction

Currently, the issues of full digitalization of the energy system of developed and developing countries of the world and the application of digital technologies, their development are important in our country. The introduction of digital technologies in the energy system's power supply, as well as in the optimal uninterrupted supply of electricity to consumers, reducing the human factor in the system, are among the priorities.

PD № 3981 of the President of the Republic of Uzbekistan dated October 23, 2018 "On measures to ensure the rapid development and financial stability of the electric power sector" sets out a number of tasks for improving production capacity, modernization of power networks, digitalization of electricity accounting and remote control of consumption. The large-scale program provides for the provision of energy facilities, economic entities and consumers of the domestic sector with modern electronic accounting devices. The statewide resolution of the task of improving the system of electricity accounting is not carried out in all countries.

Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated October 5, 2020 "On measures to approve the Digital Uzbekistan – 2030 strategy and its effective implementation" PD № 6079 was adopted. On the basis of ensuring the implementation of the decree: to increase the share of large economic entities by 90 %, which by 2025 introduced the system of managing the resources of society; automation of production and management processes being introduced in urban, agricultural, industrial enterprises, robotization, localization of the software product part of technologies such as «Internet items», «Artificial intelligence» by 2027 and the hardware part by 2030 on the basis of public – private partnerships; the implementation of smart technologies for managing utility bills, the introduction of intellectual services and the implementation of the «Smart home», «Smart grid» experience for the regulation of utilities are provided [1].

Currently, it is planned to introduce in the energy system of the Republic of Uzbekistan the power supply control and data collection (SCADA) and energy management system (EMS) on the basis of digital control of national dispatch systems, the transition to this process has begun.

In market conditions, digitized control and protection systems make it possible to reliably and quickly take into account electricity consumption, quickly analyze and eliminate emergency situations in electrical networks [2].

The introduction of digital control and protection systems for the power supply, remote access of data, remote or automatic, uninterrupted supply elimination, the presence of the possibility of being able to indicate the causes and exact location of accidents, time absorption and the work of a large number of controllers will not be needed.

The main advantage of the system is that its application allows to reduce energy losses, provide devices in the power supply system of urban, agricultural, industrial enterprises with normal, long service life, as well as provide electricity without interruption to consumers [8].

Electric consumers – in their necessary calculation, are realizing with the supplier some kind of shattering standards, large contracts or outdated, inaccurate equipment, modern and high-precision meters of power supplies.

Due to the pressure of the energy resource market, electric consumers come to such a concept that the first step in reducing energy resource savings as well as financial losses is to have a clear accounting system.

The main purpose of calculating elective energy and its power in the wholesale and retail market is to have clear information about the exact production, transmission, distribution and consumption of electricity. Order of measurement:

- implementation of financial calculations among market participants;
- control of energy consumption modes;
- determination and forecasting of all organizers of the electrical energy balance (production, transmission from tires, loss, etc.);
- determination and forecasting of the specific cost of fuel in power plants;
- implementation of financial assessment in the processes of production, transmission, distribution and consumption of waste;
- control of the technical condition of the accounting system in electrical equipment and compliance with the requirements of regulatory and technical documentation.

The forecast of the implemented and promising plans in the energy system of Uzbekistan is described in fig. 1. In this case, the development and promising sequence are shown in 3 periods. This shows promising indicators of digital control and protection systems.

Network management and data collection system (Supervisor control and data acquisition) remains the main, most promising method of automated management of complex dynamic systems (processes) in vital, critical areas in terms of security and reliability [3, 4].

The requirements, architecture and functionality of the SCADA content are determined by the base terminal installed in software and technical tools in automated dispatch management [3].

Control center – the subject of operational operator control – the system of control of the electrical energy regime in the operating zone, where the structural unit of the organization is established within its framework.

The main functions of SCADA are data storage, processing and transmission to the tracking system, anti-accident or mode control.

Currently, existing SCADA packages perform many functions, which can be divided into several groups:

- configuring SCADA for a specific task (i.e., developing the software part of the automation system);
- operator control;
- automatic control;
- record and save process history;
- perform security functions;
- perform systematic functions.

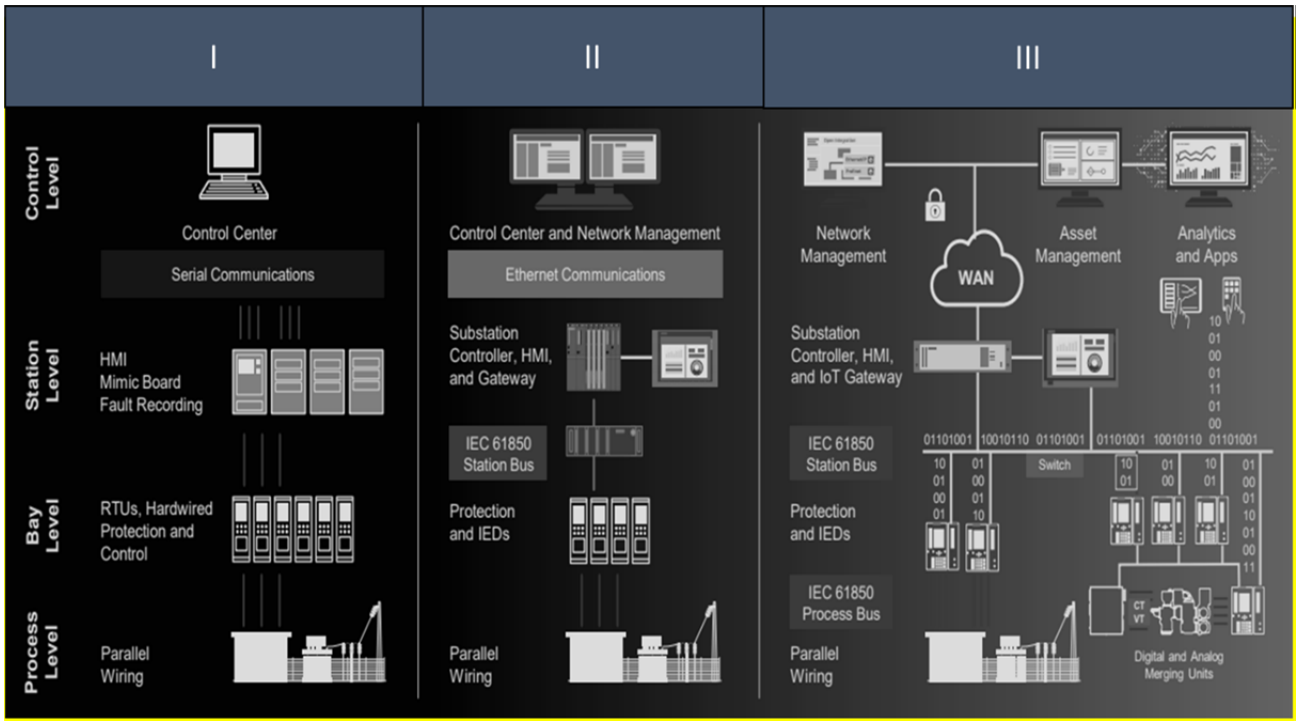


Fig. 1. The evolution of the gradual development of digitization in the elements of the Energy system

Contrary to the many functions performed by SCADA, its main distinguishing feature is the presence of an interface with the user. In the absence of such an interface, the above functions converge to those of controller programming tools, and the control is automatic in contrast to dispatch.

The application of SCADA consists in providing technological processes with data in the management of the operative dispatcher [4].

In the last 10–15 years, foreign interest in the problems of high-performance and reliable operative control and data collection, construction of protection systems has increased sharply in our Republic. On the one hand, it is associated with significant achievements in the energy sector, software and telecommunications, which increases the capabilities and expands the scope of automated energy systems. On the other hand, power supply control technologies, increased automation level, distribution of difficult functions between human and electrical equipment further strengthened the operator's control system [7].

Studies of most accidents and incidents in the energy sector have shown that 20 % of human error was the cause of the analysis. Constant improvements in technology and increased reliability of electronic equipment, machines can reduce such errors [5, 6].

An important place is occupied by the use of multi-functional digital microprocessor terminals for the control, monitoring and protection of electrical devices in modern, promising relay protection and automation. Multifunctional relay protection devices: application, principle and functions of operation, feature selection, input adjustment. Multifunctional relay protection devices are manufactured by Ekra, ABB, Mechatronics, Radius, Schneider Electric, Siemens and etc. The use of digital relay protection in automated Power Networks makes it possible to use a computer for the digital registration and analysis of accident processes in electrical energy systems, the study of digital relay protectors, the implementation of calculations and maintenance [8].

Conclusion

As a result of the introduction of digital control and protection systems in the Uzbeksiton energy system, remote control of electrical networks of all nominal voltage, recording, analyzing and eliminating accident situations that occur on electrical network elements, provides the opportunity to take measures. Therefore, it is important to introduce electrical devices and software tools that allow the energy system to be numbered. As a result of this, the accounting of generated, transmitted, distributed and consumed electricity is considered in instantaneous time, the accounting values of all its parameters are controlled in electrical networks, factors affecting the quality of electricity are studied, accident situations that occur in the system are recorded, analyzed and given instructions for the operation of the corresponding types of protection.

REFERENCES

1. Указ Президента Республики Узбекистан Об утверждении стратегии «Цифровой Узбекистан-2030» и Мерах по ее эффективной реализации. 05.10.2020 г.
2. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. – Ташкент: Fan va texnologiya, 2021. – 923 с.
3. Russel J. A Brief History of SCADA/EMS (2015). Archived from the original on 11 August 2015.
4. ИнСАТ “Master SCADA Руководство пользователя Версия 3.X.”. – Москва, 2017. – 574 с.
5. Gurevich V.I. Problems for Standardization of the Digital Protective Relays // Components and Technologies. – 2012. – No. 1. – P. 6–9.
6. Корсунов П.Ю., Моржин Ю.И., Попов С.Г. Разработка Концепции «Цифровая подстанция». Договор № И-11-41/10/ОАО «НТЦЭ». – Москва, 2011. – 248 с.
7. СТО 59012820.29.020.004-2018. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика. Нормы и требования: стандарт организации. – Москва: АО «СО ЕЭС», 2018. – 31 с.
8. Melikuziev M.V., Reymov K.M. Development of digital relay protection in intellectual city electrical networks // Science and Education Karakalpakstan. – 2022. – №3/1. – P. 48–53. ISSN 2181-9203.

СХЕМА ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ БРЕСТ-300

А.В. Шадрин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ21

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

Согласно информации указанной в «Схема и программа развития электроэнергетики Томской области на период 2022–2026 годов» можно заметить, что баланс мощности электроэнергетической системы Томской области в период 2016–2020 годы складывался с учетом потребления мощности из соседних энергосистем, здесь же стоит подчеркнуть, что среднее значение за приведенный период времени недостающего количества электроэнергии в Томской области составляет порядка 300 МВт от собственной возможной генерации. Складывающийся дефицит мощности компенсируется за счет перетоков из энергосистемы [1]. Также стоит заметить обще Российскую тенденцию на увеличение энергопотребления, согласно материалам системного оператора единой энергетической системы (СО ЕЭС) среднегодовой темп потребления электроэнергии составляет 2,1 %.

Таким образом актуальной тематикой для ввода выработки дефицитного объема электроэнергии в Томской области является строительство на территории закрытого административно-территориального образования города Северск уникального опытно-демонстрационного энергоблока с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем Брест-300 проектной мощностью 300 МВт. В связи с этим стоит вопрос о рассмотрении схемы выдачи мощности (СВМ) Брест-300, поскольку надежность СВМ является одним из важнейших условий для обеспечения надежности электроэнергетической системы в целом. Так же стоит подчеркнуть тот фактором, что Брест-300 является атомной электростанцией и его СВМ к узловым распределительным подстанциям основной сети в нормальных режимах работы энергосистемы, а также в нормальной схеме сети обязана гарантировать возможность выдачи всей имеющийся мощности, помимо этого данное условие должно выполняться и при отключении трансформатора связи либо шин любой из отходящих линий влияющих на его разгрузку [2]. Для того чтобы определить основные технические решения рассматриваемой СВМ необходимо провести анализ электроэнергетических режимов сети 220 кВ, прилегающих к району строящегося энергоблока, для его нормальной и основных ремонтных схем. Здесь же согласно требованиям из приказа Министерства Энергетики требуется рассмотреть влияние нормативных возмущений в указанных ранее схемах в соответствии с «Методических указаний по устойчивости энергосистем».

На рис. 1 представлена неполная схема электроэнергетической системы (ЭЭС) Сибирского химического комбината (СХК), а также нормальная схема выдачи мощности Брест-300 представляющая из себя блок генератор-трансформатор и три отходящие воздушные линии электропередач назовем их 101, 102, 103 220 кВ. Линия 101 отходит на подстанцию ГПП-220, линия 102 отходит на подстанцию Восточная, линия 103 отходит на подстанцию ЭС-2, откуда уже с ЭС-2 электроэнергия распределяется на нагрузки СХК. Подстанции ГПП-220, Восточная и Томская-220 в данной работе представляют из себя общий узел. Моделирование ЭЭС СХК, а также расчеты КЗ будем проводить в программного-вычислительном комплексе «Eurostage». Рассмотрим для нормальной и ремонтной схемы такие нормативные возмущения как:

- отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном коротком замыкании (КЗ) с неуспешным автоматическим повторным включением (АПВ) (тяжесть I);

- отключение сетевого элемента основной защитой при трехфазном КЗ с неуспешным АПВ (тяжесть II)[3].

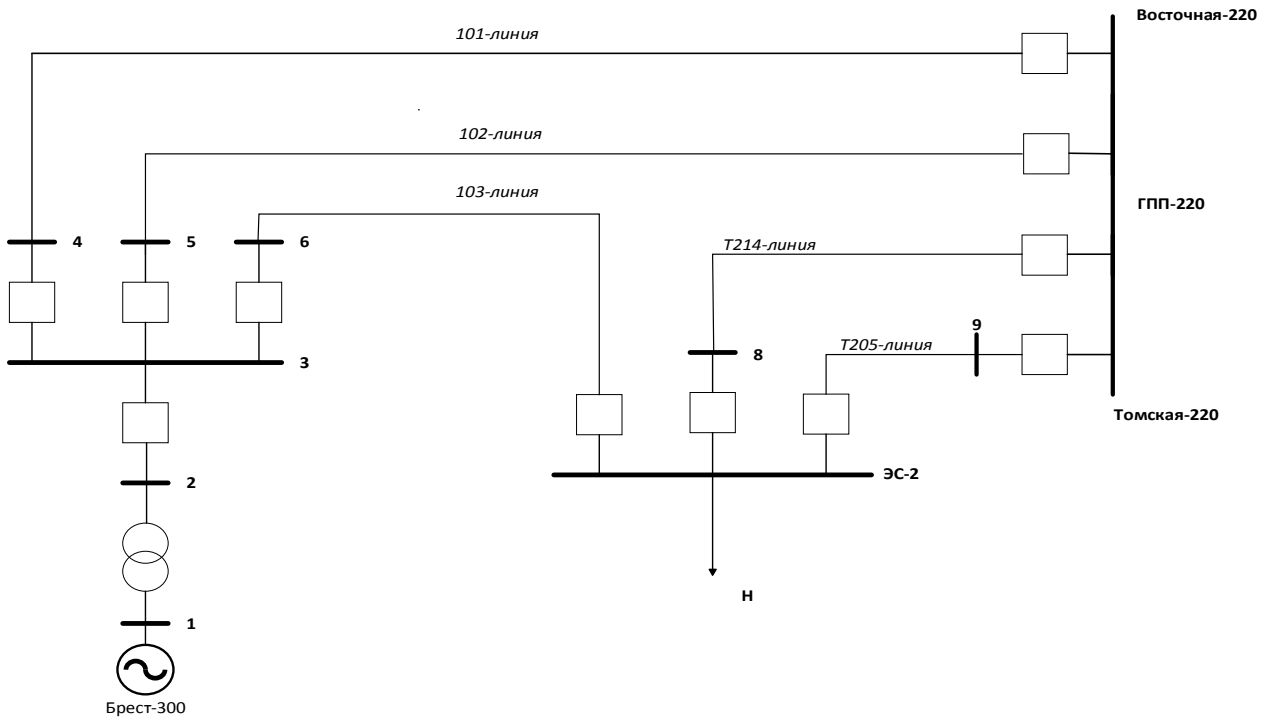


Рис. 1. Рассматриваемая схема выдачи мощности Брест-300

Таблица 1. Угла ротора генератора Бретс-300 при нормативных возмущениях в рассматриваемых схемах

№	Вид возмущения	Место повреждения	Схема	До аварийный угол ротора $\delta_{д/ав}$, град	Амплитуда угла ротора, град	После аварийный угол ротора $\delta_{п/ав}$, град
1	отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном КЗ с неуспешным АПВ	101	Нормальная	54,82	1,85	56,27
2		102	Нормальная	54,81	1,78	56,26
3		103	Нормальная	54,82	0,36	54,64
4		101	Ремонтная (102)	56,30	10,24	62,34
5		101	Ремонтная (103)	54,68	3,06	56,65
6		102	Ремонтная (101)	56,30	10,26	62,34
7		102	Ремонтная (103)	54,69	3	56,65
8		103	Ремонтная (101)	56,30	1,28	56,67
9		103	Ремонтная (102)	56,30	1,51	56,67
10	отключение сетевого элемента основной защитой при трехфазном КЗ с неуспешным АПВ	101	Нормальная	54,82	4,93	56,25
11		102	Нормальная	54,82	4,87	56,26
12		103	Нормальная	54,82	1,44	54,66
13		101	Ремонтная (102)	56,30	16,49	62,34
14		101	Ремонтная (103)	54,68	7,48	56,66
15		102	Ремонтная (101)	56,30	16,51	62,34
16		102	Ремонтная (103)	54,68	7,46	56,65
17		103	Ремонтная (101)	56,30	3,48	56,66
18		103	Ремонтная (102)	56,30	3,44	56,67

Для нормативных возмущений моделирование переходных процессов при возникновении однофазного или трехфазного КЗ происходит по следующему сценарию. На середине рассматриваемой линии происходит интересующее нас КЗ, после 0,15 с действием основного комплекта релейной защиты (РЗ) происходит отключение повреждённого участка с двух

сторон, после отключения под действием АПВ через 3 с происходит включение с двух сторон ранее отключенного участка. За время без токовой паузы КЗ на линии не устранилось, следовательно, АПВ оказалось неуспешным, и рассматриваемая воздушная линия вновь попадет под действие КЗ и с помощью РЗ вновь отключается через 0,15 с. Производить анализ динамической устойчивости будем по критерию изменения угла ротора генератора электростанции в промежуток времени от КЗ до прекращения колебаний рассматриваемого угла. Ремонтная схема Брест-300 подразумевает под собой вывод в ремонт одной из трех отходящих линий 101, 102 или 103.

В результате моделирования в программном комплексе «Eurostage» были получены угловые характеристики ротора генератора Брест-300 для нормальной и ремонтной схем при различных нормативных возмущениях I и II тяжести. Из полученных результатов (табл. 1) видно, что динамическая устойчивость схемы выдачи мощности Брест-300 не нарушается. Из этого следует, что по условию динамической устойчивости СВМ Брест-300 выбрана верно, также для данной схемы необходимо провести анализ по статической устойчивости для полной уверенности в правильности выбора СВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схема и программа развития электроэнергетики Томской области на период 2022–2026 годов (утверждена распоряжением Губернатора Томской области от 30.04.2021 № 95-р)
2. Методические рекомендации по проектированию и развития энергосистем (утверждены Приказом Минэнерго России от 30.06.03 № 281)
3. Методические указания по устойчивости энергосистемы (утверждены Приказом Минэнерго России от 29.08.18 № 630)

ПРОБЛЕМЫ ОТСТРОЙКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПРОТЯЖЕННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 6(10) КВ

Н.Ю. Князев

АО «ТомскНИПИнефть»

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

Проблемы, связанные с усложнением сети и увеличением протяженности линии электропередач предъявляют более высокие требования к эффективности функционирования релейной защиты.

При разветвлённой сети с протяженными линиями электропередач, при добавлении дополнительных источников энергии происходит как перераспределение токов коротких замыканий, так и смена самих величин токов КЗ. Всё это приводит к тому, что необходимо пересматривать существующие уставки. А как следствие, требуется рассмотреть удовлетворяют ли существующие защиты типа МТЗ.

В связи с этим, традиционные токовые защиты мало применимы в таких сетях, потому что они не обладают необходимыми требованиями к обеспечению чувствительности и надёжности. Поэтому в данный момент актуален тренд на изменение таких защит в пользу более сложных, например, дистанционных или дифференциальных защит.

В частности, рассматриваемым объектом является нефтепровод с принципиальной схемой электроснабжения представленной на рис. 1.

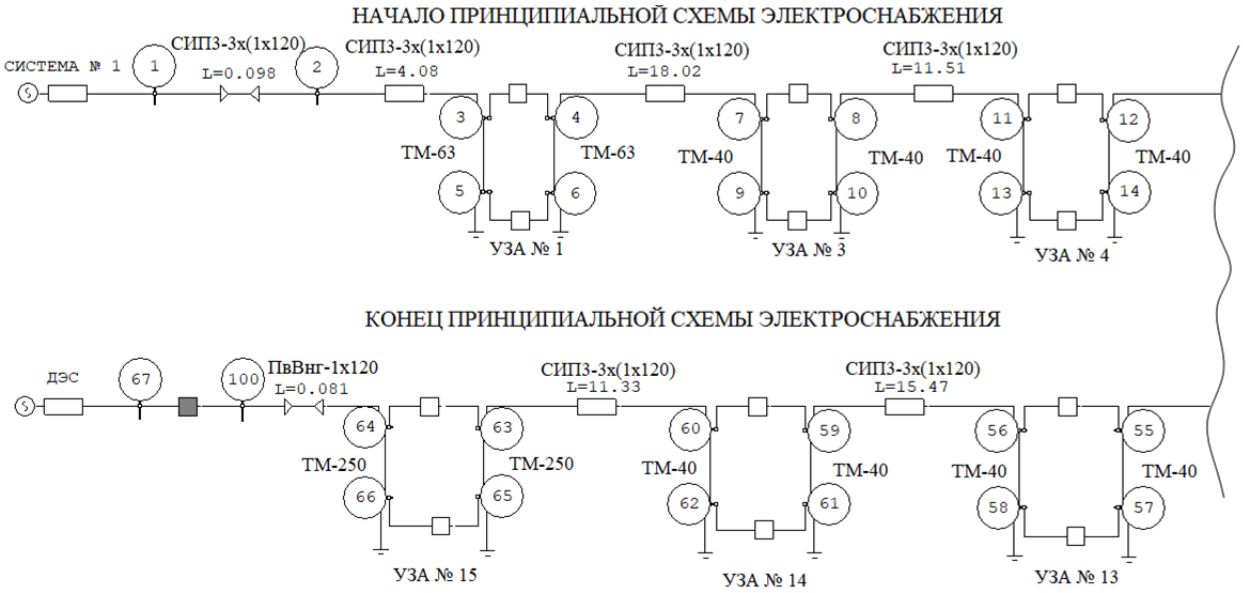


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения

На рис. 1 представлена существующая схема, которая относится к объединённой энергосистеме Сибири, характеризуется как кольцевая. Питание осуществляется узлами, состоящими из комплектных трансформаторных подстанций мощностью 40, 60 и 250 кВА, которые обеспечивают электроснабжение 15 узлов запорной арматуры. Протяженность линий электропередач составляет около 200 км из трёх однофазных СИП сечением 120 мм^2. Так как нефтепровод считается опасным объектом его электроснабжение должно быть непрерывным. Выполнено двухстороннее питание для изоляции повреждённого объекта с двух сторон.

При коротких замыканиях на концах линий узлов с двухсторонним питанием от Системы 1 и ДЭС не будет обеспечиваться селективность. Поэтому нужно рассмотреть другие типы защиты, такие как дифференциальная или дистанционная.

В рамках данной работы будет проводится сравнение применения дифференциальной и дистанционной защит для обеспечения нужд электропитания, так как токовая защита не обеспечивает необходимую надёжность. Фрагмент результатов ручного расчёта дифференциальной защиты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчёт дифференциальной токовой защиты

Источник э/с	Участок	$I_{ном}$, А	$I_{ДТО}$, о. е.	$I_{ДЗТнач}$, о. е.	$I_{ДЗТ2}$, о. е.	$I_{ДЗТ3}$, о. е.	$k_{чув}$
Система № 1	УЗА № 15	34,99	18,3	0,41	0,34	3,66	3,0
ДЭС	УЗА № 1	49,42	58,73	0,29	0,34	11,75	2,79

- $I_{ном}$ – номинальный первичный ток линии;
- $I_{ДТО}$ – значение уставки дифференциальной токовой отсечки;
- $I_{ДЗТнач}$ – значение уставки начального тока срабатывания дифференциальной токовой защиты;
- $I_{ДЗТ2}$ – значение уставки срабатывания дифференциальной токовой защиты второго участка;
- $I_{ДЗТ3}$ – значение уставки срабатывания дифференциальной токовой защиты третьего участка;
- $k_{чув}$ – коэффициент чувствительности дифференциальной токовой защиты.

Коэффициент чувствительности при КЗ должен быть более 2. Отсюда следует, что защита обеспечивает необходимую надёжность и чувствительность. [1]

По аналогии была рассмотрена возможность исполнения дистанционного типа защиты, расчёт уставок которых был выполнен с помощью программного обеспечения АРМ СРЗА и представлен в табл. 2.

Таблица 2. Расчёт дистанционной защиты

Источник э/с	Участок	$I_{Д31}$, Ом	$I_{Д32}$, Ом	$I_{Д33}$, Ом	$k_{чувБ}$	$k_{чувД}$
Система № 1	УЗА № 15	$1{,}73 + j3{,}24$	$5{,}36 + j10$	$203{,}2 + j379{,}1$	1,89	1,79
ДЭС	УЗА № 1	$2{,}81 + j5{,}24$	$16{,}8 + j31{,}3$	$113{,}1 + j211$	1,9	1,81

- $I_{Д31}$ – уставка срабатывания 1 ступени дистанционной защиты;
- $I_{Д32}$ – уставка срабатывания 2 ступени дистанционной защиты;
- $I_{Д33}$ – уставка срабатывания 3 ступени дистанционной защиты;
- $k_{чувБ}$ – коэффициент чувствительности ближнего резервирования;
- $k_{чувД}$ – коэффициент чувствительности дальнего резервирования.

С помощью ПО АРМ СРЗА построим характеристику второй ступени участка УЗА № 1 при питании от дизельной электростанции, см. рис. 2.

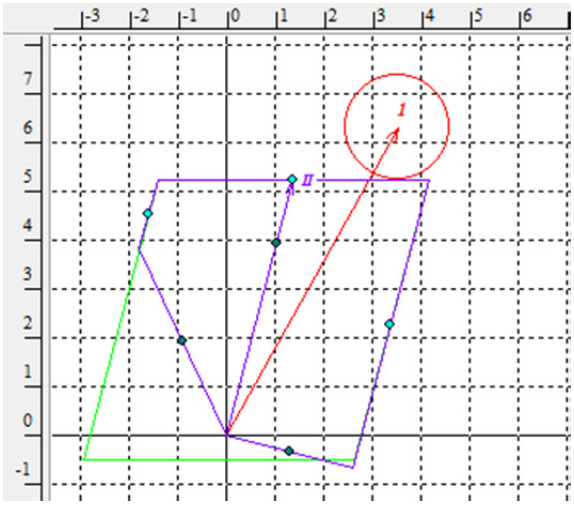


Рис. 2. Принципиальная схема электроснабжения

Полученные коэффициенты чувствительности для ближнего $k_{чувБ} \geq 1{,}25$ и для дальнего $k_{чувД} \geq 1{,}2$ резервирований удовлетворяет предъявляемым требования [2].

Анализ исследуемых защит показал, что обе они удовлетворяют предъявляемым требованиям. Однако, актуальным становится вопрос, какую всё-таки выбрать защиту.

Дистанционная защита основывается на её органе управления – дистанционном реле, которое определяет расстояние до повреждения линии на основе отношения напряжения к току линии и подаёт сигнал на срабатывания коммутационных аппаратов. Защита является двухступенчатой, не требует резервной защиты.

Суть дифференциальной защиты заключается в дифференциальном реле, которое измеряет разницу токов на концах защищаемой линии. При небалансе входного и выходного значений токов подаёт сигнал на срабатывание защиты. Имеет абсолютную селективность и нуждается в резервной защите.

В свою очередь, можно комбинировать дистанционную и дифференциальную защиту для обеспечения требуемого уровня надёжности, исходя из требований и условий системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб., доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с.
2. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / пер. с англ.; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат. 2005 – 322 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ СНЭЭ

Н.С. Иванов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ21

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

В данном докладе проводится обзор и результаты модели виртуального синхронного генератора (ВСГ), которая основана на модели “Three-Phase Battery System – A Generic Example” от разработчика ПО PSCAD Manitoba Hydro International Ltd. (MHI) [1] (рис. 1).

В данной модели построена трехфазная система накопления электроэнергии (СНЭЭ), которая с помощью силовых преобразователей (СП) способна заряжаться и разряжаться в процессе работы в зависимости от выбранного режима (charge and discharge mode). СНЭЭ подключена к электроэнергетической сети (ЭЭС) через трансформатор.

Большинство систем возобновляемых источников энергии (ВИЭ) используют именно данную технологию для интеграции с сетью. Однако внедрение установок генерации с СП способно значительно изменить динамические свойства ЭЭС, так как обладают отличными динамическими свойствами от традиционных синхронных генераторов (СГ), в частности система автоматического управления (САУ) [2]. Это приводит к влиянию на устойчивость сети. В итоге разработка более совершенной системы управления СП, позволяющей обеспечивать устойчивость и быть надежной как традиционная СГ, становится все более актуальной. Одним из возможных способов реализации данного управления является имитация статических и динамических характеристик традиционных СГ за счет особой системы автоматического управления, которая получила название «виртуальный синхронный генератор». Это направление считается одним из самых перспективных, так как позволяет присвоить установкам с СП функции, которые обеспечивают традиционные СГ для надежной работы ЭЭС. В связи с этим данный доклад посвящен разработке системы ВСГ на основе модели СНЭЭ.

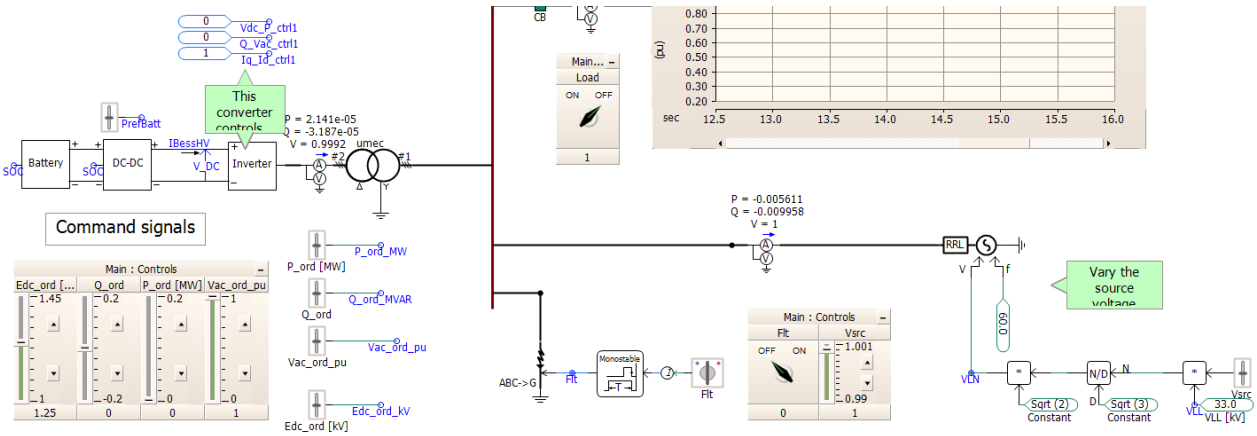


Рис. 2. Схема модели “Three-Phase Battery System – A Generic Example”

На данный момент существуют различные реализации ВСГ, среди которых можно выделить следующие: Virtual Synchronous Machine (VISMA), VISMA I, VISMA II [2]. Приведенные системы построены по принципу подчиненного управления и включают в себя три основные части: внутренний и внешний контур управления, модель СГ. Внешний контур управления может выполнять управление по частоте и мощности (автоматический регулятор

частоты и мощности (АРЧМ)) или напряжению (автоматический регулятор напряжения (АРН)). В рассматриваемой модели рассматривается АРН, в контуре которой осуществляется регулирование реактивной мощности/напряжения при помощи ПИ-регулятора (рис. 2). Снизу приведена структурная схема и реализация контура АРН.

Для реализации свойства инерционности традиционного СГ используется классическое уравнение ротора генератора с демпфирующим контуром (рис. 3).

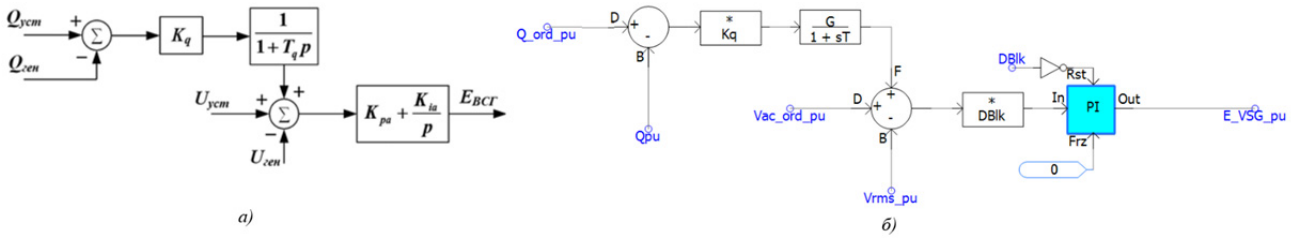


Рис. 3. Структурная схема виртуального АРН (а) и ее реализация в модели (б)

Для воспроизведения динамики СГ используется топология ВСГ 231, структурная схема которой была синтезирована в работе [2] (рис. 4). Работа регуляторов тока основано на ПИ-регулировании. Также стоит отметить, что данная топология учитывает виртуальные сопротивления ВСГ. В данной модели принимается $L_{VSG} = 0{,}4$ о.е., $R_{VSG} = 0{,}2$ о.е.

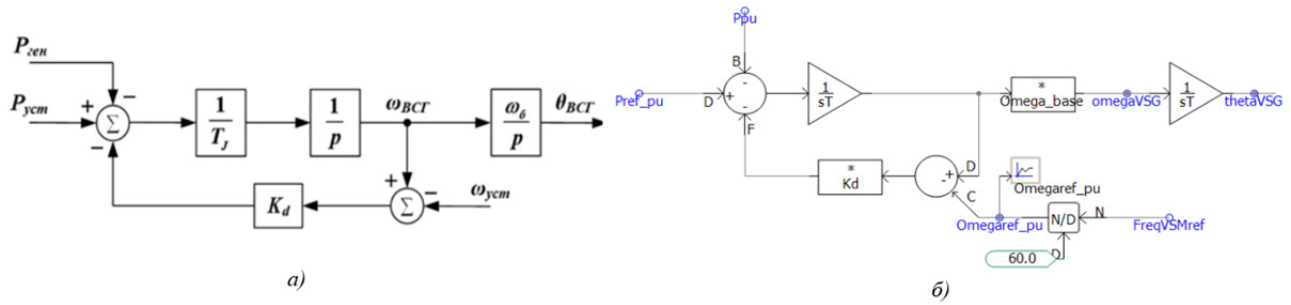


Рис. 4. Структурная схема классического уравнения движения (а) и ее реализация в модели (б)

Далее приведены результаты расчетов моделей: изначальной и модели ВСГ. Стоит отметить, что значительно изменены САУ преобразователей: DC-DC преобразователь и инвертор. В DC-DC преобразователе управление осуществляется по мощности СНЭЭ, а в ВСГ управление производится по напряжению на выходе DC-DC (рис. 5).

Далее приведены результаты исследования режима работы, в которой ВСГ синхронизирован с сетью и уставки по активной P_{ord} и реактивной Q_{ord} мощности равны 0, а напряжение на выводах DC-DC преобразователя E_{dc_ord} и инвертора U_{ac_ord} задано 1 о.е. Уставка по частоте ω_{ord} равна 1 о.е. Стоит отметить, что в изначальной модели возможно управление по нескольким параметрам: по выходному напряжению DC-DC преобразователя E_{dc} или по мощности СНЭЭ P_{BESS}, по реактивной мощности СНЭЭ Q_{BESS} или по выходному напряжению инвертора V_{ac}. В данном докладе приведено сравнение изначальной модели с режимом работы по P_{BESS} и Q_{BESS}. Коэффициенты определялись экспериментальным способом.

Согласно полученным результатам исследования можно сделать вывод, что по быстродействию и точности модель ВСГ незначительно уступает изначальной версии модели, а перерегулирование частоты ВСГ не превышает 5 %, что говорит о корректной работе контуров, управляющих данными параметрами. Однако контур по реактивной мощности не работает корректно, и система выдает значительную реактивную мощность в сеть. Разработка и исследование полностью функционирующей модели ВСГ продолжается.

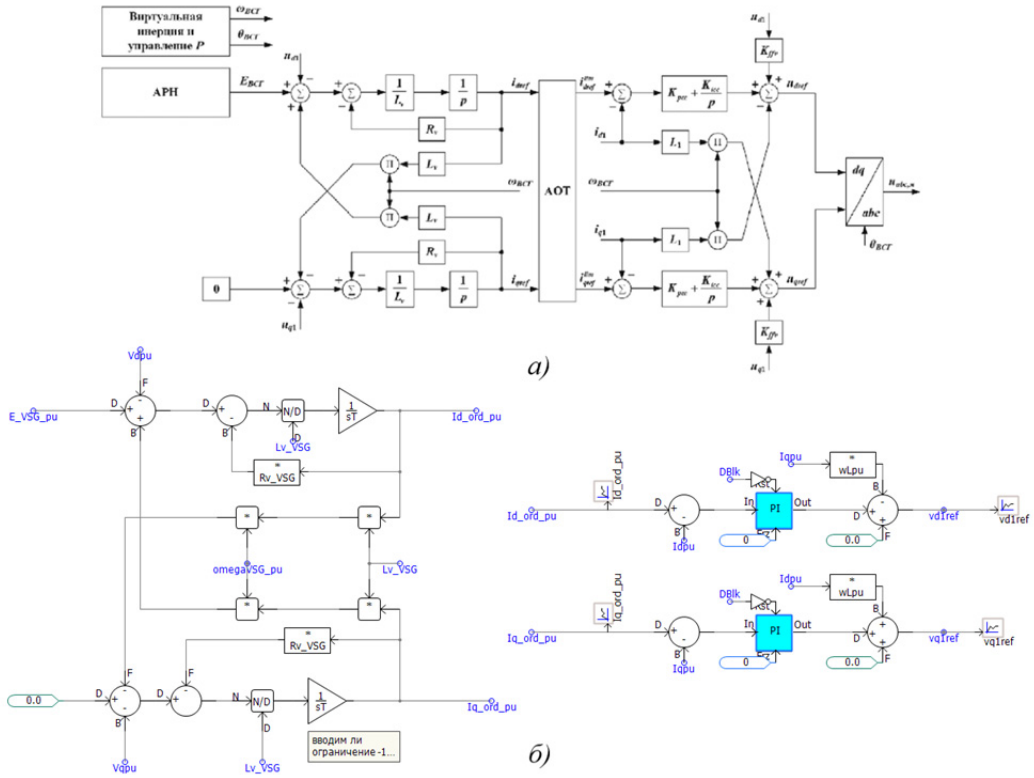


Рис. 5. Структурная схема ВСГ231 (а) и ее реализация в модели (б)

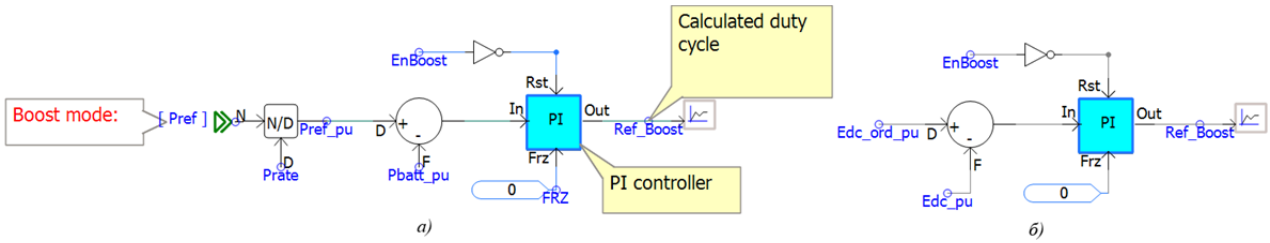


Рис. 6. Сравнение САУ DC-DC преобразователя изначальной модели (а) и ВСГ-модели (б)

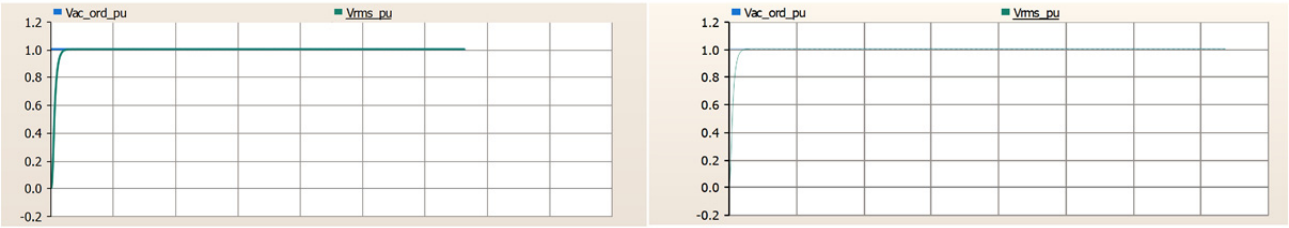


Рис. 7. График переменного напряжения изначальной модели (а) и ВСГ-модели (б)

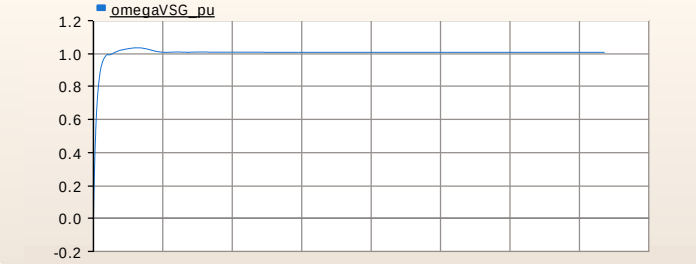
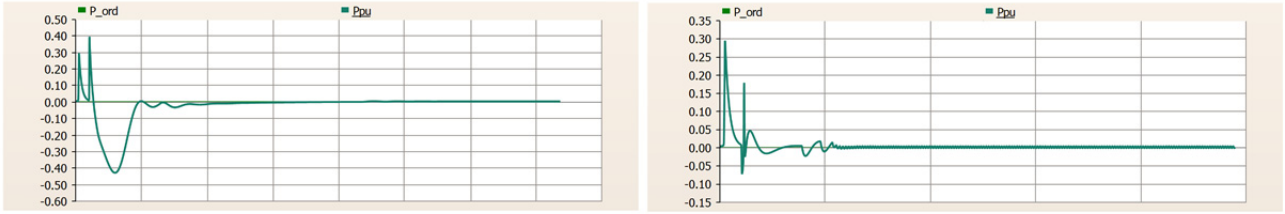
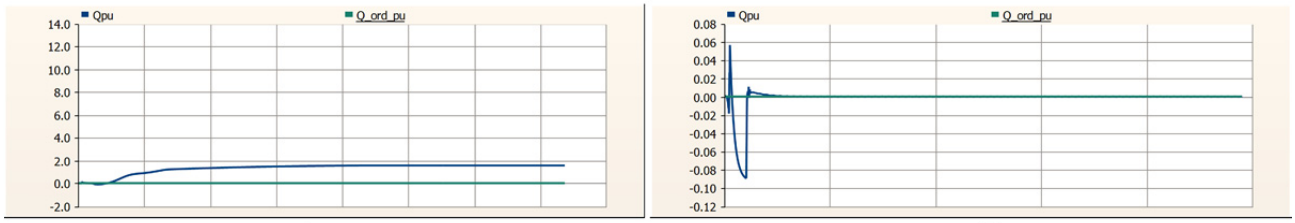


Рис. 8. График частоты ВСГ-модели



а) *б)*

Рис. 9. График активной мощности изначальной модели (а) и ВСГ-модели (б)



а) *б)*

Рис. 10. График реактивной мощности изначальной модели (а) и ВСГ-модели (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Three-Phase Battery System – A Generic Example // URL: Three-Phase Battery System – A Generic Example | PSCAD (дата обращения 18.11.2023).
2. Суворов А.А., Аскаров А.Б., Рудник В.Е., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок с силовым преобразователем // Электрические станции. – 2022. – № 3. – С. 43–57.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ В СОВРЕМЕННОЙ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ КОМПАНИИ

Р.А. Дементьев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А2-42

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

Нефтегазовый сектор занимает значительную часть в структуре российской экономики. Процессы добычи, подготовки и транспортировки углеводородного сырья являются в значительной степени энергоёмкими, в связи с чем для обеспечения всего цикла производственных задач требуются большие энергетические затраты. От величины этих затрат зависит рентабельность предприятий, уровень их конкурентоспособности и экономического развития.

Увеличение себестоимости добычи нефти в совокупности с ростом трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья, заставляют многие современные нефтегазовые компаний уделять особое внимание вопросам снижения энергозатрат и повышения энергоэффективности производства. Одним из универсальных подходов для решения обозначенной задачи является внедрение на предприятии системы энергетического менеджмента [1].

Энергетический менеджмент – это совокупность организационных и технических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, что, по сути, представляет собой рациональное, гибкое и экономи-

чески обоснованное управление ресурсами производства, начиная с низового уровня (цех) и заканчивая предприятием в целом [2]. Основные цели, которые преследует внедрение системы энергетического менеджмента на предприятии топливно-энергетического комплекса в России, представлены на рис. 1.

Для эффективной реализации программ энергосбережения и энергоэффективности как составляющих энергетического менеджмента, на предприятии должна быть введена соответствующая должность. Основными обязанностями энергетического менеджера являются:

- сбор данных по потреблению топливно-энергетических ресурсов предприятия;
- повышение уровня автоматизации систем учёта энергопотребления;
- внутренний энергетический аудит предприятия;
- отслеживание основных показателей энергоэффективности как по отдельным подразделениям, так и по производству в целом;
- разработка энергосберегающих мероприятий;
- внедрение энергосберегающих мероприятий с минимальными издержками.

Рис. 1. Основные цели системы энергетического менеджмента предприятий ТЭК [3]

Типовая схема управления предприятием с участием энергетической службы приведена на рис. 2.

Формирование системы управления энергосбережением с созданием самостоятельных структурных подразделений, подчиняемых напрямую главному энергетику и выполняющих управленческие функции, является тенденцией, которая чётко прослеживается на многих современных нефтедобывающих предприятиях.

Таким образом, в текущих реалиях энергоменеджмент является неотъемлемой частью предприятий нефтяной промышленности, обеспечивающей повышение их энергоэффективности, и, как следствие, снижение себестоимости добытого сырья. Для обеспечения оптимального развития системы управления энергосбережением на отдельно взятом предприятии требуется формирование соответствующей структуры, а также проведение регулярной оценки текущего уровня потребления энергетических ресурсов с дальнейшей разработкой организационных и технических мероприятий, направленных на оптимизацию наиболее энергозатратных технологических процессов.

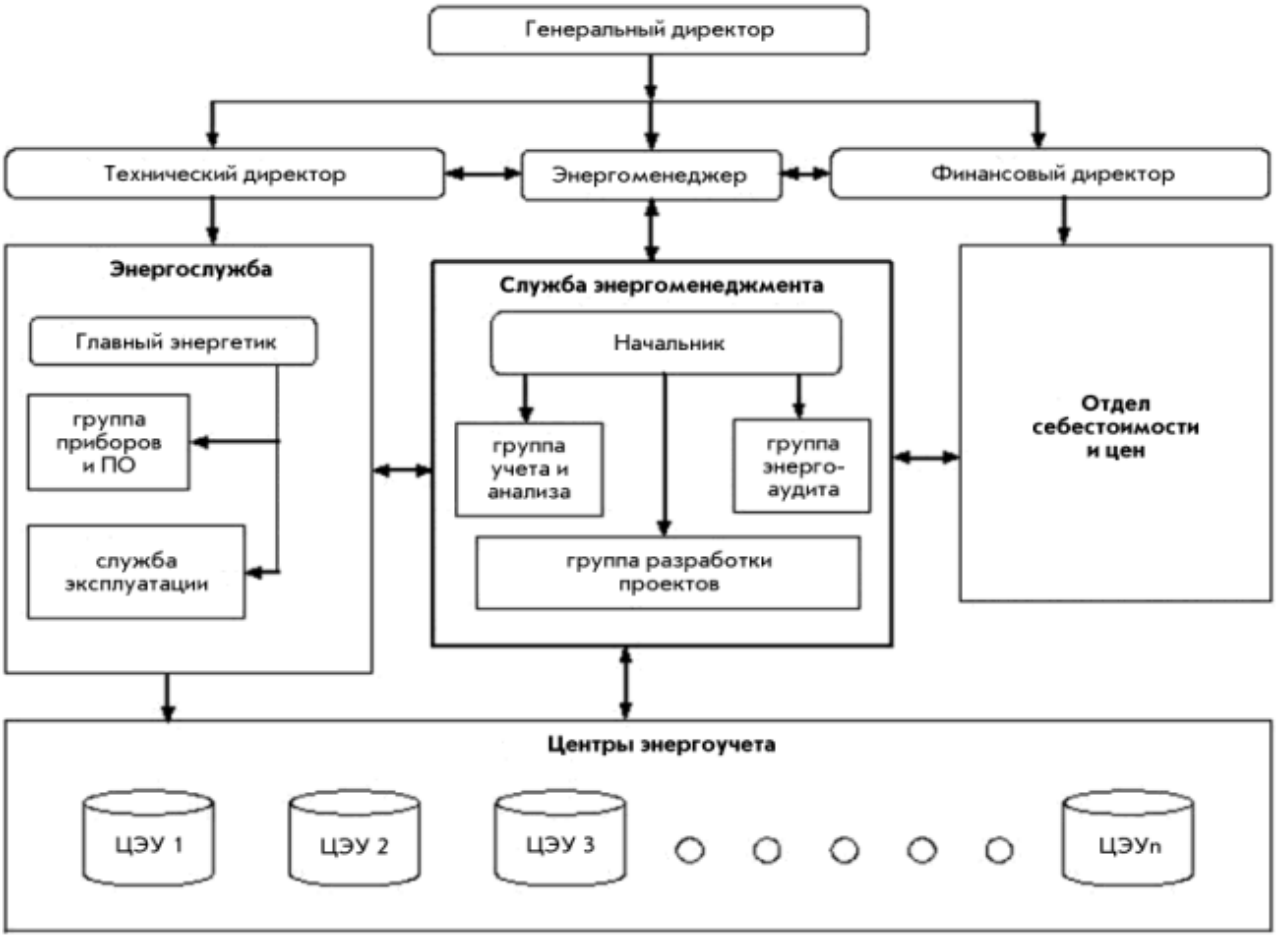


Рис. 2. Структура управления энергопотреблением на предприятии [4]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галяутдинов И.М. Повышение экономической эффективности добычи нефти на поздней стадии разработки месторождения на основе внедрения энергосберегающих мероприятий: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05. – СПб., 2016. – 169 с.
2. Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р., Юдина Н.А. Энергетический менеджмент: монография. – Казань: КГЭУ, 2016. – 146 с.
3. Склярова И.Ю. Совершенствование инструментария формирования системы энергоменеджмента предприятий топливно-энергетического комплекса России: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05. – Новочеркасск, 2014. – 201 с.
4. Синицын С.А., Бабич В.И. Организация системы энергоменеджмента на предприятии // Энергобезопасность и энергосбережение: электрон. научн. журн. – 2009. – № 6. – URL: http://www.endf.ru/30_1.php

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СХЕМЕ «ВЕДУЩИЙ-ВЕДОМЫЙ»

Д.Е. Шевченко, Е.С. Баженов

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), ПИ, ЭПМЭМ, гр. П-186

Научный руководитель: А.Е. Бычков, к.т.н., доцент ЭПМЭМ ПИ ЮУрГУ

В рамках данной работы рассматривается экспериментальное исследование принципа «ведущий-ведомый» в области электропривода (далее ЭП) и существующих методов его применения для синхронизации электроприводов, не связанных механически, а также оценка показателей и анализ эффективности примененных способов на базе полученных результатов работы системы.

В качестве рассматриваемой системы «Ведущий-ведомый» в данном случае подразумевается модель управления несколькими электроприводами, в которой внешние сигналы управления и задания по скорости подаются на «ведущий» электропривод, а «ведомый» электропривод отрабатывает сигнал задания, пропорциональный состоянию на выходе «ведущего» электропривода. Таким образом «ведомый» подстраивается по скорости под состояние на выходе «ведущего» и осуществляется синхронизация (согласованность) их работы.

Применение таких систем нередко можно встретить в промышленных установках, например, рельсовых кранах, непрерывных прокатных станах, транспортных механизмах, конвейерах, бумагоделательных машинах и т. п. Введение принципа «ведущий-ведомый» позволяет добиться согласованности работы, не связанных механически электродвигателей, и исключить возникновение ударных нагрузок. Структурная схема представлена на рис. 1.

В данной работе исследуются две системы электропривода по схеме «ведущий-ведомый»: электропривод, состоящий из двух асинхронных двигателей и двух преобразователей частоты (далее ПЧ) Altivar фирмы «Schneider Electric», и электропривод, состоящий из двух двигателей постоянного тока и двух тиристорных преобразователей (далее ТП) Mentor MP фирмы «Control Techniques». Дополнительно в качестве устройства-посредника в первой системе используется ПЛК Modicon M241 фирмы «Schneider Electric».

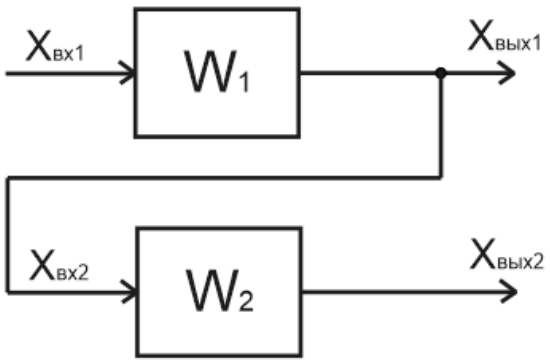


Рис. 1. Структурная схема системы по схеме «ведущий-ведомый»

Из существующих методов синхронизации электроприводов по схеме «ведущий-ведомый» в рамках экспериментального исследования были выделены следующие: синхронизация по аналоговому сигналу, синхронизация с применением дискретных входов/выходов, синхронизация с применением ПЛК по последовательному интерфейсу связи.

Последний метод рассматривался только в системе асинхронного электропривода. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2–6.

В системе асинхронного ЭП был исследован метод применения ПЛК по последовательному интерфейсу связи. В данной работе в качестве последовательного интерфейса связи был взят кабель RS-485, а протоколом связи выбран Modbus RTU.

Полученные результаты экспериментального исследования аппаратной реализации системы по схеме «ведущий-ведомый» были сведены в табл. 1.

На основе изучения функциональных возможностей выбранного оборудования в табл. 2 был приведен сводный анализ выбранных способов аппаратной реализации системы электропривода по схеме «ведущий-ведомый».

Таблица 1. Результаты аппаратной реализации системы «ведущий-ведомый»

Способ реализации	Результат исследования	
	Асинхронный ЭП	ЭП постоянного тока
Аналоговый сигнал	Статическая ошибка 18 % (50 и 41,4 Гц), быстродействие при пуске 80 мс, при торможении 50 мс	Статическая ошибка 50 %, быстродействие при пуске 400 мс, при торможении 100 мс
Побитовое управление	Синхронизация 3 заданных скоростей, быстродействие при пуске 120 мс, при торможении 80 мс	Синхронизация 2 заданных скоростей, быстродействие при пуске 350 мс, при торможении 150 мс
Применение ПЛК	Точная синхронизации в установившемся режиме, быстродействие при пуске 520 мс, при торможении 600 мс	Не проводился

Таблица 2. Способы аппаратной реализации системы «ведущий-ведомый»

Способ реализации	Достоинства	Недостатки
Аналоговый сигнал	Простая реализация, не требуются доп. модули и устройства	Ограниченное число «ведомых», равное числу выходов, возможность помехи и стат. ошибки
Применение дискретных входов/выходов (побитовое управление)	Высокое быстродействие, устойчивость к помехам, точность синхронизации в установившемся режиме	Ограниченное число «ведомых», синхронизация заданных скоростей (кол-во определяется числом логических выходов)
Применение ПЛК по последовательному интерфейсу связи	Расширенные возможности управления системой, её диагностики и контроля, точность синхронизации, возможность подключения до 247 «ведомых»	Необходимость оснащения ПЧ и ТП спец. портами связи или применение доп. модулей, малое быстродействие (двойное преобразование в ПЛК)

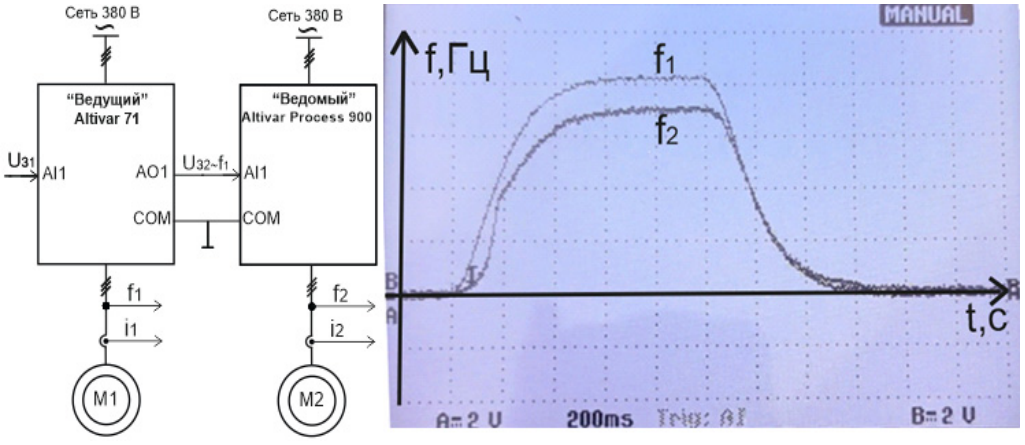


Рис. 2. Синхронизация частот на выходе «ведущего» и «ведомого» ПЧ в системе асинхронного электропривода при аналоговом сигнале

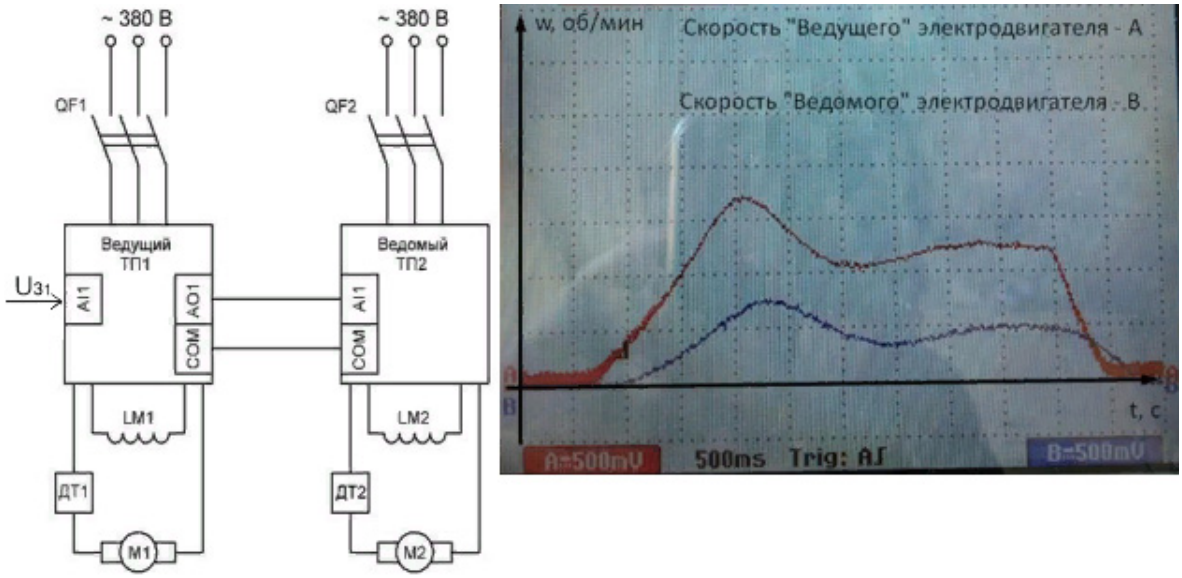


Рис. 3. Синхронизация сигналов на выходе «ведущего» и «ведомого» ТП в системе электропривода постоянного тока при аналоговом сигнале

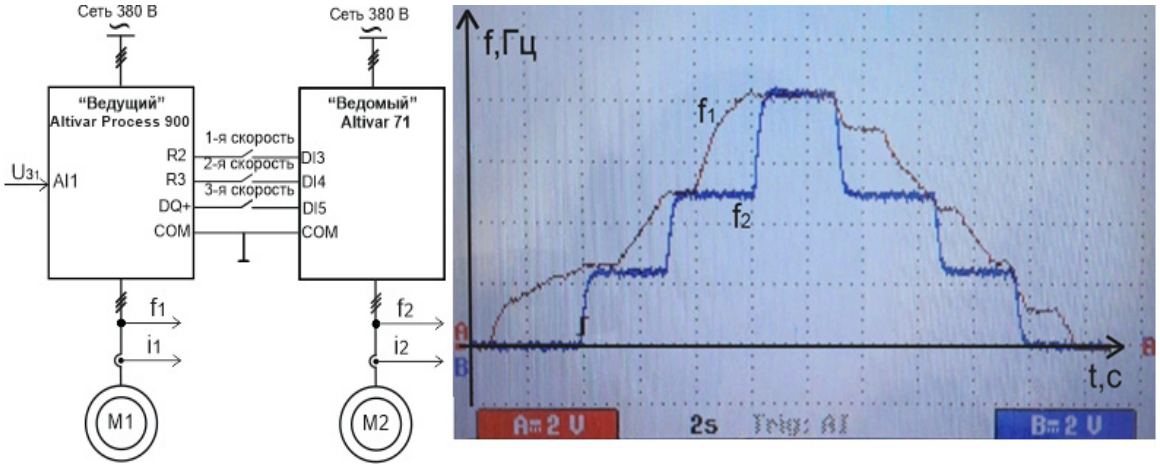


Рис. 4. Синхронизация частот на выходе «ведущего» и «ведомого» ПЧ в системе асинхронного электропривода при побитовом управлении

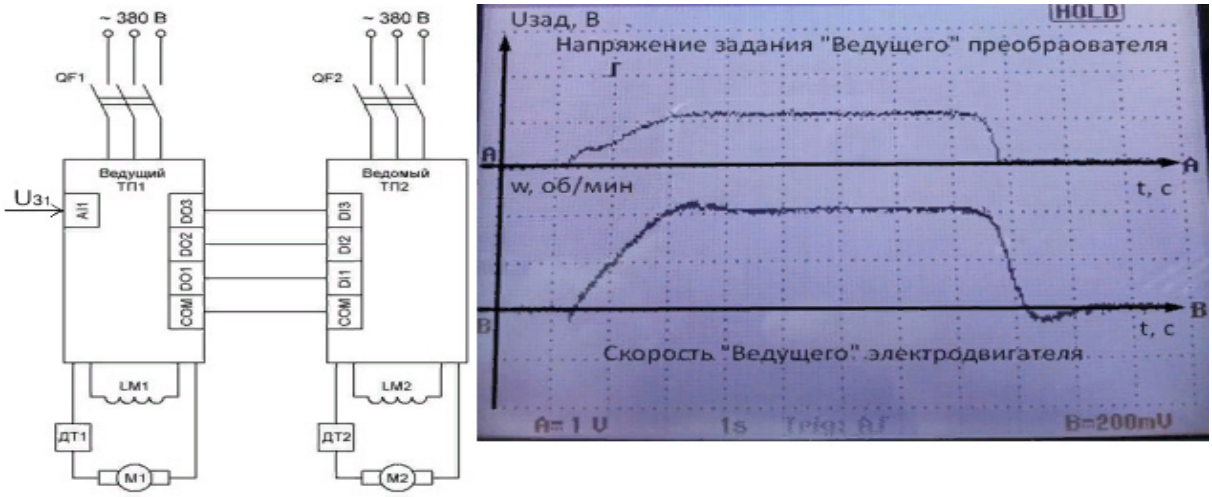


Рис. 5. Синхронизация сигналов на выходе «ведущего» и «ведомого» ТП в системе электропривода постоянного тока при побитовом управлении

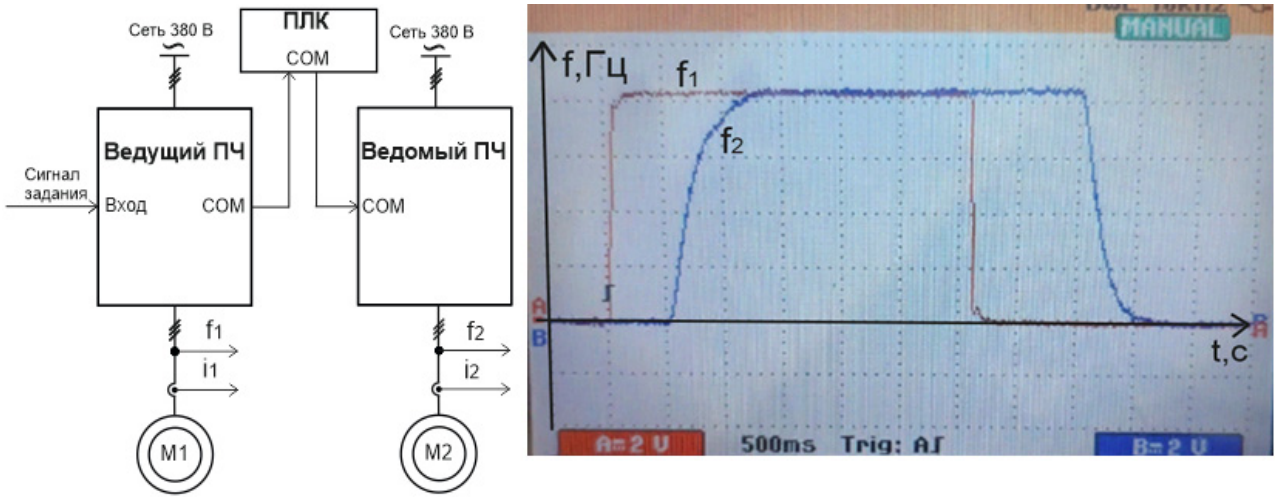


Рис. 6. Синхронизация частот на выходе «ведущего» и «ведомого» ПЧ в системе асинхронного электропривода с применением ПЛК по RS-485 и протоколу Modbus RTU

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков А.Е., Функ Т.А., Александров А.В. Методы синхронизации электроприводов не связанных механически // Омский научный вестник. – 2021. – № 5(179) – С. 56–61.
2. Довгиленко С. Применение преобразователей частоты Schneider Electric в многодвигательных промышленных машинах // Control Engineering Россия. – 2019. – № 1 (79). – С. 52–55.
3. Выравнивание нагрузки с помощью преобразователей частоты Altivar 71. Руководство пользователя. – URL: https://www.electrocentr.com.ua (дата обращения 22.10.2023).
4. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей Altivar 71. Руководство по программированию. – URL: http://www.altivar.com.ua (дата обращения: 15.10.2023).
5. Руководство пользователя Mentor MP. Электропривод постоянного тока. – URL: https://control-pro.ru (дата обращения: 03.11.2023)
6. Расширенное руководство пользователя Mentor MP. Электропривод постоянного тока. – URL: https://driveka.ru (дата обращения: 04.11.2023).

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОБОРОТОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОГЕНЕРАТОРА CMS

М.В. Кузитенко

ПО «Фабрика»

Научный руководитель: В.С. Лукянец, инженер 1 категории, ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

Одним из ответственных режимов работы турбоустановки является переход между стационарными состояниями. В этот момент изменяются вырабатываемая мощность, крутящий момент на валу турбины, а также число оборотов.

Несмотря на точность изготовления вала и диска турбины и их дальнейшую балансировку, все равно не получается добиться полного совпадения центра тяжести с осью вращения. Собранный ротор всегда имеет некоторый небаланс, приводящий к появлению несовпадений центра тяжести ротора с осью вращения вала (эксцентриситетом). При вращении появляется центробежная сила тем большая, чем больше число оборотов. Под действием центробежной силы возникает прогиб вала и появляется биение (вибрации).

При достижении критических оборотов прогиб вала теоретически стремится к бесконечности, что должно вызвать поломку вала. При пуске турбины с гибким валом следует проходить критическое число оборотов за короткий промежуток времени, чтоб избежать чрезмерной вибрации и возможной поломки вала. Для этого необходимо получить закономерности изменения величины оборотов от вырабатываемой и потребляемой мощности. Также существует много других причин, по которой может произойти разгон турбины: короткое замыкание генератора, при котором крутящий момент ротора генератора мгновенно возрастает; дефекты системы регулирования и пораспределения.

Для снятия параметров мощности на ступенях турбины была создана динамическая модель турбогенератора с использованием программном обеспечении «САПФИР». В основу ПО САПФИР заложен теплогидравлический кодогенератор CMS (Compressible Media Solver). CMS предназначен для расчета теплогидравлических параметров в произвольной смеси газов и жидкостей с индивидуальными теплофизическими свойствами и индивидуальными линиями насыщения каждого компонента [1].

В рамках модели происходит решение уравнения моментов с учетом инерции, момента сопротивления трения и текущим значением моментов подключённых агрегатов. Результатом решения уравнения моментов является абсолютная частота вращения вала [2].

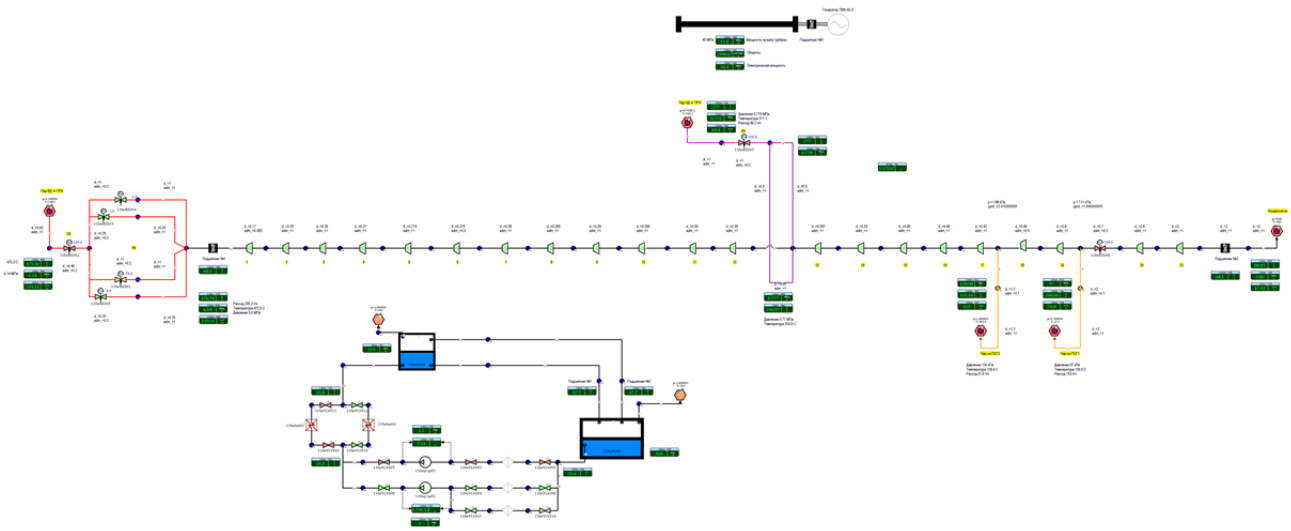


Рис. 1. Мнемосхема турбины [3]

Если $M_{\Sigma+} > M_{\text{стр}}$ и $w_{\text{отн}} > w_{\text{стр}}$, то:

$$\frac{\partial w_{\text{отн}}}{\partial \tau} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{MC}} M_{\text{агр}}^{j} - M_{\text{тр}}}{J \cdot w_{\text{ном}}} \quad (1)$$

где $w_{\text{отн}}$ – относительная частота вращения ротора; $w_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения ротора [Гц]; $w_{\text{стр}}$ – относительная частота страгивания ротора; J – момент инерции ротора относительно оси вращения [кг·м^2]; $M_{\text{тр}}$ – момент трения ротора [Н · м]; $M_{\text{агр}}^{j}$ – момент от j-го агрегата, подключённому к ротору [Н · м]; $M_{\Sigma+}$ – сумма положительных моментов, действующих на ротор, от подключённые к нему агрегатов [Н · м]; N_{MC} – число агрегатов, подключенных к ротору.

На базе кодогенератора CMS в ПК САПФИР была разработана модель турбогенератора для моделирования изменения частоты вращения в переменных режимах.

Для валидации работы полученной модели были сняты графики пуска турбины из холодного состояния и останов турбины.

Полученный графики разгона был сравнен со схемами разгона турбины, представленными в инструкции по эксплуатации [4]. Полученные результаты качественно совпадают с графиками пуска (рис. 2).

График останова сравнен с представленным в литературе [5], как видно из графика при останове турбины на третьем участке требуется учет трения от разрушения масляной пленки, которое происходит на данных значениях оборотов (рис. 3).

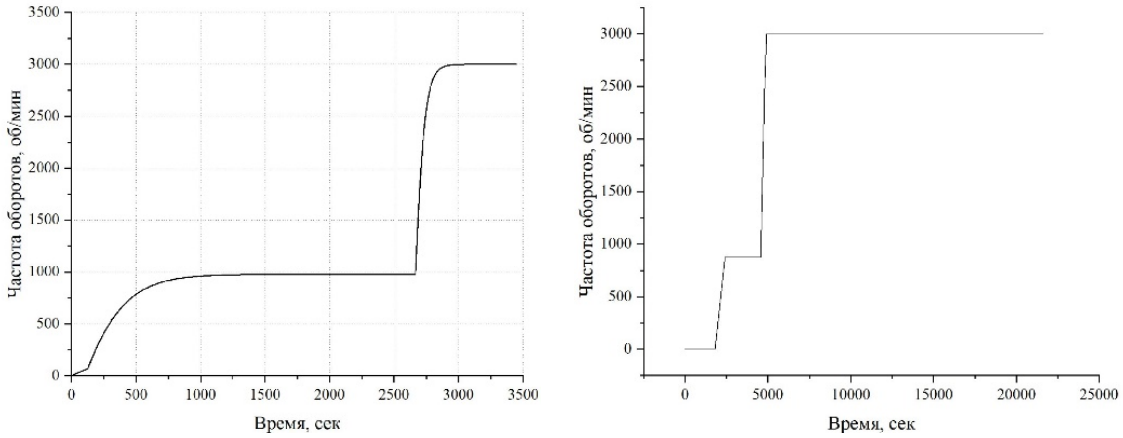


Рис. 2. График пуска, останова и неконтролируемого разгона турбины [4]

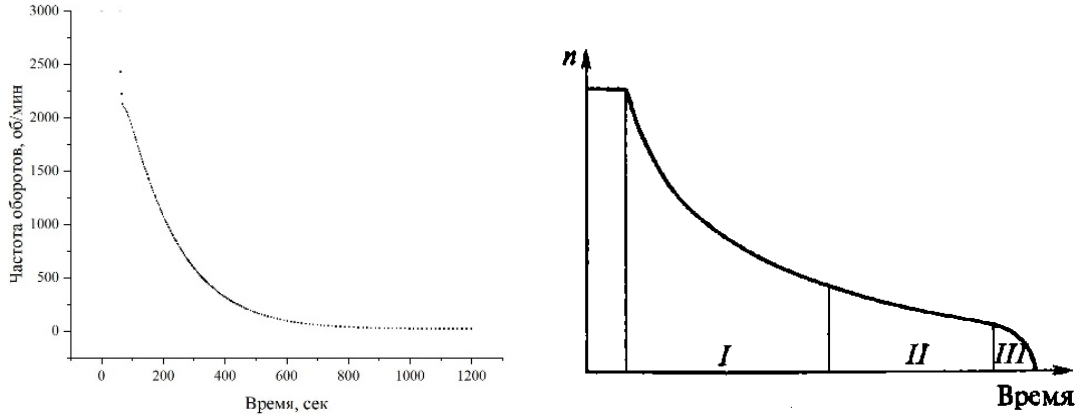


Рис. 3. Останова турбины [5]

Были воспроизведены режимы пуска турбины с холодного состояния и останов турбины и сравнены с инструкцией по эксплуатации [4] и учебным пособием [5]. Полученные результаты качественно совпадают с графиками пуска и останова представленными в инструкциях по эксплуатации турбоустановок, но требуется доработка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крошилин А.Е., Майданик В.Н. Новый подход к расчету параметров в теплогидравлических сетях для парогазожидкостных потоков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 5. – С. 32–38.
2. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2016. – 556 с.
3. Математическое моделирование паротурбинной установки (на примере теплофикационной турбины КТ-63-7,7) с использованием ПО «САПФИР» // Акционерное общество «Инженерно-Технический «Центр «ДЖЭТ». 2023.
4. РД 34.25.509. Типовая инструкция по пуску из различных тепловых состояний и останову моноблока мощностью 300МВт с турбиной К-300-240 ХТГЗ. – Главтехуправление Минэнерго СССР, 1976. – 66 с.
5. Трухний, А. Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов. – М.: – Изд-во МЭИ, 2002. – 540 с.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ В НИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Б.Д. Малюта

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А3-42

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

Введение

Активный рост установленных мощностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистемах (ЭС) по всему миру оказывает значительное, преимущественно негативное, влияние на их динамические свойства. Это обусловлено как отсутствием у некоторых видов ВИЭ инерционных свойств и резервов первичной мощности, так и тем, что значительное их число подключаются к ЭС через силовые преобразователи (СП), алгоритмы управления которых не способны обеспечить инерционный отклик и участие СП в процессах регулирования частоты.

Одним из актуальных решений данной проблемы является применение алгоритмов управления СП, эмулирующих синхронные машины. Такие алгоритмы наделяют СП инерционными свойствами и возможностью участвовать в процессах регулирования частоты и напряжения по аналогии с традиционными синхронными генераторами. В то же время существует значительное число таких алгоритмов, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Для их разработки и интеграции в ЭС необходимо предварительное исследование, осуществляемое посредством математического моделирования и применения различных методов.

Одной из таких методик является модальный анализ, позволяющий исследовать динамические свойства рассматриваемого объекта без осуществления численного моделирования во временной области. Однако результаты такого анализа могут быть сложны для интерпретации. В рамках данной работы на примере одномашинной ЭС проводится модальный анализ матрицы состояния системы, а затем полученные результаты применяются для анализа её динамического отклика по активной мощности и частоте.

Описание структуры исследуемой системы

В рамках данной работы рассматривается одномашинная ЭС, состоящая из источника постоянного напряжения, трёхфазного инвертора, управляемого алгоритмом ВСГ-Н, RLC-фильтра и энергосистемы, сэквивалентированной по теореме Тевенена до источника и активно-индуктивного импеданса. Принципиальная схема модели ЭС приведена на рис. 1.

Построение модели в пространстве состояний

Система уравнений, описывающая рассматриваемую ЭС имеет 13-й порядок. Для применения модального анализа данную систему необходимо линеаризовать и представить в матричном виде:

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

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, ΔU – вектор-столбец линеаризованных входных величин.

Структурная схема, описывающая работу алгоритма ВСГ-Н, приведена на рис. 2.

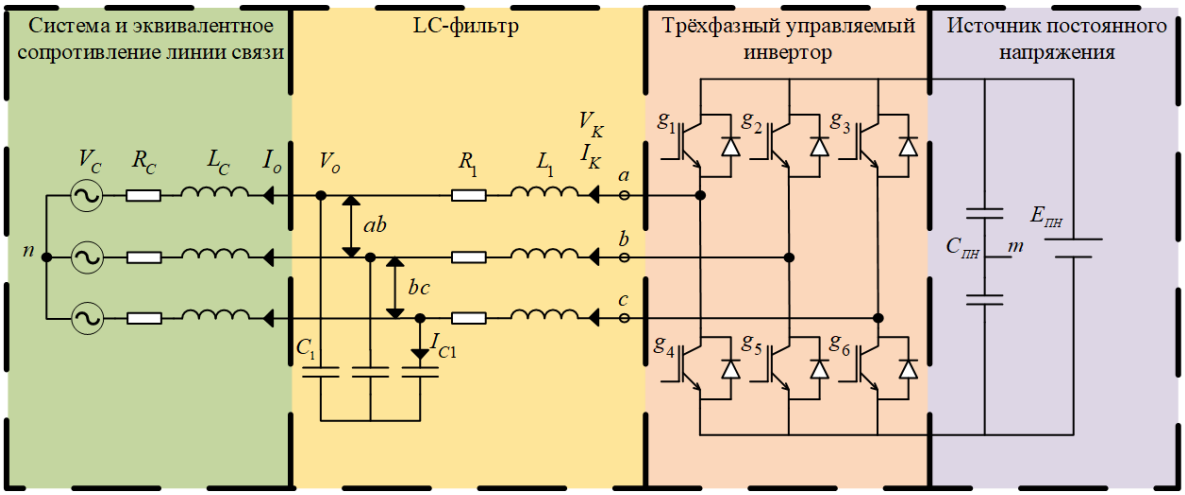


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой ЭС

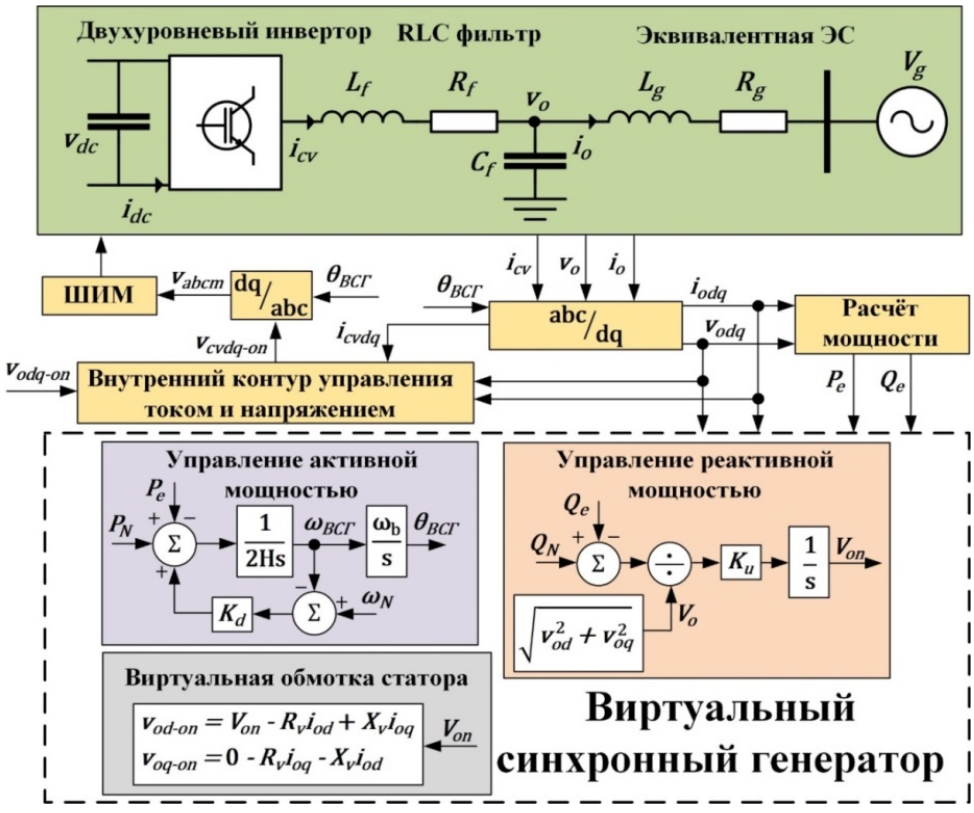


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ВСГ-Н

Верификация модели в пространстве состояний

Прежде чем применять инструментарий модального анализа к линеаризованной модели, необходимо верифицировать её посредством сравнения с результатами нелинейной модели. Для верификации были рассмотрены кривые активной мощности и частоты при возмущении, заданном изменением уставки по активной мощности от 0 до 0.2 о.е. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

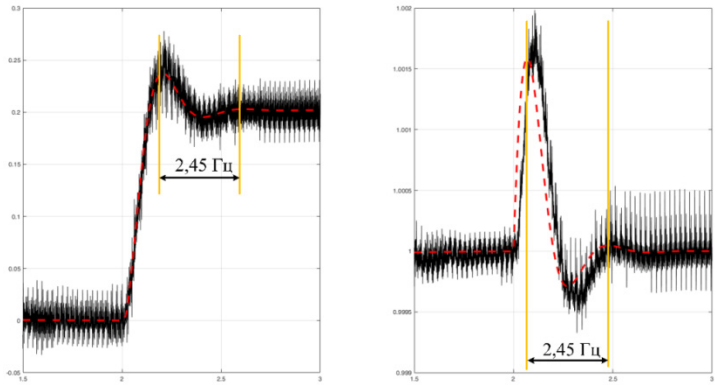


Рис. 3. Сравнительные отклики линеаризованной (красный пунктир) и детальной (чёрная сплошная линия) моделей по активной мощности (слева) и частоте (справа) во времени

Линеаризованные отклики не отражают всех колебаний выходных величин, но изменяются в тех же диапазонах и с теми же тенденциями. Наблюдается незначительная задержка во времени у отклика по частоте. Таким образом, линеаризованная модель прошла верификацию и может быть применена для модального анализа.

Модальный анализ линеаризованной модели

Одной из задач модального анализа систем является определение мод колебаний системы – собственных чисел матрицы состояний A, характеризующих характер динамических процессов в рассматриваемой системе. Результаты расчёта собственных чисел, частот их колебаний в герцах и декремента затухания, характеризующего демпфирование колебаний мод, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные числа матрицы состояний A

Мода	Собственное число	Частота колебаний, Гц	Декремент затухания
$\lambda_{1,2}$	$-964.4 \pm 3389.5i$	539.46	0.27
$\lambda_{3,4}$	$-761.5 \pm 3091.7i$	492.06	0.24
$\lambda_{5,6}$	$-3300.9 \pm 299.5i$	47.67	1.00
$\lambda_{7,8}$	$-33.6 \pm 155.6i$	24.76	0.21
$\lambda_{9,10}$	$-8.5 \pm 15.4i$	2.45	0.48
λ_{11}	-3.3	0.00	1.00
λ_{11}	-13.2	0.00	1.00
λ_{13}	-13.2	0.00	1.00

Моды с высокими частотами колебаний ($\lambda_{1,2}$, $\lambda_{3,4}$, $\lambda_{5,6}$, $\lambda_{7,8}$) влияют, как правило не на характер изменения выходной величины, а на её дополнительные колебания. Такие, например, видны у откликов детальной модели.

Чем меньше собственная частота колебаний моды, тем больше влияния она оказывает на тенденцию изменения выходной величины. Частота колебаний как активной мощности, так и частоты (рис. 3) совпадает с частотой мод $\lambda_{9,10}$, хотя данная мода демпфирована значительно лучше мод $\lambda_{1,2}$, $\lambda_{3,4}$ и $\lambda_{7,8}$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ВИЭ НА КОЛЕБАТЕЛЬНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС

Я.Ю. Малькова

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А3-42

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

Сегодня имеет место тенденция к расширению представления объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современных электроэнергетических системах (ЭЭС). Так, согласно Global Electricity Review 2023 [1], в 2022 году установленная мощность объектов ВИЭ (без учета гидроэлектростанций) достигла значения в 12 % от суммарной мощности мировой генерации.

Однако увеличение количества, единичной и суммарной установленной мощности объектов ВИЭ предопределяет увеличение степени влияния данных объектов на функционирование ЭЭС в целом, в том числе приводя к возникновению колебаний мощности. Последние, в свою очередь, негативно сказываются на устойчивости современных ЭЭС, создавая серьезные проблемы [2–4].

Описанное выше влияние обусловлено имеющимися особенностями подключения объектов возобновляемой генерации к сети, приводящими к снижению общей инерции. Так, даже относительно небольшие возмущения в ЭЭС могут привести к ситуации, когда углы синхронных генераторов будут колебаться друг относительно друга. Это есть предпосылка к возникновению незатухающих колебаний мощности и в целом к нарушению устойчивости ЭЭС.

Проблема возможного нарушения устойчивости ЭЭС после внедрения одного или нескольких объектов ВИЭ усугубляется еще и тем, что ранее (до массовой локальной установки объектов возобновляемой генерации) в ЭЭС подобного рода колебаний мощности не возникало. Соответственно, их эффективное демпфирование в настоящее время затруднено, при существующих традиционных методах и средствах демпфирования колебаний и настроенных значениях параметров последних. Известно, что в нашей стране таким средством является система автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов [5, 6].

Стоит отметить, что несмотря на то, как уже было упомянуто выше, объектам ВИЭ преимущественно свойственна локальная установка, в сетях низкого и среднего классов напряжения, ближе к конечному потребителю, путь распространения возникающих колебаний мощности может достигать и магистральных сетей, приводя к так называемым межрайонным или межзональным колебаниям (в рамках данной статьи остановимся на втором варианте). Межзональные колебания, в свою очередь, плохо поддаются демпфированию, поскольку магистральные сети, как правило, функционируют на максимально возможной передаваемой мощности. В данном случае для демпфирования колебаний применяется введение искусственных ограничений на передаваемую мощность, с возможными последствиями в виде нарушения колебательной устойчивости ЭЭС [7, 8] и системных аварий [9].

Проведенная работа, часть выдержек из которой кратко представлена в рамках данной статьи, посвящена изучению влияния объектов ВИЭ, а точнее их мощности и размещения, на устойчивость ЭЭС. В качестве объекта ВИЭ принята солнечная электростанция (СЭС).

В качестве исследуемой схемы принята схема двухзональной четырехмашинной ЭЭС [10], приведенная на рис. 1. Данная схема не случайна и имеет свое название – «схема Кундура». Широко применяется в задачах анализа режимов работы ЭЭС, для отработки новых методов

и средств повышения эффективности функционирования и устойчивости современных энергосистем, а также в исследованиях, целью которых является идентификация и демпфирование колебаний мощности.

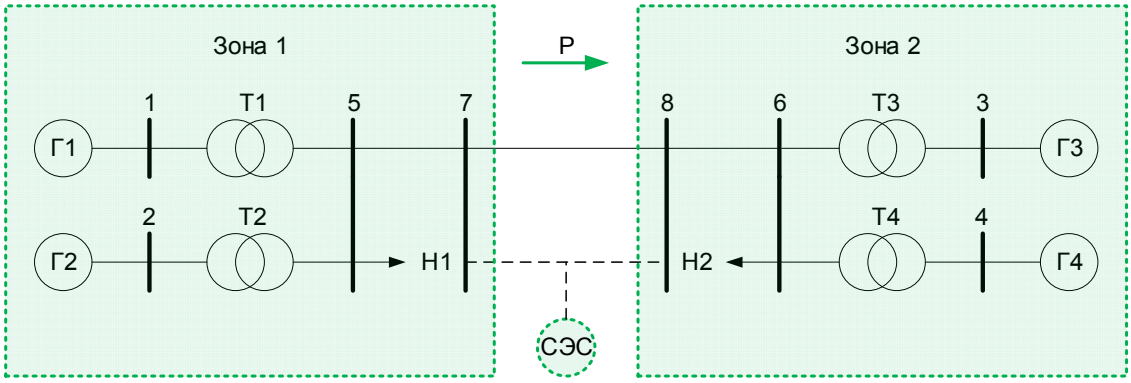


Рис. 1. Исследуемая двухзональная четырехмашинная ЭЭС («схема Кундура»)

Исследуемая схема (рис. 1) содержит две зоны, каждая из которых представлена двумя генерирующими установками:

- зона 1 – избыточная зона (зона, характеризующаяся наличием избытка мощности, передающая);
- зона 2 – дефицитная зона (зона, характеризующаяся наличием дефицита мощности, принимающая).

Зоны включают в себя следующее оборудование:

- зона 1 – генераторы Г1 и Г2, трансформаторы Т1 и Т2, нагрузку Н1 (узлы 1, 2, 5, 7);
- зона 2 – генераторы Г3 и Г4, трансформаторы Т3 и Т4, нагрузку Н2 (узлы 3, 4, 6, 8).

Зоны соединены между собой двумя параллельными протяженными линиями между узлами 7 и 8, к которым подключается СЭС.

Режим подобран так, что из Зоны 1 в Зону 2 поддерживается постоянный переток мощности, равный 1,1 МВт.

Проведенные эксперименты заключались в следующем. Сначала была рассмотрена установка СЭС в Зону 1 (узел 7), с пошаговым увеличением ее мощности. Величина шага принята равной 50 МВт, максимальное значение мощности СЭС – 400 МВт. Затем СЭС была размещена в Зоне 2 (узел 8), с увеличением мощности с тем же шагом.

Для каждого случая определены собственные значения корней характеристического уравнения, которым описывается исследуемая схема, с текущим набором оборудования, в подпрограмме Power System Analysis Toolbox (PSAT) [11] программного комплекса MATLAB. Полученные значения корней характеристического уравнения исследуемой схемы для рассмотренных случаев обобщены и приведены ниже, на рис. 2.

Так, на рис. 2, *а* и *б* представлены локальные колебания Зоны 1 и Зоны 2 соответственно (расположенных в них генерирующих установок). На рис. 2, *в* – межзональные колебания Зоны 1 и Зоны 2.

Рис. 2, *а* и *б* позволяют сделать вывод, что вне зависимости от локализации СЭС относительно узлов исследуемой схемы (размещение в Зоне 1 или в Зоне 2) наблюдается тренд на смещение влево собственных значений корней характеристического уравнения исследуемой схемы при увеличении мощности внедряемого объекта генерации в рамках заданного диапазона изменения мощности. Выявленная закономерность смещения влево корней характеристического уравнения определяет повышение устойчивости исследуемой схемы и улучшение ее демпфирующих свойств с увеличением мощности СЭС.

Кроме того, согласно рис. 2, *а*, *б* и *в* установке СЭС любой мощности в рамках заданного диапазона изменения мощности внедряемого объекта в Зону 1 (избыточную зону) соответствуют собственные значения корней характеристического уравнения исследуемой схемы, которые в каждом случае размещаются левее, чем при установке СЭС той же мощности в Зону 2 (дефицитную зону). То есть Зона 1 в данном случае является более предпочтительной для размещения СЭС, в рамках задачи повышения устойчивости ЭЭС за счет внедрения локальной генерации, представленной объектом ВИЭ, в частности, СЭС.

Рис. 2, *в* вынесен для отдельного рассмотрения ввиду того, что представленные на нем зависимости несколько отличаются от зависимостей рис. 2, *а* и *б*. Так, при внедрении СЭС в Зону 2 (дефицитную зону) наблюдается смещение корней характеристического уравнения исследуемой схемы вправо, то есть имеет место ухудшение устойчивости ЭЭС в целом. В то же время внедрению СЭС 200 МВт и более соответствует тенденция изменения положения (смещения) корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, описанная ранее и представленная на рис. 2, *а* и *б*.

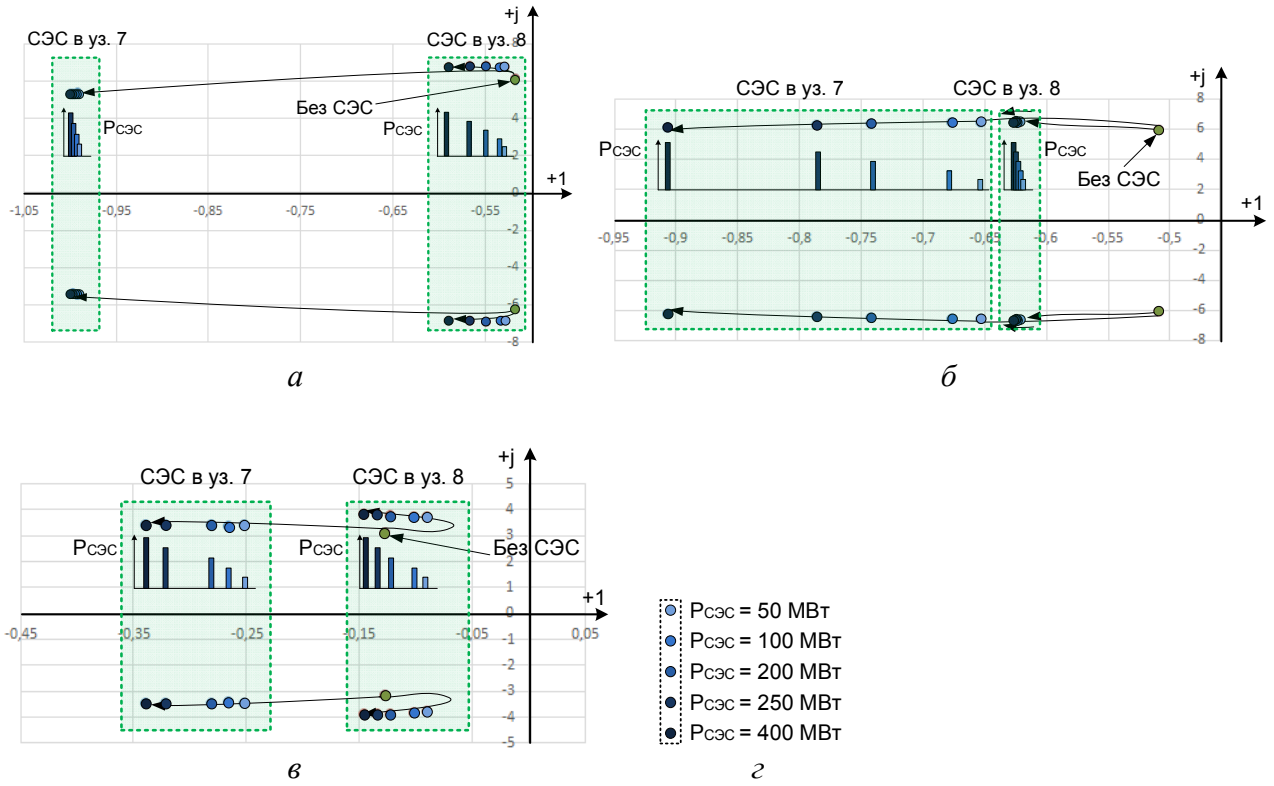


Рис. 2. Расположение собственных значений корней характеристического уравнения на комплексной плоскости при подключении СЭС разной мощности в Зоне 1 (узел 7) и в Зоне 2 (узел 8) исследуемой схемы: а) локальные колебания в Зоне 1; б) локальные колебания в Зоне 2; в) межзональные колебания Зоны 1 и Зоны 2; г) мощность внедряемой СЭС (цветовые обозначения)

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что размещение и мощность объекта ВИЭ (их изменение) оказывают влияние на устойчивость ЭЭС. При этом для исследуемой схемы, в рамках рассмотренных сценарных условий характер данного влияния положительный (улучшение демпфирующих свойств), в том числе при кратном увеличении мощности внедряемого объекта ВИЭ в рамках заданного диапазона изменения его мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Electricity Review 2023 // Ember. 2023. – URL: https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/ (дата обращения: 13.11.2023).
2. Hu J., Wang S., Tang W., Xiong X. Full-Capacity Wind Turbine with Inertial Support by Adjusting Phase-Locked Loop Response // IET Renewable Power Generation. – 2017. – V. 11. – Is. 1. – P. 44–53.
3. Liu H., Xie X., He J., Xu T., Yu Z., Wang C., Zhang C. Subsynchronous Interaction between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks // IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – V. 32. – Is. 6. – P. 4708–4720.
4. Liu C., Cai G., Ge W., Yang D., Liu C., Sun Z. Oscillation Analysis and Wide-Area Damping Control of DFIGs for Renewable Energy Power Systems Using Line Modal Potential Energy // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – V. 33. – Is. 3. – P. 3460–3471.
5. Krismanto A.U., Mithulananthan, Krause O. Microgrid Impact on Low Frequency Oscillation and Resonance in Power System // 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia). – Melbourne, VIC, Australia, 2016. – P. 424–429.
6. Saadatmand M., Gharehpetian G.B., Moghassemi A., Guerrero J.M., Siano P., Alhelou H.H. Damping of Low-Frequency Oscillations in Power Systems by Large-Scale PV Farms: A Comprehensive Review of Control Methods // IEEE Access. – 2021. – V. 9. – P. 72183–72206.
7. Sun Z., Cai G., Yang D., Tang M. Impact of Different Wind Power Generators on Small Signal Stability of Power Systems // 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). – Wollongong, NSW, Australia, 2015. – P. 1–6.
8. Garmroodi M., Hill D.J., Ma J., Verbic G. Impact of Wind Generation Variability on Small Signal Stability of Power Systems // 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). – Perth, Australia, 2014. – P. 1–6.
9. Sahar P.A., Reza I., Tate J.E. Damping Inter-Area Oscillations Based on a Model Predictive Control (MPC) HVDC Supplementary Controller // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – V. 28. – Is. 3. – P. 3174–3183.
10. Kundur P. Power System Stability and Control. – New York, USA: McGraw Hill, 1994. – 1176 p.
11. Milano F. An Open Source Power System Analysis Toolbox // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – V. 20. – Is. 3. – P. 1199–1206.

ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ КОМПАНИЙ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

В.М. Нефедов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А01

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

В данном обзоре представлено сравнение характеристик блоков микропроцессорной релейной защиты четырех разных компаний, занимающихся разработкой и производством релейной защиты и автоматики. Для сравнения характеристик блоков микропроцессорной релейной защиты были взяты такие терминалы, как терминал «БМРЗ-152» производства российской компании Научно-технического центра «Механотроника», терминал «БЭ2502А» производства российской компании Научно-производственного предприятия «ЭКРА», терминал «Sepam S80» производства французской энергомашиностроительной корпорации «Schneider Electric», и терминал «REL670» производства шведско-швейцарской транснациональной корпорации.

Для чего нужен блок микропроцессорной релейной защиты? Блок микропроцессорной релейной защиты нужен для исполнения функций релейной защиты и автоматики. Под этим определением понимается, что блок микропроцессорной релейной защиты должен защищать подключенное присоединение от токов короткого замыкания на землю, от токов короткого замыкания между фазами, от перегрузок и от перенапряжений или просадок напряжения.

Принцип работы блока микропроцессорной релейной защиты основан на том, что терминал смотрит за изменениями таких параметров, как протекающих ток в присоединении, изменением напряжения, частоты и сопротивлением присоединения. Если в присоединении какой-то из вышеперечисленных параметров выходит за пределы, то блок микропроцессорной релейной защиты должен почувствовать это изменение и отключить данное присоединение. Под пределом параметров понимается то факт, что при проектирование данного присоединения в техническом задании прописаны номинальные значения тока, напряжения и сопротивление присоединения. Также в функционал терминала входят такие функции, как коммуникация с другими устройствами в системе и управление. В функции коммуникации с другими устройствами понимается то, что терминал может принимать данные от других установленных терминалов в присоединении или же терминал сам передает данные на другие устройства. Терминал может коммуницировать с такими устройствами, как сигнализация или другими видами блоков микропроцессорной защиты. Функции управления терминала состоит в следующем, терминал самостоятельно может отключить присоединение на основе считанных данных, а не передать данные оператору, что бы тот не отключал присоединение самостоятельно.

Общие технические требования, применяемые к блокам микропроцессорной релейной защиты, требуют следующего:

- *Надежность.* Терминал должен обеспечивать стабильное функционирование в течение всего срока эксплуатации по паспортным данным.
- *Удобство установки, обслуживания и эксплуатации.* Терминал должен легко устанавливаться в процессе монтажа, легко настраиваться, а также должна иметься понятная документация для эксплуатации данного устройства.
- *Совместимость и интеграция.* Терминал должен быть совместимым и легко интегрируемым с другими установленными системами и оборудованием, чтобы обеспечить взаимодействие и обмен с другими данными.
- *Гибкость логики терминала.* Терминал должен обладать гибкой логикой для взаимодействия с другими видами защит, чтобы не нарушать работу другой защиты.
- *Высокая скорость обработки данных.* Терминал должен иметь высокую скорость обработки данных для быстрого выявления проблем в электрической сети и предотвращения аварийных ситуаций.
- *Объем журнала регистраций аварийных событий и его хранение.* Терминал должен иметь большой объем памяти для регистрации данных по произведенным срабатываниям защиты.

Для сравнения характеристик блоков микропроцессорной релейной защиты использовались следующие параметры: количество релейных защит, оперативное питание, совместимость, количество записей событий, программное обеспечение, связь с терминалом. Сравниваемые характеристики по каждому блоку сведены в табл. 1 сравниваемые характеристики терминалов.

Из табл. 1 видно, что конфигурация данных блоков различается по многим позициям. Различия начинается с того, что у каждого термина различное количество осуществляемых защит из-за того, что терминал «Sepam S80» можно установить не только на защиту линий электропередач, но и на защиту трансформаторов, двигателей и генераторов. А терминалы «БМРЗ-152», «БЭ2502А» и «REL670» устанавливаются в основном на защиту линий.

Таблица 1. Сравниваемые характеристики терминалов

Характеристики	БМРЗ-152	БЭ2502А	Sepam S80	REL670
Количество релейных защит	17	45	18	36
Оперативное питание	По напряжению: переменное: 100 В постоянное: 110 В По оперативному току: переменное: 1–5 А постоянное: 1–5 А Частота: переменное 50–60 Гц	По напряжению: переменное: 100 В постоянное: 220 В По оперативному току: переменное: 1–5 А постоянное: 1–5 А Частота: переменное 50 Гц	По напряжению: переменное: 100–240 В постоянное: 24–220 В По оперативному току: переменное: 1–8 А постоянное: 1–8 А Частота: переменное 50–60 Гц	По напряжению: переменное: 100–240 В постоянное: 48 – 250 В Частота: переменное 50–60 Гц
Совместимость	Совместим со многими системами и оборудованием	Совместим со многими системами и оборудованием	Совместим со многими системами и оборудованием	Совместим со многими системами и оборудованием
Количество записей событий	16000	1024	250	1000
Программное обеспечение	Имеет программное обеспечение от производителя	Имеет программное обеспечение от производителя	Имеет программное обеспечение от производителя	Имеет программное обеспечение от производителя
Связь с терминалом	два RS-485 модуля; два Ethernet модуля; один МЭК 61850 модуль	два RS-485 модуля; один Ethernet модуль	RS-485 модуль; Ethernet модуль; МЭК 61850 модуль	два МЭК 61850 модуля; один МЭК 60870 модуль; один LON модуль; один SPA модуль; один Ethernet модуль

Однако между терминалами «БМРЗ-152», «БЭ2502А» и «REL670» есть различие в установке на разные диапазоны напряжений. Терминал «БМРЗ-152» работает на диапазоне напряжений 6–35 кВ, когда терминалы «БЭ2502А» и «REL670» от 6 кВ и выше. Так как у терминалов различный набор видов защит, то точность проводимых вычислений разный, из-за чего установка конкретного терминала будет зависеть от условий технического задания, и от выполняемых функций терминалом. Также не мало важную роль играет журнал событий терминалов, из-за чего нужно часто мониторить заполняемость журнала событий, чтобы не потерять информацию о происходящем в присоединении, на основе чего будет выполнятся анализ о состоянии подключённого присоединения. Однако для некоторых терминалов можно расширить объем хранимой информации, это обеспечивается вводом дополнительного носителя информации, к примеру это осуществимо на терминале «Sepam S80». В основном со многими терминалами связь осуществляется через Ethernet модуль и модуль МЭК 61850. Совместимость терминалов со многими системами обоснована тем, что производители придерживаются стандарта МЭК 61850, из-за чего в каждом микропроцессорном аппарате реализовывается установка модуля, так как это стандарт получил наибольшую популярность в сфере описывания информации в энергообъектах и способов ее передачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.35.310-97 Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем (с Изменением N 1). – М.: РАО «ЕЭС». – М.: СПО ОРГРЭС, 1997. – 39 с.
2. Wikipedia МЭК 61850 // Wikipedia. 2023. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/МЭК-61850 (дата обращения 19.11.2023).
3. ЭЛЕКТРОЩИТ-СПБ REL670 реле РЗА ABB дистанционная защита линии // ЭЛЕКТРОЩИТ-СПБ. 2023. – URL: http://www.elektroshchit.ru/abb-relejnaja-zashhita-i-avtomatika/20-rel670-rele-rza-abb-distacionnaja-zashhita-linii.html (дата обращения 19.11.2023).
4. Ekra Терминал релейной защиты и автоматики БЭ2502А // Ekra. 2023. – URL: https://ekra.ru/product/rza-ps-6-35/t-rza/be2502a/ (дата обращения 19.11.2023).
5. Механотроника БМРЗ-150 // Механотроника. 2023. URL: https://www.mtrele.ru/shop/relejnaya-zashhita/bmrz-150/ (дата обращения 19.11.2023).
6. Техническое описание микропроцессорного устройства релейной защиты Sepam серии 80 // Elec. 2023. – URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/files/127/000001323/attfile/01.pdf (дата обращения 19.11.2023).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.Д. Бибиков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

Научный руководитель: В.Е. Рудник, ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ;
А.Б. Аскаров, старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Введение

Распределительные сети являются одной из важнейших частей энергосистемы, управление которыми осуществляется электрораспределительными компаниями. Для эффективного управления ими необходимо использовать различные аналитические инструменты и алгоритмы, которые позволяют анализировать большие объемы данных и прогнозировать будущие потребности в электроэнергии, как и повышать энергоэффективность в целом. Для прогнозирования энергопотребления в настоящее время могут применяться средства на основе нейронных сетей, которые способны предсказывать потери электроэнергии в распределительных сетях с высокой точностью.

Расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях

Потери электроэнергии в распределительных сетях можно поделить на два класса: условно-постоянные потери и условно-переменные (нагрузочные), которые суммарно можно определить с помощью формулы (1):

$$\Delta W_i = \Delta W_i' + \Delta W_i'' \quad (1)$$

Условно-переменные потери – это потери электроэнергии, которые изменяются в зависимости от различных факторов и условий работы энергосистемы. Они возникают при транспортировке, распределении и потреблении электрической энергии [4]. Их можно определить по формуле (2):

$$\Delta W_i' = \Delta P_{i\,\max}' \cdot \tau_{i\,\max} \quad (2)$$

Условно-постоянные потери – это потери электроэнергии, которые происходят непрерывно в системе или устройстве даже при отсутствии нагрузки или нагружения [4]. Эти потери обычно возникают из-за различных факторов, включая сопротивление проводников, диэлектрические потери в изоляции, тепловые расходы и другие неизбежные физические процессы.

Анализ работы нейронных сетей

Машинное обучение – это подобласть искусственного интеллекта. Машинное обучение использует статистические модели без явных инструкций. Нейронная сеть – это метод машинного обучения, который заключается в обучении посредством данных подобно человеческому мозгу. Прогнозирование потерь электроэнергии с помощью нейронных сетей может быть выполнено с использованием методов глубокого обучения. Глубокое обучение – это метод машинного обучения, который использует искусственные нейронные сети для моделирования и понимания сложных данных [1]. В отличие от традиционных методов машинного обучения, глубокое обучение позволяет автоматически извлекать признаки и структуры из данных, не требуя заранее их задания или предварительной обработки. Это позволяет моделям глубокого обучения достигать высокой точности в решении задач классификации, регрессии, генерации и других [1].

Искусственные нейронные сети состоят из нескольких слоев, как показано на рис. 1. Обычно они имеют один входной и один выходной слой. Между входом и выходом может быть любое количество слоев. Эти слои называются скрытыми слоями. Все слои состоят из клеток.

Собранные знания нейронной сети хранятся в весах взаимосвязей. Следовательно, обучение нейронной сети – это процесс изменения весов. Для обучения нейронной сети необходимо понимать насколько далеки выходные значения от истины. Это делается с помощью функции потерь. Функция потерь вычисляет оценку потерь, вычисляя расстояние между выходными данными сети и фактическим значением.

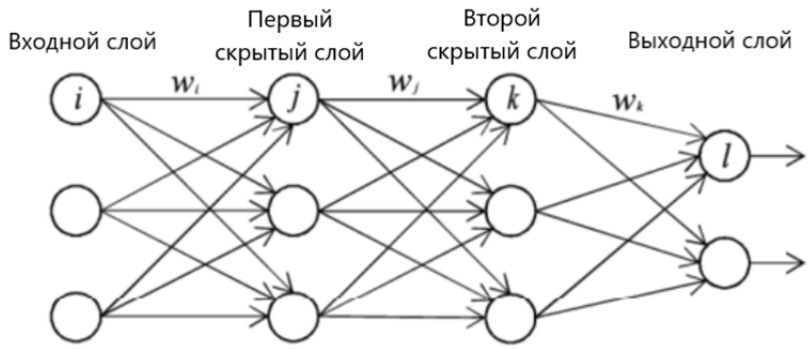


Рис. 1. Глубокая нейронная сеть

Для прогнозирования потерь в электрических сетях на основе нейронных сетей может использоваться следующая методика:

- *Сбор исходных данных:* для обучения нейронной сети необходимо собрать исходные данные о нагрузке электрической сети в прошлом периоде. Данные могут включать информацию о времени, дате, погодных условиях, днях недели и других факторах, влияющих на нагрузку.
- *Предобработка данных:* перед использованием данных для обучения нейронной сети необходимо их предварительно обработать. Это может включать удаление выбросов, заполнение пропущенных значений, нормализацию и т. д.
- *Разделение данных на обучающую и тестовую выборки:* исходные данные разделяются на две части – обучающую выборку, на которой будет происходить обучение нейронной сети, и тестовую выборку, на которой будет оцениваться точность прогнозирования.

Создание нейронной сети: на основе выбранной архитектуры (рис. 2) и параметров создается нейронная сеть. Это может быть многослойная нейронная сеть с различными функциями активации, количеством слоев и нейронов в каждом слое.

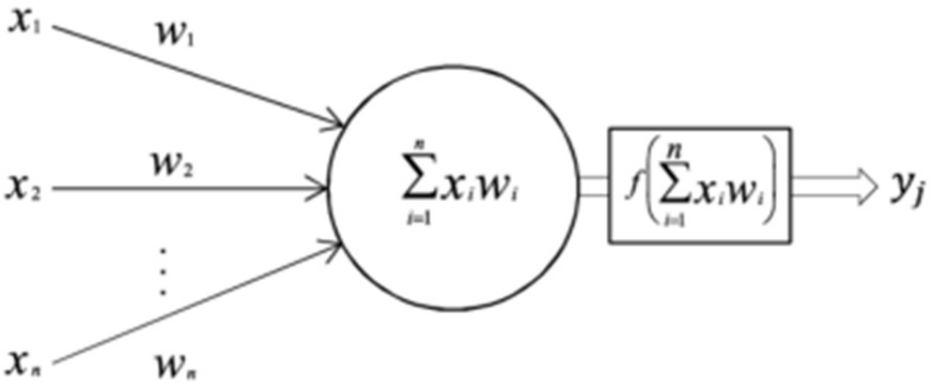


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

Обучение нейронной сети: нейронная сеть обучается на обучающей выборке. Это происходит путем подачи исходных данных на вход нейронной сети и корректировки весов и параметров сети на основе ошибки прогнозирования.

Оценка точности нейронной сети: после завершения обучения нейронная сеть тестируется на тестовой выборке. Оценивается точность прогнозирования путем сравнения прогнозируемых значений с фактическими значениями.

Настройка параметров нейронной сети при недостаточной точности прогнозирования можно внести изменения в архитектуру и параметры нейронной сети, чтобы достичь более точных результатов.

Прогнозирование нагрузки: после успешного обучения и оценки точности нейронной сети она может быть использована для прогнозирования нагрузки в будущем. На вход нейронной сети подаются исходные значения переменной x, а на выходе получается прогнозируемое значение нагрузки.

Основываясь на минимуме ошибки обучения, времени обучения и минимальной ошибки прогнозирования была выбрана наилучшая нейронная сеть. Оказалось, что наиболее оптимальная функция распространения ошибки – функция обратного распространения ошибки, а наиболее подходящей функцией активации оказалась логистическая [3].

Для обучения нейронной сети необходим набор исходных данных. Набор данных *The Kieler Nachrichten Druckerzentrum* содержит данные о потреблении электроэнергии в реальной производственной среде. Он был собран Килером Нахрихтен Друкерцентрумом с 6 июля 2014 г. по 18 января 2019 г. Набор данных содержит измерения энергопотребления для 6 различных машин, записываемые каждые 15 минут. Эти машины представлены строками, как показано в табл. 1.

Таблица 1. Набор данных Kieler Nachrichten Druckerzentrum

machine id strings	machine	ID
e-aussenbeleuchtung-sud-nea	outside lights	m0
e-buro-aufenthalt	office lights	m1
e-druckluft-e2	air compressor	m2
e-kalte-1	air conditioner 1	m3
e-kalte-2	air conditioner 2	m4
e-rotation-e4	rotary printing press	m5

Часть набора *Kieler Nachrichten Druckerzentrum* представлена в табл. 2. Она представляет собой набор данных, содержащий имена машин, временные метки в миллисекундах с 1970 г. и текущую потребляемую мощность в ваттах. Полная таблица содержит 926830 строк.

Таблица 2. Первые пять строк набора данных Kieler Nachrichten Druckerzentrum

	0	1	2
0	e-kalte-1	1402504200000	94800.001413
1	e-kalte-1	1402505100000	93200.001389
2	e-kalte-1	1402506000000	93200.001389
3	e-kalte-1	1402506900000	92800.001383
…	…	…	…

На рис. 3 показано энергопотребление всех машин в январе 2015 г. По оси Y показано энергопотребление в ваттах, а по оси *X* – дата в днях. Первая закономерность – еженедельное потребление *e-druckluft-e*2, *e-kalte*-1 и *e-buro-aufenthalt*. Машина *e-druckluft-e*2 имеет самые высокие пики. Эти пики различаются по максимальной высоте от недели к неделе.

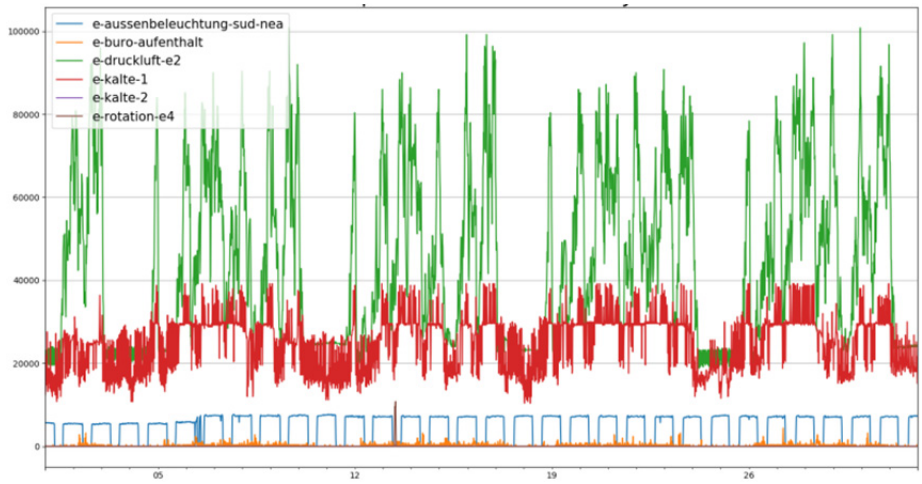


Рис. 3. Энергопотребление из набора Kieler Nachrichten Druckerzentrum

Следующий шаг – нормализация данных. Это не является необходимым функциональным требованием для модели, использующей нейронные сети, но поможет нейронной сети корректировать свои параметры в процессе обучения. Эта нормализация ускоряет процесс обучения и повышает точность результатов, которые выдает нейронная сеть. Для нормализации следующее используется формула (3):

$$X^* = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (3)$$

Выборка представляет собой (b,(l,f),t)-тензор, где b – размер пакета; l – длина каждой выборки; f – количество признаков; t – тензор, содержащий метки [2]. Длина описывает, сколько значений признаков принимается. В этом контексте функции можно понимать, как столбцы данных, а цели – как соответствующие метки. Следовательно, данные должны быть построены таким образом, чтобы иметь эту форму. Это можно сделать путем создания необходимых наборов с помощью метода *TimeseriesGenerator* от *Keras*.

Для прогнозирования используется *Keras API*. Входной слой нейронной сети должен быть определен с использованием формы обучающих данных. Это важно, поскольку при слишком маленькой форме не все данные могут быть переданы в нейронную сеть. Это приведет к потере информации. Таким образом, форма определяется длиной образцов и количеством используемых функций. Выходной слой определяет форму вывода. Между входным и выходным слоем может быть несколько других слоев (скрытых), которые позволяют моделировать сложные зависимости и структуры в данных.

После определения структуры нейронной сети ее необходимо скомпилировать – преобразовать модели в оптимизированный исполняемый код, который может быть запущен на конкретной аппаратной платформе или устройстве.

Нейронная сеть может быть оценена с точки зрения точности с помощью функции *evaluate* из *Keras* и тестового набора или соответствующего генератора тестов. Эта функция оценки возвращает значение потерь для тестового набора. Если потери при обучении больше, чем потери при проверке, то модель предположительно перестраивается. В противном случае, если потери при проверке превышают потери при обучении, то модель предположительно недооснащена. Вариация модели близка к наилучшей если разница в обоих значениях потерь очень мала.

Вывод

В качестве вывода хотелось бы привести проблемы, над которыми необходимо работать для улучшения прогнозирования потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Недостаток данных: для эффективного обучения нейронной сети требуется большой объем данных. Однако, в случае прогнозирования потерь электроэнергии может быть ограниченное количество доступных данных.

Несбалансированные данные: если данные о потерях электроэнергии несбалансированы, т. е. имеют сильное преобладание одного класса над другими, это может привести к проблемам в обучении нейронной сети и снижению ее точности.

Взаимосвязь с другими факторами: потери электроэнергии зависят от многих факторов: погода, нагрузка сети и другие переменные, все из них учесть крайне трудно.

Обобщение на новые данные: нейронная сеть может успешно прогнозировать потери электроэнергии на основе имеющихся данных, но ее способность обобщать и делать точные прогнозы на новых данных может быть ограничена. Это может быть вызвано недостатком разнообразия в обучающих данных или недостаточной репрезентативностью выборки.

Решение этих проблем требует тщательного подхода к сбору и обработке данных, выбору подходящей архитектуры нейронной сети, а также применения методов регуляризации и оптимизации для достижения наилучших результатов – именно над этим необходимо работать в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jozefowicz R., Zaremba W., Sutskever I. An empirical exploration of recurrent network architectures // In: Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning. – 2015. – Vol. 37. – P. 2342–2350.
2. Henning S., Hasselbring W., Möbius A. A scalable architecture for power consumption monitoring in industrial production environments // In: 2019 IEEE International Conference on Fog Computing (ICFC). – June 2019. – P. 124–133.
3. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / пд общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ МИФИ, 2002. – 496 с.
4. Фурсанов М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Минск: Белэнергосбережение, 2006. – 207 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

М.И. Старостин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03

Устойчивость энергосистемы отражает ее способность восстанавливаться после малых или значительных возмущений и возвращаться в исходное состояние, достигая равновесия. При изучении устойчивости энергосистемы мы рассматриваем ее как единое целое, включающее нагрузки, генераторы и электрическую сеть, соединяющую их.

Существуют два вида устойчивости энергосистемы: статическая и динамическая. Статическая устойчивость означает, что система способна справиться с малыми изменениями параметров режима. Динамическая устойчивость, в свою очередь, позволяет системе справиться с значительными изменениями параметров режима, такими как короткое замыкание.

Статическая устойчивость всегда присутствует в установившемся режиме, если таковой имеется. Статически неустойчивый режим не может продолжаться длительное время, поскольку даже небольшие возмущения (например, изменение нагрузки) немедленно приводят к его нарушению.

Если мы рассматриваем установившийся режим энергосистемы, аналогично равновесному состоянию механической системы, то статическую устойчивость можно оценить по следующим условиям:

1. При применении достаточно малых возмущающих сил изменения параметров режима остаются незначительными. Более того, эти изменения можно сделать произвольно малыми, выбирая соответствующие значения возмущающих воздействий.

2. При небольших отклонениях параметров режима энергосистемы от значений, соответствующих равновесию, изменения ее параметров остаются незначительными и могут быть произвольно малыми, если выбрать соответствующие значения возмущающих воздействий.

В контексте энергетических систем оба условия практически эквивалентны друг другу.

Классификация и категории устойчивости

На рис. 1 представлена классификация различных типов устойчивости энергосистемы, расширенная до электромагнитных переходных процессов.

Устойчивость по углу поворота ротора – это способность взаимосвязанных синхронных машин в энергосистеме сохранять синхронность в нормальных условиях работы и восстанавливать синхронность после воздействия малых или больших возмущений. Машина сохраняет синхронизм, если электромагнитный момент равен и противоположен механическому моменту, создаваемому тяговым электродвигателем. Недостаточный или отрицательный синхронизирующий момент приводит к апериодической переходной неустойчивости.

Интеграция генерации, сопряженной с преобразователем не меняет фундаментального определения угловой устойчивости ротора. Тем не менее, при замене синхронных генераторов на генерации, сопряженной с преобразователем общая инерционность системы будет уменьшаться:

1) Изменение потоков на основных линиях связи, что в свою очередь может повлиять на демпфирование межрайонных режимов и пределы переходной устойчивости.

2) Вытеснение синхронных генераторов, имеющих важнейшие стабилизаторы энергосистемы.

Это говорит о том, что необходимо создавать тестовые энергосистемы и пытаться постепенно вводить в них генерации, сопряженной с преобразователем.

Рис. 1. Классификация устойчивости энергосистемы

Под устойчивостью напряжения понимается способность энергосистемы поддерживать устойчивое напряжение, близкое к номинальному, на всех шинах системы после воздействия на нее возмущающих факторов. Она зависит от способности объединенных генерирующих и передающих систем обеспечивать требуемую нагрузками мощность.

Кратковременная стабильность напряжения связана с динамикой быстродействующих элементов нагрузки, таких как асинхронные двигатели, электронно управляемых нагрузок, генераторов на базе инверторов. Этот тип устойчивости обычно определяется не инициирующим повреждением, а возникающими в процессе устранения перебоями в работе передающего или генерирующего оборудования.

Неустройчивость, вызванная асинхронными машинами-наиболее типичный случай кратковременной нестабильности напряжения является остановка асинхронных двигателей после сильного возмущения. Например, во время аварии асинхронные двигатели замедляются (из-за снижения электромагнитного момента) что приводит к увеличению их тока и увеличения реактивной мощности, вызывая дальнейшее снижение напряжения

Стабильность частоты на рис. 2 показаны три различных периода во время действий, влияющих на снижение частоты в системе с преобладанием синхронных генераторов. По мере роста внедрения ПГУ в энергосистемы по всему миру, вероятно, частотные характеристики энергосистем будут стремиться к характерным небольших систем, что повышает необходимость и настройку систем управления, связанных с реакцией на первичную частоту. Следует отметить, что в случае ветрогенераторов возможна инерционная форма быстродействующей частотной характеристики, которая предполагается многими производителями.

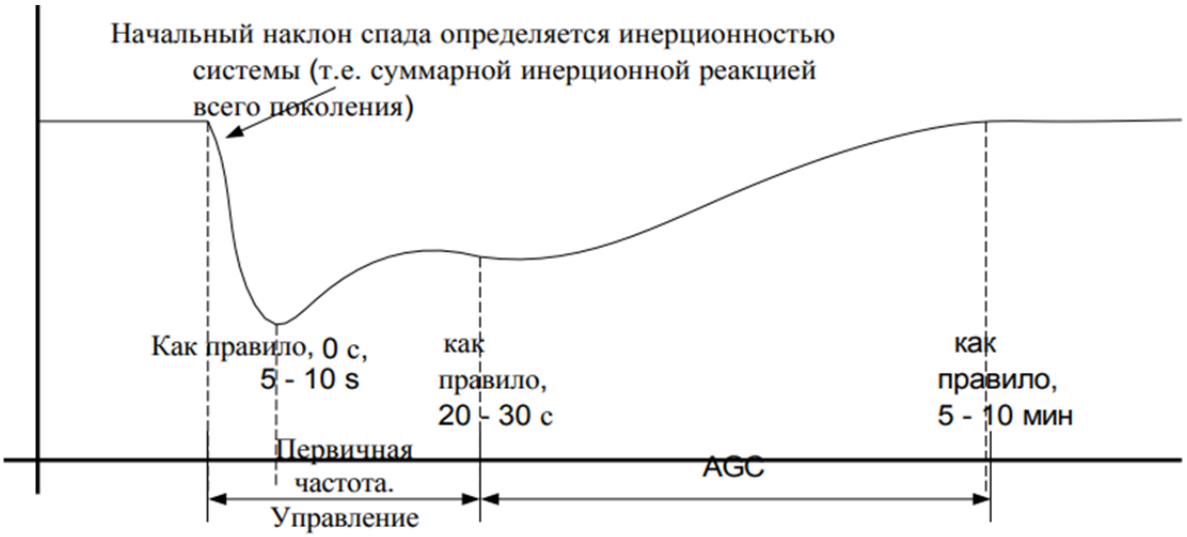


Рис. 2. Реакция частоты энергосистемы на значительную потерю генерации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eftekharnejad S.S., Vittal V., Heydt G.T., Keel B., Loehr J. Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: A case study // IEEE Trans. Sustain. Energy. – 2013. – Vol. 4, no. 4. – P. 960–967.
2. Contribution to Bulk System Control and Stability by Distributed Energy Resources Connected at Distribution Network, IEEE Power and Energy Society, Tech. Rep. PES-TR22, Jan. 2017. – URL: https://resourcecenter.ieee-pes.org/technicalpublications/technical-reports/PESTRPDFMRH0022.html)
3. Thorp J.S., Seyler C.E., Phadke A.G. Electromechanical wave propagation in large electric power systems // IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl. – 1998. – Vol. 45, no. 6. – P. 614–622.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЁТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

М.А. Ефремов[1], А.Д. Ручкина[2]

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ИЭ, ЭЭ, Высшая школа электроэнергетических систем,
гр. 3241302/20202[1]
гр. 3241302/22401[2]

Научный руководитель: Д.А. Акимов, к.т.н., ООО «Мастерская цифровых решений», аналитик

На сегодняшний день в электроэнергетике существуют тенденции по внедрению новых технологий, цифровизации и децентрализации. Активно растет генерация на возобновляемых источниках энергии, а также существуют программы по разработке микрогридов и активных энергетических комплексов. В связи с этим, в электроэнергетических системах появляются факторы, которые делают затруднительным достоверное прогнозирование работы системы. Поэтому необходим способ учета этих неопределенностей.

Задача вероятностного расчета установившихся режимов была впервые предложена в 1974 году в [1] и изучалась всё глубже с течением времени и ростом использования возобновляемых ресурсов в генерации электроэнергии.

Одним из самых распространенных методов вероятностного расчета, в том числе и вероятностного расчета установившихся режимов, является метод Монте-Карло [2, 3]. Он предполагает проведение многочисленных повторных симуляций при случайном выборе значений входных переменных. Иными словами, производится расчет установившихся режимов при варьирующихся значениях случайных переменных, который повторяется значительное количество раз, после чего из результатов составляются распределения вероятности для выходных переменных – режимных параметров сети, таких как напряжения, токи, электрические углы и т. д.

Для реализации данного проекта была выбрана библиотека pandapower, имеющая возможности для расчёта установившихся режимов электроэнергетических сетей. Эта open-source библиотека представляет собой гибкий и многофункциональный инструмент, который используется для реализации научных и технических проектов, и регулярно обновляется.

В качестве примера, была рассчитана кольцевая сеть из трех узлов, параметры сети представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры исследуемой электроэнергетической системы

Параметры узлов					
Узел	Тип	U_ном, кВ	P, МВт	Q, Мвар	U_зад, кВ
1	ЭЭС	20	0	0	20
2	Ген	20	–2,0	0	20
3	Нагр	20	5,0	2,0	–
Параметры ветвей					
Ветвь	Тип	R, Ом	X, Ом	B, мкСм	
1–2	ЛЭП	4,28	4,32	–25,5	
2–3	ЛЭП	4,28	4,32	–25,5	
1–3	ЛЭП	4,28	4,32	–25,5	

Схема данной сети представлена на рис. 1.

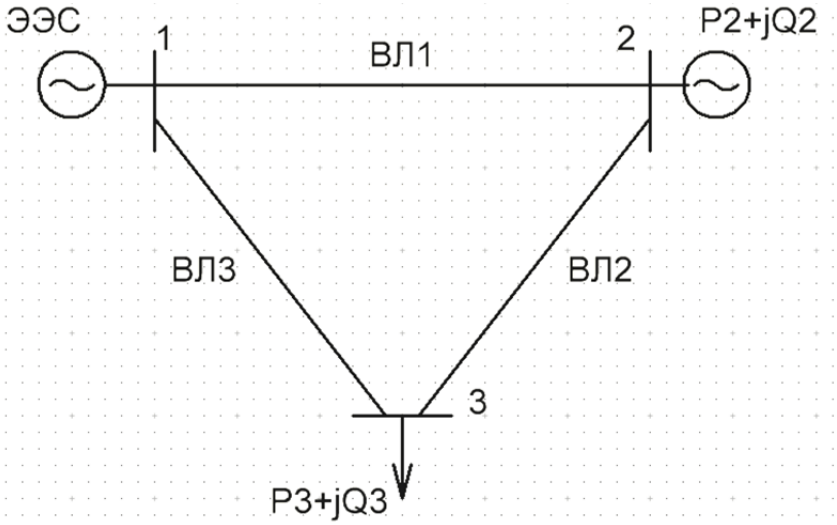


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Расчет установившегося режима этой сети проводился в библиотеке pandapower, и его результаты сравнивались с расчетом этой же сети в сертифицированном в России программном комплексе RastrWin3. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета установившихся режимов в RastrWin3 и pandapower

	RastrWin3				pandapower			
Узел	U, кВ	P, МВт	Q, Мвар	δ, град	vm_pu	p_mw	q_mvar	va_degree
1	20	–3,2	–0,5	0	1	–3,17278	-0,497705	0
2	20	–2,0	–1,6	–0,48	1	–2,00000	-1,646862	-0,483075
3	19,22	5,0	2,0	–1,22	0,960818	5,00000	2,000000	-1,216605

	RastrWin3			pandapower		
Ветвь	I, A	P, МВт	Q, Мвар	i_ka	p_to_mw	q_to_mvar
1	16	–0,39	0,39	0,016113	0,395608	–0,393755
2	78	–2,39	–1,26	0,078187	2,392317	1,259989
3	84	–2,78	–0,89	0,084285	2,777173	0,891461

Для реализации вероятностного расчета установившихся режимов методом Монте-Карло для вышеописанной трёхузловой сети в качестве входных данных были использованы следующие параметры анализируемой электроэнергетической системы: узлов (генерация, нагрузка, устройства поперечной компенсации), ветвей (параметры линий электропередачи, трансформаторов, устройств продольной компенсации), а также выраженные функциями плотности или распределения вероятности неопределенности в значениях генерации и нагрузки. Также были заданы случайные генерация и нагрузка для второго и третьего узла соответственно. Выходными параметрами являются функции плотности или распределения вероятности режимных параметров – чаще всего, токов в ветвях и напряжений в узлах, однако также возможно построение распределения для перетоков мощности, электрических углов и т. д.

Случайная нагрузка была задана нормальным распределением с математическим ожиданием $a = 5$ МВт и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1$ МВт. Случайная генерация была смоделирована как гр. ветрогенераторов с общей номинальной мощностью 5 МВт. Скорость ветра была принята соответствующей распределению Вейбулла с коэффициентом масштаба $\lambda = 10$ и коэффициентом формы $k = 2$. Результаты расчёта представлены на рис. 2.

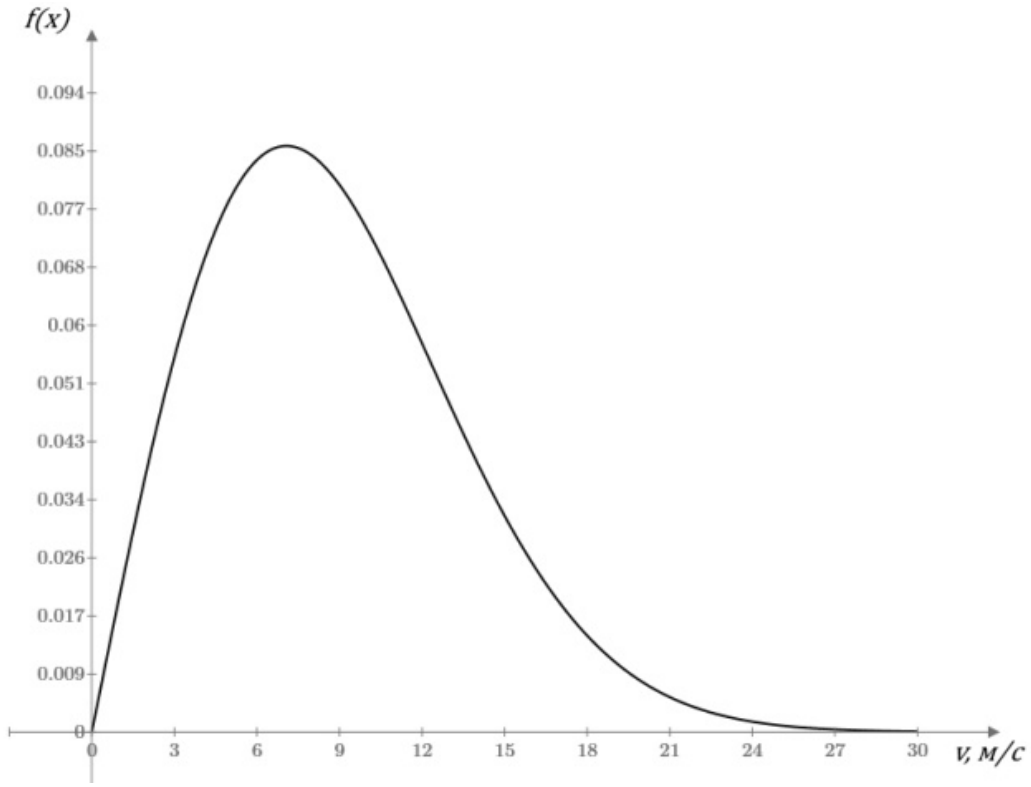


Рис. 2. График плотности вероятности скорости ветра

Ветрогенераторы имеют минимальную, номинальную и предельную скорости ветра, равные соответственно 3, 13 и 25 м/с (параметры ветрогенераторов взяты из [2]).

Расчет для данной системы проводился несколько раз, причем единственное отличие между ними было в числе итераций метода Монте-Карло. В качестве выходных данных здесь приняты токи в ветвях и напряжения в узлах. Результаты расчетов (математические ожидания и среднеквадратичные отклонения) представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты вероятностного расчета установившихся режимов методом Монте-Карло для различного числа итераций

	n=100		*n*=1000		*n*=10000		*n*=100000	
	a	*σ*	*a*	*σ*	*a*	*σ*	*a*	*σ*
U_1	1	0	1	0	1	0	1	0
U_2	1,000296	0,01353	1,001139	0,01276	1,001564	0,012671	1,001473	0,012737
U_3	0,971314	0,010618	0,971464	0,010086	0,971818	0,010023	0,971696	0,01007
I_1	0,032046	0,017817	0,030115	0,017182	0,029898	0,017209	0,030071	0,01724
I_2	0,073174	0,019466	0,075041	0,019043	0,07524	0,019049	0,075321	0,019033
I_3	0,074741	0,028136	0,074339	0,02663	0,073399	0,026474	0,073714	0,026615
$\sigma_{\text{макс}}$, %	6,163016	5,86105	0,840743	0,180251	0,012554	0,083994	0	0
$t_{\text{расч}}$, с	9,452		27,32		277,1		3346	

Кроме того, было замерено время и рассчитана относительная погрешность расчёта. За точный результат был принят расчет с $n = 100000$. Для расчета с $n = 1000$ результаты также представлены в графическом виде на рис. 3.

Очевидно, что точность расчёта растет с увеличением числа итераций метода Монте-Карло, однако, также растёт и время расчёта. При $n = 1000$ максимальная погрешность уже составляет менее 1 %. Ввиду длительных расчетов использование большего числа итераций нецелесообразно для большинства задач, не требующих сверхвысокой точности.

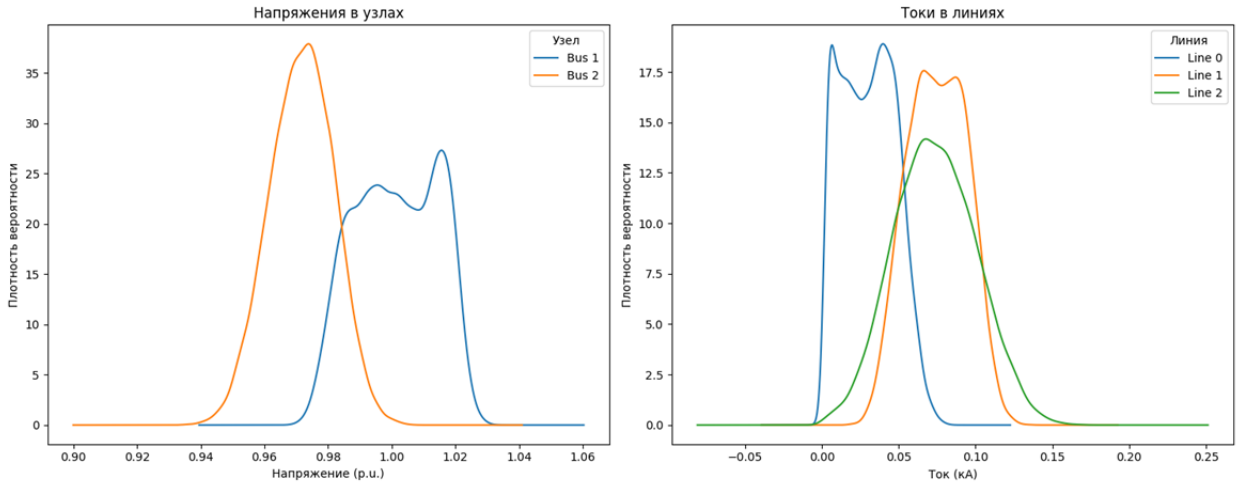


Рис. 3. Графики плотности вероятностей токов и напряжений при расчете методом Монте-Карло при n = 1000

Кроме задания значений при помощи случайных распределений, существует возможность использовать реально измеренные данные, например, данные о скорости ветра в интересующем пользователя регионе. Возможно как аппроксимировать реальные данные аналитической функцией плотности вероятности, так и выполнить сэмплирование отдельных значений методом бутстрэпа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borkowska B. Probabilistic Load Flow // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1974. – Vol. PAS-93, no. 3. – P. 752–759. DOI: 10.1109/TPAS.1974.293973.
2. Eie M. Probabilistic Load Flow Studies: Analytical and Approximate Methods // Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology. – 2018.
3. Misurovic F. Numerical Probabilistic Load Flow Analysis in Modern Power Systems with Intermittent Energy Sources // Energies. – 2022.
4. Morales J., Perez-Ruiz J. Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. 22, no. 4.
5. Zhang P., Lee S. Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – Vol. 19, no. 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТИ 0,4 КВ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Е.Ю. Валеева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики, ВШВЭ, гр. 3241302/20502

Научный руководитель: О.А. Васильева, к.т.н., доцент СПбПУ

Актуальность

Анализ работ российских авторов [1, 4] позволяет сделать вывод о том, что нарушения требований действующего стандарта относительно КЭЭ (ГОСТ 32144–2013) имеют массовый характер во многих частях энергосистемы России. В последние годы отмечается суще-

ственное ухудшение КЭЭ в электрических сетях, питающих нелинейные нагрузки жилых зданий, офисных и торговых центров. Их нагрузкой выступает офисное оборудование, персональные компьютеры, люминесцентные осветительные приборы и т. п. Значительную часть спектра потребляемого ими тока могут составлять нечётные гармоники, при этом значение 3-й гармоники может достигать 30 % и более. Для монитора компьютера (рис. 1) наблюдается существенное искажение синусоидальной формы тока, а значение 3-й гармоники превышает 90 %.

Несинусоидальность тока оказывает негативное воздействие на электрооборудование и приводит к искажению качества электрической энергии по напряжению и нарушению норм, установленных ГОСТ 32144–2013 [2]. Возникает необходимость выявления стороны, виновной в ухудшении КЭЭ, и последующего введения мероприятий, направленных на обеспечение КЭЭ.

Целью работы является исследование КЭЭ и выполнение инструментальных измерений в системе электроснабжения офисного здания на основе данных цифровых приборов BINOM3, а также оценка фактического долевого вклада питающей сети и нагрузки потребителя в искажение показателей качества электроэнергии.

Описание объекта исследований и средства измерений

Объектом исследования является офисное здание в г. Санкт-Петербург. Измерения проведены на вводе 0,4 кВ здания (СИ №1) и вводе 0,4 кВ одного из потребителей (СИ № 2) (рис. 2, слева). Основной нагрузкой являются системные блоки, мониторы и люминесцентные лампы. Измерения проводились при помощи счетчиков-измерителей показателей качества электрической энергии BINOM337U3.220I3.5S16T4 (ЗАО «ТИМ-Р») [3]. Приборы подключены к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов тока типа ТШ-40/1500(75) по токовым цепям и непосредственно к сети без измерительных трансформаторов по цепям напряжения (рис. 2, справа).

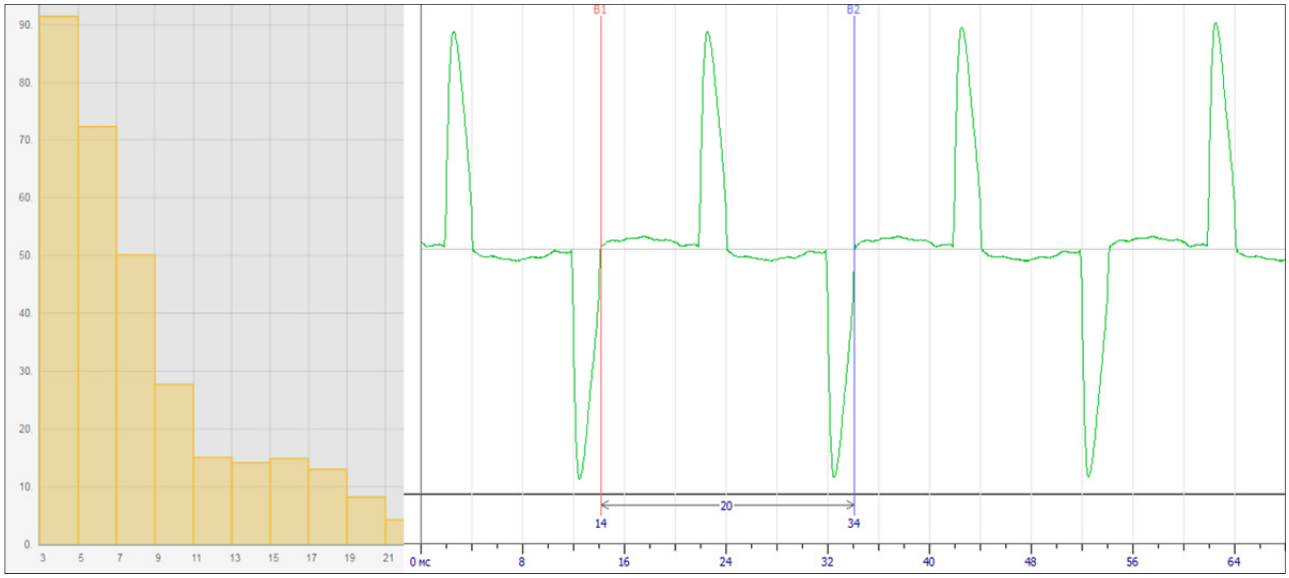


Рис. 1. Спектр потребляемого тока (слева) и его осциллограмма (справа) для монитора Acer 23” LCD V233H Abd (Iномр. = 1,5 А, Uном. = 100–240 В)

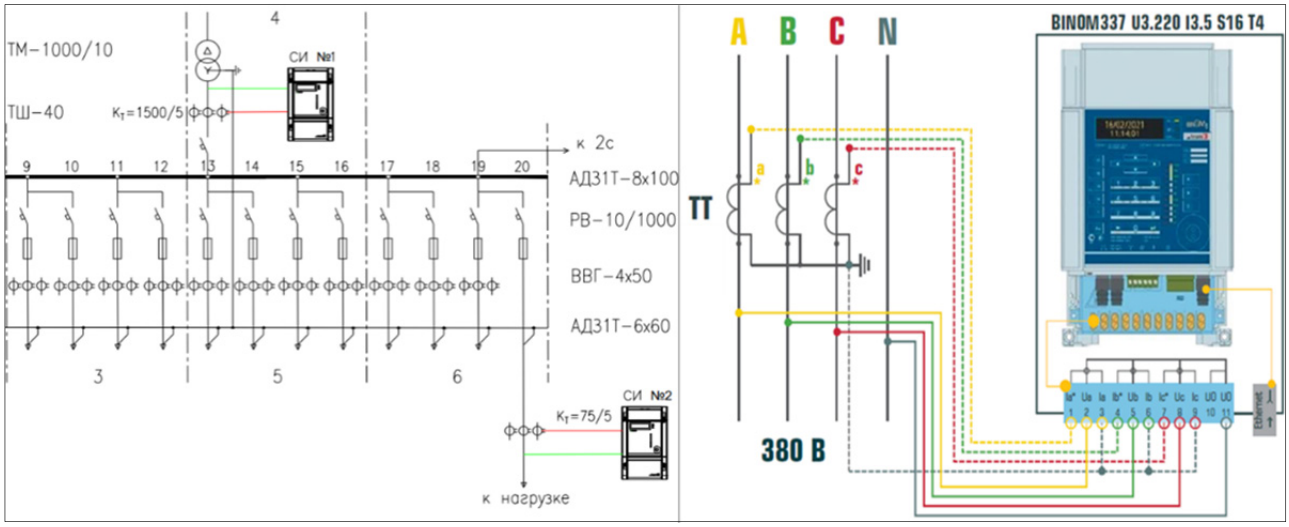


Рис. 2. Фрагмент схемы системы электроснабжения 10/0,4 кВ офисного здания с измерительными приборами (слева) и схема подключения цепей тока и напряжения прибора (справа)

Оценка качества электроэнергии по синусоидальности напряжения

Кривые фазных токов и напряжений на вводе в здание и у потребителя, записанные приборами, приведены на осциллограммах (рис. 3). Наблюдается отличие от синусоидальной формы и фазных токов, и фазных напряжений. Такая типичная форма на осциллограммах характерна для совокупности нелинейных электроприемников офисных и бытовых нагрузок.

Результаты измерений (рис. 4) свидетельствуют о превышении коэффициентов гармоник напряжения 3-го и 9-го порядков нормативных значений, установленных ГОСТ 32144–2013 к сети 0,4 кВ. Причем уровень искажений на вводе потребителя больше. К рассмотрению принята 3-я гармоника, т. к. превышение её коэффициента было наибольшим.

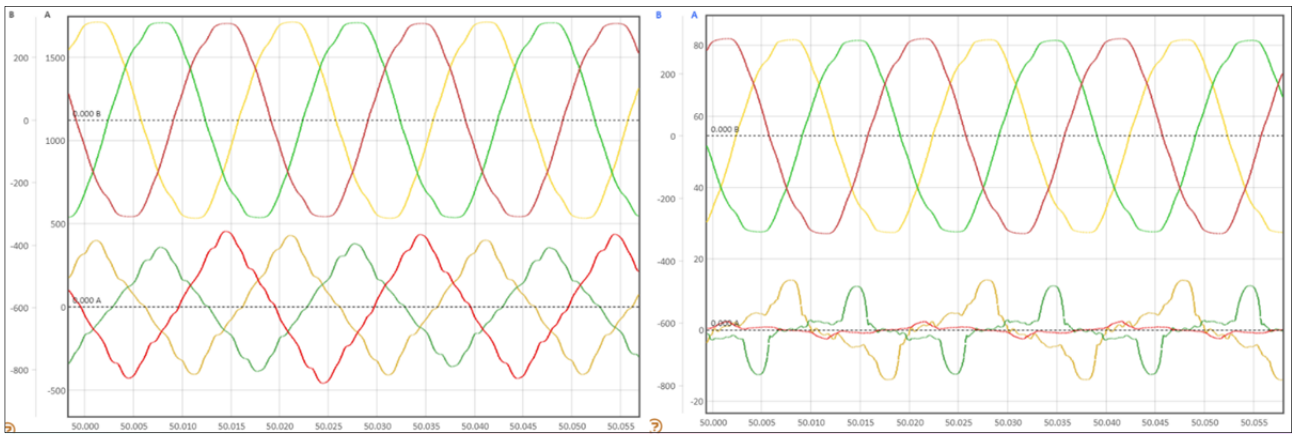


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений (вверху) и токов (внизу) на вводе в здание (слева), на вводе потребителя (справа)

Определение фактического вклада нагрузки и питающей сети в искажение синусоидальности напряжения

В соответствии с методикой [4] оценка доминирующего влияния нагрузки и системы в значения коэффициентов гармоник напряжения осуществляется путем расчета коэффициента корреляции между полной мощностью нагрузки на основной частоте и напряжением *n*-й гармонической составляющей:

$$\rho\left(S_{(1)}, U_{(n)}\right) = \frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(S_{(1)i} - M_{S_{(1)}}\right)\cdot\left(U_{(n)i} - M_{U_{(n)}}\right)}{\sigma_{S_{(1)}}\cdot\sigma_{U_{(n)}}}, \quad (1)$$

где $M_{S\,(1)}$ и $M_{U(n)}$ – математические ожидания $S_{(1)}$ и $U_{(n)}$; $\sigma_{S(1)}$ и $\sigma_{U(n)}$ – среднеквадратические отклонения $S_{(1)}$ и $U_{(n)}$.

Рис. 4. Результаты статистической обработки коэффициентов гармоник напряжения $K_{U(n)}$ на вводе в здание (слева) и у потребителя (справа)

В зависимости от значения коэффициента корреляции рассчитываются долевые фактические вклады подсистем в точке измерений в значения коэффициентов гармоник напряжения.

На вводе в здание (прибор № 1) относительно точки измерений выделяются питающая сеть и все потребители здания. На основании расчетов построены зависимости напряжения гармоники от мощности основной частоты, потребляемой нагрузкой. На диаграмме наблюдается прямая зависимость между изменением нагрузки потребителей и напряжением искажения (рис. 5, слева), и может быть осуществлен переход от корреляционной зависимости к линейной. При увеличении суммарной нагрузки здания напряжение искажения в точке контроля увеличивается. Из этого можно сделать вывод о том, что нагрузка искажает напряжение.

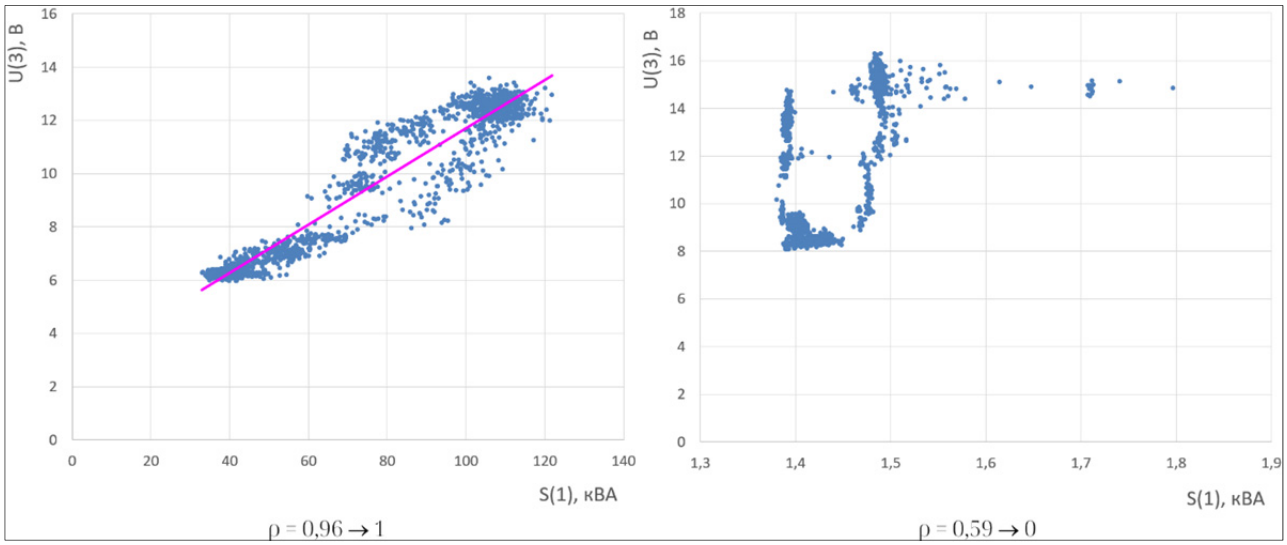


Рис. 5. Диаграммы корреляционных зависимостей на вводе в здание (слева) и у потребителя (справа)

На вводе потребителя (прибор № 2) относительно точки измерений выделяются питающая сеть и потребители здания за исключением контролируемого потребителя. Четкой зависимости между мощностью нагрузки и напряжением 3-й гармоники не наблюдается (рис. 5, справа). Поэтому применен метод эквивалентных источников тока, и измеренные напряжения гармоники разложены на фактические вклады питающей сети и нагрузки. Перейдя от напря-

жений гармоник к коэффициентам гармоник, получен график фактических долевых вкладов питающей сети и нагрузки потребителя в значения коэффициентов гармоник напряжения, иллюстрирующие участие каждой из сторон в ухудшении синусоидальности напряжения (рис. 6). Вклады системы и нагрузки сопоставимы, однако нагрузка вносит несколько больший вклад в искажение напряжения по третьей гармонике.

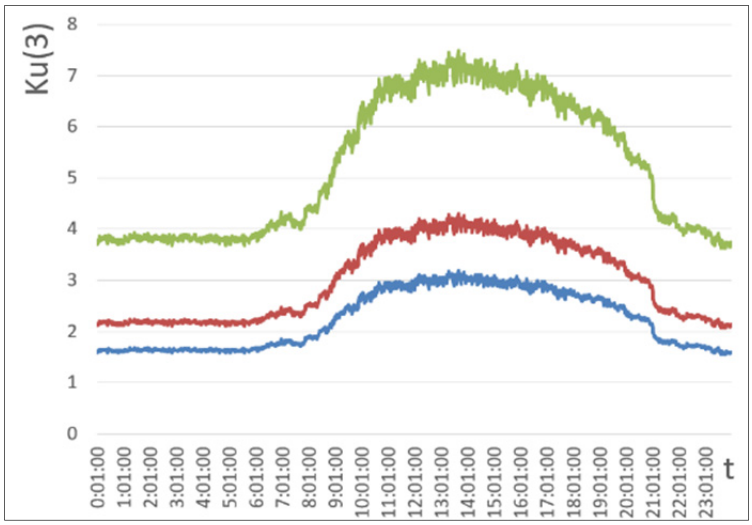


Рис. 6. Графики фактических вкладов нагрузки потребителя (красный) и питающей сети (синий) в значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения 3-го порядка (зеленый) в течение суток на вводе потребителя (прибор № 2)

Выводы

В ходе работы проведено инструментальное исследование качества электрической энергии в системе электроснабжения 0,4 кВ офисного здания. Подтверждены отклонения коэффициентов гармоник напряжения 3-го и 9-го порядков от нормативных значений, установленных ГОСТ 32144–2013. Выполнено разложение измеренных коэффициентов гармоник напряжения 3-го порядка на фактических вклады двух подсистем: питающей сети и нагрузки потребителя, что позволяет оценивать степень виновности каждой стороны в искажении качества электроэнергии. Приборы BINOM3 обеспечивают необходимую измерительную информацию для оценки фактического вклада в искажение качества электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коверникова Л., Тульский В., Шамонов Р. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 2(35).
2. Симуткин М.Г. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2014. – 163 с.
3. Васильева О.А., Шахова М.А., Шейко А.Е., Марковский Н.А. Оценка влияния несинусоидальной нагрузки на потери мощности и пропускную способность силового кабеля // Автоматизация и IT в энергетике. – 2021. – № 4 (141). – С. 48–57.
4. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. 3-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГООБЪЕКТАМИ. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ГОТОВНОСТИ К ДИСТАНЦИОННОМУ УПРАВЛЕНИЮ

А.А. Томалев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А042

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

Одним из ярких примеров цифровизации современной электроэнергетики является дистанционное управление оборудованием энергообъектов (подстанции/станции), которое может быть осуществлено из диспетчерского центра и/или центра управления сетями. В Единой энергосистеме России всё больше энергообъектов, которые, после проведения соответствующих испытаний, управляются дистанционно.

К основным общеизвестным достоинствам дистанционного управления относят:

- Сокращение времени произведения плановых переключений на энергообъекте за счет оптимизации выполняемых мероприятий.
- Повышение безопасности оперативного персонала энергообъектов при переключениях.
- Экономический эффект. Ввиду того, что на время переключений может потребоваться выполнение режимных мероприятий по обеспечению определенных уровней перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, что потребует загрузку более «дорогих» станций по инициативе субъекта оперативно-диспетчерского управления, сокращение этого времени также приводит к минимизации суммарных затрат при управлении электроэнергетическим режимом.
- Сокращение времени ликвидации нарушений нормального режима работы энергосистемы [1].

Однако, несмотря на ряд вышеуказанных преимуществ, не каждый энергообъект может быть готов к организации дистанционного управления без значительной модернизации как первичного оборудования, так и оборудования АСУ ТП, релейной защиты.

В настоящий момент к организации дистанционного управления считаются готовыми энергообъекты обладающие всеми следующими отличительными свойствами:

- дистанционное управление всеми коммутационными аппаратами и заземляющими устройствами первичной схемы электрических соединений с АРМ и терминалов каждого присоединения оперативного персонала энергообъекта, с АРМ оперативного персонала центра управления сетями, начальника смены энергообъекта и (или) диспетчерского персонала субъекта оперативно диспетчерского управления;
- наличие программной (логической) оперативной блокировки, реализуемой в АРМ и терминалах в составе АСУ ТП подстанции (электростанции);
- применение только элегазовых или вакуумных выключателей, или применение комплектных элегазовых распределительных устройств;
- наличие блокировки, исключающей возможность одновременного управления оборудованием объекта электроэнергетики с АРМ оперативного персонала подстанции (электростанций), АРМ оперативного персонала центра управления сетями, АРМ диспетчерского персонала, индивидуальных терминалов присоединения;
- применение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики [2].

В части особенностей по подготовке к непосредственным переключениям можно отметить необходимость выполнение следующих проверочных мероприятий:

- подтверждение от оперативного персонала подстанции (электростанции) отсутствие персонала в РУ, в которых предстоят переключения и подтверждение возможности выполнения переключений (с указанием цели выполнения переключений) с использованием дистанционного управления;
- отсутствие сигнализации о неисправности устройств релейной защиты на РУ, в котором предстоят переключения;
- отсутствие сигнализации о неисправности каналов для дистанционного управления с энергообъектом и подтверждение работоспособности АСДУ энергообъектов.

Непосредственно программы испытаний, как правило, предусматривают этап прохождения команд дистанционного управления без непосредственного воздействия на изменение эксплуатационного состояния коммутационных аппаратов и изменение технологического режима работы СКРМ/ЛЭП/АТ (Т).

На данном этапе специалистами службы связи и автоматизированных систем диспетчерского управления производится анализ исправность каналов связи системы АСДУ диспетчерского центра с системой АСДУ энергообъектах, проверка прохождения команд на реализацию дистанционного управления и анализ «корректности» реакции системы АСДУ энергообъекта на выполнение данной команды. Этап необходимо выполнить при взаимодействии как основных серверов АСДУ в диспетчерском центре и на энергообъектах, так и резервных.

Только после выполнения этапа прохождения команд без их непосредственной реализации целесообразно выполнение последующих этапов по изменению эксплуатационного состояния и технологического режима работы ЛЭП и оборудования.

К основным проверкам можно отнести:

- для управляемых СКРМ:
- изменение режима работы «стабилизация по току» или «регулирование напряжения»;
- изменение уставки по току или по напряжению.

Для систем шин, АТ (Т):

- управление всеми коммутационными аппаратами (выключателями/разъединителями/ заземляющими устройствами);
- изменение положения РПН как в одну, так и в другую сторону (для АТ/Т).

Для ЛЭП:

- управление всеми коммутационными аппаратами (выключателями/разъединителями/ заземляющими устройствами). Ввиду того, что для отключения и включения ЛЭП необходимо выполнение действий как на объекте дистанционного управления, так и на смежном объекте, координация действий как правило возлагается на соответствующий диспетчерский центр в диспетчерском управлении которого находится данная ЛЭП.
- проверка автоматического включения ЛЭП в транзит методом ПАВ (полуавтоматическое включение) на одном из выключателей при подаче на ЛЭП напряжения с противоположного объекта.

На основании вышесказанного можно сделать выводы о том, что проведение испытаний дистанционного управления оборудованием энергообъектов процесс трудоёмкий, но при этом необходимый этап реализации, на котором требуется как можно более качественно выполнить проверку полноценного функционирования дистанционного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дягилев А.А., Мелехина С.В. Дистанционное управление в электроэнергетике // Международный научный журнал. – 2019. – № 9. – 92 с.
2. Правила переключений в электроустановках утв. Приказом Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757. – 78 с.

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА И КОРРЕКЦИИ ИХ ВТОРИЧНОГО ТОКА

В.Ю. Татаринов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ2Н

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Сбои в работе устройств релейной защиты в основном вызваны насыщением трансформатора тока (ТТ), что приводит к искажениям при измерениях тока и нарушениям в системах защиты энергосистемы. В работе рассмотрены способы расчета времени до насыщения ТТ, которые предназначены для обеспечения соответствия технических характеристик ТТ и подключаемых к нему устройств релейной защиты требованиям государственного стандарта Российской Федерации в данной области, согласно которому эти устройства должны гарантировать корректную работу устройств релейной защиты при коротких замыканиях (КЗ), включая случаи возникновения значительной апериодической составляющей тока. Также проанализированы способы коррекции вторичного тока при насыщении ТТ. Для решения данной задачи может использоваться алгоритм машинного обучения, который позволяет определить оптимальные параметры коррекции вторичного тока для каждого конкретного случая. Для этого необходимо иметь набор данных, на основе которых обучается модель машинного обучения, которая позволяет предсказывать оптимальные значения параметров коррекции вторичного тока в зависимости от текущего состояния ТТ и его нагрузки.

Методы расчета времени до насыщения ТТ

Насыщение ТТ искажает форму сигнала в измеряемом вторичном токе, что изначально приводит к неправильному измерению тока и приводит к неисправности защитных устройств. Чтобы оборудование не получило больших повреждений из-за насыщения ТТ, требуется правильный и точный расчет времени до насыщения, который является важным этапом проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем.

Способы расчета времени до насыщения регламентированы ГОСТ Р 58669–2019 [2]. Стандарт необходим при выборе подходящих типов ТТ при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении объектов электроэнергетики, а также для выбора устройств релейной защиты, при создании новых или модернизации существующих устройств релейной защиты на существующих ТТ. Методы также используются для проверки правильности функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах при КЗ на существующих ТТ.

В стандарте рассматривается четыре основных метода определения времени до насыщения ТТ:

- аналитический;
- по паспортным данным;
- с использованием вольтамперной характеристики (ВАХ) ТТ;
- с использованием характеристики намагничивания ТТ.

Аналитический метод основан на расчёте параметров ТТ по его основным характеристикам (п. 4.2.1 [2]), расчет производится как при отсутствии сердечниках ТТ остаточной намагниченности (п. 5.1.4 [2]), так и при их наличии (п. 5.1.5 [2]).

Метод по паспортным данным для установления времени насыщения необходимо определить графически в соответствии с характеристиками (приложении Б [2]), а для выбора универсальных характеристик необходимо рассчитать косинус угла сопротивления ветви вторичной нагрузки ТТ, затем определяется время до насыщения ТТ, для этого на оси коэффи-

циента переходного режима необходимо отложить значения параметра режима А, т. е. отношение потокосцепления насыщения к амплитуде потокосцепления, созданного периодической составляющей тока КЗ с учетом или без учета коэффициента остаточной намагниченности сердечника ТТ и на построенных характеристиках коэффициента переходного режима, определяется соответствующие им значения времени до насыщения.

Способ с использованием ВАХ позволяет определить время до насыщения при различных значениях напряжения и тока при этом следует учитывать исходные данные п. 4.2.1 [2]).

Метод с использованием характеристики намагничивания определяют графически, как и с методом паспортных данных, отличие состоит в том, что в данном методе нужно учитывать характеристику намагничивания ТТ, число витков на вторичной обмотке ТТ, поперечное сечение ТТ и среднюю длину линии (п. 5.4.1 [2]).

Также существуют способы расчета времени до насыщения измерительных трансформаторов вне стандарта с использованием кусочно-линейной аппроксимации средней кривой намагничивания [3] и методом построения моделей ТТ в комплексных программных обеспечениях RTDS и RSCAD [4]. Данный способ хорош тем, что модели могут быть использованы для определения времени насыщения с учётом реальных характеристик электромагнитных ТТ, остаточной намагниченности, кратности тока КЗ и т. д.

Коррекция вторичного тока на основе машинного обучения

В последнее время машинное обучение стало популярным методом для решения различных задач в электроэнергетике. Оно позволяет автоматически находить закономерности в данных и строить прогнозные модели. Для решения задачи коррекции вторичного тока на основе машинного обучения можно использовать алгоритмы регрессии или нейронные сети.

Процесс коррекции вторичного тока на основе машинного обучения обычно начинается со сбора данных о работе трансформатора тока. Затем данные обрабатываются и подготавливаются для обучения модели. После этого модель обучается на этих данных и используется для прогнозирования вторичного тока в режиме реального времени.

Существует масса разработок по данному направлению. Коллективом ученых из Белорусского национальный технический университета разработана на базе программного комплекса MATLAB Simulink искусственная нейронная сеть для коррекции искаженной формы вторичного тока [6]. В статье представлен алгоритм восстановления, который основан на использовании искусственных нейронных сетей. Авторы описывают структуру и архитектуру нейронной сети, которую они используют в своей работе, т. е. метод обратного распространения ошибки для настройки весов нейронов (коэффициентов и смещений) сети таким образом, чтобы минимизировать ошибку между предсказанными значениями и фактическими данными. После обучения нейронной сети авторы проводят ее тестирование на новых данных, чтобы комплексно оценить ее точность и эффективность. Если результаты удовлетворительны, то нейронная сеть может быть использована для восстановления искаженной формы вторичного тока в реальном времени.

Коллективом из факультета электротехники университета Мёнджи (Южная Корея) также представлена работа по быстрому определению насыщения трансформатора тока с помощью встроенных автоэнкодеров для подавления шума [7]. Статья содержит описание проблемы перегрузки трансформатора тока и ее важности для безопасности и эффективности электроэнергетических систем. Затем авторы переходят к описанию алгоритма обнаружения, который основан на использовании свёрточных автоэнкодеров. Свёрточные автоэнкодеры – это тип искусственных нейронных сетей с глубоким обучением, которые хорошо подходят для обработки разного вида «шума». Они состоят из нескольких слоев, включая свёрточные слои, слои пулинга и полносвязные слои. Каждый слой выполняет определенные операции над входными данными, что позволяет сети автоматически извлекать признаки из входных

данных. В данной статье авторы используют свёрточные автоэнкодеры для обнаружения перегрузки трансформатора тока. Они подают на вход сети набор изображений, полученных с помощью токоизмерительных приборов, и используют функцию потерь для обучения сети находить перегрузку. После того, как сеть была обучена на новых данных, авторы проводят тестирование сети на программном комплексе моделирования энергосистем PSCAD/EMTDC, чтобы оценить ее точность и эффективность. Если результаты удовлетворительны, то сеть может быть использована для обнаружения перегрузки трансформатора тока в реальном времени.

В России коллектив из Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина также разработал и исследовал способы восстановления вторичного тока электромагнитных измерительных трансформаторов с использованием искусственных нейронных сетей и имитационных моделей [8]. Работа содержит описание метода восстановления вторичного сигнала с использованием эксплуатационных характеристик электромагнитного ТТ.

Заключение

В статье описаны эффективные методы расчета времени до насыщения ТТ и восстановления искаженного вторичного тока.

Как показывает практика, проведение расчётов по ГОСТ Р 58669–2019 является трудоёмкой операцией и требуется участие квалифицированных специалистов, владеющих методикой расчёта времени насыщения по стандарту, производительнее будет использовать комплексные ПО для обеспечения надежной и продуктивной работы.

Преимущества использования машинного обучения для коррекции вторичного тока включают высокую точность прогнозирования, возможность адаптации к изменяющимся условиям работы трансформатора тока и возможность обработки больших объемов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технологического функционирования электроэнергетических систем. Постановление Правительство РФ от 13 августа 2018 года № 937, п. 128.
2. ГОСТ Р 58669–2019. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях – М.: Стандартинформ, 2020.
3. Метод расчета времени до насыщения трансформатора тока с использованием кусочно-линейной аппроксимации средней кривой намагничивания / В.П. Будовский, В.С. Воробьев, А.Н. Иванченко, В.В. Москаленко, А.И. Расщепляев, А.Д. Рыбалкин // Известия НТЦ ЕЭС. Техника электрического регулирования. – 2021. – С. 20–31.
4. Яблоков А.А., Филатова Г.А., Петров А.Е., Батманов М.Р. Экспериментальное получение характеристик для разработки моделей трансформаторов тока и определения времени до насыщения магнитопровода // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 279–280.
5. Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока // Е-Досье, 2015–2023. URL: https://e-ecolog.ru/docs/qfqJ8BpBzUyWm__kBWZoU/497?ysclid=loqosr13lt129232438 (дата обращения 04.11.2023).
6. Разработка в Matlab-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока / Ю.В. Румянцев, Ф.А. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2021. – С. 479–491.
7. Fast Detection of Current Transformer Saturation Using Stacked Denoising Autoencoders, Republic of Korea/ Sopheap Key, Chang-Sung Ko, Kwang-Jae Songand Soon-Ryul Nam // MDPI Journal, Energies. – 2023. – Vol. 16, Iss. 3.
8. Разработка и исследование методов восстановления вторичного тока электромагнитных измерительных трансформаторов с использованием нейросетей и имитационных моделей / А.А. Яблоков, А.Р. Тычкин, В.А. Титов, А.Е. Евдаков // Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 360–363.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.Б. Аскаров

Томский политехнический университет,
к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ

В рамках парадигмы управления объектами на базе возобновляемых источников энергии и систем накопления электроэнергии, согласно которой сетевой инвертор (СИ) становится ведущим, разрабатываются алгоритмы для систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора (ВСГ). Функциональная схема предлагаемой в данной работе системы управления СИ на основе ВСГ, управляемого по току (ВСГ-Т) представлена на рис. 1 и состоит из трех основных частей: внутренний контур управления; контур, воспроизведения динамики синхронной машины, и внешний контур управления.

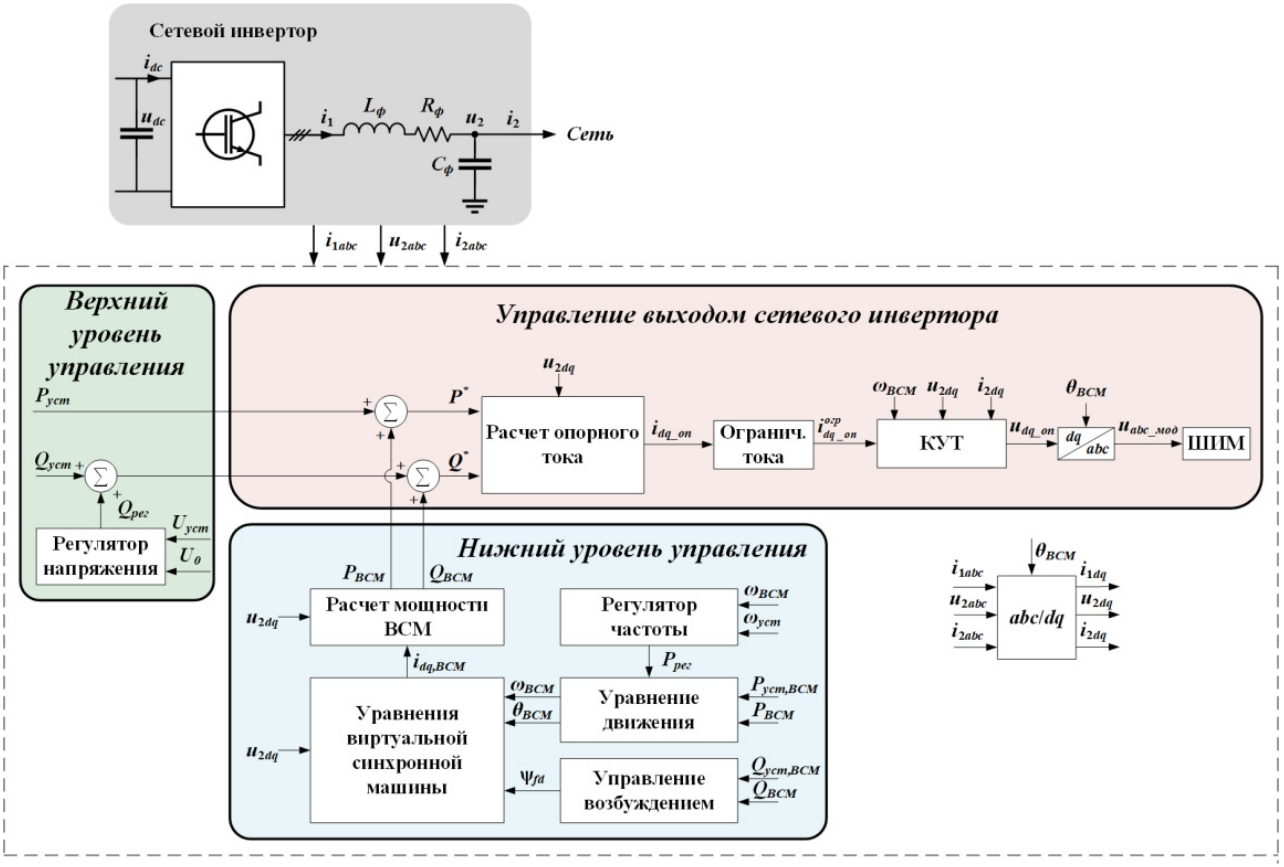


Рис. 1. Функциональная схема ВСГ-Т

Главной особенностью ВСМ-Т является появление двух уровней, которые условно можно разделить на верхний и нижний. Причем работают данные уровни параллельно. Основная функция верхнего уровня заключается в формировании уставок по активной и реактивной мощностям для СИ. Нижний уровень воспроизводит динамику синхронной машины и формируемые им выходные мощности P_{BCM} и Q_{BCM} прибавляются к значениям уставки. Из результирующих опорных значений мощностей P^* и Q^* вычисляются опорные значения токов $i_{dq_оп}$ для внутреннего контура управления током (КУТ) согласно (1). КУТ реализуется на

ПИ-законе регулирования во вращающейся системе координат *dq*, что обеспечивает ряд преимуществ, среди которых наиболее существенное это возможность ограничения максимального значения выходного тока. Алгоритм ограничения выходного тока основан на ограничении амплитуды вектора полного опорного тока i_{dq_on}. На выходе КУТ формируются опорные сигналы напряжения для синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

$$i_{dq_on} = i_{d_on} + ji_{q_on} = \frac{P^* + jQ^*}{u_{2d} - ju_{2q}} \tag{1}$$

В итоге на основе известных измерений сигналов управления и реакции системы можно построить модель в форме пространства состояний, которая в некотором приближении соответствует текущему состоянию исследуемого объекта. В общем виде полученную модель в пространстве состояний можно представить с помощью уравнения (2):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}\,, \tag{2}$$

где $\dot{\mathbf{x}}$ – вектор-столбец производных переменных состояния; **x** – вектор-столбец переменных состояния; **u** – вектор-столбец входных величин; **A** – матрица состояния; **B** – матрица коэффициентов входных величин.

В настоящее время доминирующим методом для оценки робастности системы при изменении плотности сети (изменении отношения короткого замыкания (ОКЗ) в точке подключения сетевого инвертора к сети) считают метод малых колебаний. В рамках данного метода, как правило, наибольший интерес представляют собственные числа матрицы состояния системы **A**, составленной для линеаризованной модели ВСГ-Т в пространстве состояний, которые отражают динамические свойства исследуемой системы, в том числе при изменении различных параметров. Полученные с использованием инструментов MATLAB траектории изменения собственных чисел для линеаризованной модели ВСГ-Т при изменении ОКЗ от 1 до 100 о.е. представлены на рис. 2.

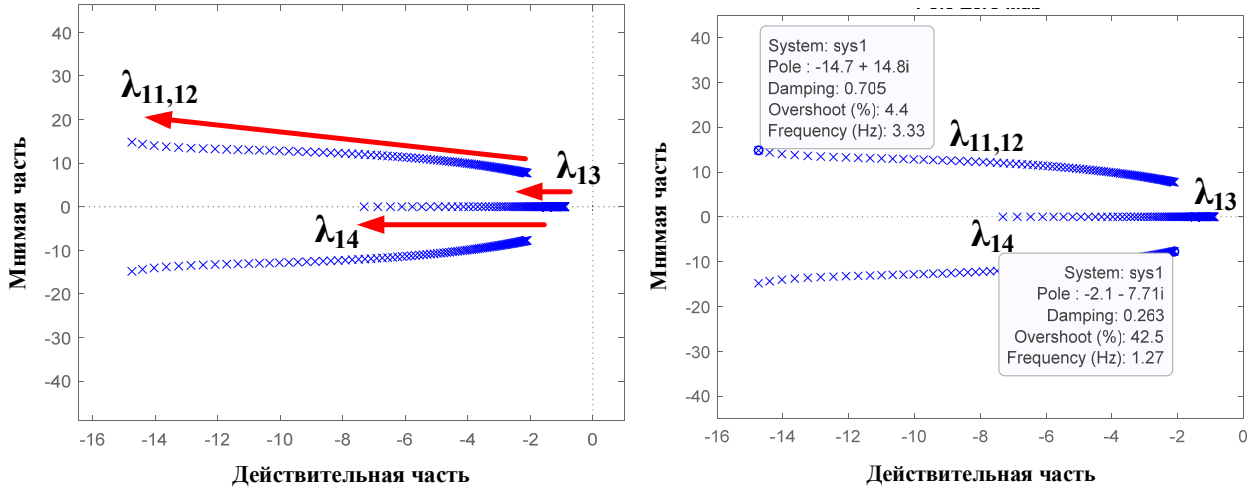


Рис. 2. Корневой годограф для модели ВСГ-Т при изменении ОКЗ от 1 до 100

Из корневого годографа на рис. 2 видно, что при увеличении ОКЗ все корни для модели ВСГ-Т равномерно двигаются влево, свидетельствуя об улучшении демпфирующих свойств с увеличением плотности сети. При детальном рассмотрении низкочастотных корней модели ВСГ-Т видно, что низким величинам ОКЗ соответствуют наименьшие значения коэффициента демпфирования. В частности, при анализе граничных случаев с ОКЗ = 1 коэффициент демпфирования составляет ζ = 0,263, в то время как при ОКЗ = 100 – ζ = 0,705. Несмотря на это, модель ВСГ-Т на всем интервале изменения ОКЗ обеспечивает устойчивую работу сете-

вого инвертора – все собственные числа рассматриваемой системы имеют отрицательную действительную часть, а также приемлемый уровень демпфирования.

Проведённые экспериментальные исследования с помощью созданной модели в пространстве состояний ВСГ-Т демонстрируют высокую эффективность функционирования разработанной предлагаемой системы управления для СИ для обеспечения надёжности и устойчивости современных энергосистем.

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Ю.Д. Бай, П.П. Радько, Б.Д. Малюта

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ

Введение

В данной статье описано управление двухуровневым силовым преобразователем, основными и комплементарными каналами таймера микроконтроллера с целью формирования широтно-импульсной модуляции и может применяться в проектных и научно-исследовательских организациях электроэнергетической отрасли. Данная система будет на физическом уровне осуществлять:

- управление прецизионным источником опорного напряжения;
- формирование положительной и отрицательной полуволн трехфазного напряжения на выходе двухуровневого преобразователя.

Используемый метод моделирования

Ввиду недопустимости натурных экспериментов в ЭЭС, особенно аварийных, и невозможности, из-за сложности, полноценного физического моделирования ЭЭС основным способом получения этой информации служит преимущественно математическое моделирование, полнота и достоверность которого определяются, прежде всего, адекватностью применяемых математических моделей оборудования и ЭЭС в целом.

Радикальным решением данной проблемы является создание средств моделирования ЭЭС, обладающих свойствами бездекомпозиционного достаточно достоверного воспроизведения на неограниченном интервале, в том числе в реальном времени, непрерывного значимого спектра нормальных и анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом [1].

В рамках данного подхода, для дальнейшего изучения и оценки влияния внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в работе обозначены основные моменты создания управляемого источника ВИЭ и силового преобразователя (СП) [2].

Реализация физической модели

Общая схема требуемой физической модели представлена на рис. 1. Выделенным цветом (красный) определены первоочередные элементы, реализация которых несет в себе основные функции и точность моделирования СП.

1. Источник питания

Выполняет роль первичного источника энергии. Имитирует солнечные панели, ветроэнергетические установки, накопитель энергии и др. Для его реализации решено использовать микросхему опорного питания, управляемую посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Таким образом, можно обеспечить стабильное управляемое напряжение, в соответствии с разрабатываемым алгоритмом.

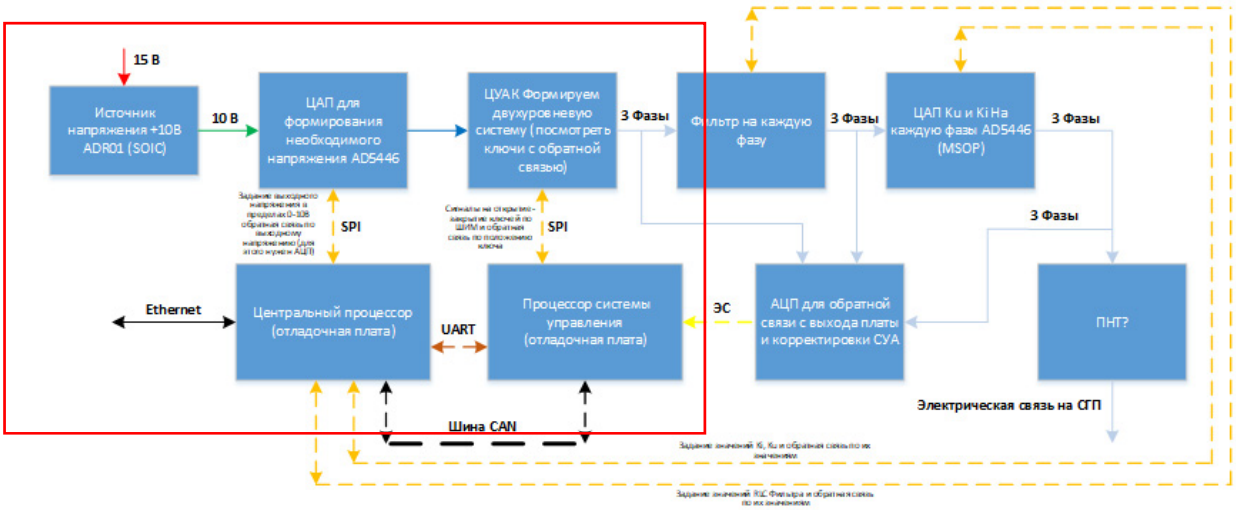


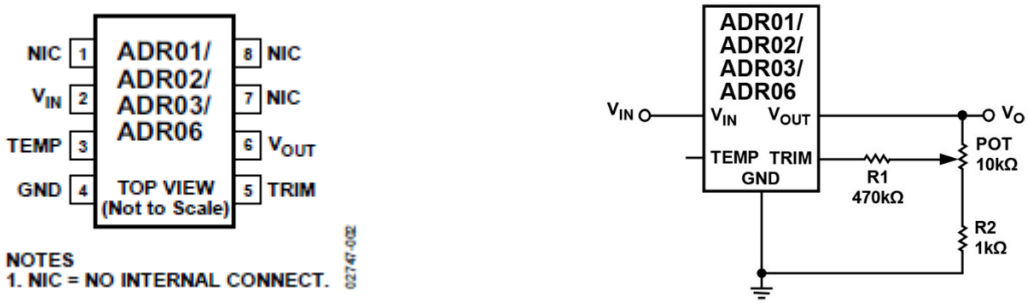
Рис. 1. Структурная схема силового преобразователя (СП)

Выбранная модель – ADR01A [3], прецизионный источник опорного напряжения, имеет 4 уровня выхода по напряжению 10.0 V/5.0 V/2.5 V/3.0 V: Прецизионный источник может быть и по току, и по напряжению, но, в случае токовых выходов, нужно будет ставить операционный усилитель (ОУ) для перехода на напряжение.

2. ЦАП источника питания

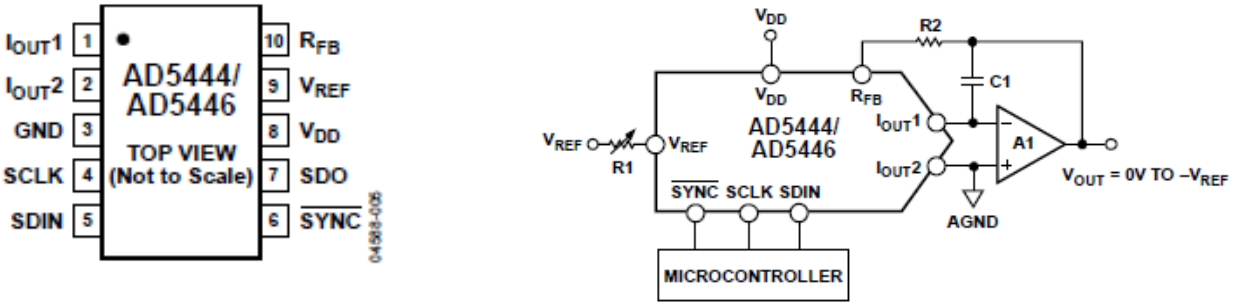
ЦАП источника питания выбран быстродействующий прецизионный 14-битный токовый ЦАП AD5446YRMZ [4] по схеме однополярного включения, что, в отличии от четырехквадрантного способа реализации хоть и обеспечивает получение только отрицательных напряжений, но управляем на всей полосе преобразования. Управление ЦАП будет осуществлено по SPI протоколу передачи данных. В качестве питающей микросхемы АЦП выбран стабилизатор напряжения LD33 на 3.3 V.

На выходе ЦАП будут использованы два одноканальных ОУ ADA4077-1ARZ [5], первый как оконечный для ЦАП, второй для формирования положительных значений напряжения, т. к. для управления СП требуется подача напряжения обоих фронтов.



а *б*

Рис. 2. Схемы включения (а) и подстройки (б) микросхемы опорного напряжения ADR01A



а *б*

Рис. 3. Схемы включения (а) и работы в однополярном режиме (б) микросхемы ЦАП AD5446YRMZ

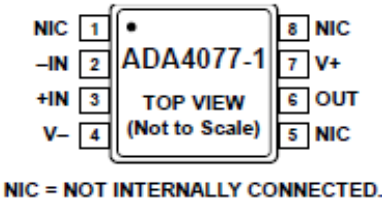
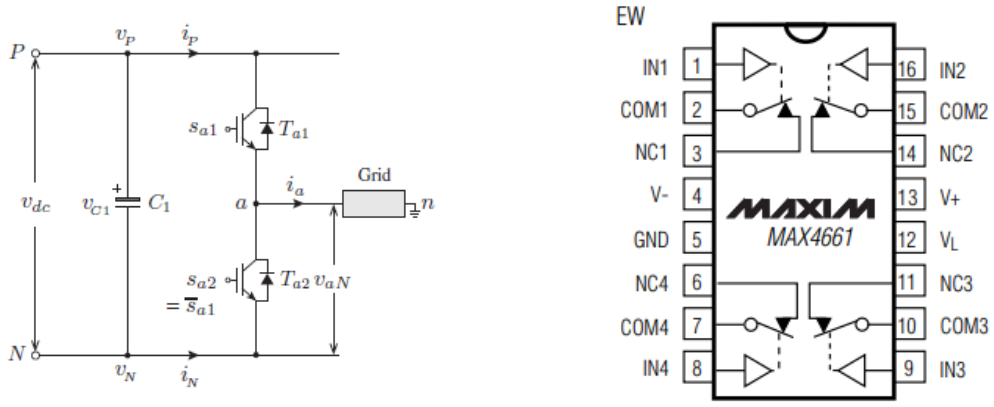


Рис. 4. Схема включения одноканального ОУ ADA4077-1ARZ

3. Статический преобразователь напряжения (СПН)

В настоящее время используют двух- или трёхуровневые СПН. Для реализации была выбрана двухуровневая схема с точки зрения соотношения простоты реализации и качества выходных характеристик [6]. Однако реализация самих ключей довольно сложна, в связи с количеством элементов. Поэтому на первом этапе предлагаю сделать силовой ключ и диод с помощью цифро-управляемых аналоговых ключей (ЦУАК).

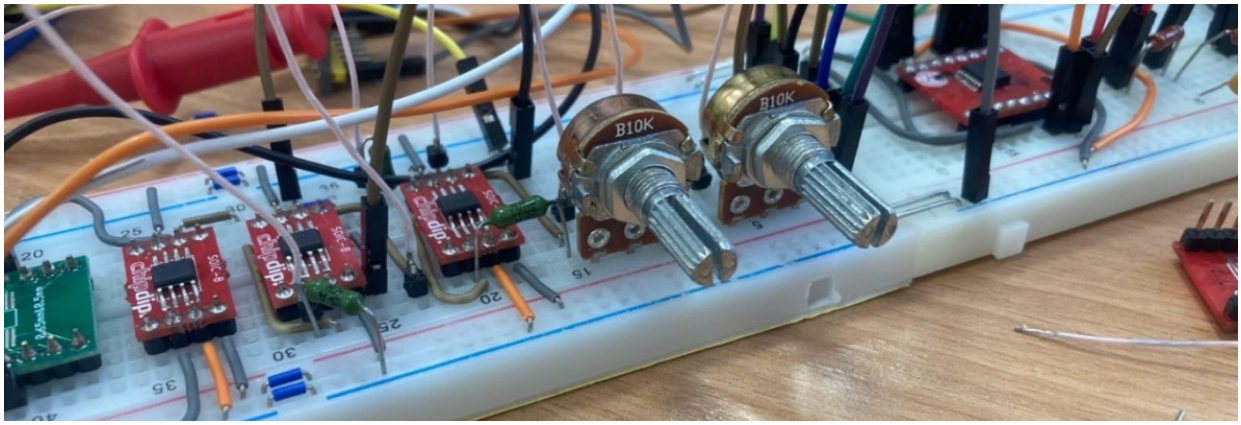


а *б*

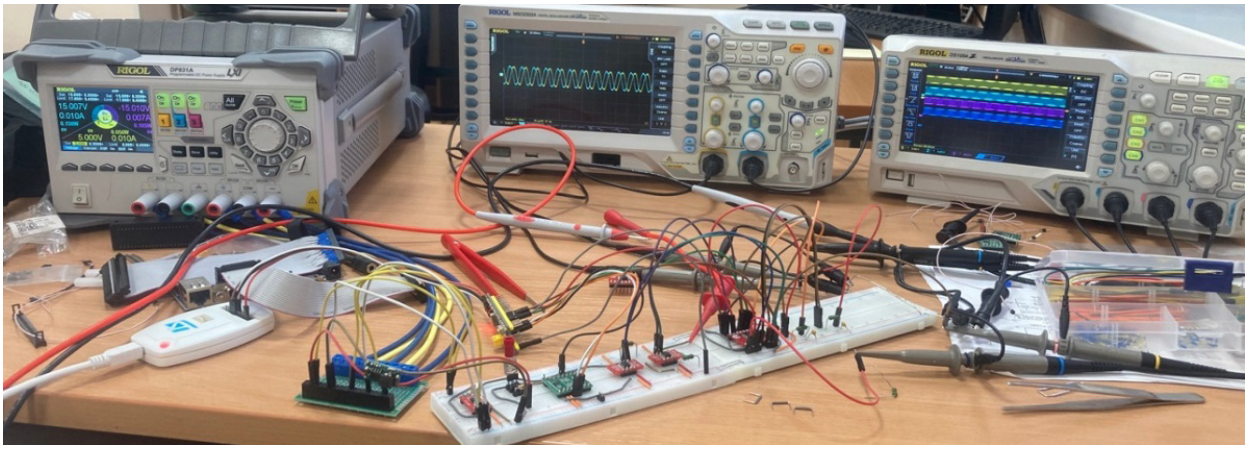
Рис. 5. Реализация СП с ЦУАК (на одну фазу) (а) и схема включения MAX4661

Для физической модели были выбраны два аналоговых КМОП ключа MAX4661 (по четыре нормально закрытых управляемых ключа в каждом) [7]. Управление ключами будет осуществлено по SPI протоколу передачи данных.

Управление всеми ЦАП производится с помощью микроконтроллера STM32F103C8T6, управление ключами осуществляется с помощью основных и комплементарных каналов расширенного таймера TIM1 [8], код был написан в Keil uVision 5. На выходе подключен RC фильтр, рассчитанный на 50 Гц. Итоговый результат сборки физической модели и системы управления силовым преобразователем представлен ниже.



а



б

Рис. 6. Результаты реализации разрабатываемой физической модели СП

Выводы

В данной работе представлены результаты разработки и реализации двухуровневого силового преобразователя. Проведенные контрольно-экспериментальные исследования с использованием осциллографа подтвердили свойства и возможности разработанной модели, а именно:

- управление прецизионным источником опорного напряжения (оценка уровня выходного сигнала в соответствии с заданным кодом ЦАП);
- формирование положительной и отрицательной полуволн трехфазного напряжения на выходе двухуровневого преобразователя (оценка ШИМ и итоговой частоты выходных синусоид).

Дальнейшая работа над преобразователем будет идти в области настройки системы управления по току и напряжению на его выходе с использованием пакета поддержки «Embedded Coder Support for STM32 Microcontrollers» среды Matlab Simulink.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel approach to validation of a positive-sequence modeling of a converter-interfaced generation with hydrogen energy storage in practical power systems / A.A. Suvorov, A.B. Askarov, V.E. Rudnik et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, iss. 12. – P. 4529–4542.

2. Дунаев М.П. Моделирование универсального полупроводникового преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. –2018. –№ 2 (10). – С. 128–135. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-2-13
3. Data Sheet. ADR01/ADR02/ADR03/ADR06. Analog Devices. 2012.
4. Data Sheet. AD5444/AD5446. Analog Devices. 2012.
5. Data Sheet ADA4077-1/ADA4077-2/ADA4077-4. Analog Devices. 2012.
6. Гельвер Ф.А., И.В. Белоусов Совершенствование структур и алгоритмов управления каскадного преобразователя частоты // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020, Санкт-Петербург, 04–07 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2021. – С. 28–33. – EDN MCNESQ.
7. Data Sheet MAX4661/MAX4662/MAX4663. Analog Devices. 2012.
8. PLL design for inverter grid connection. Simulations for ideal and non-ideal grid conditions – J. Ögren

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА БАЗЕ ARDUINO

А.С. Сорогин

Тюменский индустриальный университет,
КЭЭ, гр. ЭКа-20-1

Научный руководитель: Р.Н. Хамитов, д.т.н., профессор КЭЭ ТИУ

Солнечная панель при нагреве свыше 25° с каждым градусом теряет выдаваемую мощность. Солнечные панели в летнее время года работают при температуре 60–70 °С, что снижает их эффективность на 15–17 %. Кроме снижения эффективности солнечные элементы из-за работы в повышенных температурах начинают деградировать и возникает эффект “hot spot” (рис. 1), который может привести к пожару [1].

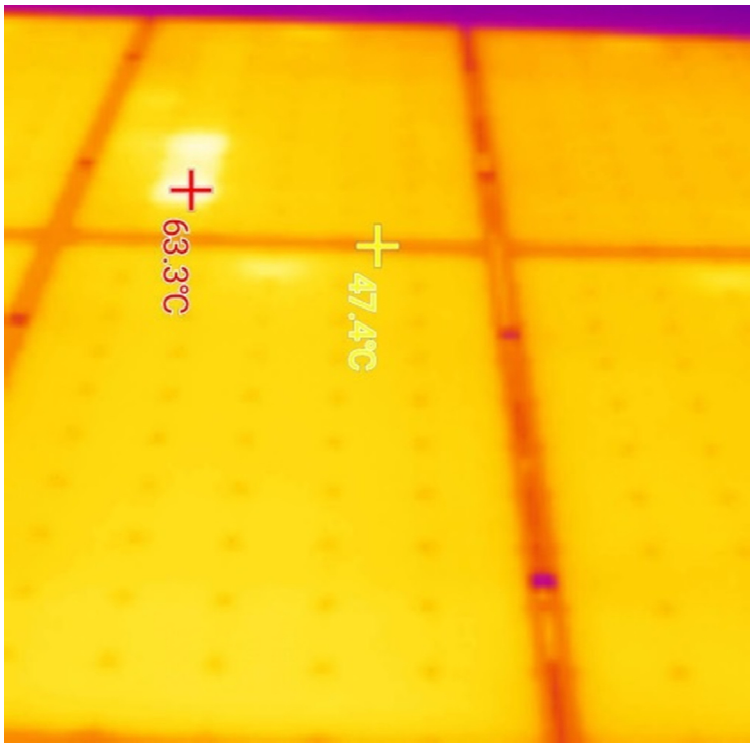


Рис. 1. Фотография тепловизора при возникновении эффекта “hot spot” на солнечной панели

Для увеличения выдаваемой мощности солнечной панели была предложена закрытая система охлаждения солнечных панелей. Данная система позволяет не только охлаждать солнечные панели, но и аккумулировать тепло для использования в собственных нуждах. Для данной системы необходима автоматизация и в качестве программной среды была выбрана программа FLProg, а в качестве аппаратной системы был выбран модуль ArduinoUNO. Данная система позволяет при определенных условиях включать и выключать работу насоса для экономии электроэнергии и увеличения общей энергоэффективности.

Исследование было смоделировано в среде FlProg на базе Arduino UNO. Схема алгоритма представлена на рис. 2. На рис. 3 представлена программа в окне системы Arduino UNO [2].

Согласно формуле (1), можно определить на сколько уменьшится мощность солнечной панели свыше 25 °C. На конечную мощность исходя из формулы можно повлиять двумя способами либо уменьшением температурного коэффициента мощности β, который зависит от паспортных характеристик солнечной панели и обычно находится в пределах от –0,2 до –0,4 1/°C либо с помощью снижения температуры поверхности солнечного модуля до значений STC, а именно 25 °C [3].

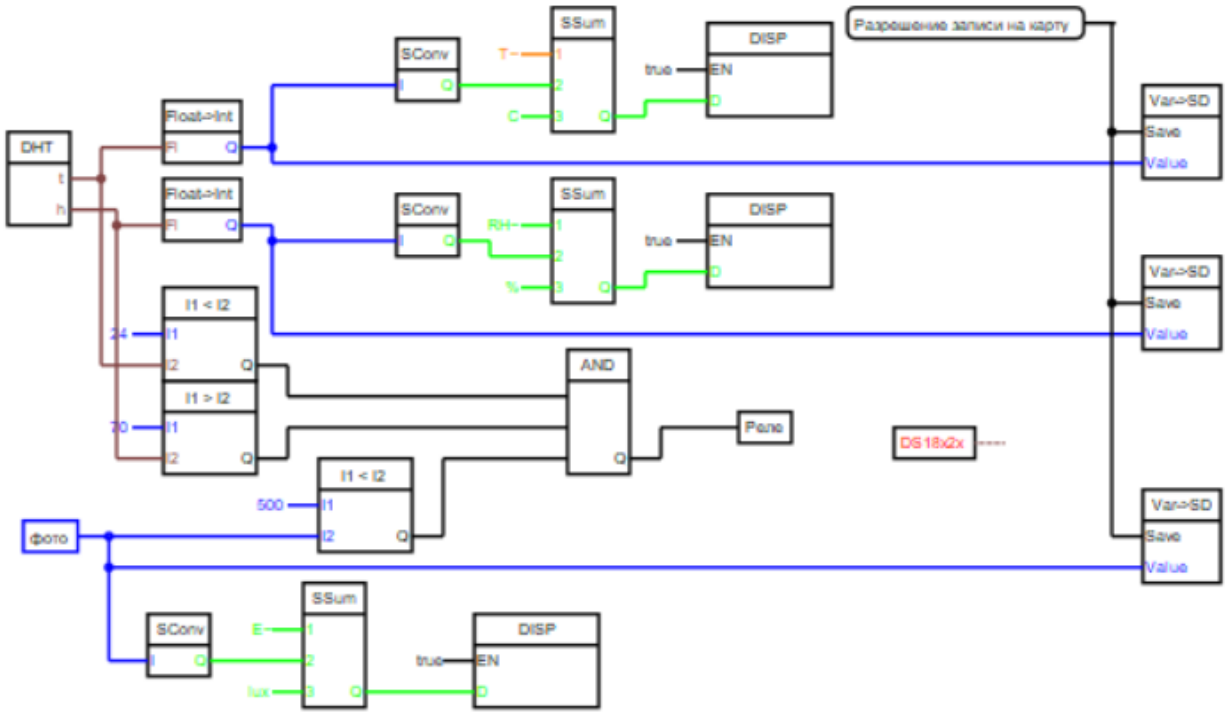


Рис. 2. Схема алгоритма для охлаждения солнечных модулей

Выходная мощность солнечной панели в зависимости от ТКМ определяется формулой [3]:

$$P = P_0(1+\beta\cdot\Delta T), \quad (1)$$

где P_0 – мощность фотоэлемента при температуре 25 °C, Вт; β – температурный коэффициент мощности, 1/°C; ΔT – повышение температуры фотоэлемента, °C.

Система управления реле насоса должна иметь определённые условия для работы:

1) температура солнечной панели выше 30°;
2) влажность ниже 80 % (для предотвращения протечек);
3) освещенность выше 900 lux (для отключения системы в отсутствии солнца).

Данные условия были заложены в алгоритм ArduinoUNO и протестированы на реальной системе.

На рис. 4 изображена схема для управления охлаждением солнечной панели.

pr1 | Arduino 1.8.15

Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

pr1

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "DHT_NEW.h"
LiquidCrystal_I2C _lcd1(0x27, 16, 2);
int _dispTempLength1=0;
boolean _isNeedClearDisp1;
DHT _dht1;
int _disp2oldLength = 0;
unsigned long _dht1LRT = 0UL;
unsigned long _dht1Tti = 0UL;
int _disp1oldLength = 0;
int _disp3oldLength = 0;
void setup()
{
    pinMode(4, OUTPUT);
    digitalWrite(4, 0);
    Wire.begin();
    delay(10);
    _lcd1.init();
    _lcd1.backlight();
    _dht1.setup(2);
    _dht1LRT = millis();
    _dht1Tti = millis();
}
```

Рис. 3. Окно программы Arduino UNO для системы охлаждения

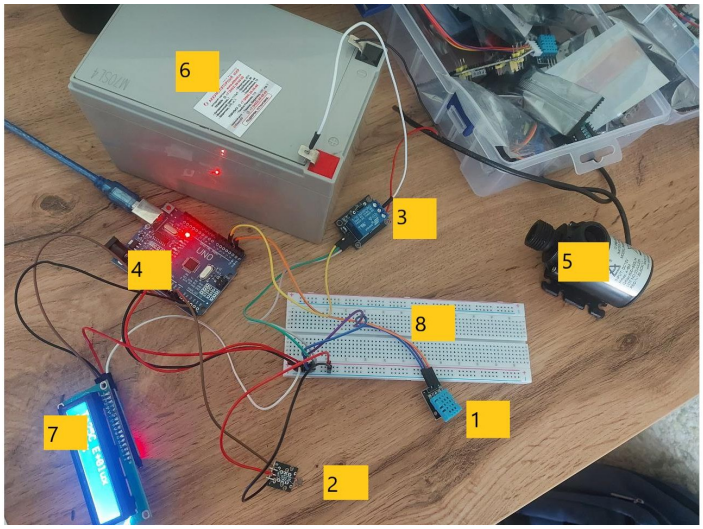


Рис. 4. Реальная схема сборки системы охлаждения на базе блока Arduino UNO датчик температуры и влажности DHT 21 (1), датчик освещенности (2), реле включения (3), программируемый блок Arduino UNO (4), насос mini water pump DC 12В 800 L/h (5), аккумуляторная батарея 12 В (6), ЖК-дисплей двухстрочный (7) и блок шин (8)

Система работает следующим образом: система замеряет данные о температуре, влажности, освещенности и передает на блок Arduino UNO если выполняются все три условия реле включается и насос начинает работать. Если одно из условий не выполняется система отключает насос.

Таким образом, была собрана и протестирована система автоматизации для управления охлаждением солнечной панели. Данная система позволяет вырабатывать солнечным панелям до 17 % дополнительной мощности в автоматическом режиме. И работать при определенных условиях без участия человека, при этом экономя дополнительною электроэнергию, затрачиваемую насосом для охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубакин В.А., Карнаухов М.Н., Стариннов С.А. Проектирование, строительство и эксплуатация солнечных и ветровых электростанций: учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – 161 с.
2. Arduino Hardware. – URL: https://www.arduino.cc/en/hardware (дата обращения: 10.07.2023).

3. Кенден К.В. Анализ состояния энергоснабжения и исследование солнечного потенциала населенных пунктов Республики Тыва // Материалы IV республиканской научно-технической конференции «Развитие инженерных технологий в строительстве и коммунальном хозяйстве». – 2013. – С. 77–82.
4. Соснина Е.Н., Кечкин А.Ю., Филатов Д.А. Вопрос электроснабжения потребителей, удаленных от сетевой инфраструктуры // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 100–105.
5. 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. – 2022. – № 1. – С. 77–94.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ – КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

А.С. Валюк

Казанский государственный энергетический университет,
ИЭЭ, ТОЭ, гр. ЦСА-1-22

Научный руководитель: Т.Г. Галиева, к.т.н.

Цифровая трансформация электросетей – одна из главных задач современной электроэнергетики. Она направлена на улучшение управления электросетевыми объектами, обновление системы учета и снижение потерь электрической энергии. В результате этого повышается надежность и качество электроснабжения для потребителей [1].

Интеллектуальная сеть – это один из современных типов электрических сетей, которая имеет информационные, автоматизированные и интерактивные характеристики. Интеллектуальная цифровая подстанция – неотъемлемая часть интеллектуальной электросети.

Интеллектуальная подстанция использует экологически безопасное оборудование с возможностями измерения, мониторинга и интеллекта для автоматического сбора данных, защиты, контроля и других операций [2].

Отличие цифровой подстанции от традиционной заключается в возможности интеллектуального управления оборудованием с использованием передовых сенсорных технологий. Интеграция первичного и вторичного оборудования осуществляется с помощью интеллектуального преобразования традиционного первичного оборудования с использованием электронных измерительных трансформаторов и технологий мониторинга на основе текущего состояния. Стандарт МЭК-61850 обеспечивает унифицированную информационную модель и стандартный интерфейс для автоматизации подстанции.

Использование «интеллектуальных» узлов делает энергосети экономичными и надежными. Применение современного силового оборудования, вычислительных технологий и систем связи позволяет создать самовосстанавливающуюся адаптивную систему обеспечения энергией. Интеллектуальные энергосистемы связываются с конечными пользователями на уровне домохозяйств или предприятий и предотвращают возможные сбои и неисправности [3].

Автоматизированная система управления энергосетью позволяет эффективно распределять электричество, а интеллектуальная подстанция контролирует работу оборудования и принимает ключевые решения. Центр управления получает отчеты о работе и энергопотреблении, чтобы обеспечить бесперебойную работу энергосети.

Интеллектуальная подстанция использует передовые сенсорные технологии для анализа и оценки информации, что делает ее особенной. Она объединяет первичное и вторичное обо-

рудование с помощью интеллектуальной модификации классического первичного оборудования, используя технологии прогнозирования и электронные измерительные трансформаторы. Трансформаторы и переключатели с интеллектуальными элементами обеспечивают функции измерения, прогнозирования, регулирования, защиты и другие функции. Требования МЭК-61850 гарантируют стандартную информационную модель и стандартный интерфейс для автоматизации подстанции [4].

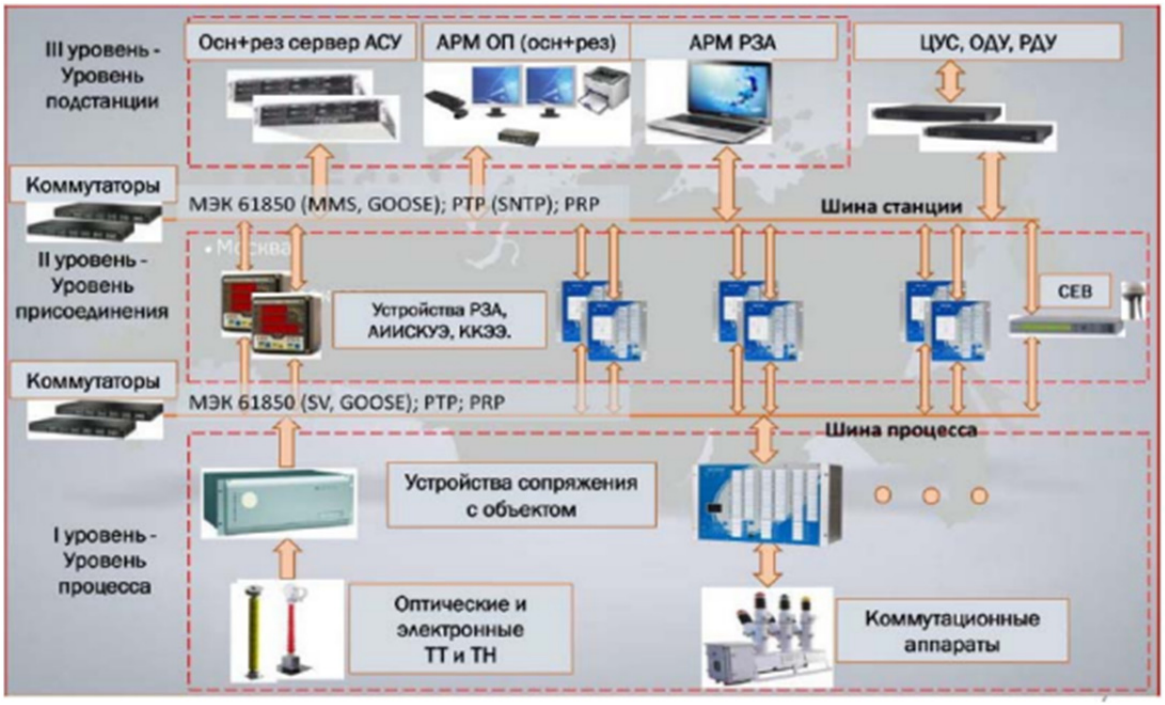


Рис. 1. Структура цифровой подстанции

Цифровая подстанция решает множество задач: обеспечивает взаимодействие устройств, унифицирует информационные протоколы обмена данными, обеспечивает наблюдаемость каналов сбора, передачи информации и управления. Она также сокращает кабельное хозяйство благодаря использованию необслуживаемых волоконно-оптических соединений, упрощает тиражирование первичной информации и применяет устройства с обновляемым программным обеспечением. Кроме того, она снижает метрологические потери во вторичных цепях, формирует единую систему диагностики и осуществляет переход к выполнению удаленной диагностики. Она также унифицирует механизмы конфигурирования подстанции и обеспечивает переход к необслуживаемым подстанциям [5].

Интеллектуальная подстанция имеет несколько преимуществ: она сокращает время простоев в электроснабжении в случае аварий, что уменьшает недостачу электроэнергии; она автоматически управляется и не требует участия оператора, что снижает затраты на обслуживание; она повышает точность измерений, особенно при низких токах; она уменьшает потребление электроэнергии по цепям переменного тока и напряжения благодаря использованию оптических трансформаторов; она предотвращает появление дефектов типа «земля в сети постоянного тока»; она проводит самодиагностику и дистанционную диагностику оборудования, что позволяет проводить ремонт по фактическому состоянию и снижает затраты на обслуживание; в интеллектуальной подстанции отсутствует электрическая связь между первичным и вторичным оборудованием, что делает ее более безопасной; на ней осуществляется видеоконтроль операций и ведется журнал событий, чтобы обеспечить контроль всех действий [6].

Интеллектуальная подстанция имеет свои недостатки. Например, отсутствует единая нормативная база на проектирование, разные производители используют свои собственные профили, которые не совместимы между собой без адаптации. Однако, они не противоречат базовому стандарту 61850 8.1. Также значительная часть сигналов, связанных с диагностическими параметрами, не определена в стандарте и остается на усмотрение производителей и интеграторов.

Цифровизация, регулирование сетью, ультракомпактное оборудование и комплексные функции – все это направления усовершенствования интеллектуальной подстанции. Технологии развития предполагают глобализированный и стандартизированный сбор информации. В будущем технологии развития интеллектуальных подстанций предполагают сбор информации в глобальном масштабе и ее стандартизацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чжан В., Лю Ч., Ван М. и др. Состояние исследований и тенденции развития интеллектуальных сетей // Power System Technology. – 2009. – Вып. 33 (13). – С. 1–11.
2. Лукьянов М.Р. Исследование технологий интеллектуальных подстанций // Образование и наука в России и за рубежом. – 2019. – №16. – С. 231–234.
3. Головщиков В.О. Готова ли электроэнергетика России к переходу на новую технологическую платформу, основанную на массовой цифровизации? // Энергетик. – 2018. – № 11. – С. 3–6.
4. Руденко В.В., Грашков С.А. Самостоятельная работа студентов как средство формирования профессиональных компетенций // Образование. Инновации. Качество: материалы VI Международной научно-методической конференции, Курск, 22–23 мая 2014 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова, 2014. – С. 221.
5. Руденко В.В., Богатырев Д.А., Фетисов В.С. Цифровая трансформация электроэнергетики // в сб: Электроэнергетика сегодня и завтра. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2022. – С. 139–141.
6. Руденко В.В., Маркова А.А. Перспективы внедрения цифровых технологий В АПК // в сб.: Инновации в научно-техническом обеспечении агропромышленного комплекса России. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – 2020. – С. 82–85.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Я.В. Калинкин

АО «ТомскНИПИнефть»,
отдел АСУ ТП

Научный руководитель: А.Г. Зебзеев, к.т.н., доцент, главный эксперт по цифровизации,
АО «ТомскНИПИнефть»

Одним из направлений работы теплоэнергетического комплекса является оптимизация текущих процессов производства и поддержания технологического режима при оптимизации энергопотребления [1]. Рассматривая в данном аспекте функционирование насосных перекачивающих станций, можно заключить, что актуальной является проблема выбора оператором неоптимального технологического режима насосных агрегатов центробежного типа при транспорте нефти.

В связи с этим предложена работа, направленная на цифровизацию подобных решений с целью оптимизации работы и увеличения энергоэффективности технологического режима насосных агрегатов (далее НА) [2].

Для дальнейшей работы были приняты напорные характеристики НА в виде графических зависимостей, которые были приведены в числовой вид с помощью встроенных функций среды Matlab (рис. 1) и подлежали приведению к функциональному виду [3].

Входные параметры алгоритма:

- расход на входе НПС;
- давление приема НА;
- потери давления в сети;
- КПД НА;
- плотность;
- рабочие характеристики НА.

Выходные параметры:

- количество агрегатов;
- частота вращения;
- мощность.

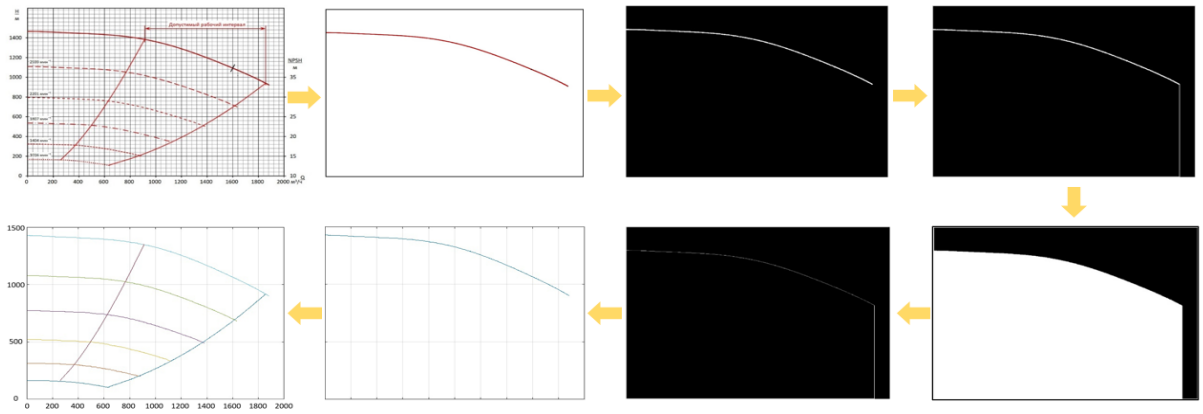


Рис. 1. Этапы оцифровки напорных характеристик в среде Matlab

Блок-схема алгоритма приведена ниже (рис. 2).

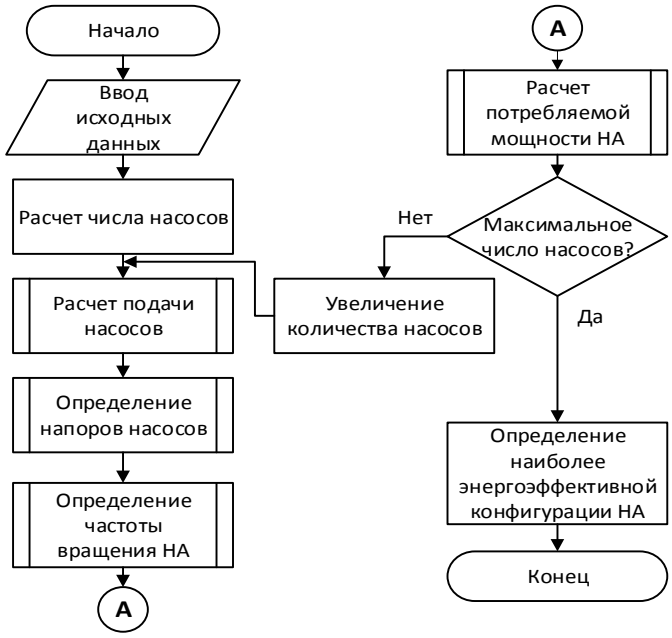


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета количества и параметров работающих НА

Представленный алгоритм был перенесен в среду моделирования SimInTech для апробации и дальнейшего соединения со SCADA-клиентом. В дальнейшем при эксплуатации продукта возможен полный перенос алгоритма в систему SCADA, поддерживающую разработку пользовательский скриптов на высокоуровневых языках программирования.

В текущей конфигурации для соединения со SCADA-клиентом (в качестве среды операторского интерфейса выбрано ПО Simple-Scada 2) использован OPC-сервер Matrikon как рекомендуемый для использования совместно с SimInTech.

В среде Simple-Scada разработан человеко-машинный интерфейс, визуализирующий работу с насосными агрегатами. В систему внедрен ранее описанный алгоритм, и разработанная таким образом система поддержки принятия решений (далее СППР) функционирует в режимах работы «советник» (штатный режим, рис. 3) и «по запросу» (рис. 4). В режиме «советник» СППР предоставляет оператору актуальную информацию об оптимальном техрежиме, а в штатном режиме работы оператор может нажать кнопку «рассчитать энергоэффективный режим» для расчета режима и выведения формы с оптимальными показателями на экран.

Рис. 3. Штатный режим работы СППР

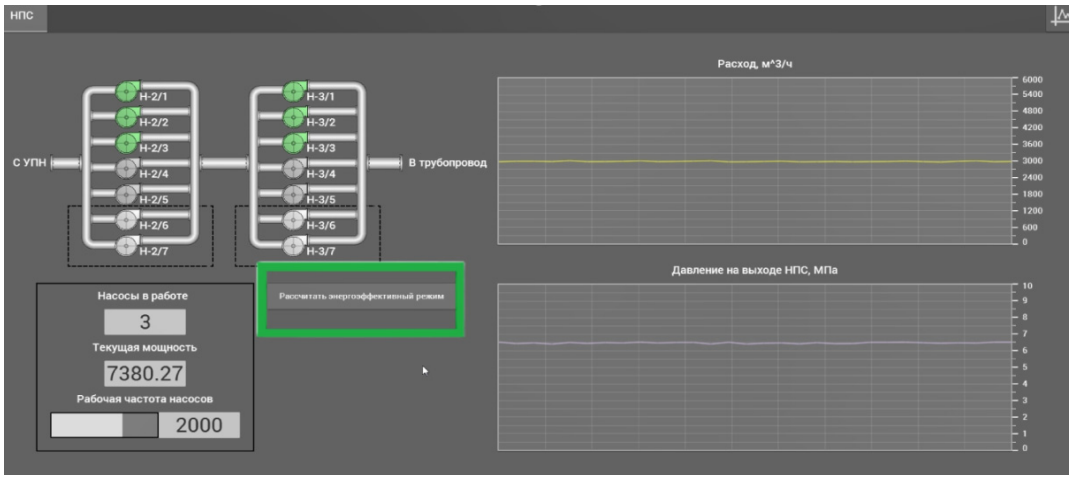


Рис. 4. Режим работы СППР «по запросу»

Представленные материалы являются прототипом конечного программного решения, готового к апробации на оборудовании АСУТП различных организаций.

Разработанная СППР позволит уменьшить энергозатраты транспорта нефтепродуктов в крупных магистральных нефтепроводах и увеличить эффективность процесса транспорта нефти в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации // КонсультантПлюс. – URL: https://normativ.kontur.ru/ document?moduleId=1&documentId=433554 (Дата обращения 12.11.2023).
2. Соснова С. Три кита энергоэффективности насосов: обследование. Оптимизация. Мониторинг // Строительство Технологии Организация. – 2018. – Т. 1. – № 58. – С. 48–51.
3. imread() // MathWorks. – URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/imread.html#btnczv9-1_seealso (Дата обращения 12.11.2023).

ИНТЕГРАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

О.Д. Кулькова[1], Я.Ю. Малькова[2]

[1] Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, факультет международных экономических отношений, гр. МеждЭБ23-2м

[2] Томский политехнический университет, факультет инженерной школы энергетики, гр. А3-42

Научный руководитель: Н.Л. Орлова, к.э.н., доцент

Увеличение использования ВИЭ с периодической генерацией приводит к неопределенности в работе энергетических систем. Одна из таких проблем – снижение инерции системы, которая является первой линией защиты от крупных возмущений. Инерция обусловлена сопротивлением объекта любому изменению его скорости. Чем выше инерция в энергетической системе, тем легче преодолеть системные нарушения и поддерживать работу энергосистемы. Системы с большей инерцией могут лучше справляться с потрясениями, т. к. имеют больше времени для реагирования и противодействия. В случае энергосистемы, в которой много больших и быстро вращающихся механизмов (роторов), инерция отражает то, насколько легко одновременно ускорить или замедлить все эти быстро движущиеся части. Однако, ВИЭ, например, солнечные фотоэлектрические установки, не имеют вращающейся массы, что означает, что система не имеет накопленной энергии. Исключение составляют ветровые турбины, которые имеет небольшую инерцию из-за своих механических частей. Поэтому инерция системы снижается по мере увеличения доли ВИЭ в энергосистеме. Снижение инерции ведет к увеличению скорости изменения частоты, что требует более быстрого реагирования для правильного управления частотой.

Частота является очень важным показателем в энергосистеме, и показывает, насколько система синхронизирована, а также состояние баланса спроса и предложения в режиме реального времени. Поэтому установленный целевой ориентир – работа на частоте 50 или 60 Гц в зависимости от рабочей частоты в конкретной стране. На рис. 1 показано, что частота балансирует значения спроса и предложения. Если спрос увеличился, а генерации стало

меньше, частота станет меньше 50 Гц, и наоборот. Если предложение больше, а спрос меньше, частота увеличивается и становится больше 50 Гц. Таким образом, риск здесь заключается в том, что по мере увеличения проникновения солнечной энергии и энергии ветра в сеть обычные синхронные генераторы будут вытеснены. Что имеет смысл, потому что конечная цель состоит в том, чтобы сократить выбросы CO_2 и получить чистый источник энергии. Таким образом, если исходить из того, что большая часть традиционных электростанций будет выведена из эксплуатации, система регулирования частоты станет сложной задачей.

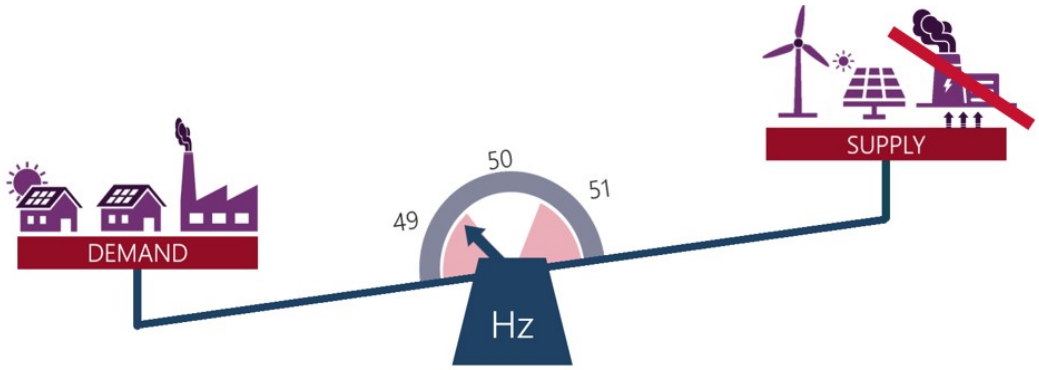


Рис. 1. Отклонение частоты энергосистемы от установленного значения
Источник: Energy Explained: Frequency Control [Electronic resource] // Australian Energy Market Operator (AEMO). URL: https://aemo.com.au/learn/energy-explained/energy-101/energy-explained-frequency-control (дата обращения: 19.11.2023)

Современные проекты ветровой и солнечной генерации в основном представляют собой электрические системы с подключением силовой электроники (например, преобразователей/инверторов) к электросети. Этот тип устройств силовой электроники, как правило, включает быстрое управление активным и реактивным током и должен быть синхронизирован с напряжением сети. Для надежной и стабильной работы источников силовой электроники с регулируемым током требуется мощность сети. Рассмотрим, что произойдет, при интеграции ветряных или солнечных электростанций в единую энергосистему. Для количественной оценки надежности сети применяют коэффициент короткого замыкания, который является показателем, используемым для оценки прочности системы для подключения источников силовой электроники. Коэффициент короткого замыкания в любой точке системы – это уровень неисправности в точке, деленный на мощность установки (МВт или МВ·А), подключенной к той же точке. Отсюда следует вывод, что меньше коэффициент короткого замыкания, тем слабее система. Таким образом, цель состоит в том, чтобы приложить все усилия для оценки коэффициента короткого замыкания, чтобы выявить риск и снизить его. В дополнение к этому производитель электронного источника питания должен предоставить четкое указание относительно минимального уровня короткого замыкания, при котором их оборудование может надежно работать. Таким образом, риск здесь заключается в том, что при низком уровне короткого замыкания состояние сети становится более сложным, и, следовательно, необходимо проведение детального моделирования энергосистемы и анализа электромагнитных переходных процессов. На рис. 2 представлено две формы волн напряжения. Левая часть рисунка представляет волну напряжения для систем с большой силой во время и после сбоя, правая – волну напряжения для непрочных систем во время и после сбоя. Можно заметить, что левая форма волны напряжения во время сбоя довольно стабильна, но для системы с низкой прочностью форма волны напряжения существенно искажена. Таким образом, существует высокая вероятность того, что энергосистема с низкой прочностью не сможет работать должным образом во время сбоев, и это может привести к отключению.

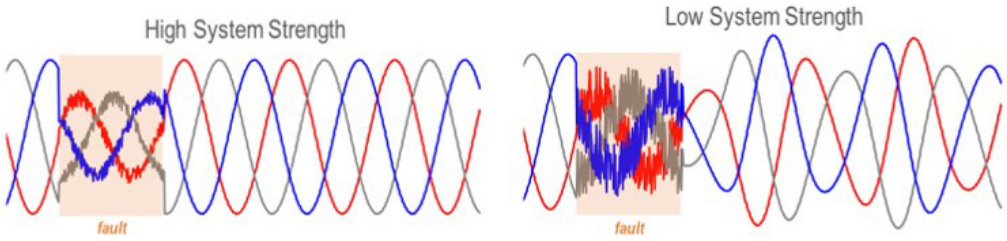


Рис. 2. Разница в форме сигналов напряжения во время и после сбоя для систем с высокой и низкой надежностью системы
Источник: Energy Explained: System Strength [Electronic resource] // Australian Energy Market Operator (AEMO). URL: https://aemo.com.au/learn/energy-explained/energy-101/energy-explained-system-strength (дата обращения: 19.11.2023)

Еще одной проблемой является качество энергоснабжения, потому что, как уже было упомянуто, объекты ветровой и солнечной генерации состоят из силовых электронных устройств и сопряжения их с сетью. Таким образом, все силовые электронные устройства представляют собой нелинейные нагрузки, и они определенно являются источником гармонических колебаний – искажений синусоидальной формы напряжения и тока. Они считаются серьезной проблемой в энергосистеме и вызывают множество сопутствующих проблем, таких как перегрев, перепады напряжения, низкий коэффициент мощности и возможность резонанса системы. Основная проблема здесь заключается в том, как сохранить индивидуальные гармонические искажения, а также общее гармоническое искажение в любой точке сети ниже стандартных пределов. Гармоники – это синусоидальные волны суммирующиеся с фундаментальной. На рис. 3 зеленая форма сигнала является чистой синусоидальной волной, и, поскольку есть синяя форма для третьей гармоники, а желтая – для пятой гармоники, то в целом форма зелёного сигнала искажается и приобретает вид красного сигнала, который вызовет все вышеперечисленные проблемы в системе.

Некоторые из возможных решений, которые могли бы помочь избавиться от проблем или, по крайней мере, свести к минимуму степень риска, могут быть следующими.

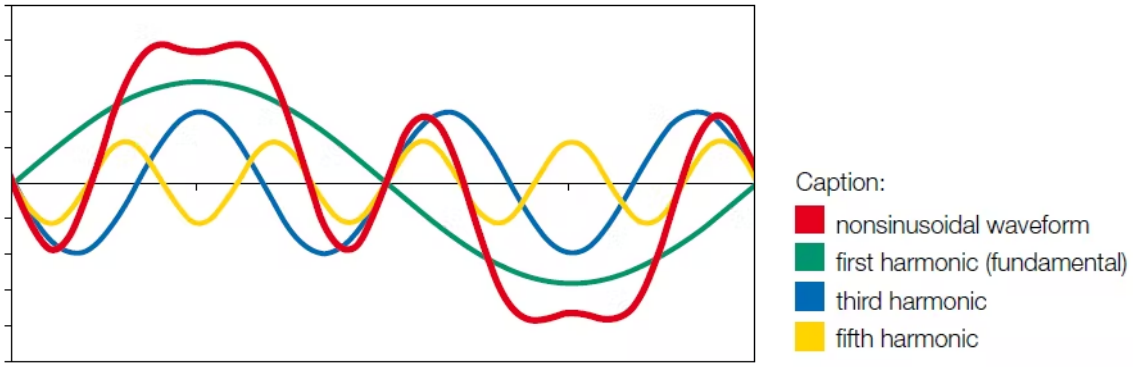


Рис. 3. Гармонические колебания в сети
Источник: Smart Energy Meter With Ubidots and Blues Wireless [Electronic resource] // Ubidots Blog. URL: https://ubidots.com/blog/smart-energy-meter-with-ubidots-and-blues-wireless/amp/ (дата обращения: 19.11.2023)

Для управления риском от непостоянного характера ВИЭ-генерации и обеспечения стабильного энергоснабжения:

- выбор мест, не совпадающих друг с другом – межсистемные соединения большей площади;
- баланс видов ВИЭ в зависимости от типа энергии – ветра, солнца и т. д.;
- использование систем хранения – гидроаккумулирующие насосы, аккумуляторы;
- баланс с диспетчеризируемыми ВИЭ – гидроэнергия, геотермальная энергия;

- баланс с диспетчеризируемыми генерирующими станциями – природный газ, комбинированный цикл.

Для решения проблем низкой мощности системы:

- строительство новых линий электропередачи или трансформаторов с более низкими значениями импеданса;
- реконфигурация существующих сетей;
- установка синхронных конденсаторов, которые помогут увеличить мощность системы, обеспечить инерцию, а также обеспечить динамическое регулирование напряжения;
- установка статических компенсаторов реактивной мощности и статических синхронных компенсаторов, которые улучшат динамическое регулирование напряжения, а также задачи управления;
- сокращение зарегистрированной мощности электростанции.

Для управления частотой:

- обеспечение узкополосной частотной характеристики всех генераторов для управления рисками системы в ближайшие годы;
- разработка рабочих планов по регулированию частоты.

Для решения проблемы гармонических искажений:

- установка гармонических фильтров.

Прежде всего, для того, чтобы корректно сравнивать стоимость энергии от различных типов генерации, надо привести её качество к одинаковому стандарту. В качестве основных рекомендаций для преодоления проблем внедрения ВИЭ в энергосистемы можно выделить следующие действия. В качестве первого шага необходимо выполнить оценку коэффициента короткого замыкания, что поможет оценить заявку на подключение и снизить риск. Второй момент – это моделирование энергосистемы и исследования, которые очень важны и должны проводиться квалифицированными инженерами. Раньше основным видом исследований были программы устойчивости переходных процессов, но сегодня из-за инвертированной технологии в дополнение к программам устойчивости переходных процессов необходимо проводить исследования электромагнитных переходных процессов. Третий шаг – это модификация и добавление некоторых функций управления для улучшения работы генератора, и это возможно с производителем оригинального оборудования. Также немаловажную роль играет сотрудничество между разработчиками системного планирования, операторами и производителями оригинального оборудования. Кроме того, необходимо больше инвестиций в НИОКР в области ВИЭ и технологий хранения энергии, чтобы стало возможным хранить больше электроэнергии и использовать ее во время пиковых нагрузок. И последняя рекомендация – государственная политика должна обеспечить необходимую поддержку и дать больше стимулов коммунальным предприятиям и поставщикам сетевых услуг для инвестиций в ВИЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашина М.П. Проблемы внедрения возобновляемой энергии в энергосистемы // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения. – 2020. – С. 31.
2. Сидорович В.В. Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды [Электронный ресурс] // Информационный портал «RenEn». – URL: https://renen.ru/integration-of-res-into-the-energy-system-practice-myths-and-legends/ (дата обращения: 19.11.2023).
3. Смирнова С.В., Шишулин О.Ю. Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии // Электроэнергетика глазами молодежи. – 2019. – С. 111–114.
4. Шескин Е.Б. Проблемы использования потенциала возобновляемых источников энергии для регулирования частоты в электрических системах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – №. 1 (80). – С. 97.
5. Tielens P., Van Hertem D. Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables // Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Date: 2012/04/16-2012/04/17, Location: Delft, The Netherlands. – 2012.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ПОМОЩЬЮ NXOPEN API

А.А. Стасеев, М.Ю. Харитонов

АО «Силовые машины»

Автоматизация процессов является популярным направлением в различных сферах, и сфера гидромашиностроения не является исключением. С развитием компьютерных технологий расширился и спектр решаемых задач по автоматизации [1, 2]. В данном докладе описана концепция алгоритма выполнения операций по построению 3D-модели рабочего колеса центробежного насоса. В дальнейшем, полученная 3D-модель была использована для выполнения CFD-расчёта в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX.

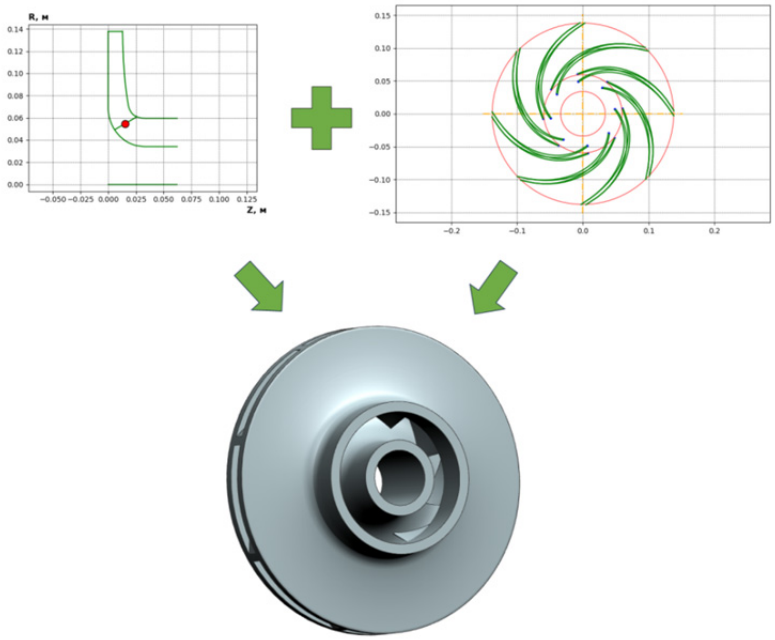


Рис. 1. Данные для построения 3D-модели

Входными данными для создания 3D-модели рабочего колесо являются результаты расчёта геометрических и энергетических параметров, выполненных согласно методике, изложенной в [3]. Алгоритмизация расчёта параметров рабочего колеса выполнена на основе источников [4, 5]. Рассчитанные данные внутри внешней программы сохраняются в отдельных файлах для дальнейшего экспорта в утилиту, разработанную с помощью NXOpen API. Экспортируемые данные и полученный результат приведены на рис. 1.

Концепция алгоритма расчёта геометрических и энергетических параметров рабочего колеса и экспорт в отдельных файлы, с последующим использованием в разработанной утилиты в NX приведена на рис. 2.

Задача автоматизации проектирования рабочего колеса была разбита на несколько этапов: трансфер полученных результатов расчётов основных параметров, координаты точек меридианного сечения, координаты точек параметров кромок и параметров рассчитанной лопастной системы. После сохранения данных в отдельной директории необходимо выполнить переход в NX и запустить разработанную утилиту, после чего выбрать директорию, в которой файлы были сохранены. Алгоритм считывает данные из файлов в указанной директории, после чего на их основании выполняется построение 3D-модели.

После проведения предварительного расчёта в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX, были получены следующие интегральные параметры:

- напор рабочего колеса равен 115.86 метрам, что отклоняется от заданного напора в 115 м 0,8 %, однако стоит учитывать, что расчёт проводился без учёта отводящего устройства, в котором тоже будет происходить потери напора;
- КПД рабочего колеса равняется 97,4 %

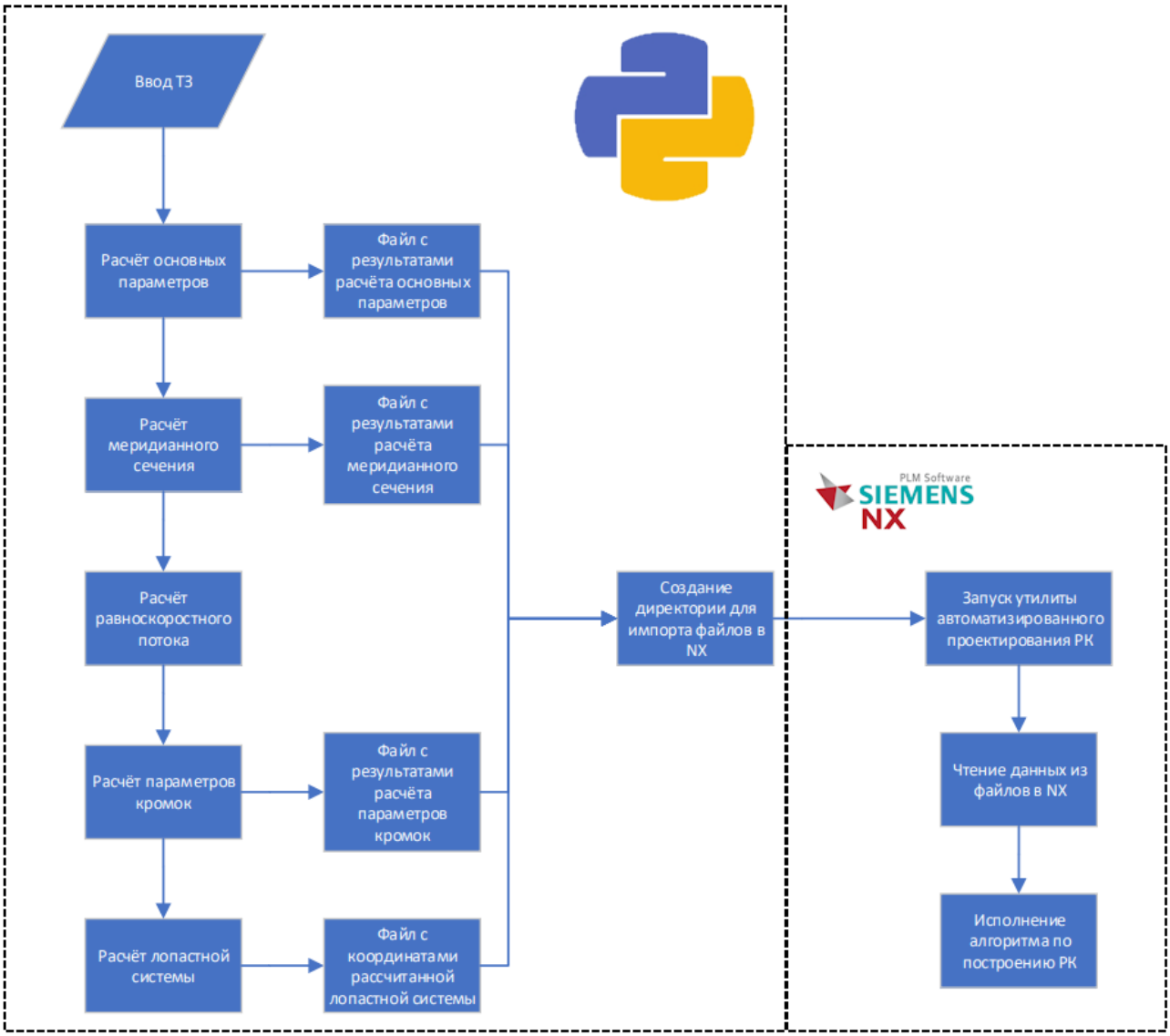


Рис. 2. Концепция алгоритма автоматизированного построения 3D-модели рабочего колеса

Таким образом, автоматизирование построение модели рабочего колеса позволяет ускорить процесс проектирования проточной части центробежного насоса, однако для подтверждения качества построенных моделей, необходимо произвести большее количество расчётов, а также произвести сравнение с данными, полученными в ходе эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание параметризованных 3D-моделей проточной части центробежных насосов / В.О. Ломакин, П.В. Щербачев, О.И. Тарасов и др. // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2012. – № 04.
2. Курир В.И. Способы 3D параметризации лопасти радиально-осевой гидротурбины Френсиса // Научно-технический вестник Поволжья. – №. 4. – С. 182–187.
3. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М.: Машиностроение, 1965.
4. Жарковский А.А., Грянко Л.П., Плешанов В.Л. Автоматизированное проектирование рабочего колеса центробежного насоса: учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУ., 1997. – 108 с.
5. Жарковский А.А., Грянко Л.П., Плешанов В.Л. Автоматизированное проектирование ступени центробежного насоса. Проектирование рабочего колеса: метод. указания к курсовому и дипломному проектированию. – Л.: ЛПИ, 1989. – 40 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ

А.А. Иванова, М.В. Лягоцкий

ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет,
ЭФ, ИВТ и ПМ, гр. ИВТ(иа)м-23

Научный руководитель: Г.А. Палкин, к.т.н., доцент кафедры ИВТ и ПМ

Энергосбережение и энергоэффективность имеют первостепенное значение в контексте систем отопления, которые являются важнейшими компонентами инфраструктуры зданий и промышленных объектов. Нерациональное использование этих систем приводит не только к чрезмерному потреблению энергии, но и к снижению общей эффективности использования энергии. Для решения этих проблем необходимо адаптировать систему управления системой отопления к местным климатическим условиям, а использование датчиков температуры для оптимизации играет значительную роль в снижении энергопотребления и достижении стабильности работы систем отопления [1].

Неоптимальные режимы работы систем отопления, наряду с вытекающими из этого неоправданными затратами энергии, могут быть объяснены несколькими ключевыми причинами:

- низкая эффективность оборудования, которое приводит к снижению энергоэффективности;
- недостаточная автоматизация, что не позволяет оптимально адаптировать режимы работы оборудования к изменениям условий эксплуатации;
- нехватка современных технологий и решений, направленных на повышение энергоэффективности и экономичности систем водоснабжения.

Основной целью данного проекта является разработка контроллера, осуществляющего регулирование температуры и интенсивности циркуляции теплоносителя в системах отопления зданий и сооружений, стремясь при этом к минимизации энергопотребления. В ходе данного исследования был проведен всесторонний анализ существующих решений с целью выявления преимуществ и недостатков, связанных с использованием этих устройств.

Контроллер предназначен для управления работой системы путем изменения выходных параметров на основе данных от внешних датчиков температуры в режиме реального времени с целью достижения желаемой температуры в помещении. Предполагается также использовать передовые алгоритмы искусственного интеллекта для анализа данных о температуре внутри и снаружи помещений и динамической точной настройки контроллера.

Важность алгоритмов интеллектуального управления для системы отопления здания не может быть недооценена, так как они являются основой для оптимизации и эффективного регулирования температуры внутри помещений. Однако не менее значимым аспектом является и дизайн самого контроллера, который должен обеспечивать удобство использования, точность управления и быстродействие в принятии решений на основе данных, получаемых от датчика наружной температуры [2].

Принцип работы контроллера заключается в управлении степенью открытия клапана подачи горячей воды в системе отопления в зависимости от данных, полученных от внешних датчиков температуры. Чтобы снизить температуру воды в отопительном контуре, открывается перемычка, замыкающая контур на себя, при этом запускается циркуляционный насос, обеспечивающий необходимое давление в системе отопления [3]. Контроллер изменяет производительность насоса, регулируя частоту питающего напряжения, что оптимизирует интенсивность циркуляции охлаждающей жидкости в системе. Схема, иллюстрирующая принцип работы контроллера, место установки датчиков и управляемых устройств в системе отопления здания, показана на рис. 1.

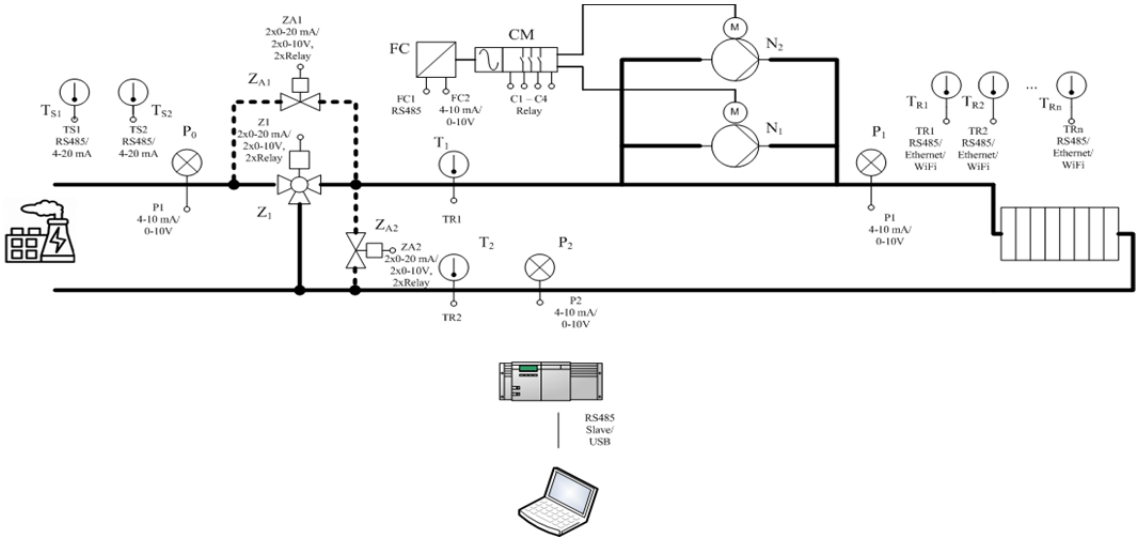


Рис. 1. Схема установки датчиков и управляемых устройств

Датчики температуры внешней среды, датчики температуры теплоносителя и обратной воды, датчики давления используются для классической схемы контура автономной системы отопления. Контроллер может адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и режиму работы объекта, а также выбирать наилучшие настройки алгоритма управления, как при первом подключении, так и во время эксплуатации.

При разработке алгоритма управления, обеспечивающего наиболее точное приближение к желаемой температуре и оптимальное использование ресурсов, планируется рассмотреть, протестировать и, основываясь на результатах тестирования, выбрать один из следующих методов управления системой:

- Составить математическую модель системы и выявить наиболее оптимальные зависимости.
- Обучение нейронной сети. При хорошем обучении метод покажет наилучшую точность и эффективность, но за счет того, что обучение сети требует больших вычислительных мощностей, делать его придется отдельно и помещать в контроллер уже подготовленную сеть, что накладывает определенные трудности.
- Работа по триггерам. Вся работа контроллера сведётся к отслеживанию триггерных ситуаций и выполнению соответствующих действий. Этот подход требует минимальные вычислительные мощности, но для достижения эффективной работы понадобится создать большую экспертную систему.

При проектировании интерфейса важно обеспечить простоту использования и эффективность работы оператора. Цель состоит в том, чтобы создать интуитивно понятный интерфейс, которым операторы действительно смогут овладеть без необходимости в длительном обучении или сложных руководствах пользователя. Для достижения этой цели важно использовать понятные и знакомые значки, маркеры кнопок, светодиодные индикаторы и освещение, поскольку они должны соответствовать функциям аналогичных контроллеров, с которыми операторы имеют опыт работы. Кроме того, применение минималистического подхода к дизайну помогает устранить ненужные и сбивающие с толку элементы, гарантируя, что операторы смогут сосредоточиться на своих задачах, не отвлекаясь ни на что другое. Таким образом, хорошо продуманный интерфейс, отвечающий этим требованиям, может значительно повысить общее удобство использования и эффективность системы [4].

С учетом всех вышеописанных требований, с помощью программы FIGMA был построен вариант интерфейса контроллера, он приведен на рис. 2.

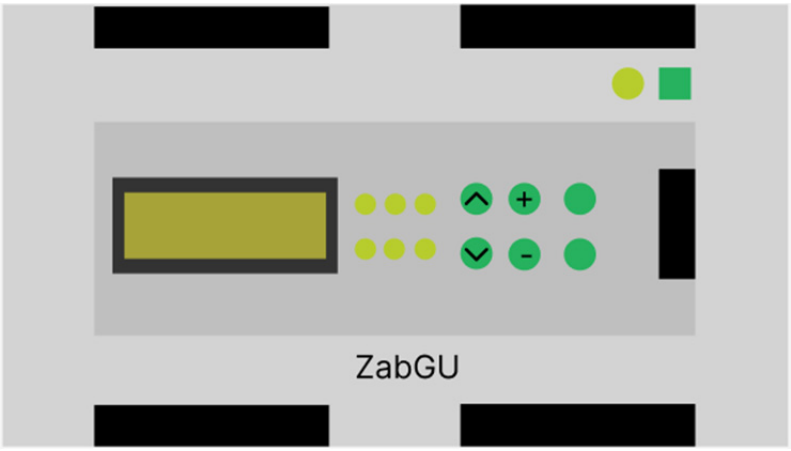


Рис. 2. Проект интерфейса контроллера (FIGMA)

В передней части устройства расположена основная панель управления с двухстрочным жидкокристаллическим экраном и кнопками управления. Кнопки используются для навигации по меню и подтверждения действий. Верхняя и нижняя части контроллера содержат порты для подключения различных внешних устройств, включая аналоговые датчики температуры, порт RS485, цифровые входы и выходы для устройств с релейным управлением, аналоговые выходы для регулируемого оборудования и преобразователь частоты для циркуляционного насоса. Эти порты являются дополнительными и могут быть закрыты заглушками, когда они не используются.

Кроме того, панель управления оснащена тремя рядами светодиодов, расположенных в виде сетки 3×3, для индикации режима работы контроллера и управления входными и выходными линиями. В правом верхнем углу находится светодиодная лампа освещения, которую можно включать / выключать с помощью расположенной рядом кнопки. Эта лампа предназначена для улучшения видимости в условиях низкой освещенности, не ослепляя оператора.

Неэффективная эксплуатация систем отопления приводит к чрезмерному потреблению энергии и снижению общей энергоэффективности зданий и сооружений. Для решения этой проблемы требуется комплексный подход, включающий оптимизацию системы, повышение уровня автоматизации и интеграцию современных технологий. Конечной целью является налаживание эффективного управления системами отопления, особенно в неблагоприятных природных условиях.

В ходе проекта был проведен анализ систем управления отоплением, патентный поиск, сформулированы принципы работы контроллера, спроектирована схема управления и дизайн корпуса, идёт работа над алгоритмом управления, использующим нейронной сети и аппаратной частью контроллера.

Работа выполняется при поддержке программы Приоритет 2030 в лаборатории ПЭТ НОЦ ГА ЗабГУ в соответствии с приказом № 10-п от 31.08.2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроллеры для тепловых пунктов // СОЮЗ-ПРИБОР. 2023. – URL: https://www.souz-pribor.ru/articles/kontrollery-dlya-teplovykh-punktov/ (дата обращения 07.11.2023).
2. Суворов И.Ф., Долгих Р.С., Палкин Г.А.: К вопросу о разработке энергоэффективной автоматизированной системы управления технологическим процессом // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. – № 11. – С. 107–110.
3 Колосов О.С. и др. Технические средства автоматизации и управления. – М.: Юрайт, 2023. – 291 с.
4. Как создать интуитивно понятный интерфейс // Uprock. 2023. – URL: https://www.uprock.ru/education/kak-sozdat-intuitivno-ponyatnyy-interfeys (дата обращения 07.11.2023).

DIGITALIZATION OF ENERGY CONSUMPTION MONITORING SYSTEMS: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

N.N. Kurbonov

Tashkent State Technical University,
Electric Power faculty, Power Supply department

Scientific supervisor: I.U. Rakhmonov, DSc. Professor, head of department of TSTU

Undoubtedly, energy efficiency and judicious utilization of energy resources are pivotal concerns not only in Uzbekistan but also globally. The challenges associated with supplying quality energy to consumers are increasingly evident in the global economic network [1]. Global statistics as of 18.06.2023 indicate that worldwide energy consumption reached 267,834 million TJoules, while electricity consumption accounted for 35,498 million TJoules. Moreover, since the start of 2023, greenhouse gas emissions have amounted to 20 billion tons, with estimates suggesting approximately 44 years until the depletion of existing oil reserves [2, 3].

This escalating demand for energy is observable not just on the global scale but is also a pressing concern in Uzbekistan. Figures in Fig. 1 exemplify this: in 2018, the generated electricity amounted to 62.4 billion kWh, and by 2022, this figure had increased to 74.3 billion kWh. Additionally, the primary consumers of this generated electricity are industrial sectors, which, in the recent five years, have seen their electricity consumption increase from 25 to up to 50 % of the total production [4].

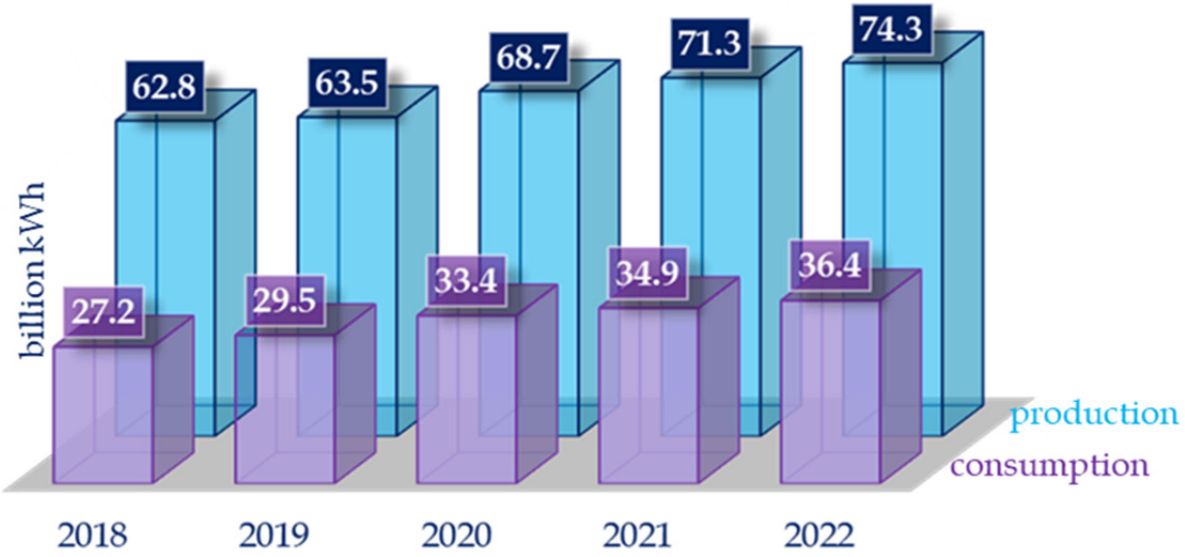


Fig. 1. Volume of electric energy produced and consumed by industrial sectors in the Republic of Uzbekistan

In this epoch of substantial energy production, vast energy consumption, drastic climate changes, and significant energy reserves, it's not only essential to adopt organizational and technical measures (hereinafter referred to as OTM) to optimize energy use, but it's also vital to leverage digital energy consumption monitoring systems (hereafter, DECMS) to oversee the purposeful usage of energy resources. Digitalizing energy consumption monitoring systems facilitates the collection, processing, and analysis of all types of necessary data related to energy consumption [5]. The utilization of digitized energy monitoring systems enables real-time oversight of energy metrics

and eases the rapid generation of diverse reports. Furthermore, it aids in promptly identifying inefficiencies in technological processes, enhancing equipment operational efficiency, ensuring safety, and, through identifying opportunities for energy conservation, it paves the way for reducing energy intensity, energy costs, and carbon (CO_2) emissions [6].

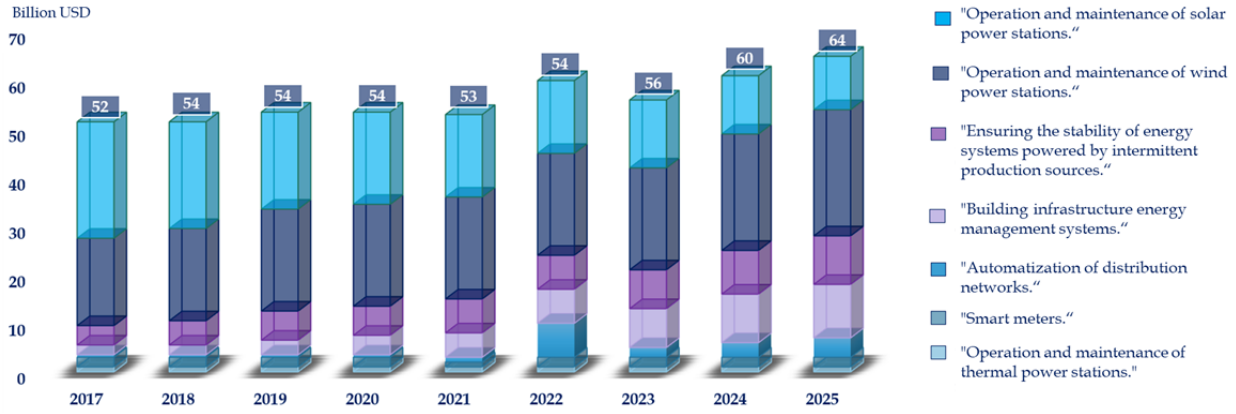


Fig. 2. Market volume of digital technologies in the energy sector

As observed from Fig. 2, a significant portion of the investment in the digital technologies market for the energy sector is allocated towards the development of Digital Energy Management Systems (DEMS). Importantly, there has been a pronounced reliance on Artificial Intelligence (AI) to enhance the accuracy and efficiency of these DEMS, employing them in the following domains [10–13]:

1. Energy system forecasting;
2. Detection and diagnostics of faults in systems;
3. Identifying abnormal regimes in lines and equipment;
4. Managing and monitoring renewable energy sources.

In the rapidly evolving energy sector, Digital Energy Management Systems (DEMS) have become a focal point for advancements and optimization efforts. There is a growing anticipation in the industry that the capabilities of these DEMS will soon be significantly enhanced through the integration of Artificial Intelligence (AI) technologies. This transition is expected to usher these management systems into a new era of fully autonomous control. Such a shift would revolutionize the way energy systems operate, streamlining technological processes and ensuring they are executed with utmost precision and efficiency.

One of the most promising aspects of this AI-driven shift is its potential to greatly improve control over various technological processes within the energy sector. These include, but are not limited to, predictive maintenance, energy distribution, and load balancing. With AI's capabilities for real-time data analysis, anomaly detection, and decision-making, these processes can be managed more dynamically, adapting to changing conditions instantaneously and optimizing energy consumption patterns.

Furthermore, the enhanced outcomes in terms of energy efficiency are invaluable. Energy efficiency not only contributes to reduced operational costs but also plays a pivotal role in environmental sustainability. Efficient energy use means less waste, reduced carbon emissions, and a smaller ecological footprint, making it a top priority for both industry stakeholders and policymakers.

An equally important facet of these advanced DEMS is the empowerment of consumers. The deployment of these systems at various points in the energy consumption chain gives consumers unparalleled insights into their energy use patterns. With real-time data at their fingertips,

consumers can assess their energy efficiency, understand the implications of their consumption habits, and make informed decisions to optimize their energy use.

This consumer-centric approach to energy management emphasizes the importance of evaluating energy efficiency based on key indicators. These indicators include the comparative energy consumption per product unit, which provides insights into the energy efficiency of production processes; energy wastages, which highlight areas for improvement and potential cost savings; and environmental impacts, which emphasize the broader ecological implications of energy consumption.

Integral to this discussion is the proposed Digital System for Assessing Energy Resource Efficiency (DSAERE). Developed within the scope of this dissertation, the DSAERE aims to be a comprehensive tool for evaluating energy efficiency. It has been meticulously designed to focus on the primary indicators mentioned above, ensuring a holistic approach to energy management. By harnessing the power of digital technologies and AI, the DSAERE promises to be an invaluable asset for both consumers and the energy industry at large, fostering a future of sustainable and efficient energy consumption.

REFERENCES

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. – Ташкент: Fan vatexnologiya, 2021. – 923 с.
2. Аллаев К.Р. Электроэнергетика Узбекистана и мира. – Ташкент: Fan vatexnologiya, 2009. – 463 с.
3. https://www.theworldcounts.com/
4. https://yuz.uz/news/elektr-energiyasi-taminoti-muammo-bor-echim-ham
5. Reis J., Amorim M., Melao N., Cohen Yu., Rodrigues M. Digitalization // A Literature Review and Research Agenda. – 2020. 10.1007/978-3-030-43616-2_47 p.
6. Marnay C., La, J., Stadler M., Siddiqui, A. Advances in the economics of energy systems and environmental policies: A homage to Welling (Willem) C. Boer // Energy. – 2012. – 37(1). – P. 1–6.
7. Mirzaei P.A., Azar A. A review of the role of energy monitoring and targeting in improving industrial energy efficiency // Journal of Cleaner Production. – 2019. –Vol. 216. – P. 429–440.
8. about.bnef.com
9. iea.org
10. Kulkarni S.S., Bhat S.R., Hunagund P.V. Artificial Intelligence-based Energy Management and Monitoring System: A Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 577, no. 1. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/577/1/012130
11. Ramalingam G., Meikandasivam S., Vijayakumar D. Comparison of Smart Energy Monitoring Systems in Real-time for Future Smart Grid. – 2019.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТА НА ВЫБОР ТИПА ЗАХВАТА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ БЛОКОВ

А.Э. Риф

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А3-05

Научный руководитель: А.О. Павлюк, к.ф.-м.н., и.о. директора НИЦ ВЭ ТПУ

К данному моменту на территории Российской Федерации были остановлены все промышленные уран-графитовые реакторы, а также часть блоков с энергетическими реакторами типа АМБ, АМ, ЭГП-6 и РБМК. До сих пор находятся в эксплуатации 8 энергоблоков РБМК и 3 ЭГП-6. При этом основным вариантом вывода из эксплуатации энергетических и некото-

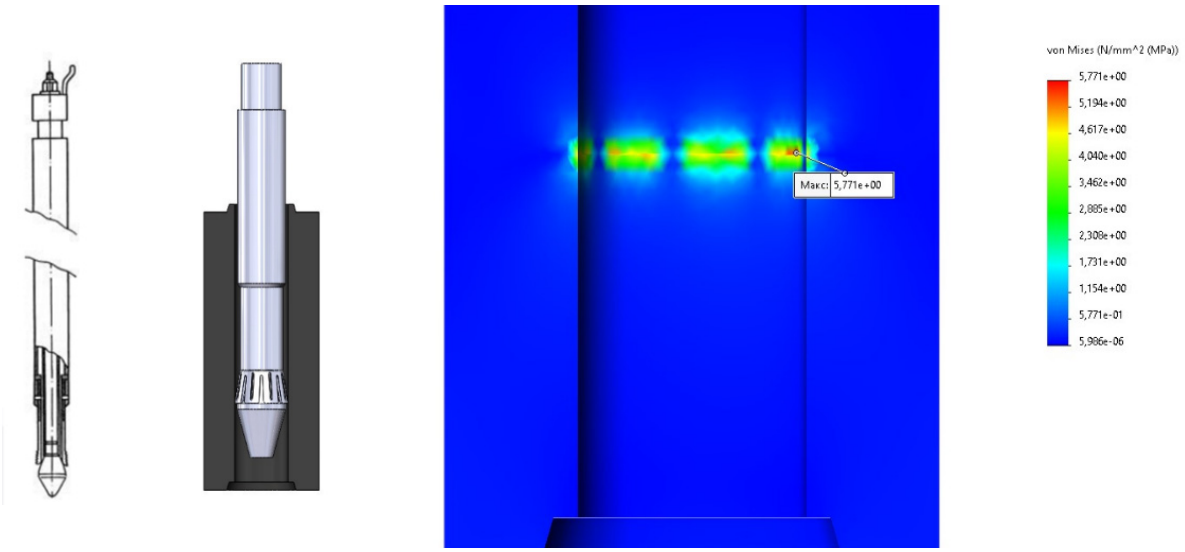
рых промышленных уран-графитовых реакторов (далее – УГР) является «немедленный демонтаж», который предполагает полное демонтирование конструкций реактора, в том числе и графитовой кладки.

Все УГР имеют схожие конструктивные особенности и элементы, однако устройство каждого УГР обладает различиями, которые оказывают существенное влияние на технологические подходы к их демонтажу. С одной стороны, особенности реакторов заключаются в их металлоконструкциях, способах размещения блоков в графитовой кладке, размерами самих блоков и их внутренних отверстий. С другой стороны, необходим учет состояния графитовых кладок после длительной эксплуатации, так как под радиационно-термическим воздействием происходит деформирование и искривление графитовых колонн, изменение физико-механических свойств графита как материала, образование трещин [1]. Данные изменения необходимо учитывать при разработке устройств, позволяющих проводить демонтаж графитовых кладок [2].

В России и мире в настоящее время разрабатываются различные устройства для извлечения блоков из графитовых кладок. Однако в силу технологической сложности процесса накоплен лишь небольшой практический опыт ликвидации УГР Таким образом, остается актуальной задача разработки эффективного устройства захвата и извлечения блоков из графитовой кладки УГР.

Целью данного исследования является определение влияния изменений физико-механических свойств графита после длительного периода эксплуатации на выбор типа устройства захвата и извлечения графитовых блоков. Для достижения данной цели был проведен анализ влияния изменений свойств графита в процессе эксплуатации на подходы к его извлечению, созданы 3D-модели трех типов захвата на основе прототипов устройств, разработанных в РФ, оценены создаваемые напряжения в графитовых блоках. Результаты исследования позволяют определить эффективный подход к демонтажу графитовых кладок российских УГР после длительного периода эксплуатации.

3D-модель цангового захвата позволяет оценить, какие средние напряжения могли возникнуть в графитовом блоке при локальных воздействиях (рис. 1).



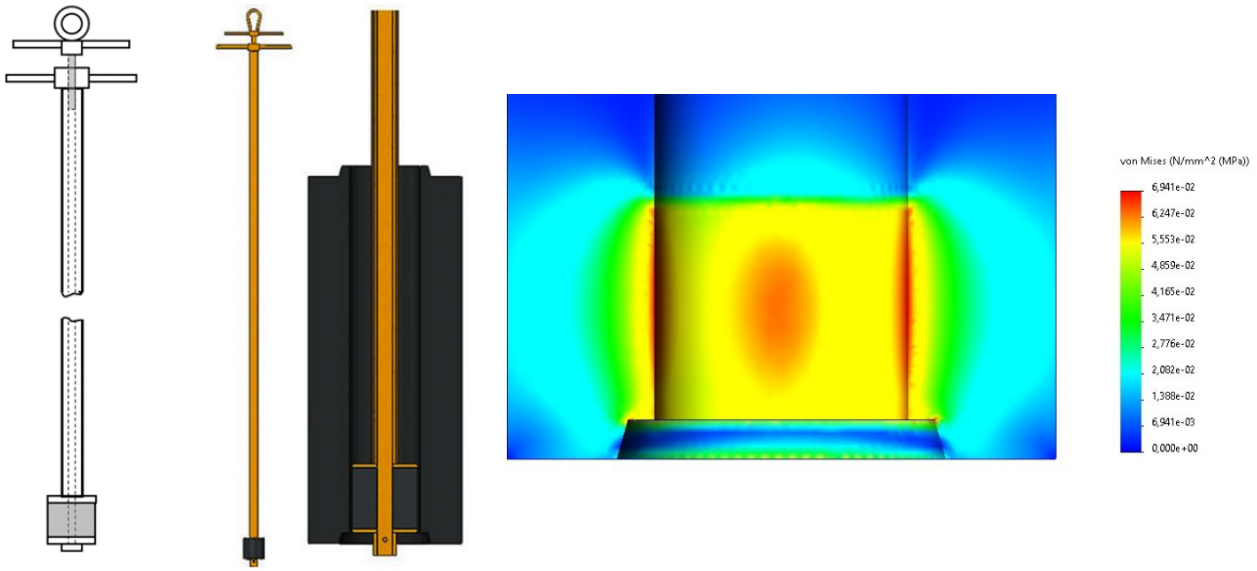
а *б* *в*

Рис. 1. Цанговый захват:
а – конструкция цангового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

Особенностью такого захвата является создание механического воздействия на внутреннее отверстие графитового блока по небольшим площадям, что значительно повышает риск разрушения блока.

Максимальное напряжение под воздействием цанги изнутри на графитовый блок по площади соприкосновения составляет 5,8 МПа. Предел прочности необлученного графита в направлении экструзии составляет 7,6 МПа, по горизонтали – 6 МПа. Однако в процессе окисления на всем протяжении эксплуатации реактора АМБ, предел прочности графита мог быть значительно снижен (вплоть до 50 %), что и привело к разрушению и осыпанию отдельных блоков. Таким образом, данный опыт показал, что цанговый тип захвата не подходит для захвата и извлечения графитовых блоков, находящихся длительное время в эксплуатации.

Приведенный опыт позволяет сделать вывод, что для нефрагментированных графитовых блоков более целесообразно использовать устройства, исключающие локальное влияние на внутреннее отверстие блока. Поэтому в ОДЦ УГР были испытаны 2 устройства, более совершенных по сравнению с цанговым: резиновый (рис. 2) и кулачковый захват (рис. 3) [3].



а *б* *в*

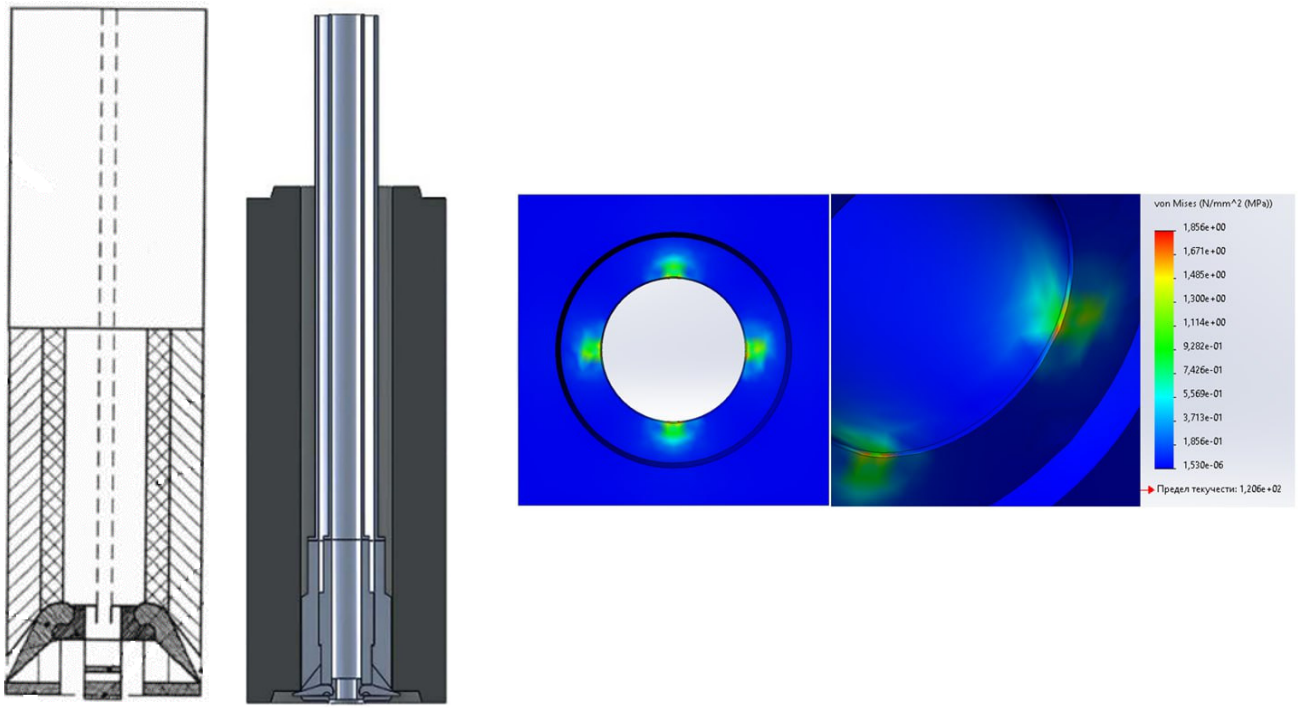
Рис. 2. Резиновый захват:
а – конструкция резинового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

Данные типы захватов характеризуются низкими значениями максимальных напряжений (резиновый – 0,07 МПа, кулачковый – 1,9 МПа), снижением пылеобразования и рисков дополнительного растрескивания и фрагментации блоков. Однако для резинового захвата на данном этапе необходимо обоснование влияния облучения на материал распорного наконечника (резину), кулачковый захват при этом полностью выполнен из стали, что не требует дополнительных исследований.

Приведенные устройства были успешно протестированы на макетных испытаниях, кулачковый захват впоследствии был опробован при извлечении графитовых блоков из кладки ПУГР АДЭ-5. Устройства показали свою работоспособность и эффективность, а, следовательно, могут быть применены при извлечении блоков в промышленных масштабах.

Таким образом, данное исследование показало, что на условия применения устройств извлечения оказывают влияние не только конструктивные особенности УГР, но и состояние

графитовой кладки за длительный период эксплуатации. Необходим учет изменения характеристик графита как материала в процессе его облучения, особенно там, где имеет место окисление графита, приводящее к его ускоренной деградации. Разрабатываемые устройства должны исключать локальное механическое воздействие на внутреннюю поверхность отверстия (место локализации внутренних напряжений графита), действовать в направлении экструзии (выше предел прочности), а также само устройство должно состоять из материалов, не подвергающихся негативному влиянию облучения.



а *б* *в*

Рис. 3. Кулачковый захват:
а – конструкция кулачкового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

На основе данного исследования в перспективе предполагается изучение механических воздействий на графитовые блоки, содержащие трещины или находящиеся в фрагментированном состоянии. А также разработка новых устройств и подходов к демонтажу графитовых кладок.

Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030 (проект № Приоритет -2030-НИП/ЭБ-039-375-2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виргильев Ю.С., Селезнев А.Н., Свиридов А.А., Калягин И.П. Реакторный графит: разработка, производство и свойства // Промышленные углеродные материалы. – 2006. – № 1. – С. 4–12.
2. Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Беспала Е.В., Риф А.Э., Кан Р.И. Зарубежный опыт и подходы к извлечению графита из уран-графитовых реакторов // Радиоактивные отходы. – 2023. – № 2 (23).
3. Патент РФ 2741765. Способ характеризации графитовых блоков ядерного реактора и устройство для его осуществления / Павлюк А.О., Кан Р.И., Котляревский С.Г., Михайлец А.М., Шевченко О.М., Шевченко А.О. Заявитель и патентообладатель Госкорпорация «Росатом» № 2020120170; заявл. 11.06.2020; опубл. 28.01.2021. Бюл. 4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПЛАНИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭНЕРГОСБЫТОВЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

А.В. Бец[1], Т.А. Григорьева[2]

Братский государственный университет,
ФЭиА, УТС, гр. ММЧМА-23[1];
ФЭиА, к.т.н., доцент кафедры УТС[2]

Повышается цена за электроэнергию для юридических лиц, что является актуальной проблемой в настоящее время. Актуальность данной проблемы определяется ролью электроэнергетики в развитии экономики всей страны.

В электроэнергетике цена – это тариф. В систему тарифов входят регулируемые тарифы и нерегулируемые тарифы. Для юридических лиц установлены нерегулируемые тарифы на электроэнергию. К нерегулируемым тарифам относятся тарифы, которые формируются на основании конкурентного отбора ценовых заявок или по соглашению розничного ранка и оптового. Законодательством предусмотрены шесть ценовых категорий [1].

Абсолютно все участники, которые пользуются электроэнергией и работают с ней, нуждаются в процессе прогнозирования электропотребления.

Насчитывается достаточно много экономических причин, доказывающие необходимость качественно прогнозировать электропотребление.

Планирование – оптимальное распределение ресурсов для достижения поставленных целей; деятельность (совокупность процессов), связанная с постановкой целей (задач) и действий в будущем [2].

Точное планирование энергопотребления даст возможность правильно загрузить энергосистемы, что приведет к минимальным затратам на производство энергии.

Планирование потребления электроэнергии и его точное прогнозирование крупными потребителями позволяет управлять расходами на покупки электроэнергии. Если регулировать загрузку оборудования, управлять производственными процессами, роботу переводить на часы с наименьшей стоимостью, в результате снижается себестоимость производства и оплата энергоснабжающим организациям.

Обязанности почасового планирования энергопотребления распределяются в зависимости от ценовой категории потребителей, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Ценовые категории и их учет

Ценовая категория	Коммерческий учет	Почасовое планирование
1	Интегральный (за месяц)	нет
2	Зонный (по зонам суток за месяц)	
3	Интегральный (за час)	
4		
5		Да
6		

Потребитель, анализируя свой режим потребления электроэнергии (за месяц, день, ночь, час), может самостоятельно выбрать ту ценовую категорию, которая больше всего ему подходит. Если потребитель выбирает пятую или шестую категорию почасовое планирование обязательно, что приводит к увеличению бизнес-процессов для предприятия.

Энергосбытовые организации – организации, осуществляющие в качестве основного вида деятельности продажу другим лицам произведенной или приобретенной электрической энергии [3].

Энергосбытовая организация осуществляет планирование самостоятельно, если предприятия сами не предоставляют им планируемое потребление. Планирование в таком случае возможно только по данным фактического потребления предприятий за предыдущие периоды. При решении данной задачи возникает масса сложных вопросов. Энергосбытовая организация не может предсказать – будет ли работать предприятие в том же режиме, как по аналогичному периоду прошлого года, или будет остановка на ремонт, будет ли сокращение производства и т. д.

Существует много факторов, которые влияют на потребление электроэнергии как промышленными организациями, так и населением в целом: погодные условия, в том числе температурный режим, время суток (светлое/темное), которые не учитываются энергосбытовыми организациями.

В настоящее время процесс прогнозирования основывается на опыт и интуицию работников.

Внедрение программного комплекса оптимизации расходов на электроэнергию на предприятиях позволяет:

1) построить и обучить модель прогнозирования;

2) собирать, обрабатывать и хранить исходные данные, которые не использует энергосбытовая организация (например, прогнозы климатических условий);

3) определять точность модели, исключая человеческий фактор и при необходимости запускать самокалибровку (автоматическое переобучение);

4) проводить «подготовку» данных (удаление заведомо ложных значений).

На рис. 1 отображен план действий энергосбытовых организаций в настоящее время, при отклонении планируемого и фактического энергопотребления.

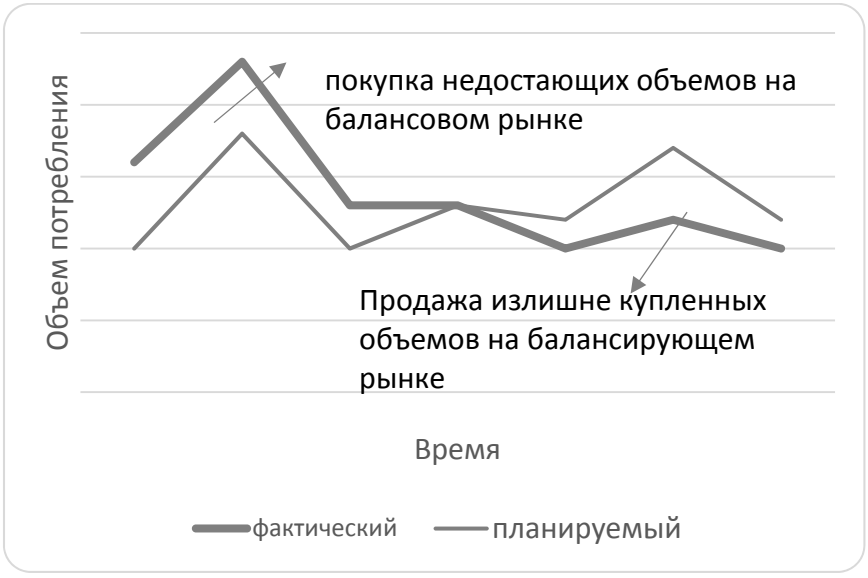


Рис. 1. Отклонении планируемого и фактического энергопотребления

Отклонение планируемого потребления от фактического приводит к разным последствиям, например, повышается износ в сетях, избыточные потери мощности, перегрев. Вследствие этого у электрооборудования сокращают срок службы. Также это может приводить к отключению линий и трансформаторов, к аварийным ситуациям.

При совпадении фактического и планируемого потребления конечная цена для потребителей будет минимальна. Любое отклонение в сторону приведет к повышению цены в разной степени.

На рис. 2 отображено планирование в энергосбытовой организации ООО «Иркутскэнергосбыт» в настоящее время и предложенные программы по ее автоматизации.

Для планирования расчетного месяца, из архива данный выгружается фактическое потребление прошлого месяца, прошлого месяца прошлого года и этого месяца прошлого года. По исходным данным вручную составляется таблица потребления по гр.м бизнес плана (бюджетные потребители, садоводы, котельные и т. д.). (предлагается автоматизировать данный процесс. Программа 3) На основе этих данный строится плановое потребление (Программа 1). Затем плановое потребление распределяется по гр.м бизнес плана и по ценовым категориям в процентном соотношении и загружается в 1С (Программа 2).

В соответствии с вышеизложенным можно сделать вывод, что точное прогнозирование потребления электроэнергии способствует достичь оптимальной цены за электроэнергию. Дальнейшие исследования должны быть посвящены развитию более точного планирования объемов потребления, т. к. в настоящее время планирование энергосбытовыми организациями не автоматизировано.

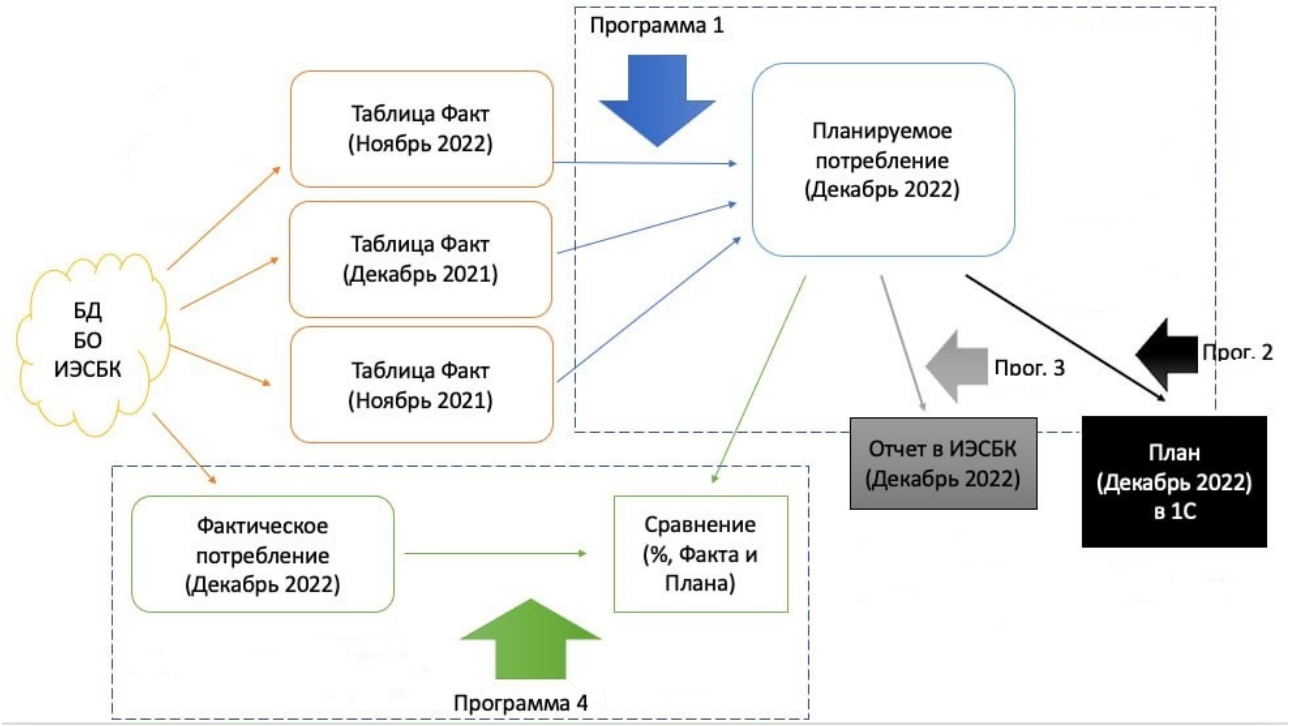


Рис. 2. планирование в энергосбытовой организации ООО «Иркутскэнергосбыт»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Консультант плюс. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 N 442 (ред. от 30.12.2022) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130498/ (дата обращения: 17.10.2023).
2. Википедия. Сводная энциклопедия. Планирование. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Планирование (дата обращения: 17.10.2023).
3. Консультант плюс. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 N 35-ФЗ. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения: 17.10.2023).

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ «САПФИР» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОДОГЕНЕРАТОРА AMS

М.Э. Крылов

ООО «ДЖЭТ ЛАБ», г. Москва,
MEKrylov@get-lab.ru

В статье рассмотрена возможность использования кодогенераторов. CMS и AMS для моделирования теплогидравлических расчетов двухфазных потоков смесей, содержащих произвольные вещества с различными теплофизическими свойствами и индивидуальными линиями насыщения (кипения) для каждого компонента в рамках 0D (1D) математических моделей (далее ММ). ММ представляет моделируемую систему (объект) в виде нодализационной схемы, в которой параметры и зависимости сосредоточены на рёбрах и в узлах (нодах) графа.

Кодогенератор CMS предназначен для расчета параметров реальной теплогидравлической сети любой конфигурации. Подразумевает моделирование различных физических процессов и явлений, которые могут возникать в разных режимах эксплуатации тепломассобменного оборудования различного назначения. AMS является модификацией кода CMS. CMS и AMS имеют одинаковую архитектуру и представляют собой пакеты модулей, которые функционируют в исполнительной системе ESUSDS с использованием графической оболочки ПО «САПФИР» (Система автоматического проектирования Физических Инженерных Расчетов).

Модернизированный кодогенератор позволяет проводить расчет ММ, полученных по средствам использования блоков библиотеки CMS, в режиме реального времени, а также в ускоренном формате. В настоящее время, кодогенератор AMS проходит экспериментальное тестирование на нескольких пилотных проектах, включая проекты с использованием жидкометаллического и жидкосолевого теплоносителя, а также ректификационной колонны для нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и станции с обессоливающей установкой морской воды. Все вышеуказанные проекты были верифицированны с действующим оборудованием с высокой точностью по основным параметрам менее 1 % и внедрены на объекты в рамках цифрового двойника или полномасштабного (аналитического) тренажера.

Целями данной работы являются:

- изменение алгоритмических уравнений смесей газов и жидких фаз, а также их переходных процессов;
- добавление свойств новых веществ для моделирования атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждающим реактором и химико-технологической частью (АЭТС с ВТГР и ХТЧ) и возможностью внедрения их в будущие проекты компании.

Внедрение свойств для веществ происходит посредством внесения фундаментальных законов и физических формул на языках C/C++, Java в рамках сомоделирования по протоколу FMI. Значения для внесения формул принимаются из справочных источников по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [1–3].

Состав смесей для каждого типа энергетического предприятия принимаются индивидуально и в соответствии с утвержденной документацией.

Для тренажеров АЭС:

- вода и водяной пар;
- борная кислота (жидкость) и её пары;
- неконденсируемые газы: кислород, азот, водород.

Таким образом, в данной задаче будет 2 пары кипящих жидкостей и конденсирующихся газов, 3 неконденсирующихся газа и 0 некипящих жидкостей.

Для тренажеров ТЭЦ:

- вода и водяной пар;
- мазут (некипящая жидкость);
- уголь (некипящее вещество);
- газы: кислород, азот, водород, CO, CO_2, CH_4.

Каждый параметр проходит многоступенчатое тестирование:

- *модульное тестирование:* Этот метод фокусируется на тестировании отдельных модулей или функций скрипта. Здесь каждая функция или модуль тестируется независимо от остальных. Модульные тесты обычно проверяют правильность работы функций, обработку исключений и другие аспекты функциональности модуля;
- *интеграционное тестирование:* В этом методе тестируется взаимодействие различных модулей или компонентов скрипта. Целью является проверка правильности передачи данных и взаимодействия между модулями;
- *функциональное тестирование:* Этот метод проверяет, выполняет ли скрипт ожидаемые функции и дает правильные результаты. Здесь тестируются различные сценарии использования скрипта, чтобы убедиться, что он работает согласно заданным требованиям;
- *тестирование производительности:* В этом методе проверяется производительность скрипта, его скорость выполнения и использование ресурсов. Тестирование производительности может включать в себя измерение времени выполнения скрипта, его отклика на различные нагрузки и оптимизацию для улучшения производительности;
- *регрессионное тестирование:* Этот метод используется для проверки, не возникают ли новые ошибки или проблемы после внесения изменений в скрипт или его окружение. Регрессионное тестирование включает повторное выполнение предыдущих тестовых сценариев для обнаружения потенциальных проблем.

Только после такого сценария код анализируется и внедряется к действующим модулям.

Обычно, таблицы со значениями вводятся в качестве массивов данных. В целях оптимизации затрачиваемой памяти вычислительной машины (сервера или персонального компьютера) в рамках расчета ММ и увеличения точности рассчитываемых значений принято решение о замене массивов на интерполяционные, апроксимационные уравнения и уравнения, рассчитанные при помощи метода наименьших квадратов (МНК). В качестве методики используются формула для определения стандартных ошибок оценок коэффициентов множественной регрессии, представленной в формуле (1):

$$s.e.(\beta_j) = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 (X'X)^{-1}_{jj}}, j = 0, \dots, k \quad (1)$$

где $s.e.(\beta_j)$ – стандартная ошибка оценки коэффициента регрессии; σ_ε^2 – среднеквадратичная ошибка регрессии (оценка дисперсии остатков); $(X'X)^{-1}{}_{jj}$ – транспонированная обратная матрица независимых переменных.

Формула позволяет узнать разброс значений коэффициента вокруг истинного значения и проверить статистическую значимость коэффициентов для построения доверительных интервалов и статистических выводов в множественной регрессии между нескольких матриц независимых переменных.

Для расчёта параметров ММ используются различные численные методы. Численные методы можно разделить на две категории явные и неявные. Явные методы предполагают независимое выполнение операций. Они меньше зависят от масштабов модели и хорошо подходят для задач, где строго задана последовательность операций. Обычно явные методы обладают слабой устойчивостью и плохо подходят для решения жёстких задач. Неявные методы

предполагают совместное выполнение всех операций. Для этого составляется единая матричная задача, которая решается совместно. Неявные методы более устойчивы при решении жёстких задач, но вычислительно тяжелы при моделировании систем с большим количеством степеней свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Рипол Классик, 1963.
2. Сычев В.В. и др. Термодинамические свойства гелия. – 1984.
3. McCarty R.D. Thermophysical Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K with Pressures to 1000 Atmospheres. – US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1972. – T. 631.

METHODS OF TEACHING TECHNICAL SUBJECTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

N.N. Kurbonov, R.Sh. Kurbonova

Tashkent State Technical University,
Faculty of Electric Power, Department of Power Supply

Scientific Supervisor: I.U. Rakhmonov, DSc. Professor, Head of Department of TSTU

Abstract. In an era where digital transformation is paramount, the integration of artificial intelligence (AI) within the educational sector has significantly altered traditional teaching methodologies, especially in technical education. Technical subjects, known for their complexity and continuous evolution, pose distinctive challenges for both educators and students. Conventional teaching methods, although fundamental, are often unable to meet the varying needs of learners or keep up with the swift advancements in technology. The implementation of AI in teaching not only promises to enhance the learning process but also offers a unique opportunity for non-native English speakers to grasp technical concepts in English more effectively.

This thesis explores the innovative methods of employing AI to teach technical subjects through English, investigating its advantages, potential difficulties, and the direction of this technological-educational amalgamation. The focus is on how AI-driven tools can facilitate better understanding and retention of technical material for students learning in a non-native language. Key areas of discussion include:

1. *Dual-focus AI Chatbots and Conversational Agents*: AI-driven programs that assist in language acquisition while clarifying technical concepts in English.
2. *AI-powered Natural Language Processing (NLP):* Tools that aid in comprehending and generating technical terminology and descriptions in English.
3. *Speech Recognition Software:* AI applications that help learners improve their technical English vocabulary and pronunciation.
4. *Adaptive Learning Systems:* Platforms that customize technical content in English according to the learner's linguistic and subject matter proficiency.
5. *Predictive Analysis in Learning:* AI's role in forecasting learning challenges and performance in technical subjects taught in English.
6. *Automated Technical Content Generation:* AI's ability to produce and translate complex technical materials into simplified English for educational purposes.
7. *Interactive Language Learning Games:* AI-infused educational games that help reinforce technical knowledge through English language interaction.

8. *Translation and Interpretation Tools:* The support provided by AI in translating technical materials for learners and aiding in real-time comprehension.

9. *Sentiment Analysis for Technical Communication:* AI's role in teaching the emotional and contextual nuances of technical terms in English.

10. *Immersive Learning with VR and AR:* The use of AI to create virtual environments for practising technical scenarios in English.

The thesis also examines how neural network architectures like Feedforward Neural Networks, Recurrent Neural Networks (RNNs), Long Short-Term Memory networks (LSTMs), Gated Recurrent Units (GRUs), and Transformer Architectures, including BERT and GPT models, are employed to facilitate these AI-driven language teaching tools. Here's a breakdown of some commonly used neural network architectures in this context:

1. *Feedforward Neural Networks (FNN):*
   - Description: These are the simplest forms of artificial neural networks. They consist of an input layer, one or more hidden layers, and an output layer. While not commonly used for advanced chatbot tasks, they serve as a foundational concept for more complex networks.
2. *Recurrent Neural Networks (RNN):*
   - Description: RNNs have loops that allow information to be passed from one step in the network to the next. This makes them particularly useful for sequences, such as sentences in natural language processing (NLP). However, they suffer from issues like the vanishing gradient problem.
3. *Long Short-Term Memory (LSTM):*
   - Description: A type of RNN that's designed to remember long-term dependencies in a sequence, making them more effective for tasks like language modelling and generation. LSTMs are widely used in chatbot development to understand and generate coherent responses.
4. *Gated Recurrent Units (GRU):*
   - Description: Another variation of RNNs, GRUs are similar to LSTMs but have a different gating mechanism. They can often achieve comparable performance to LSTMs with fewer parameters.
5. *Transformer Architectures:*
   - Description: Introduced in the «Attention is All You Need» paper, transformers use self-attention mechanisms to weigh input differently, making them highly effective for NLP tasks. BERT, GPT, and T5 are examples of models based on the transformer architecture.
6. *Convolutional Neural Networks (CNN):*
   - Description: While CNNs are primarily known for image processing, they have been applied to NLP tasks, including in chatbots, to detect hierarchical patterns in textual data.
7. *Sequence-to-Sequence (Seq2Seq) Models:*
   - Description: These models consist of an encoder and a decoder. The encoder processes the input sequence (e.g., a question from a user), and the decoder generates an output sequence (e.g., the chatbot's response). Both encoder and decoder usually use RNNs or LSTMs.
8. *Attention Mechanisms:*
   - Description: Attention allows models, especially Seq2Seq models, to focus on specific parts of the input when producing output, enhancing the relevance and coherence of generated responses.

Conclusion

The synergy between AI and English language teaching presents a revolutionary step in technical education. The methodology outlined in this paper aims to offer educators and learners a

comprehensive approach to overcoming the language barrier in technical disciplines, enabling a broader understanding of the subjects at hand. The future of technical education lies in harnessing AI to bridge the gap between complex technical concepts and English language proficiency.

References

1. Aiken M., Balan S. Artificial Intelligence in Education: The Integration of AI and Language Learning. – New York, NY: Language Learning Press, 2021.
2. Chen J.Q., Zou D. Adaptive Learning Systems in Technical Education: A Review of the Literature // Educational Technology Research and Development. – 2019. – Vol. 67(4). – P. 853–879. DOI:10.1007/s11423-019-09672-1.
3. Goldberg Y. Neural Network Methods for Natural Language Processing // Synthesis Lectures on Human Language Technologies. – 2017. – Vol. 10(1). – P. 1–309. DOI:10.2200/S00762ED1V01Y201703HLT037.
4. Li W., Gaustad T. AI-Driven Chatbots in Education: A Resource for Teaching Technical Subjects in a Second Language // Journal of AI Research in Education. – 2022. – Vol. 3(2). – P. 45–63.
5. Nguyen H., Fussell S.R. Speech Recognition Technology in Language Learning: Applications and Challenges // Computer Assisted Language Learning. – 2020. – Vol. 33(5–6). – P. 529–555. DOI:10.1080/09588221.2019.1648296.
6. Patel R., Zaveri M. The Role of Predictive Analysis in Customized Education: A Pathway to Personalized Learning // International Journal of AI in Education. – 2023. – Vol. 13(1). – P. 112–118.
7. Vasquez E. Virtual and Augmented Reality in Technical Education: The Next Frontier in Language Immersion // VR in Education Quarterly. – 2022. – Vol. 6(3). – P. 14–19.
8. Wei L., Hindle A. Transformative Approaches to Teaching Technical Subjects in English Using AI // Global Journal of Engineering Education. – 2021. – Vol. 23(1). – P. 12–22.
9. Zhou M., Brown D.J. Sentiment Analysis in Language Learning: A Novel Tool for Understanding Learner Emotions // Language Learning & Technology. – 2020. – Vol. 24(2). – P. 45–58.
10. Ziegler N.A. Translation Tools in Language Learning: Beyond the Basics // Language Learning Journal. – 2021. – Vol. 49(4). – P. 435–450. DOI:10.1080/09571736.2020.1743225.

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРАМИ

Д.Д. Поснов, А.Д. Токарев

Ульяновский государственный технический университет,
Эп и АПУ, гр. ЭАмб-1

Научный руководитель: Я.К. Старостина, к.т.н., доцент Эп и АПУ УлГТУ

Нейросетевой регулятор – это система автоматического управления, на основе нейросети, которая реализует определенные операции по обучающему алгоритму.

Регулятор на базе контроллера, реализующего простейшие действия можно получить систему многоуровневый параллельных вычислений с множеством обратных связей.

Нейрорегулятор может включать в себя множество различных систем, имеющих свою структуру. К подобным системам относятся:

- система регулирования с обратными связями;
- система управления с опорной моделью, представляющая собой многоуровневую систему регулирования, которая применяется в том случае, когда математическое описание объекта регулирования точно неизвестно;
- система предиктивного регулирования, представляющая собой сложную нейронную сеть, которая может предугадывать определенные события;
- система управления с линеаризацией обратных связей, которая позволяет компенсировать нелинейности в объекте.

Разберем один из часто встречаемых методов нейросетевого регулирования – это подражающее регулирование. Основной составляющей подражающего управления является нейросеть, которая учится на основе данных уже существующего регулятора. Выборка для обучения формируется на основе значений входных и выходных данных регулятора во время нормального режима работы объекта управления.

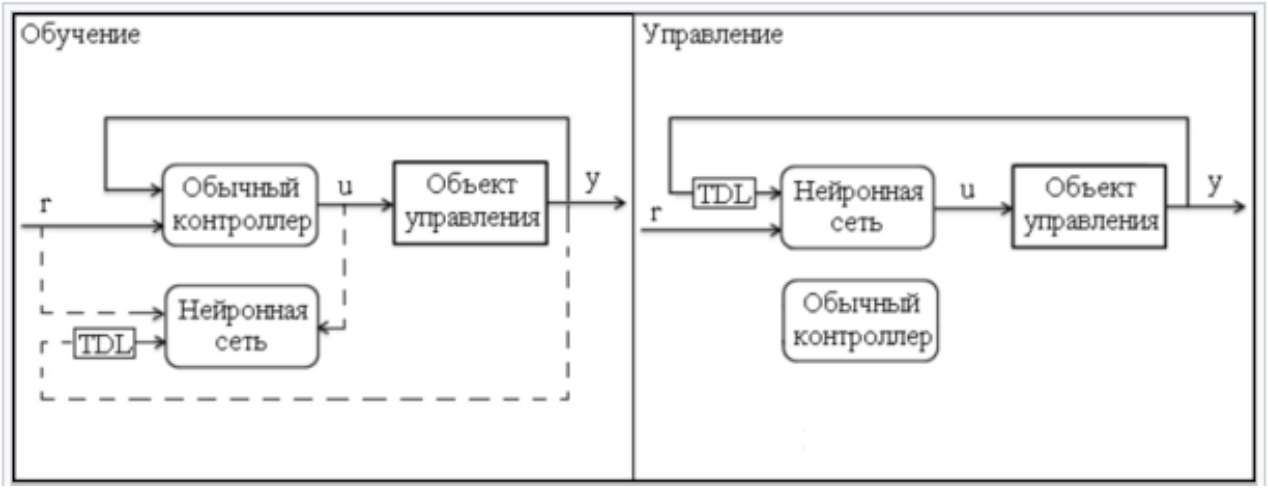


Рис. 1. Схема подражающего нейроуправления

Нейронная сеть может быть обучена по одному из методов, применяя предоставленную выборку. После процесса обучения, нейросеть способна точно воспроизводить работу регулятора, на основе которой осуществлялось обучение. В результате, нейронная сеть может быть интегрирована в систему управления, заменяя предыдущий регулятор.

Однако, следует отметить, что система на основе подражающего регулирования является наиболее легким способом применения нейросетей в АСУ – автоматических системах управления. Тем не менее, данный метод имеет ряд недоработок, основным из которых является необходимость наличия заранее настроенного регулятора, который будет применяться для моделирования обучающей выборки. В результате, нейросетевой контроллер не всегда способен обеспечить более эффективное управление, чем исходный регулятор.

В управлении нейросетями применяют множество методов инверсного управления, но в основе данного метода лежит система с прямым инверсным управлением. В данной системе используется случайные процессы в качестве выходных сигналов объекта управления и выходных значений для обучающей выборки.

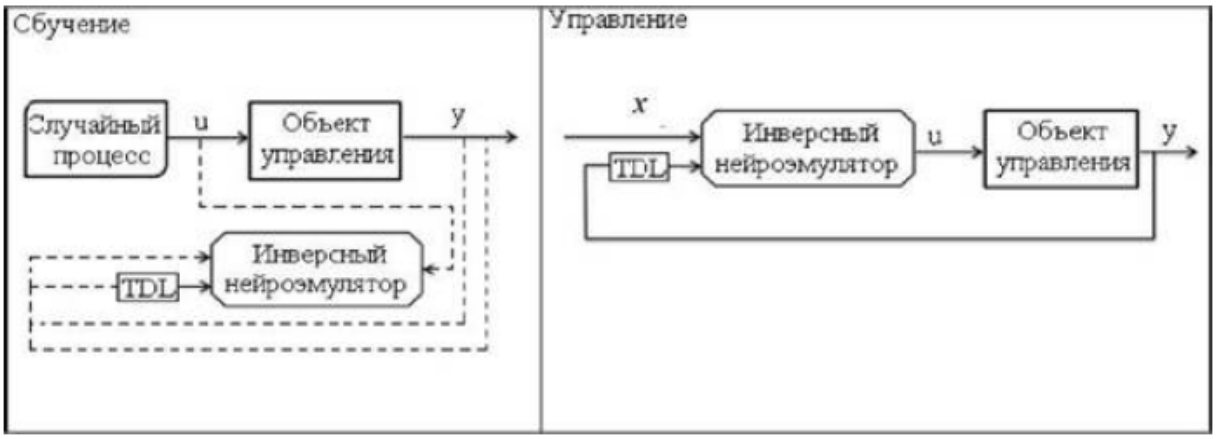


Рис. 2. Схема прямого инверсного управления

Выходные данные для контроллера становятся входными для нейросети, а для обучения применяется метод обратного распространения ошибки. После обучения, нейронная сеть способна генерировать значения управляющего воздействия в зависимости от желаемого выхода объекта управления. То есть, нейронная сеть может производить действия, которые приведут объект управления в заданное состояние.

Нейронная сеть, обученная таким образом, называется нейроэмулятором.

Гибридное нейроуправление – это симбиоз стандартных регуляторов классической теории регулирования и нейросетевых контроллеров.

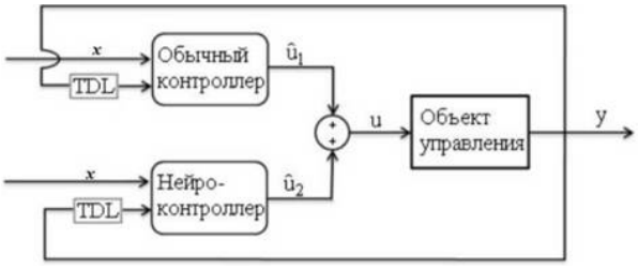


Рис. 3. Параллельное нейрорегулирование

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spravochnick.ru: Нейросетевой регулятор. [Электронный ресурс]. – URL: https://spravochnick.ru/avtomatizaciya_ tehnologicheskih_processov/neyrosetevoy_regulyator/ (Дата обращения 02.11.2023).
2. Emkelektron.webnode.page: Интеллектуальные системы управления на основе искусственных нейронных сетей. [Электронный ресурс]. – URL: https://emkelektron.webnode.page/news/intellektualnye-sistemy-upravleniya-na-osnove-iskusstvennykh-nejronnykh-setej/ (Дата обращения 02.11.2023).
3. Макаренков В.М., Азябин С.В., Говердовский А.Д. Современные нейроконтроллеры: обзор решений и анализ возможностей для применения в интеллектуальных системах // Сборник научных трудов. 14-я молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2012». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 25–26 апреля 2012 г. – С.159–164.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ В СРЕДЕ MATLAB

М.С. Исоев

Казаснский государственный энергетический униеврситет,
ИЭЭ, РЗА, гр. АУСм-1-22

Научный руководитель: Ю.В. Писковацкий, к.т.н., доцент ИЭЭ КГЭУ

Дифференциально-фазная защита – основная защита воздушной линии электропередачи с абсолютной селективностью. Принцип работы основан на сравнении фаз токов с обеих сторон линии с помощью полукомплектов БМРЗ-ДФЗ, установленных на противоположных концах. Полукомплекты соединены друг с другом либо по ВЧ, либо по ВОЛС каналам связи [1]. Разработка модели, которая реализует алгоритм защиты линии на основе дифференциальной защиты, проведение успешных экспериментов для демонстрации корректности работы модели поможет понять логику защиты и принцип работы БМРЗ-ДФЗ. Для этого используется упрощенная структурная схема дифференциально-фазной защиты, которая изображена на рис. 1, где ОМ – орган управления передатчиком или манипуляции; ОСФ – орган сравнения фаз токов.

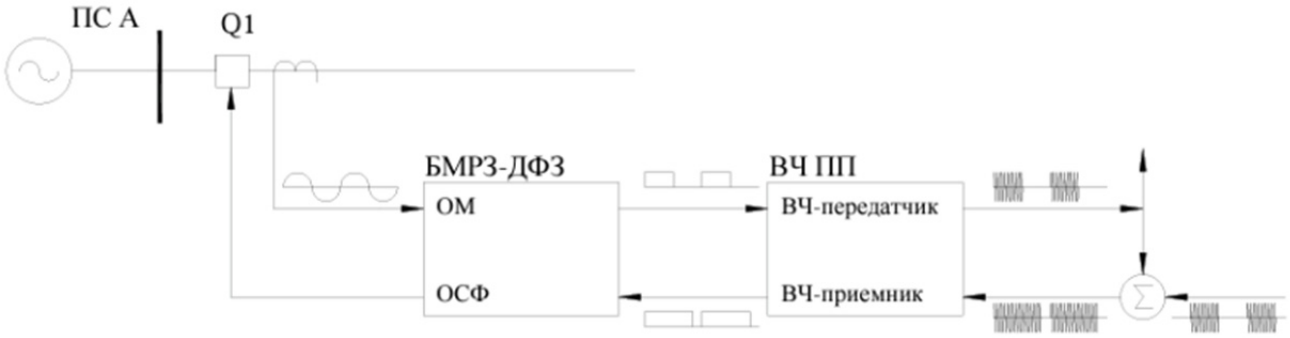


Рис. 1. Структурная схема дифференциально-фазной защиты

На рис. 2 изображена упрощенная схема взаимодействия двух полукомплектов дифференциально-фазной защиты. При внешнем коротком замыкании в точке К1 токи, протекающие по двум концам защищаемой линии, будут находиться в противофазе, сдвинуты друг относительно друга на 180°. Это приведет к образованию сплошного сигнала в высокочастотном канале связи и вызовет отказ защиты.

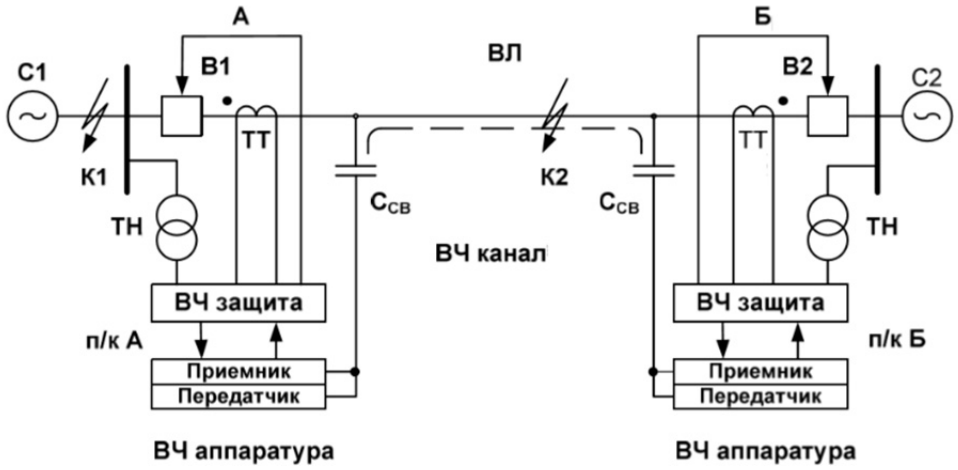


Рис. 2. Упрощенная схема взаимодействия двух полукомплектов дифференциально-фазной защиты

При обрыве в точке К2, что соответствует внутреннему короткому замыканию, токи, протекающие по двум концам защищаемой линии, будут синфазными и почти равными, что приводит к формированию прерывистого сигнала – меандра в высокочастотном канале связи, и защита срабатывает.

Для работы была создана модель защищаемой линии и блок дифференциально-фазной защиты в программном комплексе MATLAB. Модель со следующими параметрами: $U_{\text{С}}$ = 110 кВ; l = 95 км; уставка органа управления передатчиком или манипуляции (ОМ) по коэффициенту комбинированного фильтра токов K_{Φ} = 3,0; уставка пускового органа (ПО) (отключающая) для каждого из полукомплектов $I_{\text{л откл}}$ = 79,7 А; уставка органа сравнения фаз токов (ОСФ) по углу, при котором происходит блокирование действия защиты на отключение, регулируется в пределах ±40° до ±65°; уставка длительности скважности: половина периода = 0,01 c = 180°. Срабатывание при наличии скважности длительностью более 20 % (примерно 40°) от половины периода (t = 0,008 с); изображена на рис. 3.

В работе был проведен ряд экспериментов, а именно: 1. Короткое замыкание в точке К1 – однофазное КЗ на землю в середине линии; 2. Короткое замыкание в точке К2 – двухфазное КЗ в конце линии; 3. Короткое замыкание в точке К3 – трехфазное КЗ со стороны источника.

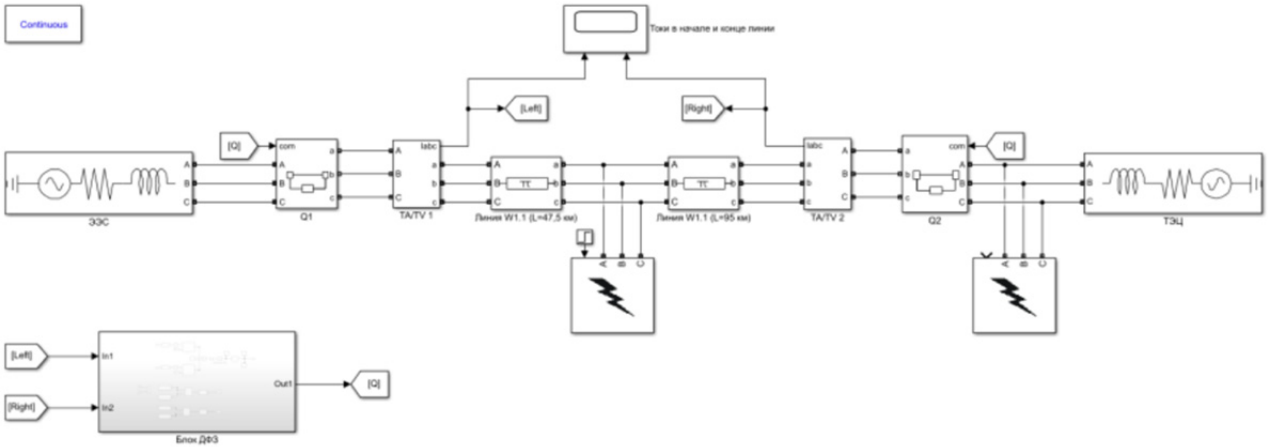


Рис. 3. Модель сети в MATLAB

В каждом эксперименте были получены осциллограммы, на которых виден первичный ток фаз A,B,C; ток на входе пускового органа, ток сложения токов I_1 и I_2; ВЧ импульсы на приемнике.

Поскольку схема симметрична, измерения проводились только для одного из полукомплектов.

Осциллограммы при коротком замыкании в точке К1 изображены на рис. 4 и 5 и при КЗ в точке К3 на рис. 6 и 7.

После проведения серии экспериментов и анализа осциллограмм можно сделать вывод, что разработанный алгоритм дифференциальной защиты по фазе успешно срабатывает при коротком замыкании в пределах защищаемой линии, но не срабатывает при внешнем повреждении.

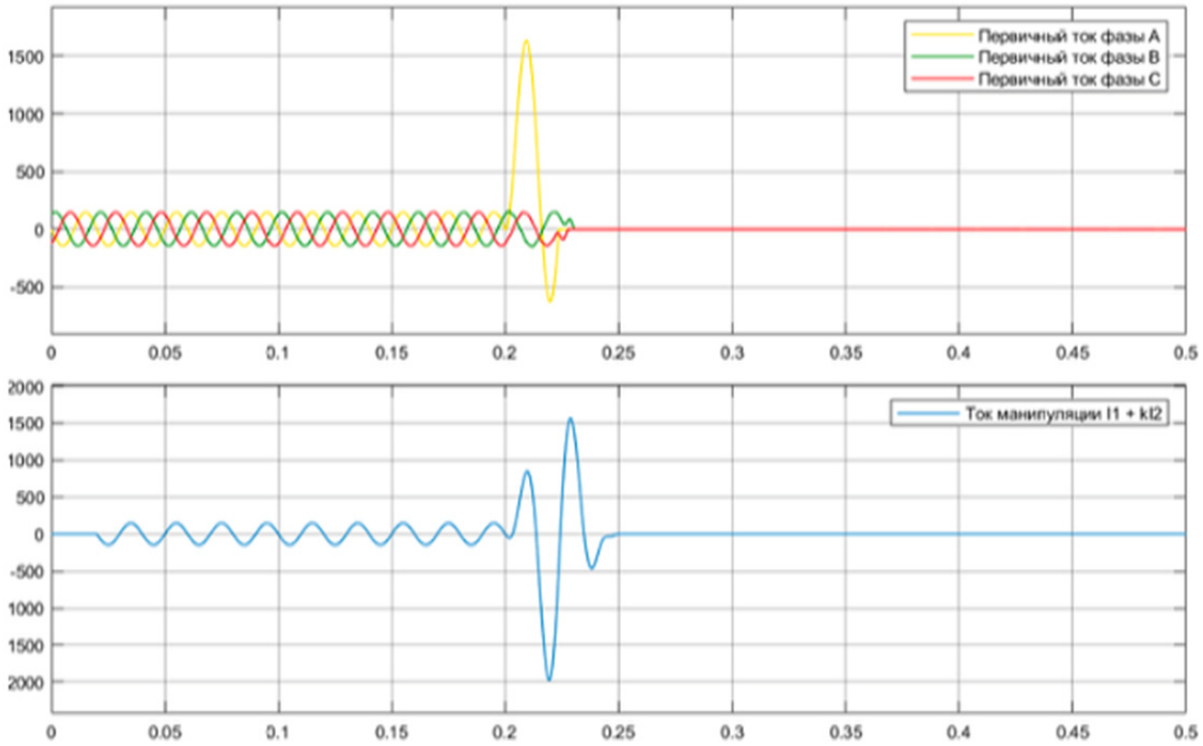


Рис. 4. Осциллограмма при КЗ в точке К1

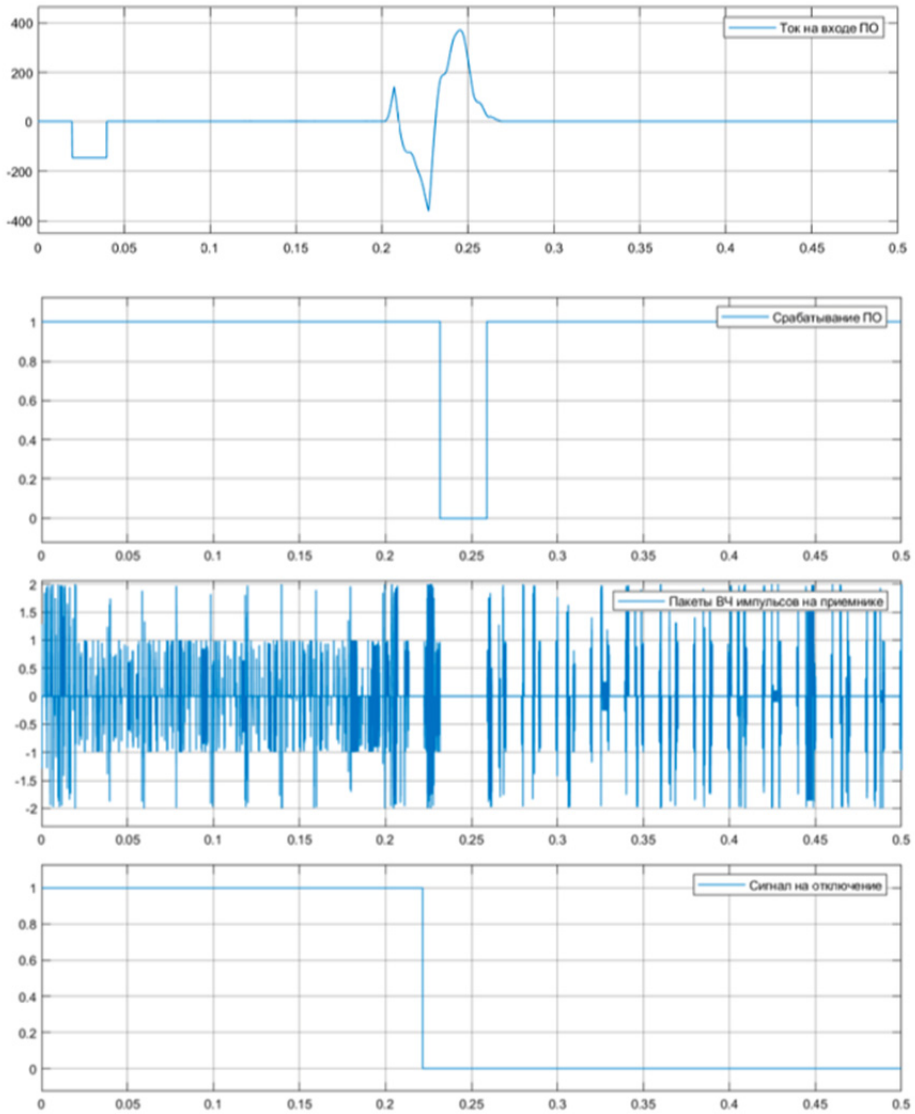


Рис. 5. Осциллограмма при КЗ в точке К1

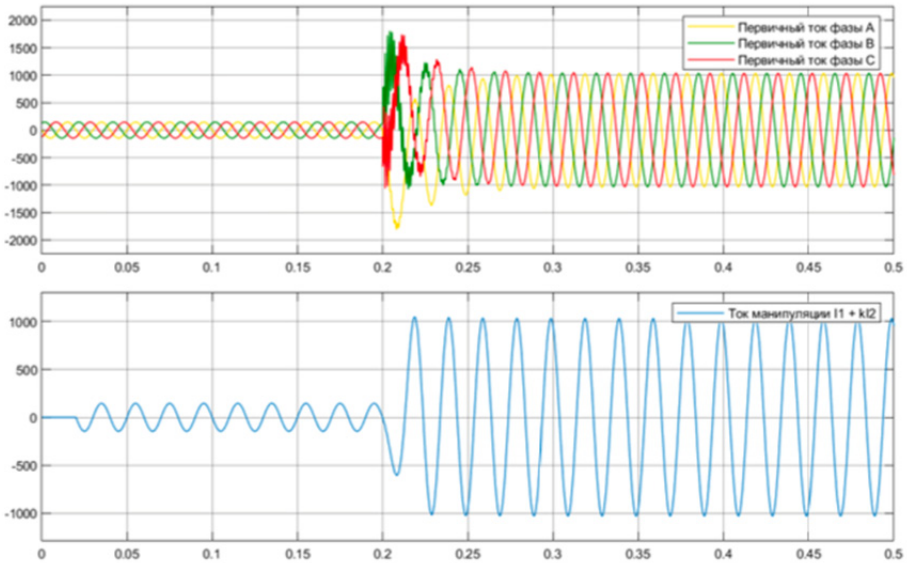


Рис. 6. Осциллограмма при КЗ в точке К3

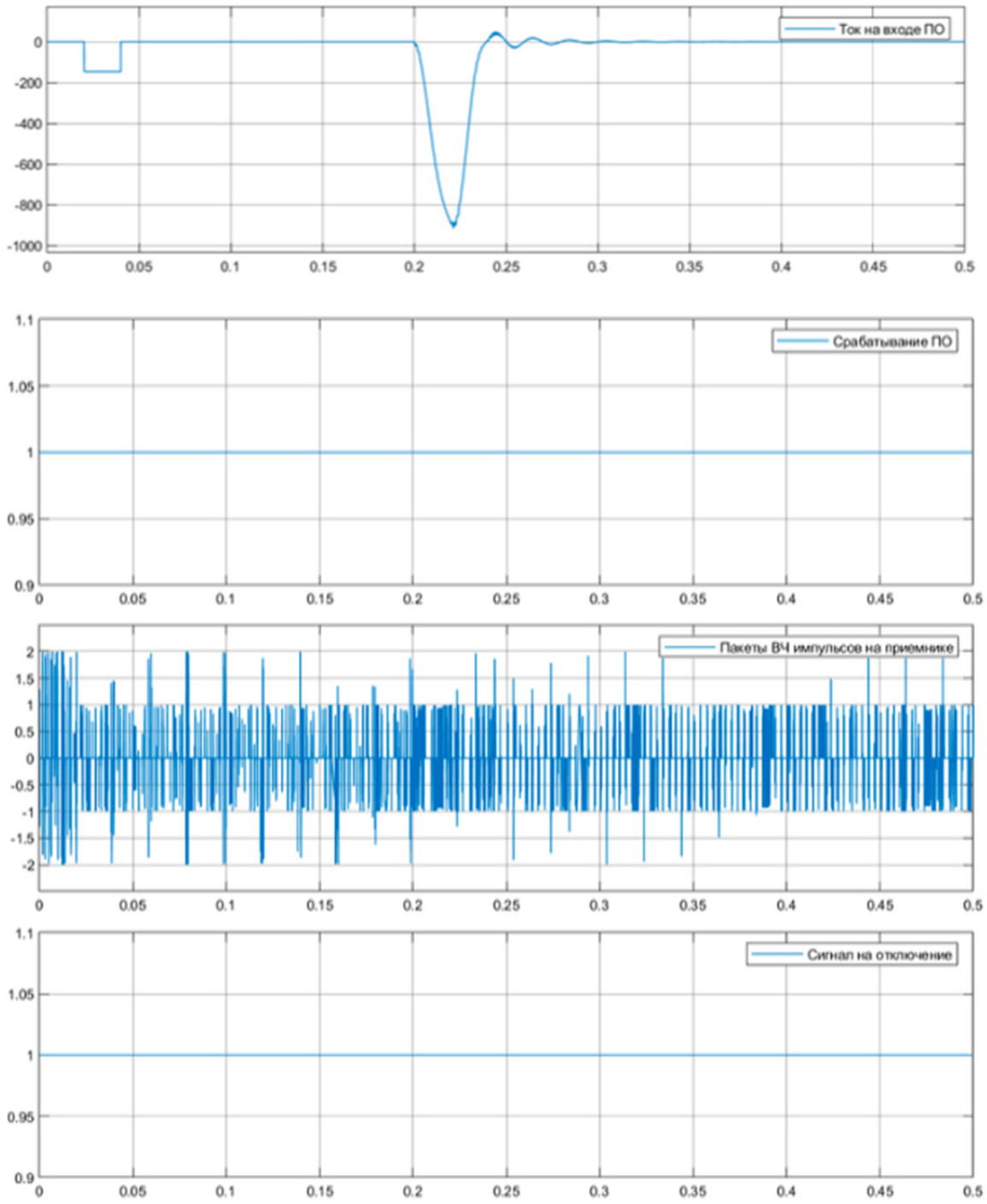


Рис. 7. Осциллограмма при КЗ в точке КЗ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО ДИВГ.648228. .080-14.03 РЭ1. Блок микропроцессорныой релейной защиты БМРЗ – ДФЗ-51. Руководство по эксплуатации. – СПб.: НТЦ Механотроника, 2020.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. Глава 3.2, раздел 3. – М. : Ростехнадзор, 2010. – 411 с.
3. Гранская А.А. Применение системы векторных измерений на цифровой подстанции // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика, 2023. – С. 348–351.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Н.М. Лоиков

Казанский государственный энергетический университет,
ИЭЭ, РЗА, гр. АУСм-1-22

Научный руководитель: А.М. Гатауллин, к.т.н., доцент РЗА ИЭЭ КГЭУ

Известно, что обнаружение частичных разрядов (ЧР) в высоковольтном электрооборудовании может осуществляться несколькими способами, включая регистрацию электромагнитных волн, акустических сигналов, электрических сигналов и по характеристам оптического излучения. В данной работе основное внимание уделяется разработке метода регистрации ЧР с помощью датчиков ультравысокочастотного (УВЧ) диапазона электромагнитного излучения (ЭМИ).

Частичный разряд – это разновидность искрового разряда, возникающего при частичном перекрытии небольшого участка изоляции. ЧР характеризуются малой мощностью (порядка милливатт), увеличение частоты следования ЧР приводит к нагреву и разрушению изоляции. В тоже время по характеристикам ЧР можно судить о предпробойной ситуации [1]. Обнаружение и локализация ЧР в силовых трансформаторах важны с точки зрения предотвращения выхода из строя высоковольтного электрооборудования [2, 3].

Регистрация и анализ характеристик ЧР в УВЧ диапазоне ЭМИ широко используется для мониторинга высоковольтных трансформаторов за счет уменьшения уровня шумов. Кроме того, затухание УВЧ сигналов в масляной изоляции минимально, что обеспечивает высокую чувствительность к ЧР в условиях эксплуатации. В лабораторных условиях источником образцовых ЧР служит установка типа поверхность-игла. Обычно регистрация ЧР осуществляется в частотном диапазоне от 0,4 до 3 ГГц. Регистрация ЧР в УВЧ диапазоне ЭМИ для тестирования силовых трансформаторов на наличие дефектов имеет высокую чувствительность по сравнению с другими методами [4, 5].

Типичная установка системы мониторинга УВЧ, показанная на рис. 1, *a*, состоит из фильтрованных и усиленных сигналов датчиков, которые затем обнаруживаются и оцифровываются. Процесс оцифровки обеспечивает динамическое использование сигналов, а информация об опорной фазе и тактовой частоте регистрируется вместе с оцифрованными данными. Считается, что зарегистрированные импульсы ЧР исходят из точечного источника в реальном времени, при этом амплитуда импульса калибруется по энергии сигнала УВЧ. Конденсатор связи делает это, позволяя передавать УВЧ-сигналы, одновременно фильтруя низкочастотный шум, как показано на рис. 1, *b*. Поскольку средства тестирования не содержат коронного разряда, их можно подключать к трансформаторам различной мощности.

Типовая установка системы мониторинга изоляции по характеристикам ЧР в УВЧ диапазоне ЭМИ состоит из специальных электромагнитных антенн, которые крепятся на бак трансформатора, для увеличения соотношения сигнал/шум применяют фильтры и усилители. Данные, как правило, передаются в цифровом виде, которые, кроме данных ЧР, включают значения о фазе приложенного напряжения и тактовой частоте для построения амплитудно-фазовых диаграмм (АФД) и спектров ЧР. Считается, что ЧР в трансформаторе исходят из точечного источника, связанного с дефектом. В лабораторных условиях роль такого источника играет модельная система поверхность-игла, при этом ЧР регистрируют как с помощью телескопической антенны с последующей обработкой сигнала на персональном компьютере, так и с помощью специальных антенн различного диапазона частот [6].

Обнаружение частичные разряды в трансформаторы является важнейшим аспектом технического обслуживания и надежности энергосистем. Частичный разряд – это локальный пробой изоляционных материалов, который, если его не обнаружить, может привести к выходу оборудования из строя. Обнаружение и мониторинг ЧР необходимы для обеспечения безопасной и эффективной работы трансформаторов.

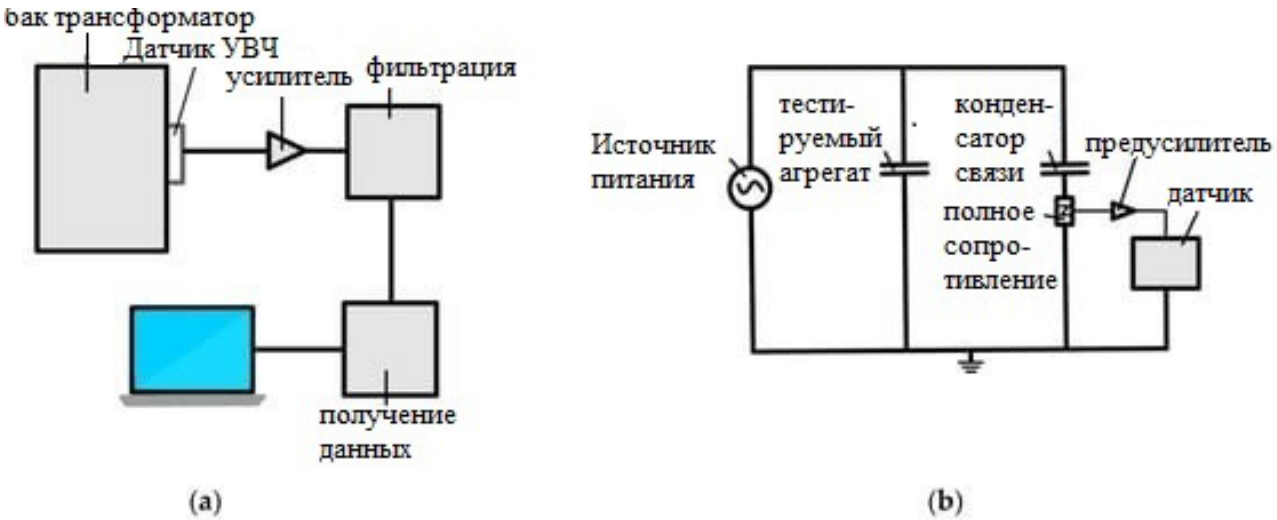


Рис. 1. (a) Базовая система УВЧ-мониторинга ЧР и ее руководящий принцип и (b) принцип типичной сверхвысокой частоты [5]

Мониторинг явления ЧР в высоковольтных энергетических системах и оборудовании считается необходимым измерением для профилактического обслуживания оборудования, находящегося в эксплуатации, или для оценки производительности нового оборудования, выпускаемого промышленностью. Следовательно, возможность и пригодность использования соответствующих датчиков с определенными свойствами и методами измерения частичных разрядов для получения надежных результатов измерения частичных разрядов на силовых трансформаторах является пробелом, который потенциально может быть удовлетворен и включен в качестве важнейших проблем при расширении исследования в будущем.

Для регистрации ЧР в силовых трансформаторах, важна компактная система регистрации ЧР от нескольких датчиков.

Для разработки такой системы в лаборатории были проведены исследования характеристик ЧР различными датчиками в широком диапазоне частот. Особое внимание было уделено предпробойной ситуации. Было обнаружено, что признаками предпробойной ситуации являются упорядочение ЧР, увеличение их частоты, смещение спектра ЧР в УВЧ область ЭМИ. Было проведено сравнение характеристик ЧР в УВЧ и ВЧ диапазоне ЭМИ, на основании которых сделан вывод о том, что в УВЧ диапазоне ЭМИ обнаружить развитие дефектов в изоляции представляется гораздо более перспективным по сравнению с ВЧ диапазоном ЭМИ, особенно узкополосными датчиками, с полосой пропускания 5 МГц. При этом для обнаружения ЧР можно применять как телескопические антенны, так и специальные многодиапазонные УВЧ антенны.

Сделан вывод, что система сбора данных на основе датчиков ЧР с телескопической антенны, узкополосного перенастраиваемого приемника в УВЧ диапазоне ЭМИ с обработкой сигнала на основе компактного микрокомпьютера является наиболее перспективной с точки зрения обнаружения и локализации ЧР в трансформаторе.

Также сделан вывод о том, что преимущество УВЧ-мониторинга ЧР заключается в способности обнаруживать ЧР на ранней стадии развитя дефекта, что позволяет своевременно

проводить техническое обслуживание и предотвращать ухудшение состояния изоляции силового трансформатора. Кроме того, датчики УВЧ можно легко разместить рядом с важными частями силового трансформатора, например рядом с вводами, или вокруг бака силового трансформатора, УВЧ датчик имеет ряд преимуществ, включая высокую чувствительность, широкую полосу частот и возможность обнаружения ЧР в различных частях силовых трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akbari A., Werle P., Borsi H., Gockenbach E. Transfer function-based partial discharge localization in power transformers: A feasibility study // IEEE Electr. Insul. Mag. – 2002. – Vol. 18. – P. 22–32.
2. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2008. – Vol. 15. – P. 1576–1583.
3. Judd M.D. Experimental comparison of UHF sensor types for PD location applications // In Proceedings of the 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada, 31 May–3 June 2009. – P. 26–30.
4. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage // В сб.: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. – 2019. – P. 35–39.
5. Macià-Sanahuja C., Lamela H., García-Souto J.A. Fiber optic interferometric sensor for acoustic detection of partial discharges // J. Opt. Technol. 2007. – Vol. 74. – P. 122–126.
6. Richardson B. Diagnostics and monitoring of power transformers // IEE Colloquium on Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers (Digest No: 1997/086), London, UK, 1997. – P. 6/1–6/2. DOI: 10.1049/ic:19970499.
7. Gataullin A.M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in UHF range of electromagnetic radiation // В сб.: Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2020. – P. 1–5.

Секция 2
Теплофизические аспекты энергетических технологий

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КРУГЛОГО РЕБРА НА ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Г.Р. Бадретдинова

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, АТПП, гр. АТа-1-21

Научный руководитель: А.В. Дмитриев, д.т.н., заведующий кафедрой «АТПП»

На сегодняшний день одним из приоритетных направлений в энергетики является энергосбережение и энергоэффективность, роль которых заключается в сохранении энергии и полезном ее расходовании с максимальной эффективностью. Для этого энергетические компании разрабатывают комплекс мер, направленные на эффективное и рациональное использование своих ресурсов [1]. С появлением энергосберегающих технологий у компаний появилась возможность достигать экономическую эффективность, повышать рентабельность производства, а также снижать влияние на окружающую среду.

В данной работе рассматривается проблема снижения тепловой эффективности теплообменного оборудования вследствие загрязнения ее рабочей оребренной поверхности твердыми частицами целлюлозы при конденсации парогазовой смеси. Исследования по данной проблеме рассмотрены в работах [2–4]. В работе [5] авторами изучен процесс загрязнения трубы с оребренной поверхностью при конденсации, содержащей твердые частицы. Авторами представлено автомодельное решение в виде безразмерной функции одной переменной. Получены уравнения, описывающие распределение толщины осадка и температуры на прямом ребре неограниченной высоты при первоначально чистой поверхности.

В статье [6] проведен анализ для изучения влияния конфигурации ребристых каналов и расстояния между ними с четырьмя рядами, расположенными в шахматном порядке. Установлено, что труба с треугольными ребрами и расстоянием между ними, равным 1,6 мм обеспечивает более высокую эффективность процесса теплопередачи с квадратными и круглыми ребрами. В работе [7] проведены сравнительные расчеты эксцентрических и концентрических пучков труб с круглыми ребрами. Исследования показывают, что лучшее расположение трубы в круглом ребре достигается в задней части ребра на расстоянии 2,5 мм от его центра. Авторы статьи [8] исследовали теплообменные характеристики канала с волнистыми ребрами. Изучено влияние геометрических параметров ребра на процесс теплопере-

дачи и перепад давления. Результаты показывают, что высота, радиус и угол ребра оказывают большое влияние на теплообмен, а влияние толщины ребра относительно невелико. Также установлено, что волнистые ребра с большой высотой и большим радиусом скругления ребер лучше повышают процесс теплопередачи и уменьшают перепад давления. В работе [9] авторами исследована модель турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы с различной геометрией ребер. Полученные результаты показали, что трубы со спиральным оребрением позволяют увеличить интенсивность теплоотдачи до 40 %.

Целью работы является исследование влияния геометрических размеров ребра на относительный тепловой поток при конденсации парогазовой смеси.

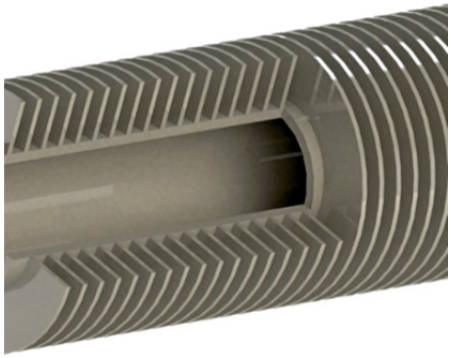


Рис. 1. Оребренная труба

В данном исследовании рассмотрено тонкое круглое ребро диаметром $d = 26{,}9$ мм. Температура в основании ребра принимается постоянной $t_0 = \text{const}$ (рис. 1). Парогазовая смесь, содержащая твердые частицы, обтекает круглые ребра. На обеих сторонах ребра происходит конденсация пара, причём на его поверхности оседают загрязнения.

В работе была построена модель процесса, определяющая относительный тепловой поток, отводимый ребром к трубе. Были установлены зависимости изменения относительного теплового потока от толщины ребра $\delta_р = 0{,}5\cdot10^{-3}$, $1\cdot10^{-3}$, $2\cdot10^{-3}$ и высоты ребра $L = 0{,}003$, $0{,}013$, $0{,}03$ м. Базовыми параметрами, при которых выполнялись вычисления, приняты $\delta_р = 1\cdot10^{-3}$ м и $L = 0{,}013$ м.

Получено выражение для общего относительного теплового потока, отводимого ребром Q_0/Λ:

$$Q_0 / \Lambda = 2\pi\cdot[\frac{\theta_0 - \vartheta_{i=1}}{\Delta r}\cdot(R_0 + \Delta r/2) + \theta_0\cdot\frac{2\cdot\lambda_о}{\Lambda}\cdot\frac{R_0\cdot\Delta r}{2\delta_{i=0}}].$$

В ходе проведения исследования установлено, что значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 10 суток с увеличением высоты ребра (рис. 2). При базовых значениях высоты ребра и $L = 0{,}03$ м, значения теплового потока схожи на протяжении всех 72 суток. Значения теплового потока при базовых значения и $L = 0{,}003$ м схожи вплоть до первых четырех суток, разность показателей начинает увеличиваться и доходит до значения 1000 к 31 суткам и далее держится в этом диапазоне. Из этого можно сделать вывод, что изменения высоты ребра менее чем на порядок несущественно влияют на поток, при увеличении высоты ребра более чем на порядок, наблюдается увеличение теплового потока.

Уменьшение толщины ребра приводит к увеличению относительного теплового потока (рис. 3). Значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 5 суток, по истечении этого времени показатели изменяются несущественно, без резких перепадов, при этом тепловой поток начиная с пятых по семьдесят вторые сутки изменяется примерно на 1500.

По результатам исследования были выявлены закономерности влияния конструктивных параметров оребренной трубы на относительный тепловой поток, отводимый ребром к трубе. Изменения высоты ребра менее чем на порядок не существенно влияют на поток, при увеличении высоты ребра более чем на порядок, наблюдается увеличение теплового потока. Уменьшение толщины ребра приводит к увеличению относительного теплового потока. Значительные изменения теплового потока при изменении толщины ребра наблюдаются в первые 5 суток. Увеличение коэффициента теплопроводности осадка приводит к увеличению теплового потока, а увеличение коэффициента теплопроводности ребра – к его уменьшению.

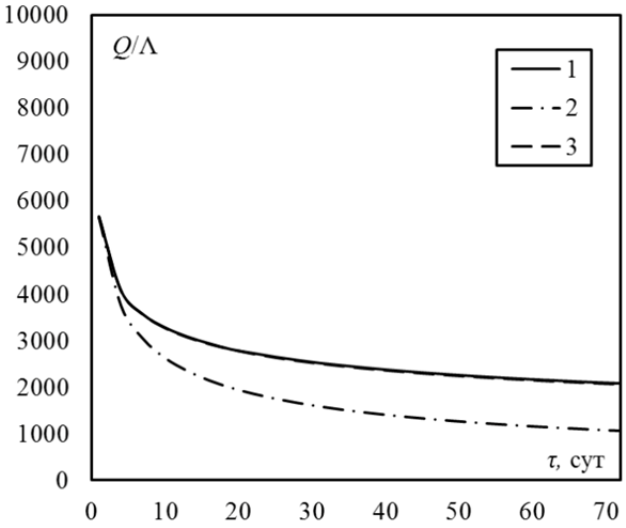


Рис. 2. Зависимость теплового потока от высоты ребра L, м: 1 – 0,013; 2 – 0,003; 3 – 0,03

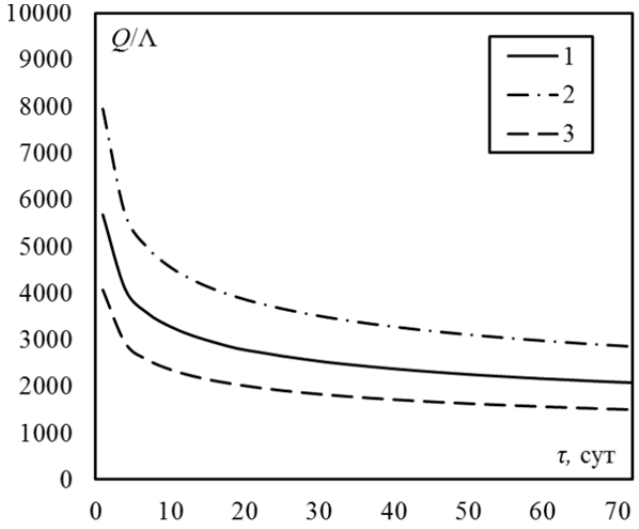


Рис. 3. Зависимость теплового потока от толщины ребра $\delta_р$, м: 1 – $1 \cdot 10^{-3}$; 2 – $0{,}5 \cdot 10^{-3}$; 3 – $2 \cdot 10^{-3}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси / А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова, А.Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 176–185.
2. A numerical model for convective-condensation heat transfer of flue gas and its application on fin efficiency calculation / K. Yang, J. Yang, L. Han, H. Liu, L. Zhou, S. Yu, L. Deng, D. Che // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. – 2023. – P. 1–20.
3. Enhancement of condensation heat transfer rate of the air-steam mixture on a passive condenser system using annular fins / Y.J. Jang, D.J. Choi, S. Kim, M.T. Hyun, Y.G. Lee // Energies. – 2017. – V. 10. – No. 11. – P. 1777.
4. Condensation heat transfer characteristics of moist air outside 3-D finned tubes with different wettability / Y. Gu, Y. Ding, Q. Liao, Q. Fu, X. Zhu, H. Wang // Energy. – 2020. – V. 207. – P. 118202.
5. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре / Н.Д. Якимов, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т.24. – № 3. С. 121–129.
6. Al Doori W.H. Numerical estimation of pressure drop and heat transfer characteristics in annular-finned channel heat exchangers with different channel configurations // Heat Transfer–Asian Research. – 2019. – V. 48. – No. 4. – P. 1280–1291.
7. Comparison of thermal and hydraulic performances of eccentric and concentric annular-fins of heat exchanger tubes / A.H. Benmachiche, F. Tahrour, F. Aissaoui, M. Aksas, C. Bougriou // Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 53. – P. 2461–2471.
8. Effects of continuous wavy ribs on heat transfer and cooling air flow in a square single-pass channel of turbine blade / L. Wang, S. Wang, F. Wen, X. Zhou, Z. Wang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 121. – P. 514–533.
9. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Г.Р. Бадретдинова, И.Р. Калимуллин, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 176–186.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ И АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНЫХ ТОПЛИВ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИСАДОК

А. Клименко, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ3З

Научный руководитель: Н.Е. Шлегель, к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

Мазут является одним из основных видов топлива для морских и энергетических установок вследствие его низкой стоимости и высокой теплотворной способности [1, 2]. Как правило, мазут получают при сероочистке нефти на нефтеперерабатывающих заводах. Основной проблемой сжигания мазутного топлива является образование различных загрязняющих веществ [2–4]: остаточных зол, ценосфер, сажи и серной кислоты. Мазутное топливо (HFO) характеризуется высоким содержанием серы (до 4,5 %). Кроме того, HFO содержит различные концентрации микроэлементов тяжелых металлов, таких как ванадий, никель, свинец, медь и др., которые создают дополнительные проблемы, включая высокотемпературную коррозию и загрязнения [2–4]. Для снижения вредных выбросов и улучшения характеристик горения топлива используются дополнительные специализированные присадки [6]. Добавление присадок к топливу обладает рядом преимуществ, таких как повышение эксплуатационных характеристик котла, снижение расхода топлива [7, 8]. Производство эффективных присадок включает смешивание, перемешивание ингредиентов в течение 5–10 мин и фильтрование. Как правило, в присадку добавляют катализаторы горения, износостойкие, дымоудаляющие и энергосберегающие компоненты, а также регуляторы октанового числа [16, 17].

Цель настоящего исследования – определение критических условий и характеристик вторичного измельчения капель мазута и водо-мазутной композиции при соударении их с твердой стенкой.

Экспериментальные исследования проводились на аналогичном стенде и методики используемой в ранней работе [11]. Присадки для водомазутного топлива используются в котельных агрегатах для улучшения работы горелки, снижения потребления топлива, повышения эффективности горения и сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Реологические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Реологические характеристики водомазутных топлив

№	Наименование топливной смеси	Температура состава T_f, °C	Динамическая вязкость μ, мПа·с	Плотность ρ, кг/м^3	Поверхностное натяжение σ, Н/м
1	Мазут	20/80	1795/130	1015/937	0.041/0.035
2	Мазут – 90 % + Вода – 10 %	20/80	1543/116	1021/933	0.044/0.033
3	Мазут – 89.5 % + Вода – 10 % Р503В3 – 0.5 %	20/80	1505/111	1020/934	0.042/0.030
4	Мазут – 89.5 % + Вода – 10 % + Р502В1 – 0.5 %	20/80	1515/112	1022/934	0.044/0.031
5	Мазут 89.5 % + Вода 10 %+ ИОН М – 0.5 %	20/80	1493/109	1016/933	0.041/0.029

Экспериментальные исследования проводились на аналогичном стенде и методики используемой в ранней работе [11]. На рис. 1 представлены установленные зависимости времени задержки зажигания капель водомазутного топлива с добавлением присадок от температуры газовоздушной среды. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позволил установить, что все исследуемые присадки позволяют снизить времена за держки зажигания.

Такой эффект обусловлен тем, что присадки являются катализаторами горения. В свою очередь, катализаторы снижают пороговую энергию активации окисления

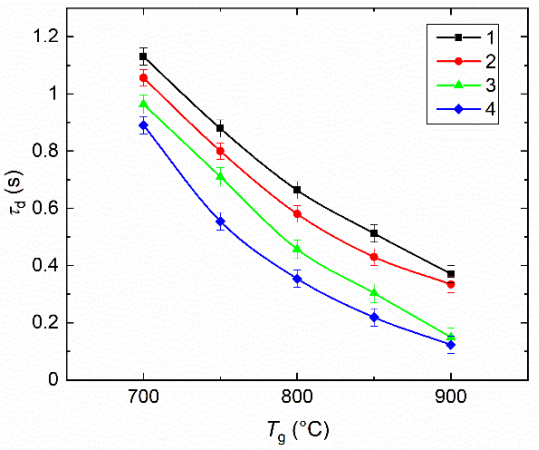


Рис. 1. Зависимости времени задержки зажигания капель исследуемых топлив от температуры газовоздушной среды: 1 – № 2; 2 – № 3; 3 – № 4, 4 – № 5

топлива, в результате чего происходит более полное выгорание. Результаты экспериментальных исследований показали, что минимальными временами задержки зажигания обладает водомазутное топливо с добавлением присадки на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов. Такая присадка снижает времена задержки зажигания на 40–50 % во всем температурном диапазоне газовоздушной среды. Добавление присадки на основе жирных кислот растительных масел снижало времена задержки зажигания более чем на 10 % во всем исследуемом температурном диапазоне относительно водомазутного топлива. Использование состава № 4 позволяло снизить времена задержки зажигания на 30–40 %. Анализ экспериментальных исследований позволил установить, что при увеличении температуры газовоздушной среды до 900 °С составы с присадками имеют времена задержки зажигания, ниже в 3 раза по сравнению с топливом без присадок. Такой эффект обуславливается тем, что в присутствии катализаторов горения вода связывается с тяжелыми углеводородами, и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее.

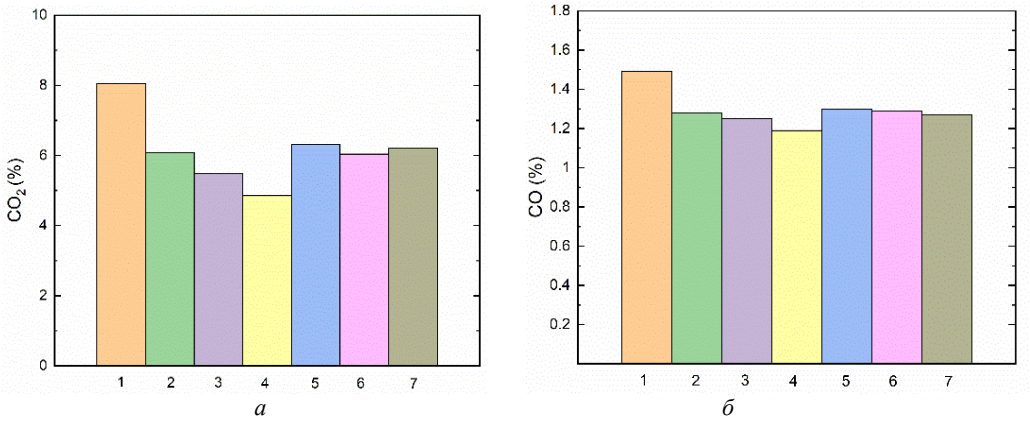


Рис. 2. Концентрации CO_2 (а) и CO (b) при сжигании водомазутного топлива при T_g =800 °С: 1 – № 1; 2 – мазут 90 vol %, вода 10 vol %; 3 – мазут 80 vol %, вода 20 vol %; 4 – мазут 70 vol %, вода 30 vol %; 4 – № 2; 5 – № 3; 6 – № 4; 7 – № 5

Добавление воды к мазуту и присадок способствует снижению антропогенных выбросов. На рис. 2, *а* представлены установленные значения концентраций CO_2 при сжигании водомазутного топлива с добавлением присадок при температуре газовоздушной среды около 800 °С. Анализ проведенных исследований показал, что при добавлении воды в мазут снижается содержание оксидов углерода. Результаты экспериментальных исследований показали, что использование составов № 3, 4, 5 увеличивает выбросы CO_2 на 3,97, 0,2 и 2,12 % при T_g = 800 °С относительно состава № 2. Такое увеличение антропогенных выбросов является несущественном при сравнении его с мазутным топливом. Использование водомазутного топлива с присадками позволяет снизить выбросы CO_2 на 21,5, 24,98 и 22,86 % для компози-

ций № 3, 4, 5 по сравнению с № 1. На рис. 2, *б*. представлена зависимость содержания оксида углерода при сжигании исследуемых составов. Анализ экспериментальных данных показал, что при добавлении концентрации воды уменьшается содержание CO. Установлено, что при добавлении присадок увеличивают выбросы CO на 1,21, 1,5 и 0,85 % для составов № 3, 4, 5 при T_g = 800 °C относительно № 2. Но при сопоставлении данных с необводненным мазутом определено, что добавление присадок позволяет снизить выбросы CO на 14,36, 14,16 и 17,61 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NOx reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments // Energy. – 2020. – Vol. 199. – P. 117371.
2. Zhong W. et al. Features and evolution of international fossil fuel trade network based on value of emergy // Appl. Energy. – 2016. – Vol. 165. – P. 868–877.
3. Abdul Jameel A.G. et al. Calculation of Average Molecular Parameters, Functional Groups, and a Surrogate Molecule for Heavy Fuel Oils Using 1H and 13C Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy // Energy & Fuels. American Chemical Society. – 2016. – Vol. 30, № 5. – P. 3894–3905.
4. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // Environ. Sci. Technol. American Chemical Society. – 1976. – Vol. 10, № 12. – P. 1109–1114.
5. Sippula O. et al. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers // Atmos. Environ. – 2009. – Vol. 43, № 32. – P. 4855–4864.
6. Huang H. et al. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition // Appl. Energy. – 2019. – Vol. 250. – P. 185–197.
7. Poullikkas A. Cost-benefit analysis for the use of additives in heavy fuel oil fired boilers // Energy Convers. Manag. – 2004. – Vol. 45, № 11. – P. 1725–1734.
8. Saha D., Roy B. Influence of areca nut husk nano-additive on combustion, performance, and emission characteristics of compression ignition engine fuelled with plastic-grocery-bag derived oil-water-diesel emulsion // Energy. – 2023. – Vol. 268. – P. 126682.
9. Manufacture of high-efficiency multifunctional fuel oil additive // Fuel Energy Abstr. – 2002. – Vol. 43, № 1. – P. 24.
10. 99/01042 Fuel oil additives: Tsuru, S. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 10 158,665 [98 158,665] (Cl. C10L1/24), 16 Jun 1998, Appl. 96/331,461, 26 Nov 1996, 4 pp. (In Japanese) // Fuel Energy Abstr. – 1999. – Vol. 40, № 2. – P. 109.
11. Klimenko A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // Energy. – 2023. – Vol. 283. – P. 128480.

НОВЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАЕМОСТИ

А.В. Дорожкин, С.П. Бондарчук, Г.Е. Котельников

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ24

Научный руководитель: Е.Г. Орлова, к. ф.-м. н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова

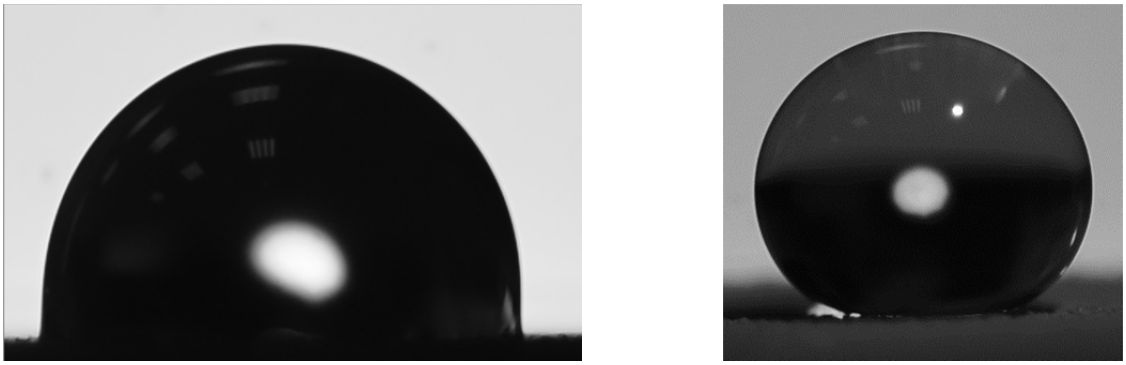
Исследование процессов взаимодействия жидкости с твердыми поверхностями актуально в связи с тем, что в последнее время появляются новые методы модификации твердых поверхностей, в результате чего значительно меняются их приповерхностные свойства, в том числе и смачивание. Наиболее популярным и многообещающим является направление создания поверхностей с супергидрофобными свойствами. В энергетике такие поверхности имеют достаточно высокую потребность, а вызвано это с уникальными свойствами таких поверхностей: устойчивость к абразивному износу, обледенению, коррозии, скольжению жидкости у гидрофобного слоя [1]. Известные на сегодняшний день методы получения супер-

гидрофобных поверхностей (dip-coating, spin-coating, адсорбция из растворов или паров, испаряющейся капли [2]) достаточно дорогостоящие и трудно масштабируются под промышленные объемы. Целью настоящей работы является создание нового подхода к созданию поверхностей с экстремальными свойствами смачивания.

Исследования проводились на пластинах размерами 15,0×15,0×1,2 мм, изготовленных из алюминиево-магниевого сплава АМГ-2М. Химический состав АМГ-2М: Al – 95,7–98,2 %, Mg – 1,7–2,4 %, Fe – <0,5 %, Mn – 0,1–0,5 %, Si – <0,4 %, Cu – <0,15 %, Ti – <0,15 %. Разработанный подход к созданию материалов с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофобность) базировался на текстурировании поверхности образцов с использованием лазерной системы на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG Photonics (длина волны 1064 нм) и последующей процедуре гидрофобизации. Перед гидрофобизацией образцы очищались в ультразвуковой ванне с использованием этилового спирта и дистиллированной воды. Процедура гидрофобизации представляет собой распыление углеводородсодержащей жидкости (трансформаторное масло) на нагретый до определенной температуры образец в муфельной печи.

Свойства смачивания исследовались на установке, в которой реализована теневая оптическая методика [3]. Свойства смачивания определялись по величине статического контактного угла по теневым изображениям капли дистиллированной воды объемом 5 мкл.

Измеренные статические контактные углы на полированных образцах АМГ-2М составили 86,3° (рис. 1). Непосредственно после гидрофобизации, поверхности демонстрировали супергидрофобные свойства и угол составлял больше 165° (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Типичное теневое изображение капли воды для измерения статического контактного угла: а) на полированной поверхности; б) на супергидрофобной поверхности

Гидрофобизация образцов выполнялась в следующей последовательности. Предварительно текстурированный и очищенный образец помещался на держатель и вводился в трубчатую печь LF-50/500-1200 (LOIP, Россия), нагретую до 920 °С. На закрепленную каретку помещался образец с термопарой типа К (хромель-алюмель) и с помощью модуля линейного перемещения СТМЛ-1 (Сервотехника, Россия) образец перемещался в печь. После нагрева образец вынимался из печи и на его поверхность распылялось масло. Длительность и объем распыляемого масла контролировалось электромагнитным клапаном (SAILFLO, Китай) в паре с модулем реле времени (XY-j02, Россия). Время нахождения образца в печи и температура внутри печи оставались постоянными, варьировалось время распыления масла на поверхность образца.

Исследование показало, что увеличение времени распыления масла с 1,5 до 2,5 с увеличивает контактный угол. Изменение статического угла при рассматриваемых параметрах варьировалось от 135° (при 1,5 с распыления) до 172° (при 2,5 с распыления). При увеличении

длительности распыления больше 2,5 с, процедура гидрофобизации проходила нестабильно, так как образец перенасыщался маслом, и имел маслянистый остаток на поверхности. Недостаток масла наблюдался при длительности распыления меньше 1,5 с, из чего следует, что образец оставался гидрофильным.

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлены параметры гидрофобизации (время распыления, температура нагрева образцов, длительность нагрева), позволяющие получить поверхности алюминиево-магниевого сплава с супергидрофобными свойствами. Полученные материалы с уникальными функциональными свойствами в дальнейшем будут исследованы на долговечность покрытия, коррозионную стойкость, стойкость к кавитационным и абразивным износам для установления возможности их дальнейшего применения при конструировании теплообменных аппаратов и систем капельного охлаждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10245, (https://rscf.ru/project/21-73-10245/)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О важности подбора режимагидрофобизации для получения стойких супергидрофобных покрытий / Е.А. Кузина, Ф.Ш. Омран, А.М. Емельяненко, Л.Б. Бойнович // Коллоидный журнал. – 2023. – Т. 85. – № 1. – С. 63–67.
2. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко // Успехи химии. – 2008. – Т. 77. – № 7. – С. 619–638.
3. Droplet Spreading and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Surfaces / G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, A.G. Islamova, A.V. Zhuikov // Met. Mater. Int. – 2020. – V. 26. – P. 46–55.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЛАЖНЫХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОПКАМ ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

Ж.А. Косторева, А.А. Омаров, С.В. Сыродой

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, А3-11

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Одним из перспективных вариантов существенного снижения выбросов антропогенных оксидов в атмосферу при горении углей является сжигание последних в составе водоугольных суспензий, которые принято называть водоугольным топливом (ВУТ) [1]. Установлено, что при сжигании таких топлив существенно снижаются выбросы антропогенных оксидов на единицу массы угля [2]. Сформулирована гипотеза о механизме подавления оксидов серы и азота в результате взаимодействия паров воды с газообразными и твёрдыми продуктами термического разложения углей [3]. Но при сжигании водоугольных топлив теплотворная способность такого топлива существенно ниже теплотворной способности обычного угля. Поэтому высокозначимой для науки и практики является задача перехода от водоугольных суспензий к влажным углям. В этом случае при влажности 10–15 % возможно достижение существенно более высокой теплотворной способности топлива по сравнению с ВУТ, при сохранении таким топливом способности подавлять антропогенные оксиды. Использование

влажных углей вместо ВУТ также может существенно упростить технологический процесс сжигания топлив. Но для обоснования эффективности использования в качестве топлива угольных электростанций влажных углей необходимо решить группу важных задач. Одной из таких задач является определение характеристик и условий зажигания частиц влажных углей. Пока основные закономерности таких процессов не установлены.

В экспериментах исследовались угольные частицы четырех разных марок (бурый (2Б), длиннопламенный (Д), тощий (Т), антрацит (А)) двух влажностей (исходная и увлажненная). На первом этапе процедуры подготовки экспериментального материала, куски угля больших размеров, измельчались с помощью щековой дробилки до характерного размера одиночных частиц «семечка» δ=1,5–2 мм, масса которых составляла m=0,015±0,005 г. Частицы угля взвешивались на фасовочных высокоточных весах систематическая погрешность определения массы образцов топлива составляла не более 0,001 г. Далее часть взвешенных частиц угля выдерживалась в дистиллированной воде в течение 24 часов. По истечению этого периода времени частицы снова взвешивались для определения их относительной влажности, которая составляла для марки бурого угля (2Б) 8 %, длиннопламенного (Д) 8 %, тощего (Т) 8 % и антрацита (А) 3 %.

На рис. 1 приведены зависимости времен задержки зажигания одиночных частиц угольного топлива четырех марок и двух влажностей (в исходном состоянии и увлажнённые). Относительная влажность влажных частиц угля составляла для марки бурого угля (2Б) 8 %, длиннопламенного (Д) 8 %, тощего (Т) 8 % и антрацита (А) 3 %. Можно отметить, что увлажнение частиц угля не оказывает значимого влияния на характеристики и условия их зажигания.

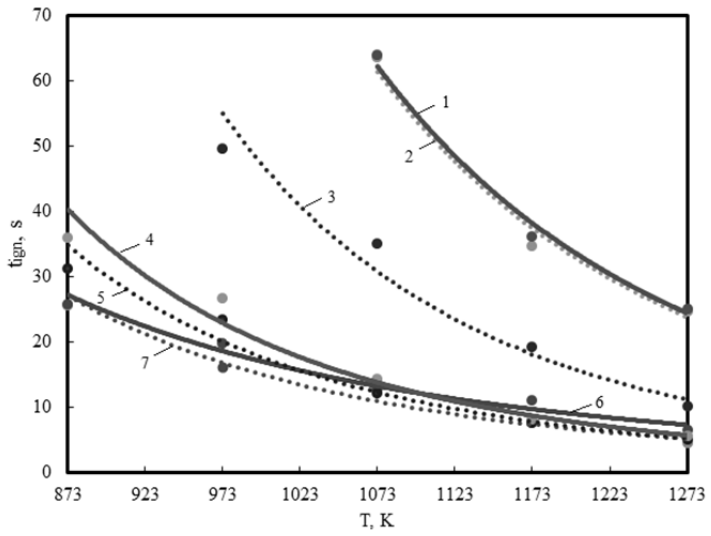


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания частиц угля от температуры внешней среды:
1 – уголь А влагонасыщенная частица;
2 – уголь А сухая частица;
3 – уголь Т сухая частица;
4 – уголь Д влагонасыщенная частица;
5 – уголь Д сухая частица;
6 – уголь Б влагонасыщенная частица;
7 – уголь Б сухая частица

Работа поддержана Российским Научным Фондом грант № 23-79-01067

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals odifferent degree metamorphism / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva // Energy. – 2020. – V. 201. – P. 117701.
2. Justification of the use of forest waste in the power industry as one of the components OF BIO-coal-water suspension fuel / G.V. Kuznetsov, D.Yu Malyshev, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, M.V. Purin, Zh. A. Kostoreva // Energy. – 2022. – V. 239. – P. 121677.
3. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood / G.V. Kuznetsov, S.A Jankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov // Combustion Science and Technology. – 2019. – V. 191. – P. 2071–2081.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИДРАТНОГО ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PLANAR LASER INDUCED FLUORESCENCE

Е.Р. Подгорная, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Томский политехнических университет,
ИШЭ, ТЭС, гр. А3-44

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова

Лед представляет воду в кристаллическом состоянии и имеет состав [1]: H – 11.2 %, O – 88.8 %. В природе лёд представлен одной из нескольких кристаллических модификаций, устойчивой в интервале температуры от 0 до – 80 °C, имеющей точку плавления 0°C. Спонтанное зарождение льда создает достаточное количество относительно долгоживущих водородных связей, чтобы сформировать компактное начальное ядро. Оно затем медленно меняет форму и размеры, пока не достигнет стадии, которая позволяет быстро расширяться, что приводит к кристаллизации всей системы (рис. 1). В воде каждая молекула связана водородом примерно с 3–4 другими молекулами, в то время как во льду каждая молекула связана водородом с 4 другими молекулами, как представлено на рис. 1.

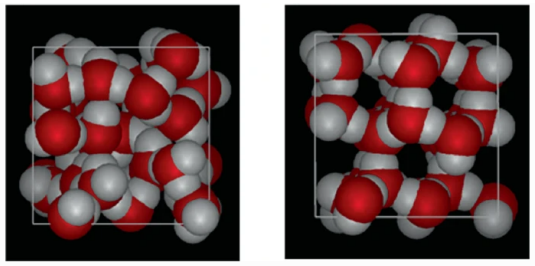


Рис. 1. Кристаллическая структура воды (слева) и льда (справа) [1]

Задачи контроля и достоверного прогноза температуры ледовых агломератов с применением бесконтактных методов оптической регистрации стали особенно актуальными в связи с усилением внимания исследователей к освоению районов Крайнего Севера и Арктики. В условиях пониженных температур целесообразно оптимизировать условия использования энергетических ресурсов для реализации энергетических, топливных, химических и иных технологий [21]. В частности, особую актуальность представляют технологические процессы с газовыми гидратами [25] – сложными кристаллическими структурами, содержащими газ (метан, этан, пропан, углекислый газ и др.), воду и лед. Свойства таких структур существенно зависят от температуры [25]. В частности, важно контролировать температуру в разных сечениях таких структур при добыче газа из скважин, транспорте и хранении. Размещение чувствительных элементов в различных сечениях гидратных пластов способствует формированию дополнительных центров кристаллизации и снижению точности измерений температуры, давления и других технологических параметров [31]. Процессы тепломассопереноса в газогидратных структурах протекают с высокой скоростью [32]. В таких условиях необходимы бесконтактные системы регистрации технологических параметров для получения достоверной информации об основных протекающих процессах в трех фазах: газ, вода, лед.

В качестве объекта исследования в экспериментах использовались ледовые агломераты, получаемые с применением специализированных формовочных кювет. Для создания ледовых образцов в экспериментах использовался водный раствор флуорофора Rhodamine B в концентрации γ=0.2–10 мг/л. При приготовлении раствора Rhodamine B использовались несколько различных типов воды: водопроводная; дистиллированная; пропущенная через двухступенчатый (I – механическая очистка частиц менее 5 мкм; II – угольный картридж) фильтр (считалась очищенной от примесей).

При проведении исследований выполнялись измерения температуры в разных сечениях ледовых агломератов методом Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) [36].

На этапе температурной калибровки PLIF в процессе выполнения эксперимента параллельно с регистрацией изображений ледового агломерата измерялась его температура. Использовалась методика термопарных измерений [31]. По результатам выполненных экспериментов строились температурные тренды. Далее полученные значения температуры сопоставлялись со значениями светимости ледового агломерата, полученными при обработке изображений в ПО «DaVis». Строилась калибровочная кривая – зависимость температуры от значений светимости ледового агломерата. На завершающем этапе с использованием калибровочной кривой восстанавливалось температурное поле ледового агломерата. Значения светимости каждого пикселя изображения ледового агломерата переводились в значения температуры.

По результатам анализа подготовленных ледовых агломератов выделены важные закономерности. Во-первых, установлено, что для образцов, приготовленных из водопроводной и фильтрованной воды, характерно неравномерное распределение флуорофора. Это обусловлено наличием в воде как мелких механических примесей, так и растворенных солей, которые остаются даже после фильтрации воды. Вследствие этого в замораживаемом образце присутствуют локальные центры кристаллизации, что способствует неравномерному распределению флуорофора в агломерате. Последнее при выполнении PLIF измерений способствует неравномерной абсорбции лазерного света и, следовательно, неравномерной (по сечению образца) эмиссии излучения. Образец, приготовленный из дистиллированной воды и замороженный при температуре около –20 °С, имел прозрачную однородную структуру. Распределение Rhodamine B внутри образца также было однородным. При этом заморозка аналогичного образца из дистиллированной воды при температуре около –80 °С способствовала помутнению последнего. Такой результат обусловлен тем, что при быстрой заморозке содержащиеся в жидкости газовые пузырьки не успевают выйти из агломерата, что приводит к снижению его оптической прозрачности. Таким образом, наилучшим вариантом (с точки зрения достоверности измерений температуры ледовых агломератов) является последующее использование в экспериментах образцов, приготовленных из дистиллированной воды и замороженных при температуре –20 °С.

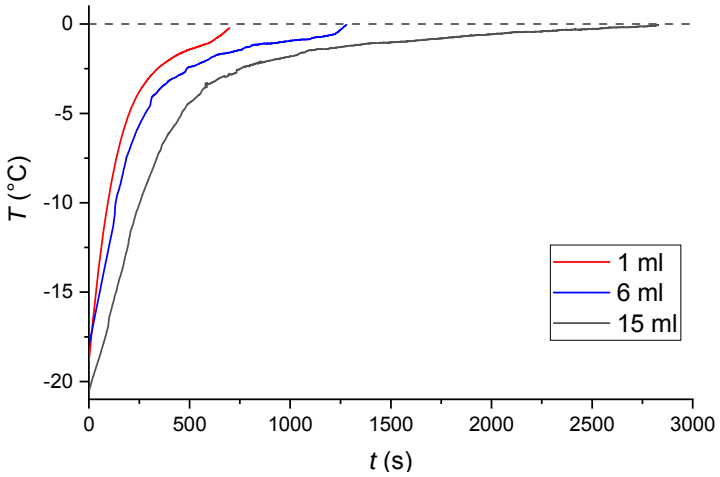


Рис. 2. Тренды изменения средней температуры ледовых агломератов трех разных объемов (1 мл, 6 мл и 15 мл) спустя 30 с с момента их извлечения из морозильной камеры

На рис. 2 приведены установленные тренды изменения средней температуры ледовых агломератов трех разных объемов, полученные с использованием термопарных измерений. Видно, что с повышением начального объема ледового агломерата скорость роста его средней температуры увеличивается. На рис. 3 приведены тренды изменения средней светимости ледовых агломератов трех разных объемов, полученные при обработке изображений в ПО «DaVis».

По результатам анализа полученных данных (рис. 3) выделены интересные особенности изменения интенсивности сигнала флуоресценции при таянии ледовых агломератов. Установлено, что максимальные зарегистрированные значения средней интенсивности свечения ледовых агломератов объемом 1 и 6 мл составили 280–300 ед., в то время как для образца объемом 15 мл значения последней достигали 5000 ед.

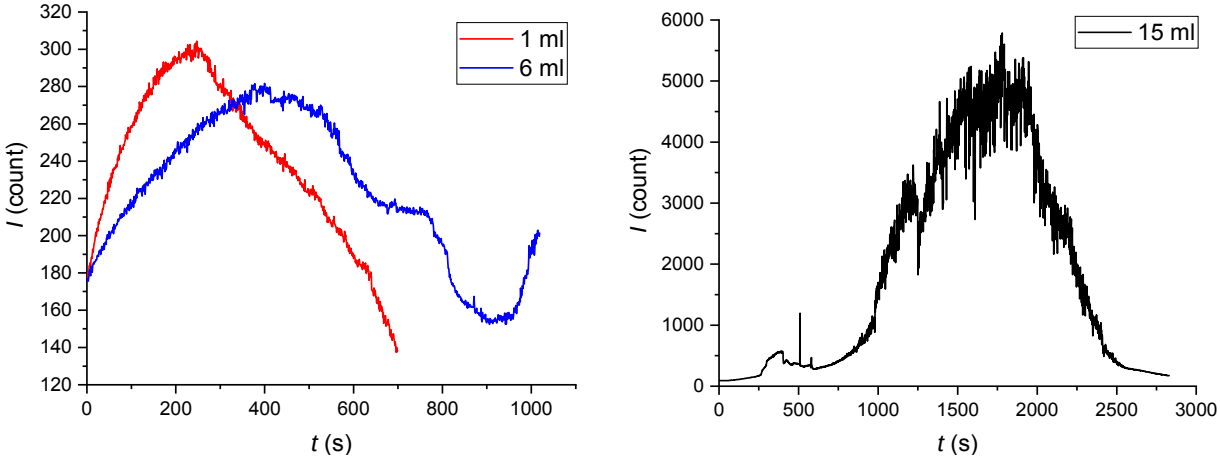


Рис. 3. Тренды изменения средней светимости ледовых агломератов трех разных объемов

В то же самое время светимость ледовых агломератов была существенно неравномерной и увеличивалась от периферии к глубинным слоям образца. Таким образом, абсолютные значения светимости для ледовых агломератов объемом 1 и 6 мл достигали 750 ед., а при 15 мл – 35000 ед. Для всех исследованных ледовых агломератов зарегистрирована идентичная тенденция. В частности, на первом этапе регистрировался нелинейный рост светимости, на втором – монотонное снижение интенсивности эмитированного света. Продолжительность данных этапов существенно зависела от размеров и объема ледового агломерата. Так, для ледового агломерата объемом 1 мл продолжительность первого этапа составила около 230 с, 6 мл – около 420 с, 15 мл – около 1750 с. Полученный результат обусловлен следующими эффектами. При замораживании (кристаллизации) воды атомы Rhodamine B находятся вне кристаллической решетки льда. Поэтому на начальном этапе регистрировались крайне малые значения светимости (немногим выше интенсивности свечения фона). В процессе нагрева и таяния ледового агломерата протекали два взаимосвязанных процесса. Первый – ледовый агломерат по мере нагрева покрывался тонкой пленкой воды. Второй – образующаяся вода, в свою очередь, абсорбировала молекулы Rhodamine B. Чем больше объем воды скапливался в виде пленки на поверхности льда, тем больше молекул Rhodamine B в ней растворялось. С ростом концентрации Rhodamine B в воде возрастала интенсивность абсорбции лазерного излучения. Это способствовало монотонному росту значений интенсивности свечения (эмитированного света).

Одновременно с образованием тонкой пленки жидкости на поверхности ледового агломерата вода проникала в поры ледового агломерата. Это способствовало растворению в воде содержащегося внутри ледового агломерата флуорофора, который также начинал интенсивно поглощать и эмитировать лазерное излучение. Так как температура ледового агломерата ниже, чем на его поверхности, то интенсивность эмитированного красителем Rhodamine B, содержащимся внутри образца, света выше по сравнению с интенсивностью эмиссии от приповерхностной пленки. Это дополнительно способствовало увеличению средней интенсивности изображения агломерата (рис. 3). В определенный момент времени система «вода – ледовый агломерат» стабилизировалась, а интенсивность эмиссии выходила на постоянное значение, соответствующее максимуму I (рис. 3). С этого момента изменение светимости ледового агломерата связано исключительно с ростом его температуры (значения I снижаются), что соответствовало характеристикам и свойствам использованного флуорофора. На основании вышеизложенного сформулировано заключение о том, что кривую изменения интенсивности ледового агломерата с момента стабилизации значений I правомерно использовать для построения калибровочной кривой.

По результатам выполненных исследований выделены основные ограничения PLIF метода при его использовании для измерения температуры ледяных агломератов:

- при приготовлении образцов для реализации PLIF измерений следует использовать дистиллированную воду. Использование водопроводной и фильтрованной воды способствует неравномерному распределению флуорофора в измерительной области;
- метод PLIF позволяет проводить удовлетворительные измерения при концентрации флуорофора в водяном растворе около 5 мг/л. При меньших концентрациях интенсивность эмитированного Rhodamine B слишком мала и незначительно превышает фоновую интенсивность изображения. При больших концентрациях возникает явление чрезмерного поглощения падающего на ледовый агломерат лазерного света, что приводит к тому, что интенсивность эмитированного света многократно превышает интенсивность свечения самого образца;
- метод PLIF применим для определения температуры относительно небольших ледовых агломератов (объемом менее 6 мл);
- метод PLIF может быть достаточно эффективно использован для определения температуры ледового агломерата при температурах последнего выше –5 °C;
- метод PLIF можно использовать для определения температуры ледового агломерата на глубине не более 20 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bjerrum N. Structure and properties of ice // Science. – 1952. – Vol. 115, Is. 2989. – P. 385–390. https://doi.org/10.1126/science.115.2989.385.
2. Erdiwansyah M., Husin H., Nasaruddin, Zaki M., Muhibbuddin. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies // Prot. Control Mod. Power Syst. – 2021. – Vol. 6, Is. 3. URL: https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3.
3. Gambelli A.M., Rossi F. Formation rate as parameter to distinguish nucleation from hydrate massive growth phase: Experimental investigation in presence of two different porous media // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2022. – Vol. 131. – P. 110525. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110525.
4. Antonov D.V. et al. Heat and mass transfer at the ignition of single and double gas hydrate powder flow in a reactor // Int. J. Heat Mass Transf. – 2023. – Vol. 209. – P. 124121. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124121.
5. Volkov R., Strizhak P., Temperature recording of the ice–water system using planar laser induced fluorescence // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2022. – Vol. 131. – P. 1105532. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110532.
6. Li F., Zhang H., Bai B. A review of molecular tagging measurement technique // Meas. J. Int. Meas. Confed. – 2021. – Vol. 171. – P. 108790. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108790.

ЗАЖИГАНИЕ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНО-МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

Д.Ю. Малышев, М.С. Тамашевич

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, А3-11

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Наиболее распространенным сырьем для тепловых электрических станций (ТЭС) является уголь [1]. Но в угольном топливе содержится практически вся таблица Менделеева и его сжигание сопровождается существенным загрязнением окружающей среды. Для очистки дымовых газов применяются различные установки, но это значительно удорожает строительство тепловых электростанций и ведет к росту финансовых затрат во время эксплуата-

ции ТЭС, работающих на угле, и, как следствие, ведет к увеличению стоимости отпускаемой энергии. В этой связи возникает потребность разработки новых технологий сжигания угля.

Одним из наиболее перспективных и простых технологических решений по существенному снижению антропогенной нагрузки угольных ТЭС на атмосферу Земли [2], на настоящее время являются технологии сжигания угля в составе водоугольного топлива (ВУТ). В его состав входит уголь, вода и присадки пластификатора [3]. Установлено, что при сжигании ВУТ, по сравнению с углем существенно снижаются выбросы антропогенных газов, таких, как оксиды азота и серы [4]. На практическое применение водоугольных топлив на объектах энергетики затруднено в связи с высокими значениями времен задержки зажигания, которые могут достигать нескольких десятков секунд. Уменьшение времен задержки зажигания ВУТ возможно при добавлении в состав водоугольных топлив различного рода, ускоряющих процесс зажигания добавок, например, биомассы. Другим способом, позволяющим уменьшить времена задержки зажигания ВУТ является «подсветка» факела. Одним из возможных способов является воздействие на топливо микроволнового нагрева.

Целью данной работы является оценка влияния микроволнового нагрева на времена задержки зажигания водоугольного топлива.

На рис. 1 представлены зависимости времен задержки зажигания водоугольных топлив с добавлением опилок и хвои сосны в их состав с в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов. ВУТ состоял из 50 % воды, 46 % угля и 4 % древесной биомассы. На основании полученных результатов сделать вывод, что применение микроволнового нагрева снижает времена задержки зажигания ВУТ в среднем на 10 %.

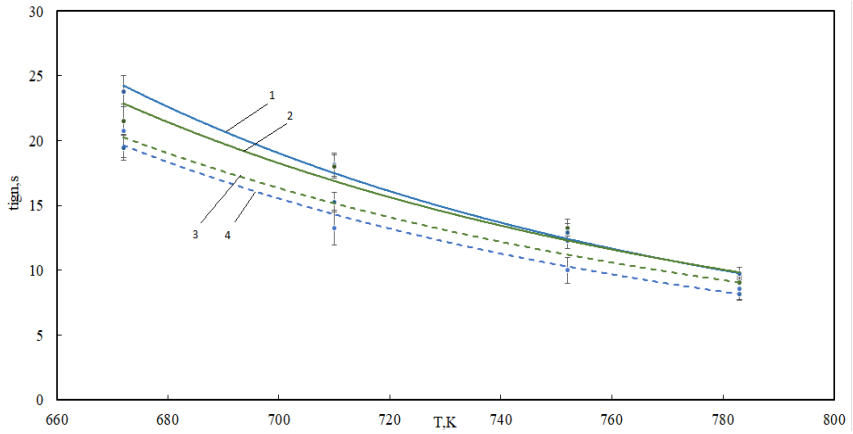


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания водоугольных топлив от температуры внешней среды: 1 –ВУТ с добавлением опилок сосны без использования СВЧ; 2 – ВУТ с добавлением хвои сосны без использования СВЧ; 3 – ВУТ с добавлением опилок сосны с использованием СВЧ; 4 – ВУТ с добавлением хвои сосны с использованием СВЧ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (2.0047.РНФ.2022 (РНФ 22-79-00223))

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году. – URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/upsrep2019.pdf (дата обращения 09.09.2023).
2. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 853 с.
3. Hanjalic K., Lekic A., Krol R. Sustainable Energy Technologies: Options and Prospects // Springer. – 2008. – 336 p.
4. Делягин Г.Н. Экологически чистое топливо ЭКОВУТ – путь резкого улучшения экологической ситуации в энергетике России // Материалы международной научно-практической конференции «Экология энергетики 2000».– МЭИ. – 2000. – С.320–323.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА ВЕБЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ДРОБЛЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ ВУТ

Р.Р. Замалтдинов, В.С. Акимов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, А3-11

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Современные требования к энергетической отрасли ставят задачи, решение которых позволит снизить загрязнение атмосферы антропогенными газами. Одним из способов решения экологической проблемы является использование смесевых топлив. В частности, одним из перспективных видов топлива является водоугольное топливо (ВУТ). Основным преимуществом сжигания ВУТ является способность к образованию связыванию оксидов азота и серы, что способствует уменьшению уноса этих веществ с дымовыми газами [1]. В работе [2] представлены результаты, подтверждающие гипотезу о возможности секвестирования оксидов азота и серы при наличии в топливе воды и негорючей части.

Одной из основных проблем внедрения ВУТ повсеместно, является отсутствие полных данных о условиях дробления капель ВУТ. В работах [5, 6] описываются исследования направленные на определение условий дробления ВУТ при движении в потоке воздуха и распыления с помощью форсунки. Но приведенные исследования не позволяют прогнозировать все процессы, происходящие в процессе дробления.

Исследования процесса дробления капель ВУТ направлено на определение условий диспергирования первичной капли при ударе о подложку. Исследование позволит определить оптимальные условия эксплуатации систем по распылению ВУТ новыми способами.

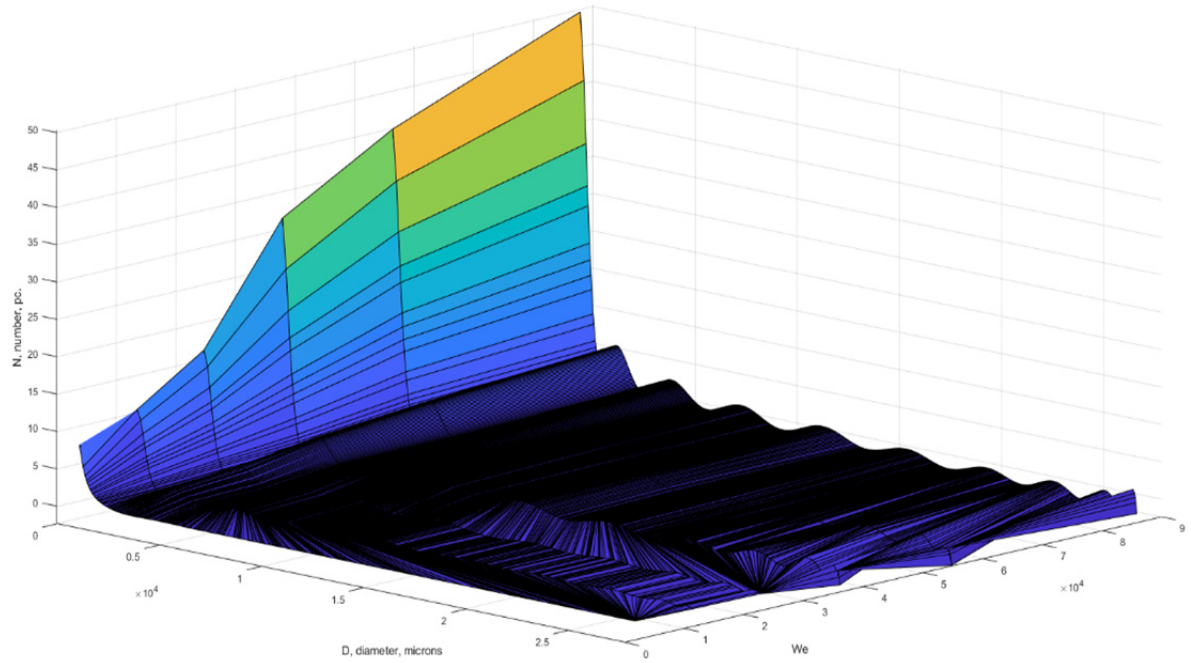


Рис. 1. Распределение числа вторичных капель относительно их размера и числа Вебера

На рис. 1 приведено распределение числа вторичных капель относительно их размера и числа Вебера. Состав топлива – уголь марки Д и дистилированная вода в соотношении

50/50 %. Следует отметить, что с увеличение числа Вебера, число вторичных капель малых размеров (до 200 микрон) возратает. Стоит отметить, что при размерах более 500 микрон, число вторичных капель не превышает 1–2.

Работа поддержана Российским Научным Фондом грант № 23-79-10092.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals odifferent degree metamorphism / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva // Energy. – 2020. – V. 201. – P. 117701.
2. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood / G.V. Kuznetsov, S.A Jankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov // Combustion Science and Technology. – 2019. – V. 191. – P. 2071–2081.
3. Костовецкий С.П., Мурко В.И., Олофинский Е.П. Некоторые результаты исследований процессов приготовления, транспортирования и прямого сжигания водоугольной суспензии // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем.
4. Ходаков Г.С. Водоугольная суспензия в энергетике // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
5. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.V., Kopyev E.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // Fuel. – 2021. – Vol. 303, no. 6.
6. Shebeleva A.V., Minakov M.Yu., Chernetskii P.A. Strizhak Deformation of a Droplet of an Organic Water – Coal Fuel in a Gas Flow // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – Vol. 59. – C. 653–661.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ КОСОМ УДАРЕ О ПОДЛОЖКУ

Р.Р. Замалтдинов, В.С. Акимов, С.В. Сыродой

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, 5БМ34

Научный руководитель: С.В. Сыродой, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Сжигание угля в виде водоугольных суспензий, известных как водоугольное топливо, является одним из перспективных методов снижения антропогенных выбросов оксидов в атмосферу [1]. Однако для эффективного сжигания водоугольного топлива необходимо обеспечить диспергирование капель этой суспензии при контакте с подложкой. Исследования показали, что при косом ударе капели водоугольного топлива о поверхность происходит их разбрызгивание на более мелкие частицы. В работе [2] установлено, что время задержки зажигания капель водоугольного топлива в потоке разогретого воздуха линейно зависит от размера капли ВУТ, что отображено на рис. 1.

Использование ВУТ сопряжено так же с проблемой износа форсуночных устройств, т. к. суспензия выступает, как образив для поверхностей разбрызгивания. В работе [3] представлены исследования по диспергированию водоугольного топлива с помощью керамических форсунок.

Всё это создает предпосылки по исследованию условий и характеристик дробления капель ВУТ.

На рис. 2 приведено распределение количество вторичных капель в зависимости от чисел Вебера и размера самих капель. Установлено, что при увеличении числа Вебера значительно возрастает число вторичных капель, размер которых не превышает 500 микрон.

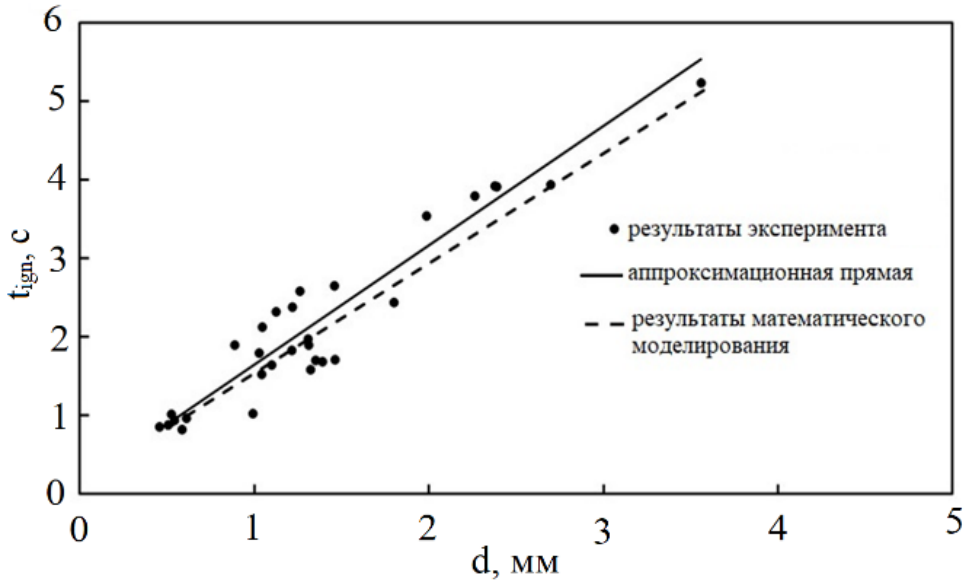


Рис.1. Времена задержки зажигания капель водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя (воздуха) в зависимости от диаметра частицы. Температура воздуха T_g=873К[2]

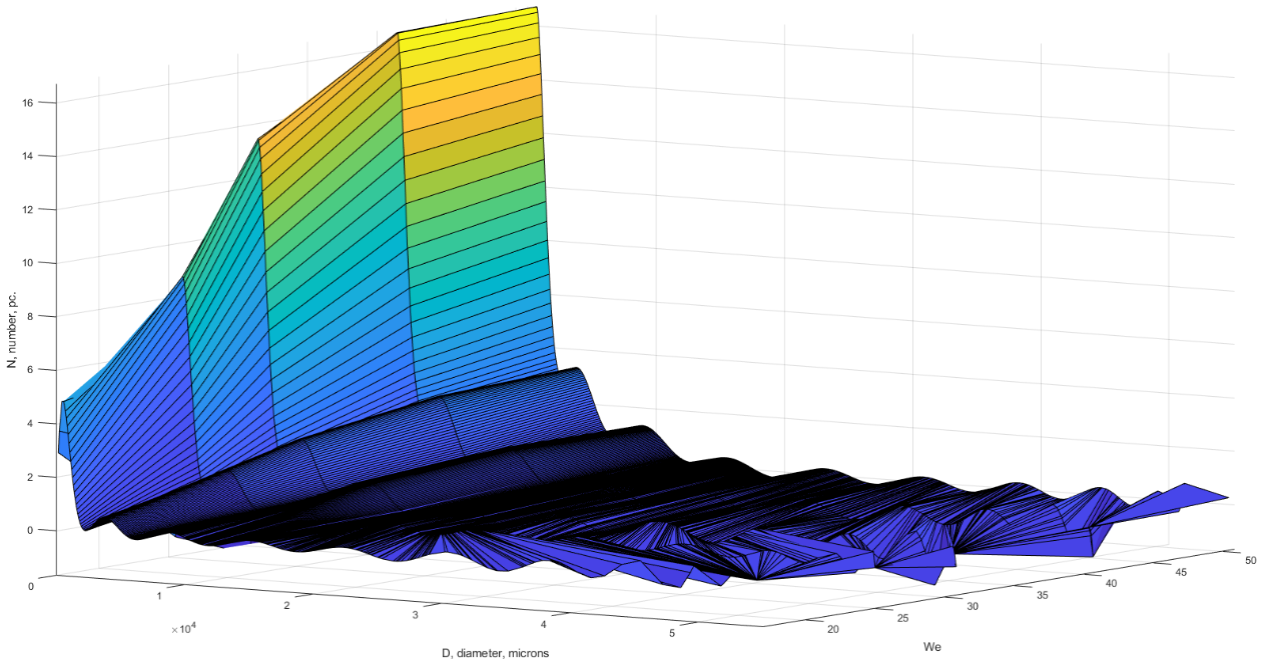


Рис. 2. Распределение количества вторичных капель в зависимости от числа Вебера и их размера

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 23-79-10092

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals odifferent degree metamorphism / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva // Energy. – 2020. – V. 201. – P. 117701
2. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles // Combustion and Flame. – 2019. – № 203. – P. 375–385
3. Jianxin D., Zeliang D., Dongling Yu. Erosion wear mechanisms of coal–water–slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers // Materials Science and Engineering A. – 2006. –V. 417. – P. 1–7.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СДВИГА КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ

Д.С. Козловский, Е.Ю. Лага

Томский политехнический университет,
ИШФВП, гр. 0БМ31

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

Создание конструкционных материалов с управляемыми функциональными свойствами является актуальной проблемой современности. Последнее связано с растущими потребностями в таким материалов для ряда промышленных отраслей: теплоэнергетика, машиностроение, авиация, судостроение, нефтехимическое производство и др. Известно [1], что традиционные способы обработки материалов (металлы и их сплавы), например, механическая обработка абразивными материалами, не позволяет решить некоторые задачи, в частности, интенсифицировать процесс охлаждения нагретых поверхностей различных устройств и аппаратов. Поэтому на смену традиционным способам приходят современные перспективные технологии – лазерный способ обработки поверхностей. Последний зарекомендовал себя как низко затратный, безотходный и простой способ формирования текстуры материалов и изменения химического состава их приповерхностного слоя. Кроме того, такая обработка позволяет управлять смачивание поверхностей в широких диапазонах варьирования статического контактного угла [2]. Однако малоизученным остается направление исследования кризисов кипения, в частности эффект Лейденфроста (частный случай пленочного кипения для капли жидкости), на поверхностях, текстура которых модифицирована лазерным излучением.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования эффекта Лейденфроста для капли воды на поверхностях алюминиевого сплава и стали, текстура которых модифицирована лазерным излучением.

В качестве образцов использовались пластины из алюминиевого сплава (АМг-3) и нержавеющей стали (ASTM A 240/A 240M 430) размерами 50,0×50,0×1,0 мм и 50,0×50,0×0,5 мм, соответственно. Текстура формировалась на поверхностях образцов лазерным излучением с помощью иттербиевого импульсного волоконного лазера. Обработка выполнялась в лабораторных условиях.

Возникновение эффекта Лейденфроста исследовалось на специально собранной установке (рис. 1). Капля *1* воды с помощью электронного дозатора *2* размещалась на поверхности исследуемого образца *3*, нагретого до установленной температуры. Процесс регистрировался с использованием оборудования теневой оптической системы: высокоскоростная видеокамера *4*, источник света *5* и телецентрическая труба *6*. Стеклокерамическая плита *7* использовалась для нагрева образцов.

Температуры Лейденфроста, зарегистрированные на поверхностях алюминиевого сплава и нержавеющей стали для капли воды объемом 5 мкл, представлены на рис. 2. Установлено, что на модифицированных поверхностях лазерным излучением (сталь, алюминиевый сплав) эффект Лейденфроста возникает при более высоких температурах по сравнению с полированными поверхностями тех же материалов. Однако величина сдвига температуры возникновения эффекта Лейденфроста зависит от конфигурации текстуры. При этом, наибольшая величина сдвига (119 °С на поверхности алюминиевого сплава, 47 °С на поверхности стали) обнаружена для текстуры в виде «цветной капусты». Сделан вывод о том, что помимо изменения текстуры (увеличение площади контакта жидкости и твердого тела), также определяющим фактором является супергидрофильность сформированных текстур. При этом на алюминиевом сплаве текстура более развитая, достигается большая шероховатость.

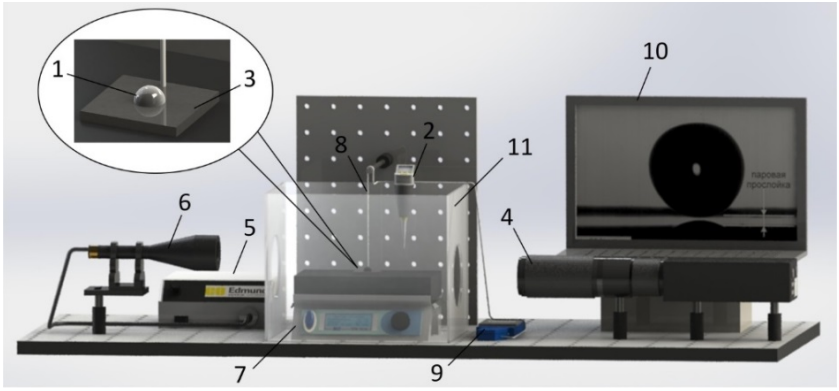


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – капля; 2 – дозатор; 3 – образец; 4 –видеокамера с макрообъективом; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – стеклокерамическая плита; 8 – термопара; 9 – контроллер; 10 – персональный компьютер; 11 – бокс

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наряду с традиционными способами обработки конструкционных материалов (абразивная обработка, полировка), лазерное излучение также может быть использовано в качестве обработки поверхностей металлов и сплавов. Причем, такой способ обработки показывает возможности сдвига кризиса теплообмена в область более высоких температур. Показана возможность управления возникновением эффекта Лейденфроста на поверхностях алюминиевого сплава и стали.

а *б*

Рис. 2. Температура Лейденфроста на поверхностях алюминиевого сплава (а), нержавеющей стали (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-29-00417, https://rscf.ru/project/23-29-00417/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wachters L.H.J., Westerling N.A.J. The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state // Chemical Engineering Science. – 1966. – V. 21. – Iss. 12. – P. 1231–1238.
2. Ignition and combustion characteristics of coal-water-oil slurry placed on modified metal surface at mixed heat transfer / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov et al. // Fuel Processing Technology. – 2022. – V. 233. – P. 107291.
3. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A.A. Sivkov et al. // Surface and Coatings Technology. –2022. – V. 435. – P. 128263.

ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ

Тимофеева О.Б., Гулькин К.Н., Бондарчук С.П., Лага Е.Ю.

Томский политехнический университет,
ИШФВП, гр. 0БМ31

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

В связи с интенсивным развитием микроэлектронных устройств, особенно остро в последние несколько десятилетий стоит проблема отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженных элементов современных устройств и оборудования [1].

Системы охлаждения могут базироваться на разных технологиях. Некоторые системы охлаждения используют однофазные потоки, но они неэффективны для охлаждения устройств и оборудования, выделяющего тепловые потоки, превышающие 100 Вт/см^2 [1]. Вместо этого, исследователи предложили использовать системы двухфазного жидкостного охлаждения, такие как двухфазные термосифоны, спрейное охлаждение, вскипание потока в канале. В этих системах теплообмен происходит в режиме кипения или испарения (без кипения теплоносителя). Системы спреевого охлаждения являются наиболее эффективными, так как они способны отводить тепловые потоки высокой плотности и поддерживать равномерную температуру поверхности. Это достигается за счет использования мелких капель жидкости с большим отношением поверхности к объему, которые покрывают значительную площадь поверхности [2].

Поэтому исследование процессов испарения «лежащих» капель, особенно при высоких температурах поверхности, актуально с точки зрения отвода тепловых потоков высокой плотности от современного микроэлектронного оборудования.

Известно, что гидрофильные и гидрофобные свойства поверхностей нагрева влияют на процесс испарения и кипения теплоносителей. Для получения бифильных поверхностей применялись различные методы, однако долговечность покрытий, получаемых этими методами, недостаточна. Сложная и дорогостоящая конструкция и низкая долговечность препятствовали широкому использованию этих поверхностей [3].

В настоящем исследовании предложен новый подход к созданию бифильных поверхностей с помощью лазерной обработки и гидрофобизации. Кроме того, выполнен анализ влияния различных конфигураций текстуры на скорость испарения капель и на процесс пузырькового кипения.

Анализ текстуры проводился методом электронной микроскопии, трехмерные параметры шероховатости текстуры определены методом конфокальной микроскопии с использованием лазерного сканирующего микроскопа. На рис. 1 представлена установка по исследованию свойств смачивания поверхностей АМг-2 и процесса испарения капель воды.

Свойства смачивания определялись по значению статического контактного угла (θ_0) и угла скатывания (θ_{roll}) с использованием оборудования теневого оптического метода. Исследование процессов зарождения, роста и разрушения пузырей в капле осуществлялось с помощью оборудования верхней оптической системы. Статические контактные углы измерены в условиях дозирования на поверхности образцов капель дистиллированной воды объемом 5 мкл с погрешностью ± 0.01 мкл. Погрешность определения статического контактного угла и угла скатывания не превышала 5 %.

Исследования проводились на образцах в форме пластин из алюминиевого сплава АМг-2 размерами 30.0×30.0×2.0 мм. Использовалось пять групп образцов, различающихся свойствами смачивания (гидрофильные, супергидрофильные, супергидрофобные, бифильные (супергидрофобных/ супергидрофильные), бифильные (гидрофильные/ супергидрофильные)).

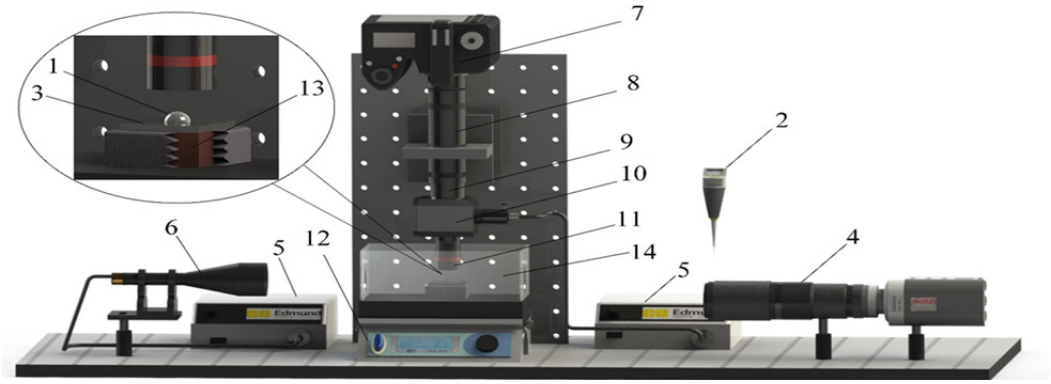


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – капля; 2 – дозатор; 3 – образец; 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная макрообъективом; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – фотоаппарат; 8 – переходник; 9 – кольцо; 10 – делитель пучка; 11 – объектив; 12 – стеклокерамическая плита; 13 – медный параллелепипед; 14 – бокс

По результатам проведенных экспериментальных исследований процессов испарения и кипения капли воды на поверхностях с различными свойствами смачивания (гидрофильная полированная, супергидрофильные и супергидрофобная с развитой иерархической текстурой, бифильные с комбинацией свойств смачивания гидрофильность / супергидрофильность, бифильные с комбинацией экстремальных свойств смачивания супергидрофобность / супергидрофильность) получены следующие выводы:

1) Комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях более предпочтительна по сравнению с комбинацией экстремальных свойств смачивания.

2) Выбор дизайна (конфигурации и расположения) поверхности, участки которой демонстрируют различные свойствами смачивания, оказывает влияние не только на интенсивность испарения теплоносителя, но в случае экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях, является основным фактором формирования сухих пятен за счет разрушения паровых пузырей на супергидрофобной части поверхности.

3) На бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных (полированные участки) и супергидрофильных (концентрические кольца, полученные текстурированием лазерным излучением) свойств режимы испарения капель теплоносителей и их последовательность подобны аналогичным характеристикам на полированных гидрофильных поверхностях металлов.

4) Комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях в сравнении с полированными поверхностями металлов значительно влияет на длительность режимов испарения.

6) Супергидрофильные свойства обеспечивают наибольшее охлаждение поверхности. Однако, при дозировании капли воды на супергидрофильную поверхность жидкость полностью впитывается в микро- и нанотекстуру, размерами капли, в частности, площадью смачивания, невозможно управлять.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00417, (https://rscf.ru/project/23-29-00417/)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xia Y., Gao X., Li R. Surface Effects on Sub-Cooled Pool Boiling for Smooth and Laser-Ablated Silicon Surfaces // Int. J. Heat Mass Transf. – 2022. – V. 194. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123113.
2. Gao X., Li R. Spray Impingement Cooling: The State of the Art // Intech. – 2016. – V. 11. – P. 13.
3. Atmosphere-Mediated Scalable and Durable Biphilicity on Rationally Designed Structured Surfaces / X. Yan; F. Chen, X. Zhang et al. // Adv. Mater. Interfaces. – 2020. – V. 7. – P. 1–14. doi:10.1002/admi.202000475.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ SIC, ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

М.А. Плюснина, К.Н. Гулькин, Г.Е. Котельников, А.В. Дорожкин

Томский политехнический университет,
ИЯТШ, гр. 0БМ31

Научный руководитель: Е. Г. Орлова, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В настоящее время известных экспериментальных и теоретических исследований недостаточно для разработки положений и прогностических аппаратов для контроля и управления свойствами смачиваемости поверхностей SiC. Известно, что от смачиваемости зависят такие функциональные свойства как самоочищение, стойкость к обледенению, запотеванию, коррозии, биообрастанию, абразивному и кавитационному износу, защита от бактерий. В связи с этим, особо актуальными являются исследования, направленные на разработку методов изменения свойств смачивания поверхностей керамики. Известны исследования по снижению интенсивности износа контактирующих деталей, изготовленных из керамики, путем текстурирования их поверхностей лазерным излучением [1].

Цель работы заключается в разработке способов изменения свойств смачиваемости карбидокремниевой керамики.

В качестве материала использовалась субмикронная керамика, изготовленная методом искрового плазменного спекания (в диапазоне температур от 1600 до 1800 °С) с использованием в качестве исходного материала ультрадисперсного продукта с высокой степенью чистоты (содержание SiC до 98 %), полученного методом прямого плазмодинамического синтеза в гиперскоростной струе кремний-углеродной электроразрядной плазмы. Изменение свойств смачиваемости исследовано после обработки приповерхностного слоя керамики «абразивным материалом», «абразивным материалом + наносекундным лазерным излучением. Свойства смачиваемости изготовленных поверхностей определены с использованием оборудования оптического теневого метода. По полученным теневым изображениям методами LB-ADSA [2] и «тангенциальным 1» [3] определены статические контактные углы (θ). Погрешность определения θ не превышала 5.0 % для $\theta \leq 15°$, 1.0 % для $\theta \geq 57°$. Для углов от 15° до 57° погрешность находилась в диапазоне от 1 до 5 %. Изменение элементного состава после модификации поверхностей керамики оценено по результатам анализа, проведенного методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS).

На рис. 1 приведены фотоизображения микротекстуры поверхностей субмикронной керамики, обработанных «абразивным материалом» (образцы № 1–3 рис. 1, *а–в*), «абразивным материалом + лазерным излучением» (образцы № 4–6 рис. 1, *г–е*)

Установлено, что при абразивной обработке происходит хрупкое разрушение материала, формируются локальные углубления неправильной геометрической формы преимущественно по прекурсам аморфного углерода (усл. обозначение 1–3 на рис. 1, *а–в*), размер этих локальных областей аморфного углерода зависит от температуры спекания. После лазерного текстурирования образовалась разноуровневая (микро- и нано-размерная) текстура (рис. 1, *г–е*).

На рис. 2 приведены результаты, полученные при исследовании элементного состава керамических образцов. Из рис. 2 видно, что основными элементами, входящими в состав образцов, являются Si и C. По результатам анализа элементного состава поверхностей, обработанных абразивным материалом (№ 1–3 рис. 2) установлено, что с ростом температуры спекания от 1600 до 1800 °С незначительно уменьшается доля углерода (с 34,5 до 32,2 %) и растет доля кислорода (с 2,9 до 3,9 %) в составе керамики.

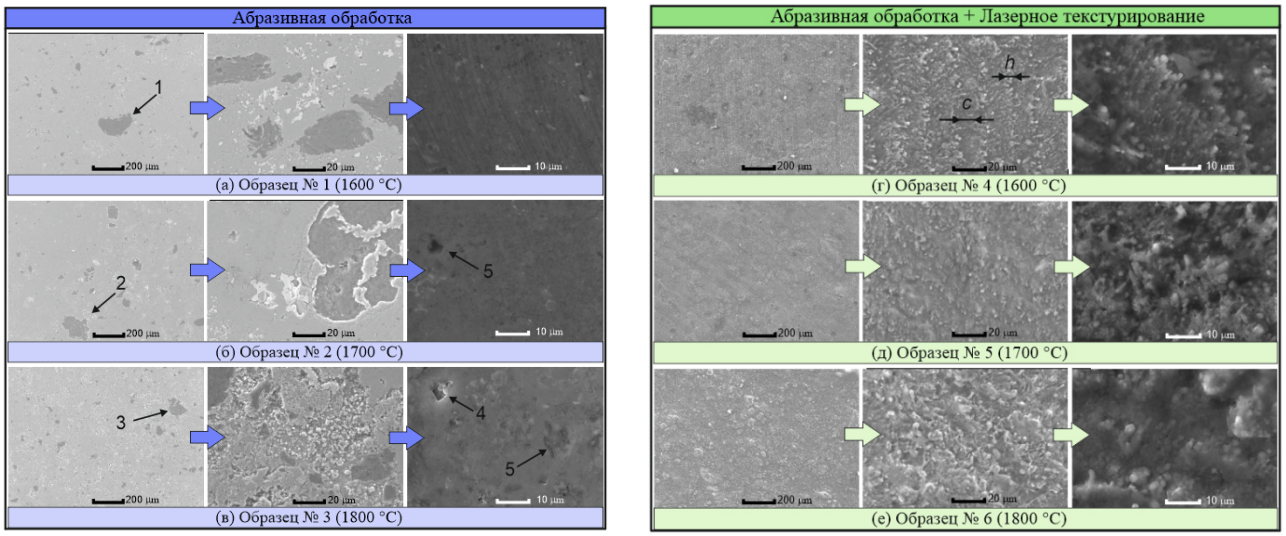


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхностей керамики, обработанных: «абразивным материалом» (а–в); «абразивным материалом + лазерным излучением» (г–е); Увеличение изображений слева направо: ×100, ×1000, ×5000. Условные обозначения: 1–3 – локальные области аморфного углерода; 4 – участок возвышенности; 5 – участок углубления. Ширина канавок: c = 10 мкм. Ширина кромки между канавками: h = 6 мкм

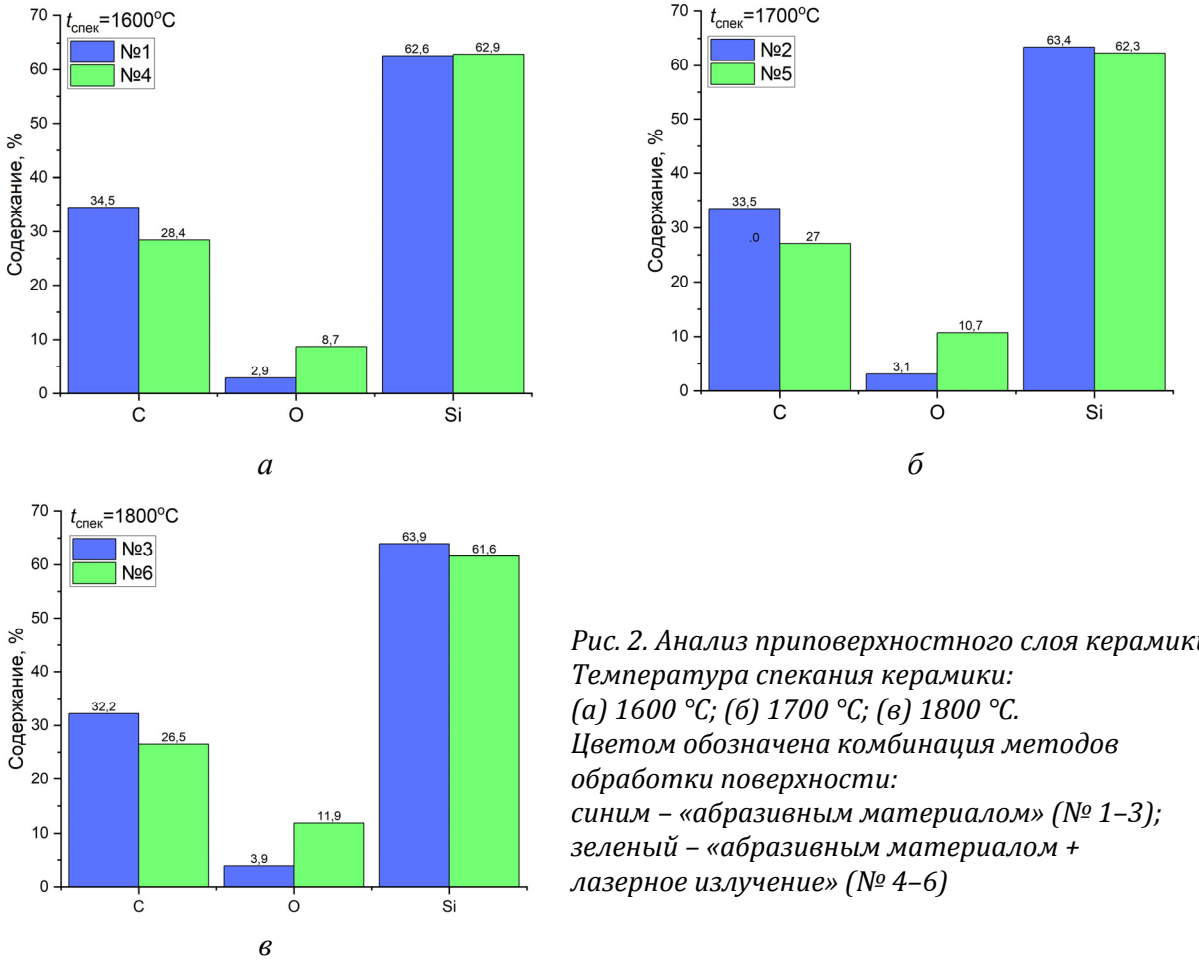


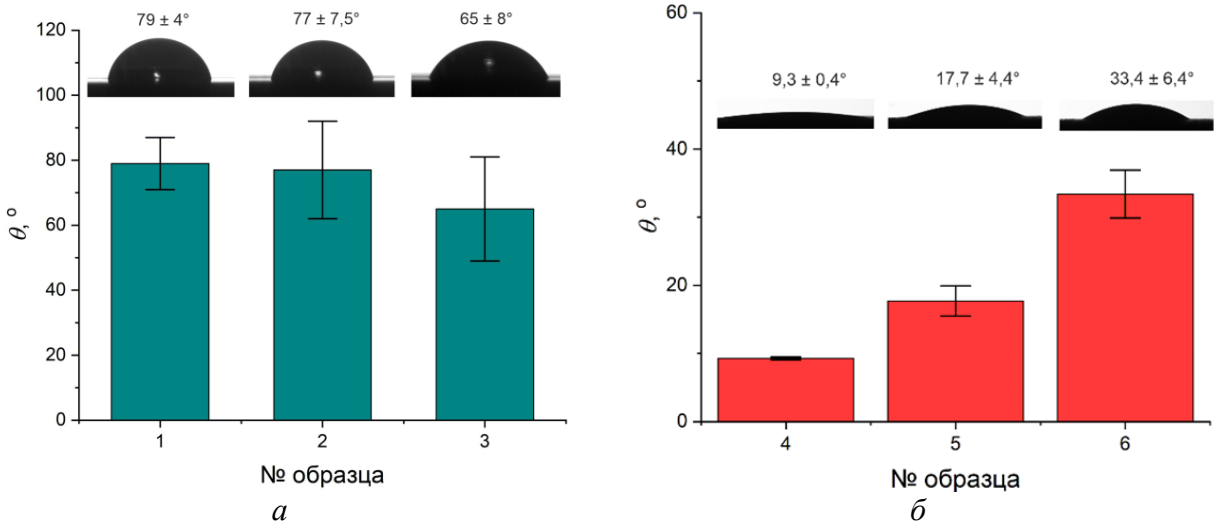
Рис. 2. Анализ приповерхностного слоя керамики. Температура спекания керамики: (а) 1600 °С; (б) 1700 °С; (в) 1800 °С. Цветом обозначена комбинация методов обработки поверхности: синим – «абразивным материалом» (№ 1–3); зеленый – «абразивным материалом + лазерное излучение» (№ 4–6)

Лазерное текстурирование поверхностей приводит к окислению, что подтверждается увеличением кислорода в элементном составе (№ 4–6, рис. 2). Внедрение атомов кислорода в приповерхностный слой SiC объясняют удерживающим эффектом оборванных связей. При воздействии лазерным излучением на поверхность SiC исходная кристаллическая структура материала разрушается, в материале появляются дефекты, и некоторая часть кристаллического SiC переходит в аморфное состояние. Разорванные связи аморфного SiC захватывают фотоионизованные атомы кислорода из окружающего воздуха. Таким образом формируется оксид кремния (SiO_2). Лазерное обработка поверхностей керамики приводит к уменьшению доли углерода (4–6, рис. 2).

На рис. 3 приведены значения контактных углов, измеренных при помещении капли воды на поверхности SiC. По результатам анализа статических контактных углов (рис. 3, *а*) установлено, что поверхности SiC, обработанные абразивным материалом, характеризуются гидрофильными свойствами. Увеличение температуры спекания с 1600 до 1800 °С привело к улучшению свойств смачивания (рис. 3, *а*). Необходимо отметить, что величина гистерезиса контактного угла больше на поверхностях, изготовленных при более высоких температурах. Последнее связано с тем, что эти поверхности после абразивной обработки, характеризуются большей шероховатостью, с ростом которой гистерезис контактного угла увеличивается. Увеличение шероховатости гидрофильных поверхностей приводит к улучшению свойств смачиваемости. Поэтому образцы, изготовленные при более высокой температуре спекания, после абразивной обработки, характеризуются лучшими свойствами смачиваемости.

Лазерная обработка поверхностей SiC улучшает свойства смачиваемости по сравнению с поверхностями, обработанными абразивным материалом (рис. 3, *а*), контактный угол снижается на 45–60°. Последнее объясняется тем, что доля кислорода в элементном составе приповерхностного слоя SiC (рис. 2) увеличилась с 3–4 % (на абразивно обработанных поверхностях) до 9–12 % (после лазерного текстурирования) и образовалась разноуровневая (микро- и нано-размерная) текстура. Разноуровневая текстура (рис. 1, *г–е*) способствует улучшению свойств смачиваемости за счет наличия нано-элементов и микроканалов, по которым жидкость растекается за счет капиллярных сил.

Изучено «влияние температуры спекания в диапазоне от 1600 до 1800 °С на свойства смачиваемости субмикронной керамики. Определено изменение свойств смачивания керамики SiC после комбинации методов обработки поверхности «абразивным материалом», «абразивным материалом + наносекундным лазерным излучением».



а *б*

Рис. 3. Значения контактных углов на поверхностях SiC после обработки: а) «абразивным материалом»; б) «абразивным материалом + лазерным излучением. Доверительным интервалом показана величина гистерезиса контактного угла

Установлено, что в условиях изготовления керамики SiC методом искрового плазменного спекания увеличение температуры спекания с 1600 до 1800 °С позволяет получить более стойкую керамику к хрупкому разрушению в результате абразивного износа, увеличить долю кислорода и уменьшить долю углерода в элементном составе приповерхностного слоя. Показано, что модификация поверхности SiC лазерной обработкой позволяет уменьшить шероховатость и создать однородную разноуровневую текстуру без локальных областей аморфного углерода, улучшить свойства смачиваемости, уменьшить гистерезис контактного угла.

Использование комбинации методов обработки поверхности «абразивным материалом», «абразивным материалом + наносекундным лазерным излучением» позволяет изменить свойства смачивания субмикронной керамики SiC в широких диапазонах изменения контактных углов от 9° (гидрофильные свойства) до 135° (гидрофобные свойства). Последнее позволяет значительно расширить область применения керамики SiC, где необходимо контролировать и управлять свойствами смачивания, например, в системах охлаждения на базе капельного орошения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 21-73-10245 (https://rscf.ru/project/21-73-10245/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings / S.P. Murzin, V.B. Balyakin // Optics and Laser Technology. – 2017. – P. 96-98.
2. Recent progress in Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) / M. Hoorfar, W. Neumann // Advances in Colloid and Interface Science. – 2006. – P. 25–49.
3. A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles / A. Bateni, S.S. Susnar, A. Amirfazli, A.W. Neumann // Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp 219. – 2003. – P. 215–231.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

К.А. Карташова, Д.С. Романов, Г.С. Няшина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ3З

Научный руководитель: К.Ю. Вершинина, к.ф-м.н., доцент ИШФВП ТПУ

Добыча сырой нефти и ее дальнейшая переработка в нефтепродукты сопровождается образованием и накоплением нефтешламов, представляющих собой смеси сырой нефти легких и тяжелых фракций, механических примесей (чаще всего в виде глины, песка, минеральных частиц, щелочноземельных металлов) и воды. Средняя скорость формирования нефтешламов в мире составляет не менее одного миллиарда тонн в год и продолжает расти [1]. Высокие концентрации углеводородов и тяжелых металлов в нефтешламах вызывают загрязнение почвы и подземных вод, а также загрязнение воздуха летучими нефтяными углеводородами [2]. На сегодняшний день существует несколько методов переработки нефтешламов, основными из которых являются термохимическими, в частности, пиролиз, сжигание и газификация.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение характеристик зажигания и горения композиционных топлив на основе нефтешлама и различных добавок.

Используемый нефтешлам содержал около 30 % воды и 15 % механических примесей. Добавками к нефтешаму являлись спирт, дизельное топливо и вода с массовыми долями в итоговой смеси от 5 до 15 %. На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда. Сжигание капель (начальный средний размер 2 мм) композиционных топлив выполнялось в горизонтальной электрической печи Nabertherm R 50/250/13 (диапазон варьирования температуры 20–1200 °C; температура регулировалась по сигналу встроенной термопары типа S). Диапазон температур нагрева в эксперименте составлял 600–750 °C. Времена задержки газофазного зажигания, а также длительности горения капель топлива определялись при помощи высокоскоростной камеры Phantom Miro C110 (разрешение 800×600 пикселей, скорость съемки 1000 кадр/с). Координатный механизм обеспечивал перемещение держателя с каплей топлива в печь. Для управления движением координатным механизмом, управления видеорегистрацией использовался персональный компьютер.

Смеси на основе отхода нефтедобычи при нагреве характеризовались двумя типичными этапами. Первый этап является эндотермическим, включает испарение воды, горючих компонентов (фракции нефти, добавка), в результате чего вокруг капли формируется парогазовая оболочка; второй этап – зажигание парогазовой оболочки и дальнейшее гомогенное выгорание горючих компонентов.

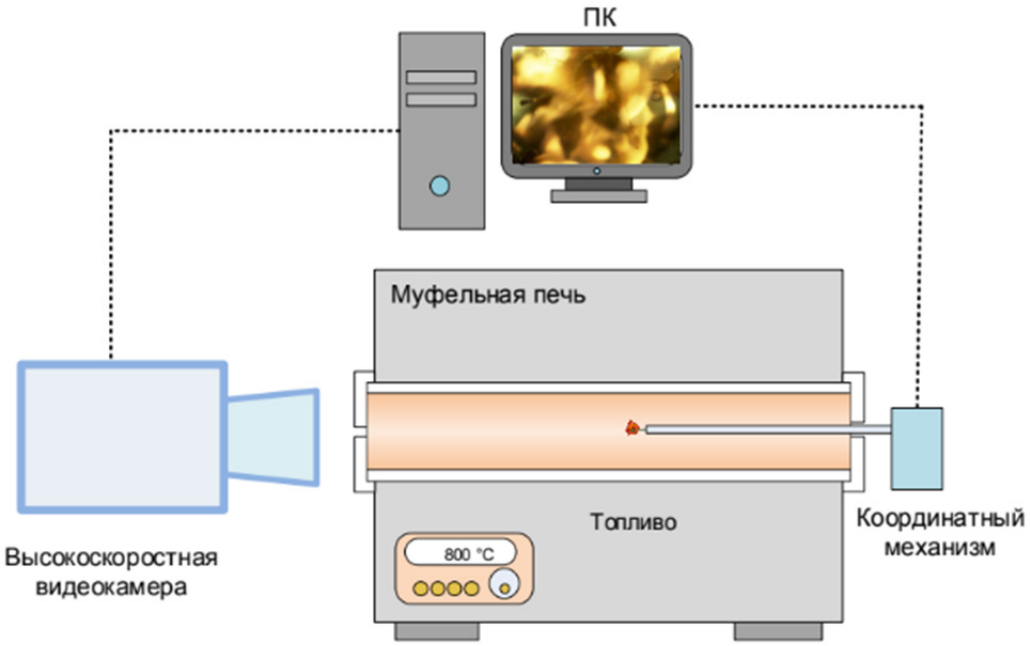


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

На рис. 2 представлены зависимости времен задержки зажигания и длительностей горения капель топливных смесей на основе нефтешлама с добавками дизельного топлива, спирта и воды от температуры в камере сгорания. Установлено, что топливные композиции с добавкой дизельного топлива (рис. 2, *а, б*) характеризуются меньшим временем задержки воспламенения, чем топливная смесь «100 % нефтешлам». Соответствующее отличие варьировалось в диапазоне 20–50 % в зависимости от температуры в камере сгорания и содержания используемой добавки. Также при анализе видеокадров эксперимента определены несколько характерных режимов взаимодействия капли с окислителем, при которых наблюдается фрагментация капель топлива (puffing) и микровзрыв (micro-explosion).

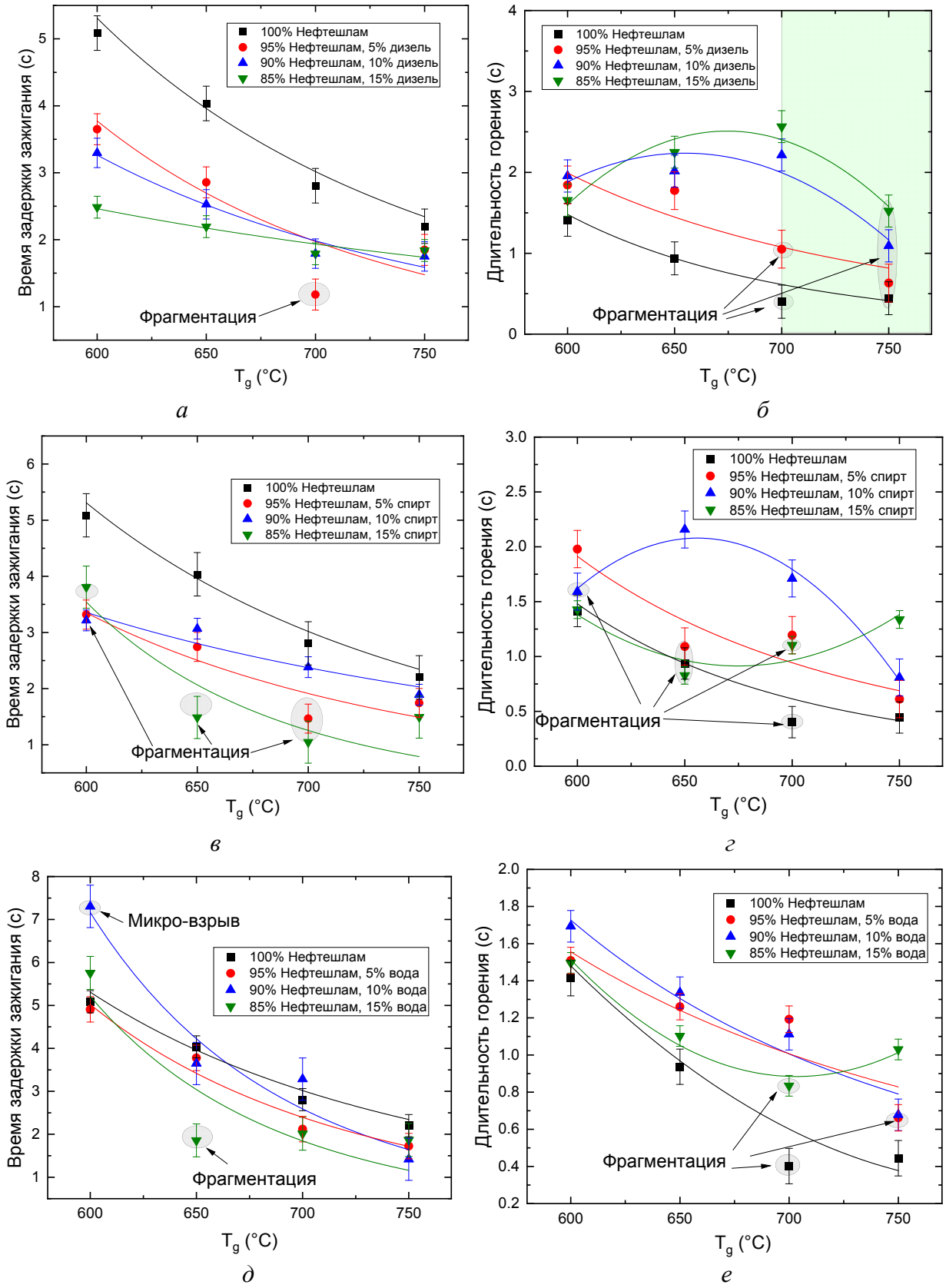


Рис. 2. Зависимости времени задержки зажигания и длительности горения капель топливных смесей на основе нефтешлама с добавками дизеля (а, б); спирта (в, г); воды (д, е) от температуры в камере сгорания

Кроме длительности инициирования горения, дополнительные компоненты могут оказывать влияние на продолжительность горения. При добавлении дизельного топлива с концентрацией 10–15 % мас. регистрировалось увеличение длительностей горения капель топлива, обусловленное увеличением полноты выгорания топливных образцов. В диапазоне 600–700 °С наблюдалась тенденция, связанная с увеличением времени горения капель топливных смесей. После 700 °С длительность горения топливных композиций добавками дизельного топлива (доли 10 и 15 %) снижалось за счет интенсивной фрагментации капли после зажигания, связанной с вскипанием компонентов. Для всех топливных композиций с добавкой дизельного топлива регистрировалось увеличение длительности горения капли по сравнению с топливной смесью «100 % нефтешлам» на 20–80 % в зависимости от температуры в камере сгорания. Данные результат связан с тем, что увеличение температуры позволяет добиться снижения доли несгоревшего топлива и сажеобразования в камере сгорания.

Использование спирта позволяет интенсифицировать зажигание топливных композиций на основе нефтешлама. Метиловый спирт ускорял процесс воспламенения капель топлива, в среднем, на 20–40 % в зависимости от температуры в камере сгорания (рис. 2, *в, г*). При горении капля топливной смеси может фрагментировать с образованием вторичных фрагментов. Эффект существенно влияет на времена выгорания, интенсифицирует теплоперенос в системе топливо-воздух и способствует улучшению условий подвода окислителя к топливу.

На рис. 2, *д, е* представлены временные характеристики горения капель топливных смесей с разной долей воды. Для всех топливных смесей регистрировалось характерное снижение как длительностей горения, так и времени задержки воспламенения капель при увеличении температуры в камере сгорания от 600 до 750 °С на 50–80 %. Также в ходе экспериментов было отмечено, что фрагментация капель топливных смесей может происходить как на этапе прогрева, так и в процессе горения образцов. Для топливной композиции «85 % нефтешлам, 15 % вода» фрагментация регистрировалась при температуре 650 °С, на всех остальных температурах воспламенение происходило без фрагментации. Однако при увеличении температуры регистрировалась фрагментация в процессе горения т.е. после воспламенения капли топлива.

Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2020-806 (договор №13.1902.21.0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Enhancing the biodegradation of total petroleum hydrocarbons in oily sludge by a modified bioaugmentation strategy / R.A. Tahhan, T.G. Ammari, S.J. Goussous, H.I. Al-Shdaifat // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2011. – V. 65. – P. 130–134.
2. Experimental investigation on smoldering combustion for oil sludge treatment: Influence of key parameters and product analysis / Z. Gan, Ch. Zhao, Yu. Li, G. Chen, Zh. Song, Zh. Zhang, W. Ran // Fuel. – 2022. – V. 316.

ВЛИЯНИЕ ОБОГРЕВА НЕСКОЛЬКИХ РАБОЧИХ ЗОН ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ОБОГРЕВАТЕЛЕМ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ

А.В. Вяткин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А1-44

Научный руководитель: Б.В. Борисов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

При отоплении промышленных помещений традиционными система отопления тратится большое количество энергии из-за значительного объема таких помещений. Таким образом, с точки зрения энергетической эффективности необходимо отапливать только зоны, требующие обогрева, например, локальные рабочие или технологические зоны. Отопления локальных зон промышленных помещений можно осуществлять системой с использованием газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) [1, 2].

В настоящее время, процесс теплообмена при обогреве локальной рабочей зоны газовым инфракрасным рассмотрен при различных условиях: различные расход приточного воздуха и расположение вентиляционных отверстий, изменение положения локальной рабочей зоны, варьирование степени черноты поверхности оборудования и ограждающих конструкций и т. д. [3–9]. Однако в данный момент не рассмотрен случай взаимного влияния обогрева нескольких рабочих зон на тепловой режим помещения.

Анализ взаимного влияния обогрева нескольких рабочих зон газовыми инфракрасными обогревателями на тепловой режим помещения рассмотрен в рамках модели теплопереноса [5]. В представленной работе представлена математическая модель в двумерной постановке. В качестве расчетной области принята прямоугольная область размерами L_x=10×L_y=4,4 м, ограниченная ограждающими конструкциями толщиной L_{wall}=0,1 м. В рассматриваемой области размещен один или два ГИИ на высоте 2,975 м. Также в области расположены одна или две горизонтальные панели на оси симметрии ГИИ, поверхность которых была на высоте 760 мм от пола. Рассматриваемая модель помещения оснащена приточно-вытяжной вентиляцией, представленной областями притока и оттока воздуха. Схема рассматриваемой области решения представлена на рис. 1. Воздух считается диатермичной средой, а все поверхности (стен, пола, потолка, ГИИ и оборудования) – непрозрачными серыми. В математической модели для численного анализа процессов теплопереноса используются стандартные модуль программной среды COMSOL Multiphysics: «The Heat Transfer in Fluids Interface» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface». Для учета радиационного теплового потока используется модуль «Surface-to-Surface Radiation». Уравнение движения воздуха на границе «воздух-ограждающая конструкция» принято с учетом условия прилипания. На участке ввода воздуха задан расход и температура, на выходе – постоянное давление равное атмосферному.

Представленная математическая модель перед проведением численного расчета прошла проверку с результатами физического эксперимента [6].

В качестве начальных условий в представленной математической модели приняты следующие параметры: начальная температура воздуха в помещении +7 °С, температура на входе приточной вентиляции + 7 °С, расход воздуха на входе приточной вентиляции – $2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м^3).

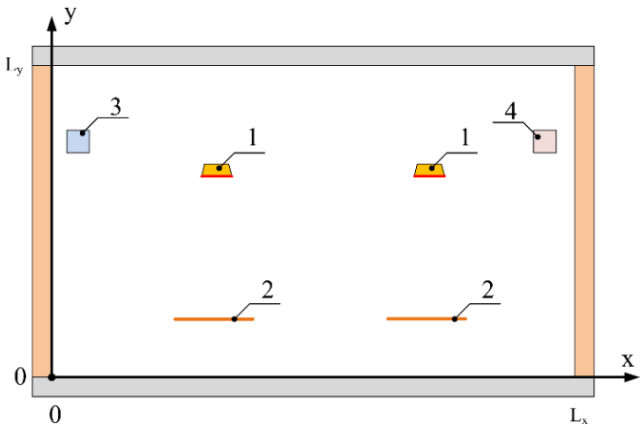
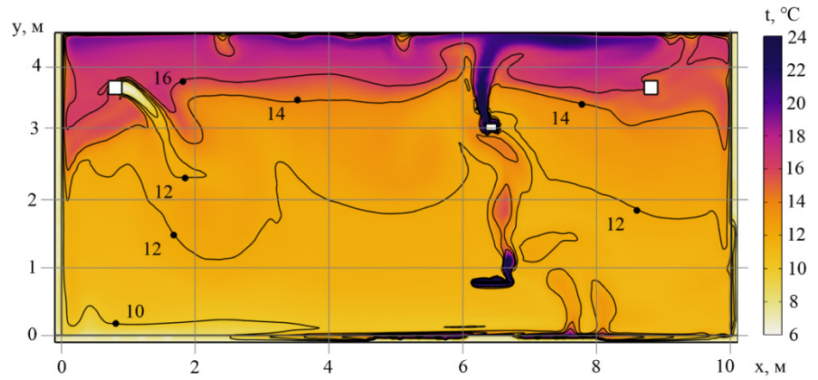
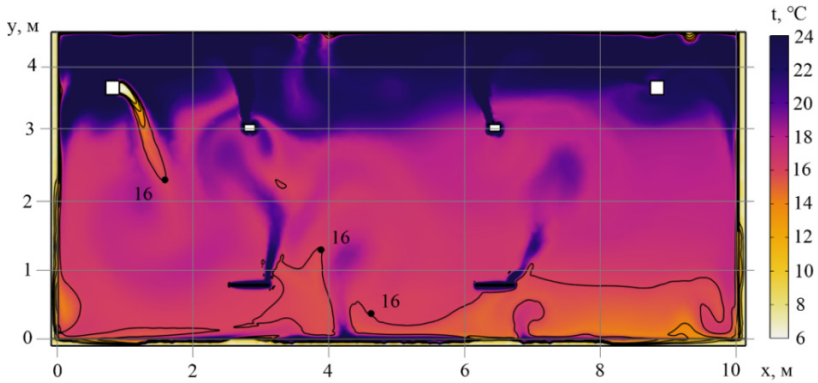


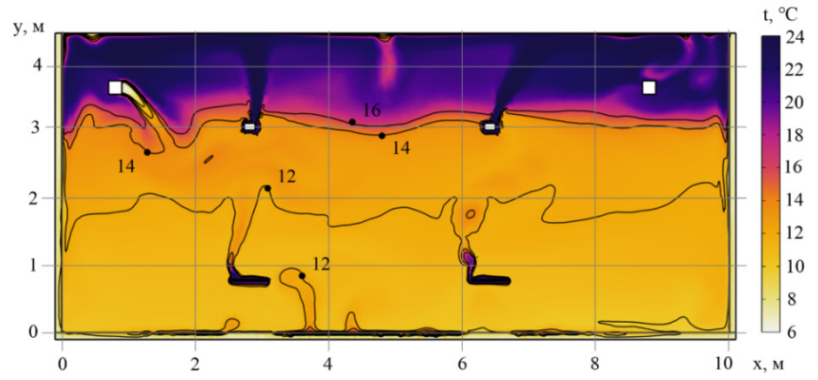
Рис. 1. Схема области решения:
1 – Газовые инфракрасные излучатели;
2 – Горизонтальные панели;
3 – Область притока воздуха;
4 – Область оттока воздуха



а



б



в

Рис. 2. Поля температур через 60 минут работы ГИИ в условиях смешанной конвекции: а) обогрев одной локальной рабочей зоны; б) обогрев двух локальных рабочих зон стандартными газовыми инфракрасными излучателями; в) обогрев двух локальных рабочих зон газовыми инфракрасными излучателями с пониженной мощностью на 25 %

В работе рассмотрены случаи обогрева одной локальной рабочей зоны, обогрева двух локальных рабочих зон со стандартной мощностью газового инфракрасного излучателя, обогрева двух локальных рабочих зон с пониженной мощностью газового инфракрасного излучателя на 25 %. Результаты показаны на рис. 2.

Представленные результаты показывают, что при обогреве второй локальной рабочей зоны газовыми инфракрасным излучателем средняя температура по всему объему помещения повышается на 3–4 ℃. Однако, при снижении мощности газового инфракрасного излучателя на 25 % уменьшается градиент температур, и наблюдается более равномерный прогрев воздуха по всему помещению.

Таким образом, по результатам проведенного исследования, можно сделать вывод о том, что при обогреве газовыми инфракрасными излучателями нескольких локальных рабочих зон требуется корректирующий расчет мощности используемого оборудования. Уменьшение мощности оборудования также позволяет повысить энергетическую эффективность системы отопления промышленного помещения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Thermal conditions of the local working area heated by a gas infrared heater under the mixed convection state / B.V. Borisov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2211. – Article number 012022.
8. Thermal regime of the local working zone in the industrial premises under radiant heating conditions/ G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2057. – Article number 012124
9. Temperature fields of local working zones of large-sized industrial premises with sources of radiant local heating under conditions of mixed convection / A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V. 2503. – Article number 020003.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПРИГОТОВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ С УГЛЕМ

А.К. Асильбеков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А1-46

Руководитель: К.В. Слюсарский, к.ф.-м.н., доцент НОЦ. И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Широкое внедрение углерод-нейтральных топлив различного вида в современную энергетику является устойчивым направлением последних лет, связанным с необходимостью утилизации отходов для снижения выбросов парниковых газов в окружающую среду. В настоящее время биотопливо (в т. ч. отходы) обеспечивают порядка 10 % общемирового потребления первичной энергии, что составляет 56 ЭДж [1]. Следует отметить стабильность образования отходов и доступность низкореакционного твердого топлива [2], что делает его особенно подходящим для целей теплоснабжения, преимущественно, путем сжигания [3].

Глубокая переработка отходов позволит обеспечить их более широкое вовлечение в различные области энергетики, транспорта и промышленности для снятия нагрузки на ископаемое топливо [4]. В результате переработки отходов методом пиролиза формируются продукты в твердой, жидкой и газовой фазах (углеродный остаток, пиролизная жидкость и неконденсируемые пиролизные газы), пригодные для использования в качестве энергетического топлива [5].

Актуальность работы заключается в необходимости разработки технологических решений для повышения конкурентоспособности пиролизной переработки различных отходов в традиционной энергетике. Сжигание пиролизной жидкости в составе смеси с углем, позволяющим стабилизировать свойства полученного топлива и использовать его в составе стандартного энергетического оборудования.

В связи с этим необходимо определение характеристики зажигания и горения смеси пиролизной жидкости и низкосортного угля, влияния способа приготовления, в зависимости от температуры греющей среды и концентрации добавки.

Для определения влияния способа приготовления, смесь пиролизной жидкости с низкосортным углем приготавливалась двумя методами: методом равномерного смешивания и методом поверхностного смачивания.

Для определения состава выделяющихся газофазных продуктов использовался газоанализатор БОНЭР, а для кинетических характеристик процессов пиролиза и окисления полученной пиролизной жидкости, данные образцы исследовались с помощью термогравиметрического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия).

Время задержки зажигания определялось при помощи высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM CA4, и определялась как разница между моментами времени поступления образца в печь и его зажигания, фиксируемого по появлению свечения на его поверхности или в непосредственной близости от неё. Характерные кадры задержки зажигания образцов смесей пиролизной жидкости с низкореакционным углем представлены на рис. 1, приготовленные методами равномерного смешения и поверхностного смачивания, с концентрации добавки 5 % при температуре греющей среды 600 °С. Во всем исследованном диапазоне температур греющей среды наблюдалось относительно линейное снижение времени задержки зажигания при увеличении концентрации добавки и температуры греющей среды (при 700 и 800 °С различия между значениями времен задержки зажигания для образцов, приготовленных различными способами, практически отсутствуют), исключением является образец с 5 мас. % добавки пиролизной жидкости, приготовленный методом равномерного смешения при 600 °С. Это связано с недостаточным тепловыделением добавки, не позволяющим инициировать зажигание образца.

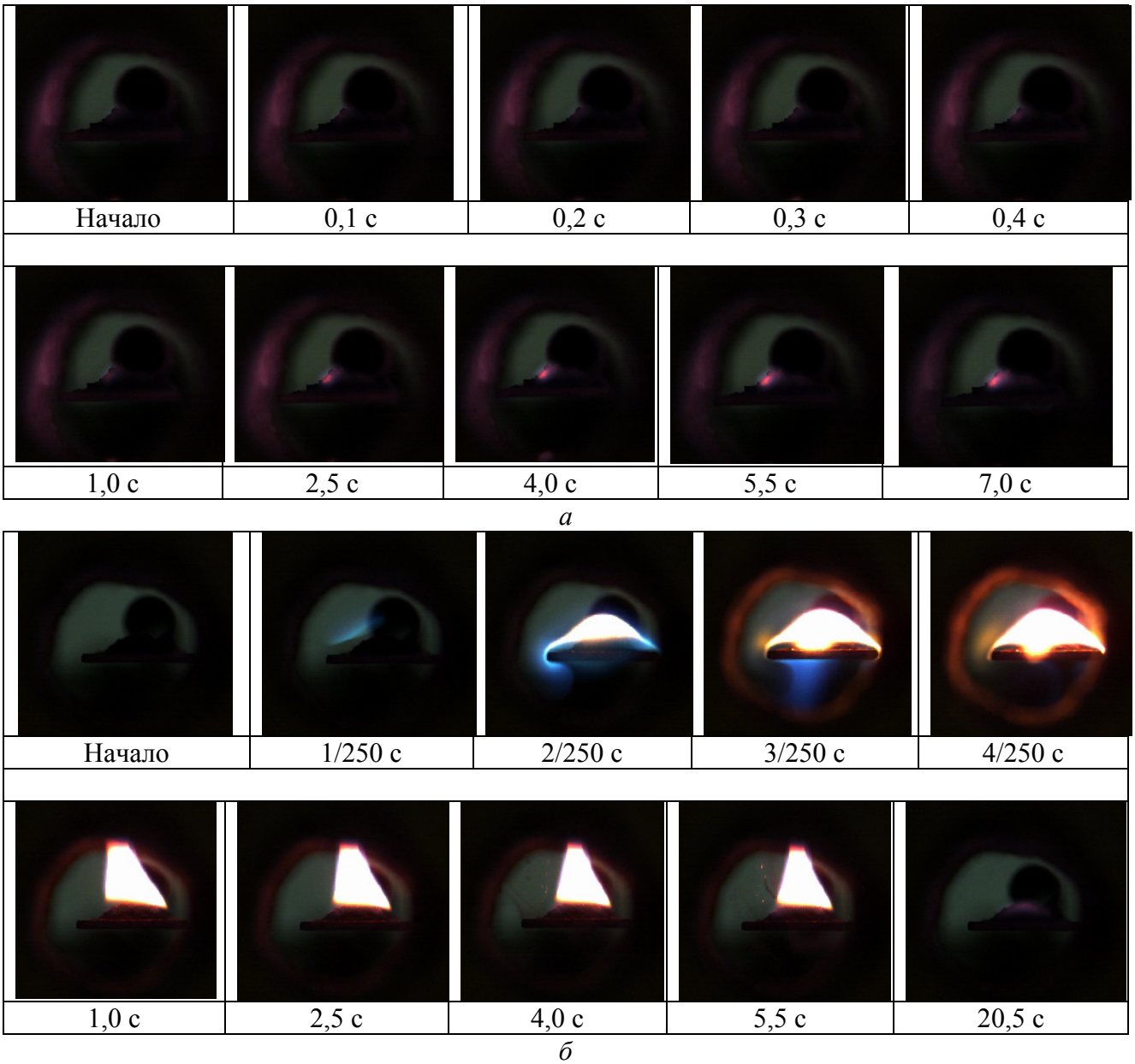


Рис. 1. Кадры зажигания и горения образцов при 600 °С 5 % добавки пиролизной жидкости, приготовленного методам равномерного смешения (а) и поверхностного смачивания (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (проект № МК-2563.2022.1.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scarlat N., Dallemand J.-F. Future Role of Bioenergy // The Role of Bioenergy in the Bioeconomy. Elsevier. – 2019. – P. 435–547.
2. Ruiz-Mercado G.J., Segovia-Hernández J.G., Castro-Montoya A.J. Transformation towards sustainable bioenergy systems // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2018. – V. 20. – № 7. – P. 1385–1385.
3. Soltero V.M., Quirosa G., Rodríguez D., Peralta M.E., Ortiz C., Chacartegui R. A profitability index for rural biomass district heating systems evaluation // Energy. – 2023. – V. 282. – P. 128395.
4. Banja M., Sikkema R., Jégard M., Motola V., Dallemand J.F. Biomass for energy in the EU – The support framework // Energy Policy. Elsevier, – 2019. – V. 131. – P. 215–228.
5. Balat M., Balat M., Kırtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems // Energy Conversion and Management. – 2009. – V. 50. – № 12. – P. 3147–3157.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЛЕСНОМ ГОРЮЧЕМ МАТЕРИАЛЕ

В.А. Вяткина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А1-13

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В последние десятилетия отмечается тенденция к увеличению как частоты, так и суровости лесных пожаров [1, 2]. Вследствие этого кратно растут как ущербы от этого стихийного бедствия, так и расходы на восстановление лесных массивов [3]. Прогнозирование является одним из наиболее эффективных и перспективных методов борьбы с лесными пожарами. Точный прогноз способствует как возможному предотвращению возгорания, так и перераспределению ресурсов для оперативной ликвидации уже существующих возгораний.

Пожар является сложным процессом, характеризующимся протеканием большого количество физических и химических процессов, что является достаточно трудоёмкой задачей с точки зрения моделирования. В данном случае требуется обработка большого количества разнородных и быстро меняющихся данных. В данном случае целесообразно применение параллельных вычислений для обеспечения проведения расчётов в режиме опережения. Целью исследования являлось численное моделирование процессов тепломассопереноса в типичном лесном горючем материале с применение параллельных вычислений.

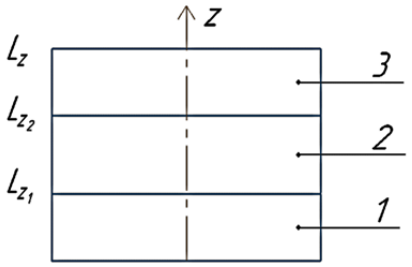


Рис. 1. Область решения задачи: 1, 3 – сухое органическое вещество; 2 – смесь сухого органического вещества и воды

При моделировании рассматривались процессы инертного прогрева и пиролиза в типичном для смешанных лесов горючем материале – листе берёзы. Предполагалось, что образец имеет многослойную структуру (рис. 1).

Математическая модель включала себя одномерные уравнения теплопроводности и реакции пиролиза с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - q_{\text{р}} k \rho_4 \varphi_4 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \quad (1)$$

$$\rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = -k_1 \rho_4 \phi_4 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_i}\right), \quad (2)$$

$$t = 0: \quad T_i = T_0, 0 < z < L_z \quad (3)$$

$$\varphi_4 \big|_{t=0} = \varphi_{40} \quad (4)$$

$$\varphi_5 \big|_{t=0} = \varphi_{50} \quad (5)$$

$$\sum_{i=4}^{6} \phi_i = 1 \quad (6)$$

$$z = 0: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}\big|_{\text{г}} = \alpha(T_1 - T_{\text{п}}) \quad (7)$$

$$z = L_z: \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}\big|_{\text{г}} = \alpha(T_3 - T_{\text{п}}) \quad (8)$$

$$z = L_{z1}: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}|_{\Gamma} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}|_{\Gamma};\ T_1 = T_2 \quad (9)$$

$$z = L_{z2}: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}|_{\Gamma} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}|_{\Gamma};\ T_2 = T_3 \quad (10)$$

где i =1, 2, 3 – слои образца, i =4, 5, 6 – фазы сухого органического вещества, воды и газовых продуктов соответственно, ρ – плотность, с – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, T_i – температура образца в точке i-го слоя, T_n – температура пламени q_p – тепловой эффект реакции пиролиза образца, k – предэкспонент реакции пиролиза образца, R – универсальная газовая постоянная, E – энергия активации реакции пиролиза образца.

Для решения уравнений применялся метод конечных разностей [4]. Дискретизация уравнений проводилась с помощью локально одномерной схемы А.А. Самарского. Программа для реализации расчётов была реализована на высокоуровневом языке Python.

В рамках исследования копии программы с заранее сгенерированными наборами входных данных запускались на различном количестве узлов (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256). В ходе вычислений формировался файл результатов, содержащий значения температур и фаз в каждой точке образца на каждом шаге по времени. Также на основе значения времени, затраченного на выполнение расчётов на каждом количестве узлов, вычислялись значения эффективности и ускорения.

Значение ускорения и эффективности вычислялись по формулам (11) и (12) соответственно [5]:

$$S_{\text{м}} = \frac{T_0}{T_{\text{м}}}, \quad (11)$$

$$E_{\text{м}} = \frac{T_0}{MT_{\text{м}}}. \quad (12)$$

где T_0, $T_{\text{М}}$ – времена выполнения последовательного (вариант без потерь) и параллельного алгоритма соответственно. Теоретическое ускорение считалось равным числу ядер ($S_{\text{М}}$=M).

При моделировании рассматривались четыре основных вида лесных пожаров и три вида пожароопасных сезонов. Учитывалась также влияние теплофизических и термокинетических параметров образца.

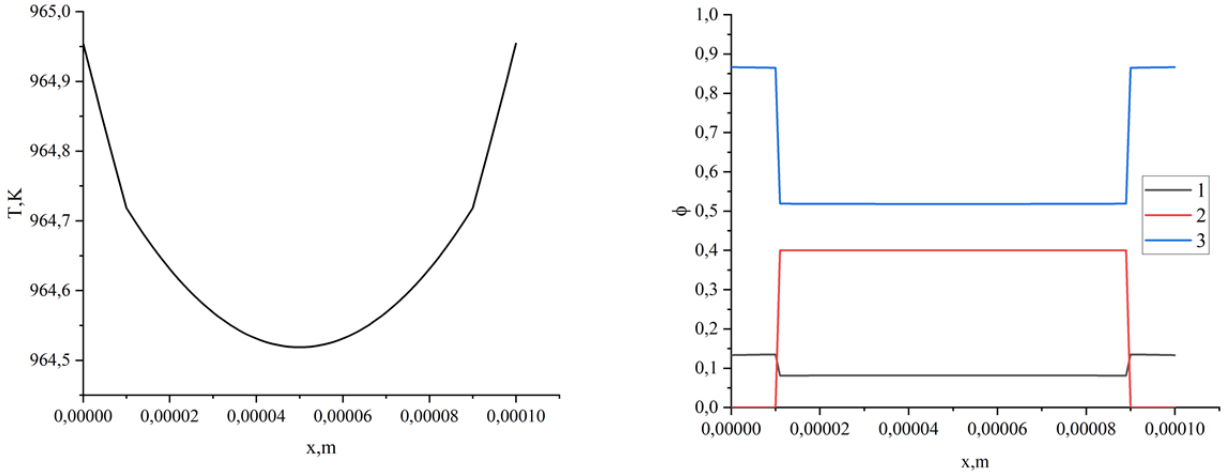
Рис. 2, *а* и *б* приведены типичные распределения температур и фаз в листе берёзы, находящемся под воздействием фронта для случая низового лесного пожара в летний период.

На рис. 3, *а* и *б* приведены сравнения теоретический и фактических значений для эффективности и ускорения соответственно.

Полученные температурные и фазовые распределения образца позволяют проводить количественную и качественную оценку изменений параметров в образце. Так, установлено, что основной эффект воздействия на образец обусловлен длительностью пребывания образца во фронте лесного пожара. Максимально количество газообразных продуктов пиролиза образуется на границе контакта с высокотемпературной средой.

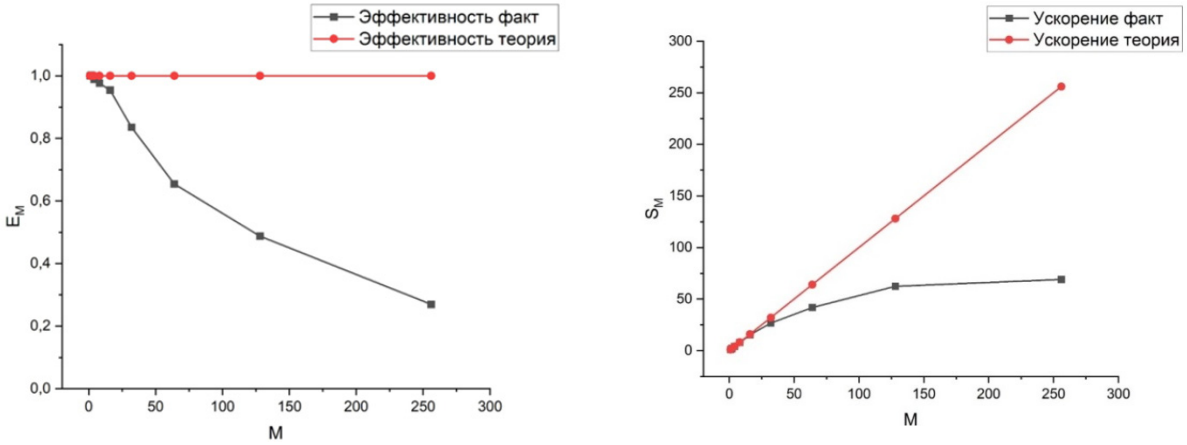
Анализ зависимостей, приведённых на рис. 3, показывает, что оптимально использовать 8 узлов для проведения расчётов. В данном случае обеспечивается максимальный прирост в ускорении по сравнению с предыдущим количеством узлов и не наблюдается резкого падения в величине эффективности. Разница между практическими и теоретическими значениями величин обусловлена затратами времени на обмен данными, запуск и завершение процессов.

Таким образом, проведенное математическое моделирования позволяет как выявить основные закономерности поведения образца, так и оценить предстоящие затраты на реализацию таких вычислений. Предложенная математическая модель может быть интегрирована в качестве модуля в более сложные системы прогноза пожарной опасности.



а *б*

Рис. 2. Распределение температур (а) и объемных долей фаз (б) в образце под воздействием низового лесного пожара низкой интенсивности в момент времени t = 2 с (лето): 1 – сухое органическое вещество, 2 – влага, 3 – газовая фаза



а *б*

Рис. 3. Зависимость величины эффективности E_M (а) и ускорения S_M (б) от числа задействованных в расчетах узлов (M)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forest Fire Occurrence, Distribution and Risk Mapping Using Geoinformation Technology: A Case Study in the Sub-Tropical Forest of the Meghalaya, India / T. Dhar, B. Bhatta, S. Aravindan // Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2023. – V. 29. – P. 100883.
2. Fire Severity and Pre-Fire Forest Composition Affect Northern Hawk Owl Presence in Burned Forests in Western North America / K.C. Hannah, J.E. Put; J. Shonfield // Forest Ecology and Management. – 2023. – V. 528. – P. 120632.
3. Константинов А.В., Морковина В.В. Лесные пожары как наиболее значимая угроза экономической безопасности лесного сектора // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4. – № 2. – С. 319–325.
4. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
5. Algorithms for parallelizing a mathematical model of forest fires on supercomputers and theoretical estimates for the efficiency of parallel programs / N.V. Baranovskiy // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – V. 51. – P. 471–480.

ЛИКВИДАЦИЯ ВОЗГОРАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОСРАБАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, СОДЕРЖАЩЕГО ГИДРАТ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

И.В. Забелин, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Томский политехнических университет,
ИШЭ, ТЭС, гр. А3-13

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова

Газовые гидраты представляют собой нестехиометрические каркасные кристаллические соединения, образованные низкомолекулярным газом и водой в условиях пониженной температуры и высокого давления [1, 2]. К этим газам относятся легкие углеводороды (CH_4, C_2H_6, C_3H_8 и др.), углекислый газ, сероводород, азот и др. [3]. В природе гидраты в основном существуют в глубоководных отложениях и вечной мерзлоте. Мировым научным сообществом накоплен опыт синтеза гидратов с различным компонентным составом (одинарные, двойные, мультикомпонентные) для совокупности приложений [4].

В настоящее время газогидраты пока не нашли широкого применения для локализации и ликвидации возгораний вследствие отсутствия результатов экспериментальных и теоретических исследований условий горения материалов при контакте с ними. Важно обосновать, насколько они эффективны. Целесообразно разработать технологии для транспортировки, хранения и подачи гидрата в зону горения. С учетом результатов анализа [5] можно сделать вывод о том, что подавление возгораний гидратом является весьма перспективным. В гидрате присутствует инертный газ, который позволит вытеснить из зоны горения окислитель, а лед и вода, меняя агрегатное состояние, позволят снизить температуру в очаге возгорания [6]. Гидрат предполагается использовать в самосрабатывающем гидратном огнетушителе, который в момент разрыва оболочки срывает пламя ударной волной, что приводит к подавлению пламенного горения. Вода, водяной пар и инертный газ в дальнейшем снижают температуру и концентрацию окислителя в окрестности реагирующего материала [7].

Для синтеза гидрата двуокиси углерода использовались поверхностно-активные вещества: лаурилсульфат натрия, состав огнетушащий ОС-5, пенообразователь и Tween-80. Свойства исследуемых составов приведены в табл. 1. Выбор ПАВ обусловлен совокупностью причин: способностью к пенообразованию в водных растворах, что на данный момент необходимо в пожаротушении; отсутствием негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека; низкой стоимостью; отсутствием канцерогенных веществ. Применение таких поверхностно-активных веществ также обусловлено снижением поверхностного натяжения жидкости, что приводит к увеличению площади роста кристаллов гидрата.

Таблица 1. Свойства исследуемых составов

№	Наименование	Плотность ρ, kg/m^3	Поверхностное натяжение σ, N/m	Динамическая вязкость μ, Pa·s
1	99.5 vol % вода, 0.5 vol % лаурилсульфат натрия	998	0.0401	0.001
2	99.5 vol % вода, 0.5 vol % ОС-5	998	0.0321	0.001
3	99.5 vol % вода, 0.5 vol % пенообразователь	998	0.0361	0.001
4	99.5 vol % вода, 0.5 vol % tween-80	998	0.0474	0.001
5	Вода	998	0.07269	0.001

Состав № 1 представляет собой органическое соединение соли натрия и лаурилсерной кислоты в виде порошка белого цвета, растворяемого в воде. В водных растворах образуется

стойкая пена. Применяется в качестве детергента в промышленности. Широкое применение обусловлено низкой стоимостью. Не является канцерогенным веществом. Состав № 2 используется в качестве добавки к воде для подавления возгораний различной интенсивности. Состав № 2 обладает одновременно огнетушащей и огнезащитной способностью. Состав № 3 является концентрированным водным раствором стабилизатора пены, образующейся при смешении рабочего раствора пенообразователя с водой. Применяется для подавления горения горючих жидкостей, твердых горючих материалов, волокнистых и тлеющих веществ, а также для защиты строительных конструкций, технологических аппаратов и хранящихся материалов от воздействия тепловых потоков. По химическому составу пенообразователи классифицируются как синтетические углеводородные типа S. Состав № 4 представляет жидкое, маслянистое вещество со светло-желтым оттенком. Применяется в пищевой промышленности в качестве эмульгатора и стабилизатора пены, в косметике, медицине.

Для проведения исследований по ликвидации возгораний твердых и жидких веществ и материалов самосрабатывающим гидратным огнетушителем использовался экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1. Стенд представлял собой параллелепипед, выполненный из стали марки СТ3 с габаритными размерами 430×430×460 мм и толщиной стенки 2 мм. В одной из сторон параллелепипеда предусматривалось смотровое окно размерами 200×200 мм для видеофиксации процессов подавления возгораний веществ и материалов. В верхней части стенда предусмотрено отверстие размером 80×80 мм для подачи самосрабатывающего огнетушителя. Регистрация процесса ликвидации возгораний проводилась при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro C110 (3) (разрешение 1280×1024, скорость регистрации 240 fps). Видеофиксация проводилась при разрешении 1280×1024 pixels at 240 fps с межкадровой задержкой 1/10000. Высокоскоростная камера использовалась с объективом Sigma 50mm f/1.4 EX DG OS HSM Macro Nikon F.

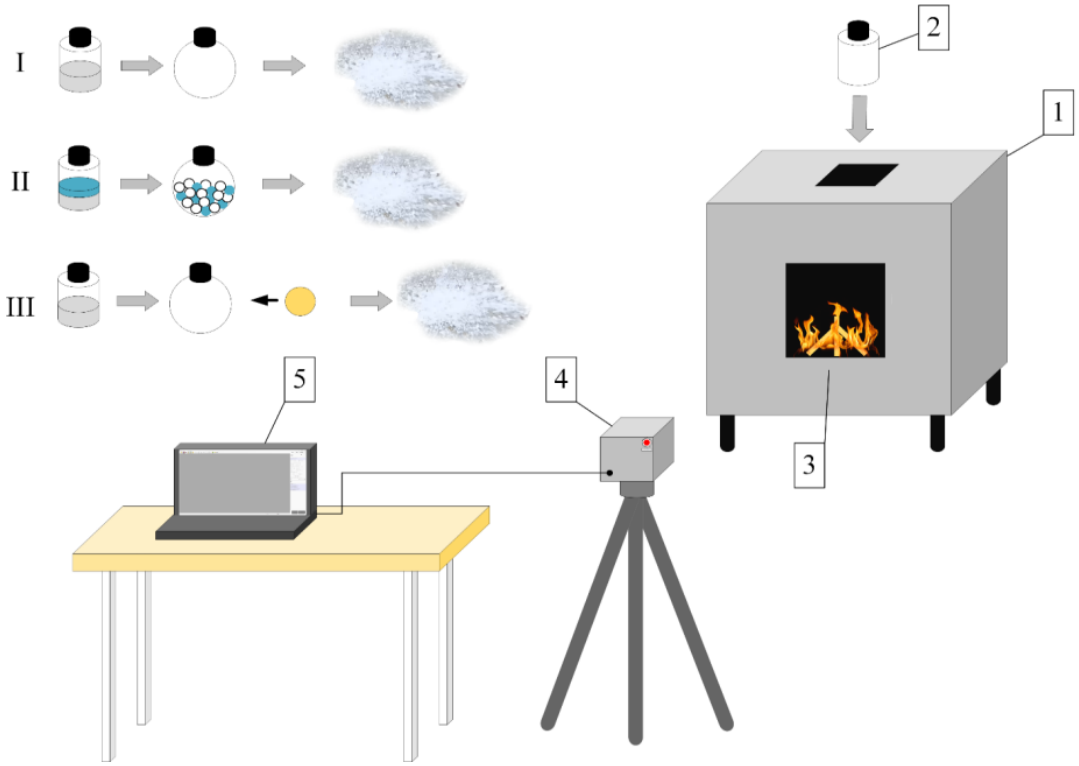


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:
1 – корпус; 2 – самосрабатывающий гидратный огнетушитель; 3 – модельный очаг;
4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – персональный компьютер

Экспериментальные исследования проводились для двух типов очагов возгорания, смоделированных согласно GOST 51057 (Fire fighting equipment. Portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods). Первый тип очага возгорания изготавливался из твердых горючих материалов. Для изготовления такого очага применялись кедровые бруски размером 200×25×25 мм и влажностью около 16 %. Для инициирования процесса горения такого очага добавлялся бензин объемом около 10 мл, который воспламенялся от пьезоэлектрического элемента. Второй очаг представлял собой емкость высотой 100 мм и внутренним диаметром 300 мм. Площадь модельного очага составляла около 0,07 м^2. В такую емкость наливалась вода в объеме 15 и 50 мл. На слой воды наваливался бензин в объеме 10 и 20 мл. Далее инициировалось его горение с помощью пьезоэлектрического элемента.

Для создания самосрабатывающего гидратного огнетушителя использовались емкости, выполненные из PET пластика, объёмом 50 и 100 мл. В верхней части емкости располагалась крышка с резьбовым соединением. Критическое давление разрыва самосрабатывающего гидратного огнетушителя составляло около 14 бар. Масса гидрата контролировалась весами Demcom DL 123 и составляла 35, 50 и 75 г. Для определения условий срабатывания гидратного огнетушителя проведена серия экспериментов, в ходе которых в корпус огнетушителя добавлялась вода объемами 25, 50 и 75 мл. Также проводились эксперименты по инициированию срабатывания за счет механического воздействия. На огнетушитель оказывалось внешнее воздействие. Реализовывались соударение металлического шарика диаметром 4,5 мм, выпущенного из пневматического метательного устройства, и соударение условного снаряда массой 28 г, выпущенного со скоростью 20 м/с. Также оценивалось механическое воздействие от соударения огнетушителя с очагом возгорания и отсутствие механического воздействия.

При анализе экспериментальных исследований рассчитывались следующие параметры: объем углекислого газа (V_{CO2}); объем свободного пространства в огнетушителе (V_{em}); объем навески твердого материала в очаге возгорания (V_f); объем гидрата (V_h); объем горючей жидкости в очаге возгорания (V_{lq}); объем добавленной воды в гидрат (V_w). При расчете объема углекислого газа (V_{CO2}) и нормальных условиях использовались значения массовой концентрации газа в гидрате (23 %). Расчет объема гидрата в самосрабатывающем огнетушителе (V_h) осуществлялся на основе кадров видеофиксации по диаметру и уровню заполнения гидратом огнетушителя. Для расчета объема свободного пространства в огнетушители (V_{em}) использовалось известное значение общего объема самосрабатывающего гидратного огнетушителя (50 и 100 мл) и вычисленное значение объема гидрата в огнетушителе (V_h). Объем навески твердого материала в очаге возгорания (V_f) вычислялся из размеров и массы навески, а объем жидкости (V_{lq}) на основе рисок при наполнении емкости. Схема расчетных и регистрируемых параметров приведена на рис. 2. С использованием высокоскоростной видеосъёмки регистрировались параметры: время задержки срабатывания огнетушителя (τ_{ac}) (т. е. временной интервал от подачи огнетушителя в очаг возгорания до его срабатывания); время подавления возгорания (τ_{ex}) (временной интервал от момента срабатывания огнетушителя до полной ликвидации очага возгорания).

Анализ полученных результатов исследований позволил установить, что добавление поверхностно-активных веществ способствует снижению поверхностного натяжения жидкости, что приводит к лучшему разбрызгиванию воды по поверхности реактора. Такой эффект позволяет увеличивать площадь поверхности теплообмена в реакторе, что приводит к снижению времени синтезирования газового гидрата на 35 %. Установлено, что повышение температуры в самосрабатывающем огнетушителе ускоряет процесс диссоциации, а следовательно, снижаются времена задержки срабатывания огнетушителя. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить эффективные условия использования гидратного огнетушителя для ликвидации возгорания различных материалов. Установлено, что увеличение массы гидра-

та в самосрабатывающем огнетушителе, уменьшение объема свободного пространства в огнетушителе, добавление воды в него, а также механическое воздействие способствуют повышению скорости его срабатывания (т. е. минимизирует задержку). Варьирование таких параметров позволяет контролировать времена срабатывания гидратного огнетушителя.

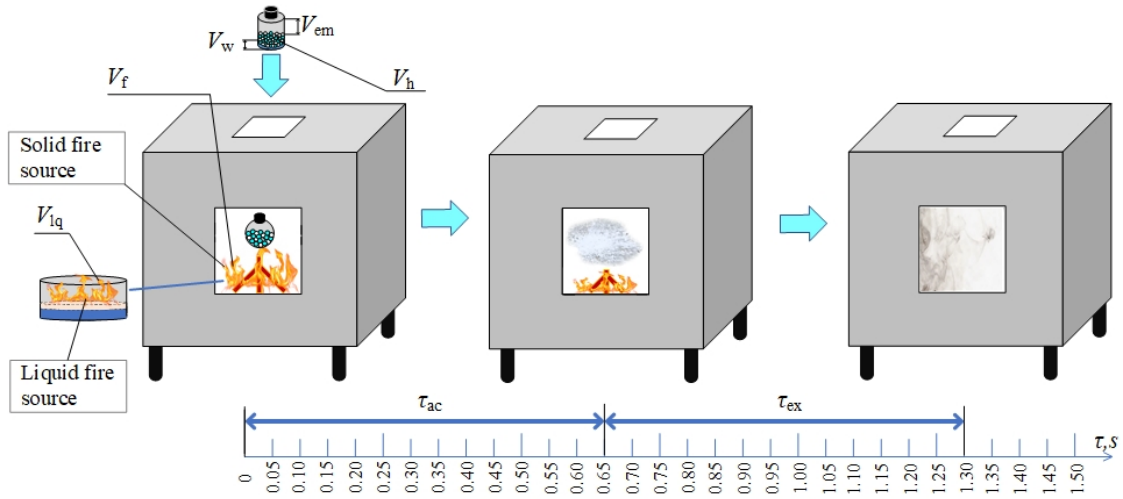


Рис. 2. Основные расчетные и регистрируемые параметры:
V_f – объем навески твердого материала в очаге возгорания, м³;
V_{lq} – объем жидкости в очаге возгорания, м³; V_h – объем гидрата, м³;
V_w – объем добавленной воды в гидратный огнетушитель, м³;
V_{em} – объем пустого пространства в гидратном огнетушителе, м³;
τ_{ac} – время задержки срабатывания огнетушителя, s;
τ_{ex} – время подавления возгорания, s

Разработана схема применения самосрабатывающих гидратных огнетушителей для подавления возгораний. Определены границы применимости созданного огнетушителя и технологии на его основе для подавления горения твердых веществ и материалов. Обосновано, что ликвидация возгорания жидкого топлива самосрабатывающим гидратным огнетушителем малоэффективна. Получено математическое выражение для оценки коэффициента эффективности огнетушителя при ликвидации возгораний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li X.Y., Yan J., Zhong D.L., Lu S.J., Ge B.B. Investigation of tetra-n-butyl ammonium bromide semiclathrate hydrate-based CO_2 capture by kinetic and in situ Raman spectroscopy measurement // Ind. Eng. Chem. Res. 2023. – V. 62(6). – P. 2504. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03609
2. Ni X.-Y. et al. Effect of 1,3-Dioxolane on Gas Separation Kinetics via Gas Hydrates // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – V. 62(35). – P. 14012–14022. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02034
3. Bhawangirkar D.R., Sangwai J.S. Insights into Cage Occupancies during Gas Exchange in CH_4+CO_2 and CH_4+N_2+CO_2 Mixed Hydrate Systems Relevant for Methane Gas Recovery and Carbon Dioxide Sequestration in Hydrate Reservoirs: A Thermodynamic Approach // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2019. – V. 58(31). – P. 14462–14475. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02364
4. Khandelwal H. et al. Effect of l-Tryptophan in Promoting the Kinetics of Carbon Dioxide Hydrate Formation // Energy & Fuels. – 2021. – V. 35(1). – P. 649–658. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03709
5. L, H., Hao J., Du Z. Study on the Minimum Fire-Extinguishing Concentration of Several Commonly Used Extinguishing Agents to Suppress Pyrolysis Gas of Red Pine Wood // ACS Omega. – 2023. – V. 8(8). – P. 7757–7766. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07424
6. Shishova N., Jr Fesenko. The prospects of the application of gases and gas hydrates in cryopreservation // Biophysics. – 2015. – V. 60. – P. 782–804. https://doi.org/10.1134/S0006350915050218
7. Hu X., Kraaijeveld A., Log T. Numerical Investigation of the Required Quantity of Inert Gas Agents in Fire Suppression Systems // Energies. – 2020. – V. 13(10). https://doi.org/10.3390/en13102536

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИССОЦИАЦИИ ГИДРАТА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

М.В. Школа, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ3З

Научный руководитель: Н.Е. Шлегель, канд. техн. наук, инженер-исследователь, ИШФВП ТПУ

Газовые гидраты – это нестехиометрические соединения, образованные водой и небольшими молекулами газа в условиях высокого давления и низкой температуры [1]. Молекулы воды соединяются водородными связями, образуя каркасную структуру, а молекулы газа запечатываются в каркасной конструкции под эффект сил Ван-дер-Ваальса [2]. В качестве газа могут использоваться метан, этан, пропан, диоксид углерода, азот и др. В окружающей среде гидраты природного газа встречаются в морских отложениях и районах вечной мерзлоты [3].

Газовые гидраты привлекают все больший исследовательский интерес из-за разнообразия их применения. Клатратные гидраты, образованные негорючими газами (CO_2, N_2, Ar), могут быть использованы в качестве огнетушащих веществ, поскольку при диссоциации гидратов снижается температура горящих материалов, а выделяющиеся негорючие газы вытесняют кислород из очага возгорания [4]. Такие гидраты могут быть созданы из дымовых газов, образующихся на угольных станциях, металлообрабатывающих заводах и других объектах в результате сжигания топлива.

В настоящие время газогидраты пока не нашли широкого применения для локализации и ликвидации возгораний вследствие отсутствия результатов экспериментальных и теоретических исследований условий горения материалов при контакте с ними. Важно обосновать, насколько они эффективны. Целесообразно определить условия, при которых происходит активная диссоциация гидрата двуокиси углерода.

Для синтеза гидрата двуокиси углерода использовался экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1. На первом этапе синтеза в емкость реактора *8* через заливную воронку *4* подавался раствор воды с ПАВ в объеме 150 мл. Использовались следующие поверхностно активные вещества: лаурилсульфат натрия, состав огнетушащий ОС-5, пенообразователь и Tween-80. Далее производился запуск электродвигателя *7*, который приводил в движение магнитную мешалку *3*. Использование магнитной мешалки необходимо для распределения раствора по стенкам реактора в целях интенсификации процессов теплообмена. После этого в реактор *8* с помощью вентиля *5* подавалась двуокись углерода до достижения значения давления около 60 бар. Синтез газогидратов проводился при скорости вращения магнитно-перемешивающего устройства около 1100 об/мин. Процесс гидратообразования завершался, при достижении постоянных значений давления и температуры в течении длительного времени, т. е. равновесного состояния двуокиси углерода (P =12,3 бар).

После изготовления газового гидрата проводились экспериментальные исследования по скорости диссоциации. На первом этапе эксперимента с помощью вентиля сброса давления *11* осуществлялось выпуск газа из реактора до достижения атмосферного давления. Затем отключалось перемешивающее устройство. На термостате устанавливалось значение температуры в диапазоне от 0 до + 70 °С. Процесс диссоциации газового гидрата, сопровождающийся повышением давления и температуры, длился до тех пор, пока температура в реакторе не стабилизировалась, а давление в течение 6 часов оставалось неизменным, т. е. пока не наступит равновесное состояние газа.

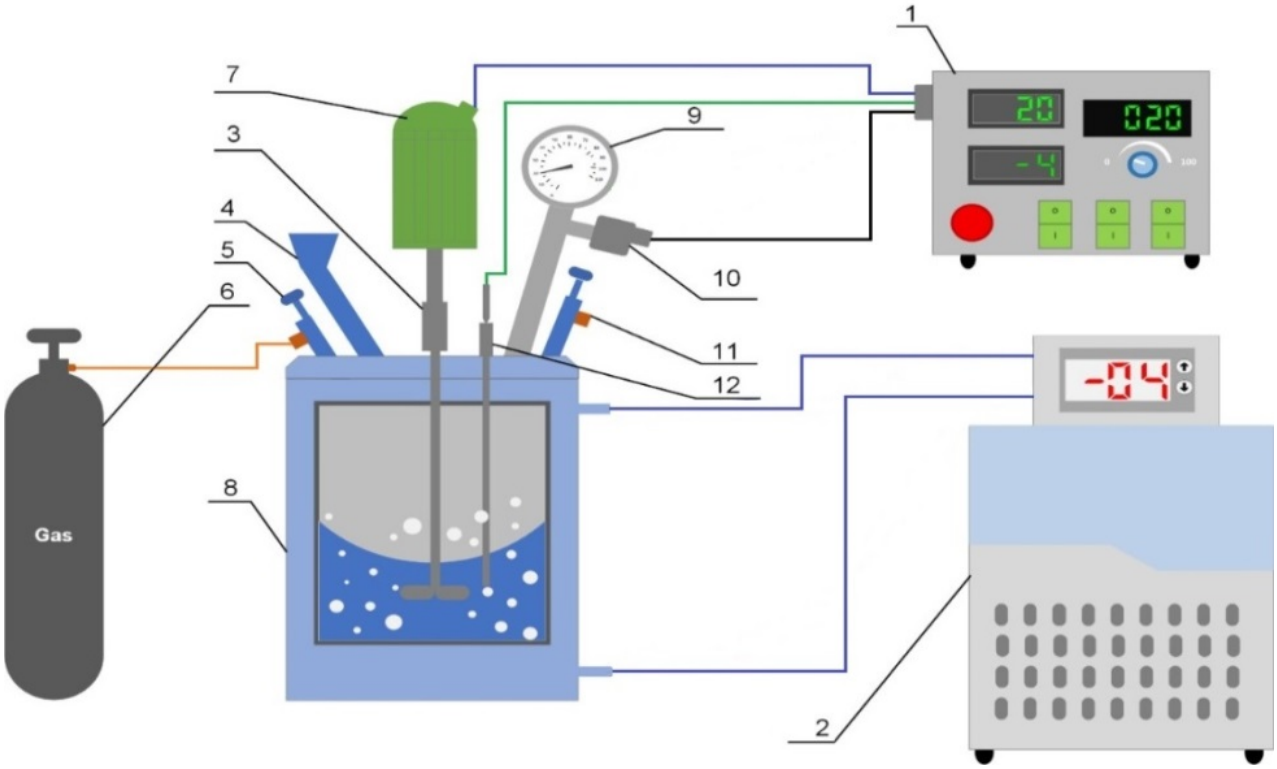


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для синтезирования газовых гидратов:
1 – блок управления; 2 – термостат; 3 – магнитно-перемешивающие устройство;
4 – заливная воронка; 5 – вентиль подачи газа; 6 – баллон с газом; 7 – электродвигатель;
8 – реактор; 9 – показывающий манометр; 10 – датчик давления;
11 – вентиль сброса давления; 12 – датчик температуры

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования характеристик диссоциации гидрата двуокиси углерода объемом около 150 мл, произведенным с добавлением ОС-5, в зависимости от температуры внешней среды (от 0 до 70 °С).

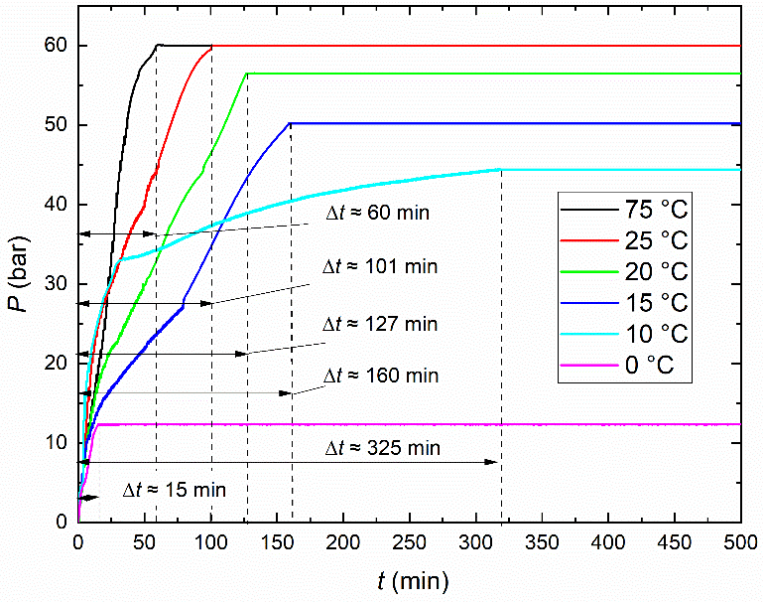


Рис. 2. Изменение давления во времени при диссоциации искусственного гидрата с использованием ОС-5

Анализ полученных экспериментальных результатов позволил выделить два этапа диссоциации гидрата двуокиси углерода. На первом этапе при диссоциации газа, повышение температуры приводило к выходу газа в местах соприкосновения со стенками реактора. Выделение газа протекало неактивно в течении первых 10 мин, так как между газовым гидратом и стенками реактора формировалась пленка из воды. Это приводило к самоконсервации внутренних слоев гидрата (блокированию их выхода). Дальнейший нагрев гидрата способствовал повышению температуры в пленке воды. Это приводило к увеличению площади теплообмена и интенсификации диссоциации газа из внутренних слоев гидрата. Этот процесс постепенно переходил во второй этап диссоциации гидрата двуокиси углерода, а именно на выход равновесного состояния газа.

Наиболее быстрый выход газа из гидрата происходил при 75 °С процесс завершился через 60 мин после начала эксперимента со значением давления в реакторе 60,3 бар. При уменьшении температуры внутри реактора увеличивалось время диссоциации и снижалось максимальное давление.

Для эффективного использования гидрата диоксида углерода в пожаротушении необходимо установить оптимальное время диссоциации газового гидрата и максимальное значение концентрации газа. Для этого использовался экспериментальный стенд, представленный на рис. 3.

Результаты экспериментального исследования характеристик диссоциации искусственного газового гидрата двуокиси углерода с использованием трех различных по массе навесок 35, 50 и 70 г. приведены на рис. 4. Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что максимальная объемная концентрация углекислоты около 46 % достигается при использовании 70 г газового гидрата. Увеличение массы газового гидрата в 2 раза приводит к значительному увеличению длительности диссоциации примерно в 3,5 раза. Необходимо сократить длительность процесса, но при этом сохранить эффективность выхода двуокиси углерода.

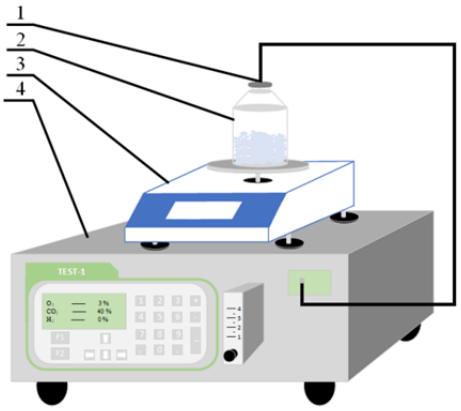


Рис. 3. Схема экспериментального стенда для оценки скорости диссоциации и состава газового гидрата:
1 – штуцер для подключения газоанализатора;
2 – емкость с образцом гидрата; 3 – весы;
4 – газоанализатор

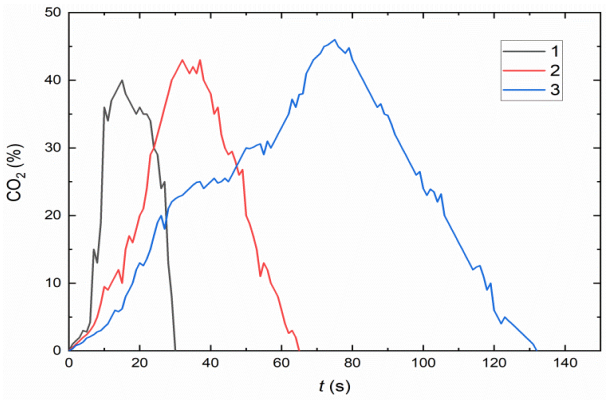


Рис. 4. Значения концентрации углекислоты в процессе диссоциации при варьировании массы навески образцов, г:
1 – 35; 2 – 50; 3 – 70

Для увеличения эффективности выхода двуокиси углерода проведены экспериментальные исследования по интенсификации теплообменных механизмов гранул гидрата, для чего к гидрату добавлялось около 25 мл воды (рис. 5). Такой подход позволил снизить время выхода двуокиси углерода практически в 2 раза, а также увеличить диапазон его максимальной концентрации на 10 %.

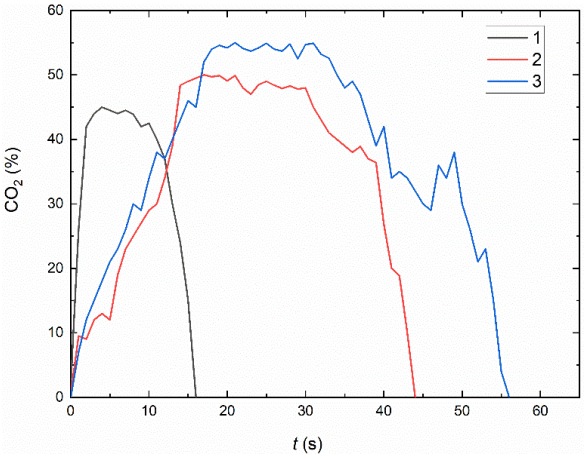


Рис. 5. Значения концентрации углекислоты в процессе диссоциации при добавлении воды 25 мл и варьировании массы навески образцов, г: 1 – 35; 2 – 50; 3 – 70

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feng Y. et al. Effect of gas hydrate formation and dissociation on porous media structure with clay particles // Appl. Energy. – 2023. – V. 349. – P. 121694. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121694.
2. Chen B. et al. Unsaturated water flow-induced the structure variation of gas hydrate reservoir and its effect on fluid migration and gas production // Energy. – 2023. – V. 282. – P. 128843. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128843.
3. Chong Z.R. et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges // Appl. Energy. – 2016. – V. 162. – P. 1633–1652. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.061.
4. Hatakeyama T. et al. Fire Extinction Using Carbon Dioxide Hydrate // Ind. & Eng. Chem. Res. – 2009. – V. 48. – P. 4083–4087. https://doi.org/10.1021/ie8019533.

ОКИСЛЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ AL И AL-CU ПРИ НАГРЕВЕ В ВОЗДУХЕ

Д.В. Теплов*, А.Г. Коротких

Томский политехнический университет,
*ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А2-11**

Научный руководитель: А.Г. Коротких, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

За счет высокой реакционной способности и интенсивного тепловыделения при взаимодействии с окислителем наноразмерные порошки (НП) металлов являются перспективным направление развития современных энергетических композиций. В течении последних 50 лет [1] ведется активная работа по изучению возможности практического применения алюминия и алюминиевых сплавов. Благодаря высокой объемной и массовой плотности энергии, выделяемой при окислении НП алюминия могут применятся в составе твердых топлив и гелеобразных композиций двигательных установок, газогенераторов, в пиротехнических составах, а также в качестве компонента взрывчатых веществ [2].

Наличие огнеупорного оксидного слоя Al_2O_3 на поверхности НП Al (до 50 мас. %) [3] и возможный эффект «старения» при хранении в составе топливных композиций, содержащих окислитель, способствуют снижению концентрации активного металла, выделения тепла при окислении и, как следствие, энергетических характеристик двигательной установки.

Для снижения массовой доли оксида Al_2O_3 на поверхности частиц алюминия, как правило прибегают к уменьшению диаметра частиц алюминия и снижение толщины оксидной плен-

ки, с этой целью могут применятся пассирующие покрытия или легирование частиц алюминия такими металлами как магний, никель, мель и др.

Целью исследования является установление характеристик и кинетических параметров окисления (энергии активации от степени конверсии) НП алюминия (Alex), прошедшего процесс пассивации воздухом и НП сплава алюминия с медью (Al–Cu), полученных методом электрического взрыва проводников [4], при их нагреве до 1300 °С в воздухе.

В работе применен совмещенный термогравиметрический анализ с дифференциально-сканирующей калориметрией (ТГ-ДСК анализ). Измерения проводились при скоростях нагрева 2, 4, 20 °С/мин в печи термического анализатора STA 449 F3 Jupiter Netzsch (Германия), при постоянном расходе окислительной среды (воздуха) в камере сгорания 150 мл/мин.

С помощью сканирующей электронно-оптической микроскопии были изучены морфологические особенности поверхности и структура частиц исследуемых образцов алюминия, установлено, что НП Alex и Al–Cu представлены сферическими частицами диаметром 30–300 нм с тонким покрытием оксида алюминия Al_2O_3 на поверхности частиц. По данным производителя (ООО «Передовые порошковые технологии»), содержание оксида Al_2O_3 в составе НП Alex, прошедшего пассивацию воздухом, не превышает ~10 мас. %. Начальная концентрация оксида металла в составе НП Al–Cu рассчитывалась на основании измеренного массового содержания кислорода на поверхности частиц и экспериментальных данных, говорящих об отсутствии фазы соединения CuO в оксидном слое частицы при комнатной температуре, представленных в работе [5]. По результатам обработки данных, установлено, что расчетное содержание оксида Al_2O_3 на поверхности частиц НП Al–Cu составляет не более ~12,9 мас. %. Полученное значение незначительно превышает паспортное значение, предоставленное для НП Alex.

По данным ТГ–ДСК анализа проведенного при различных скоростях нагрева в воздушной среде было установлено, что температура интенсивного окисления для НП Al–Cu ниже на 3–15 °С, аналогичных значений, полученных для НП Alex при идентичных условиях нагрева. В диапазоне температур 565–596 °С и скорости нагрева 20 °С/мин НП Al–Cu (рис. 1) зафиксирована экзотермическая реакция окисления металла с максимальным удельным тепловым потоком в 39 Вт/г. Экзотермическая реакции окисления металла для НП Alex зафиксирована в близком диапазоне температур, 565–609 °С при аналогичной скорости нагрева 20 °С/мин, но с более высоким удельным тепловым потоком в 57,5 Вт/г, что на ~47 % выше удельного тепловатого потока зафиксированного для для НП Al–Cu. Установлено, что присутствие меди в составе НП Al приводит к снижению суммарного удельного выделения тепла при нагреве и окислении металлов в первом пике ΔQ_1 на 52–71 %, в зависимости от изменения скорости нагрева, как следствие, происходит уменьшение скорости окисления и массы образца.

На основании ТГ-данных с помощью методов Фридмана и Киссинджера–Акахира–Саноуза (КАС), были установлены значения энергии активации окисления НП Alex и Al–Cu. Расхождение полученных данных при разных значениях конверсии колеблется в диапазоне от 1 до 20 %. Как видно из представленного графика (рис. 2) значения энергии активации (E_a) характерные для НП Al–Cu значительно превышают аналогичные значения энергии активации, полученные для НП Alex практически по всему диапазону степени конверсии. Увеличение энергии активации может быть связано со структурными изменениями реакции, выраженными образованием интерметаллидных фаз $CuAl_2$ и $CuAl_9$ и сложного оксида алюминия и меди при окислении частиц. Установлено что наименьшее значение энергии активации наблюдается в процессе плавления в диапазонах значения конверсии $\alpha = 0{,}25–0{,}35$ для НП Al–Cu и $\alpha = 0{,}28–0{,}45$ для НП Alex и соответствует значениями $E_a = 99$ кДж/моль, $E_a = 78$ кДж/моль, соответственно. Максимальное значение энергии активации наблюдается при значениях конверсии $\alpha = 0{,}67$, $E_a = 430$ кДж/моль для НП Al–Cu, $\alpha = 0{,}9$, $E_a = 307$ кДж/моль для НП Alex.

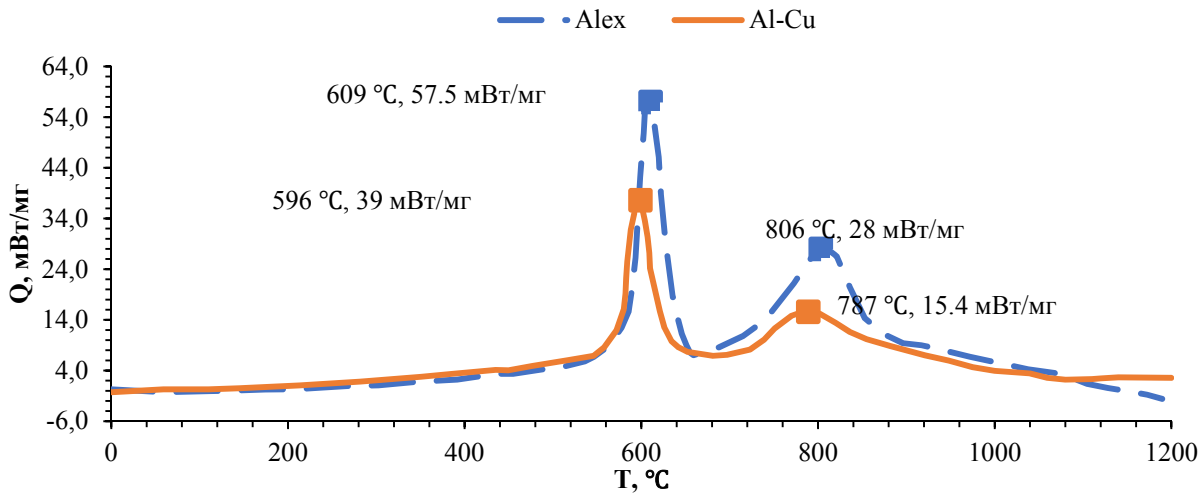


Рис. 1. Зависимость удельного теплового потока от температуры при скорости нагрева 20 °C/мин

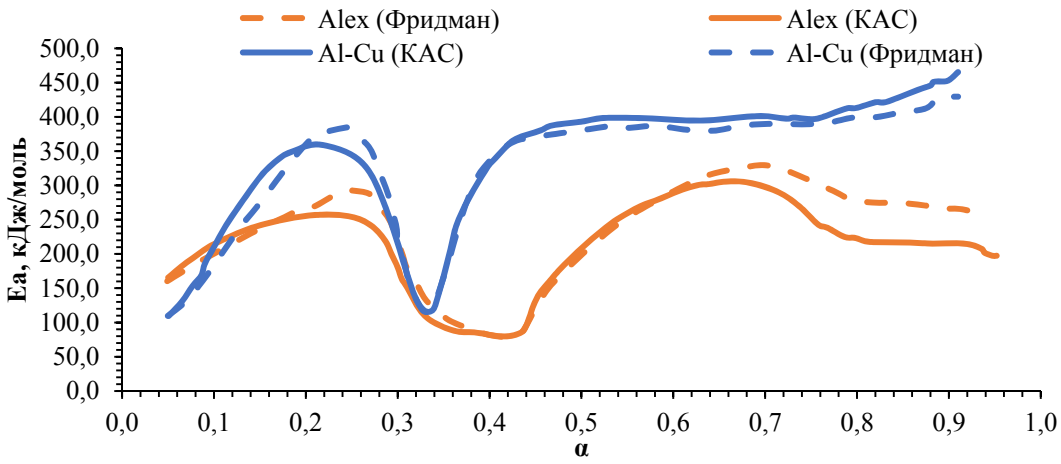


Рис. 2. Зависимость энергии активации окисления НП Alex и Al–Cu от степени конверсии

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич М.А., Лапкина К.И., Озеров Е.С. Предельные условия воспламенения частицы алюминия // Физика горения и взрыва. – 1970. – Т. 6, № 2. – С. 172–175.
2. Meda L, Marra G., Galfetti L., Severini F., De Luca L. Nanoaluminum as energetic material for rocket propellants // Mater. Sci. Eng. C. – 2007. – V. 27. Spec. Iss. 5–8, – P. 1393–1396.
3. Sundaram D., Yang V., Yetter R. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications // Prog. Energy Combust. Sci. – 2017. – V. 61. – P. 293–365.
4. Pervikov A., Kazantsev S., Lozhkomoev A., Lerner M. // Bimetallic Al-Ag, Al-Cu and Al-Zn nanoparticles with controllable phase compositions prepared by the electrical explosion of two wires // Powder Technol. – 2020. – V. 372. – P. 136–147.
5. Noor F., Vorozhtsov A., Lerner M., Pedone E., Filho B., Wen D. Thermal-Chemical Characteristics of Al-Cu Alloy Nanoparticles // J. Phys. Chem. C. – 2015. – V. 119, No. 25. – P. 14001–14009.

THE INFLUENCE OF THE ELECTRON BEAM TREATMENT ON ALUMINUM AND IRON NANOPOWDERS

N.M. Badamasi

School of Nuclear Science & Engineering, Division of Nuclear Fuel Cycle, Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia, (Group A1-43i)

Scientific supervisor: A.V. Mostovschikov, Sc. D., Professor, Department of Chemical Engineering, TPU

Abstract. This work involves the differential thermal analysis of iron and aluminum nanopowders irradiated with electron beam of energy of 360 keV within 120 ns. The Differential Thermal Analysis of the irradiated samples reveals an increase in the amount of water particles absorbed by the surface of the nanoparticles, as well as the accumulation of defects inside the core of their crystal structure.
Keywords: Nanopowders, irradiation, iron, aluminum, temperature, differential thermal analysis

1. Introduction

The unique combination of structural and dimensional factors of metal nanopowders greatly improves their physical, chemical and thermal properties of materials in comparison to their bulk counterparts [1]. As such, the past decade has seen a significant increase in the research and use of nanoparticles in various field of application because of the ability of synthesizing and manipulating these materials desirably. Applications in areas such as electronics, energy, biomedical, mining, optoelectronics, pyrotechnics, military, materials etc. has brought about an increase in investments in nanotechnology research and development [2].

In essence, modification of surface, structural and thermal properties of nanoparticles make them more desirable for many industrial and research applications. Such modification methods include irradiation with high energy particles followed by Thermal Analysis Techniques [3]. This work uses differential thermal analysis to investigate the impact of electron beam irradiation on the thermochemical characteristics of iron and aluminum micro and nanopowders.

2. Material and Methods

The two primary subjects of this study are iron and aluminum nanopowders. The electric explosion of a metal conductor in an argon atmosphere yielded these metal nanopowders. (Fig. 1: Jeol JEM 2200FS microscope). The samples were irradiated with pulses of electron beam having kinetic energy of 360 keV for a duration of 120ns. This was carried out under normal atmospheric conditions [4].

Since differential thermal analysis (DTA) is the most sensitive method used to examine the structural alterations occurring in the nanocrystals, it was used to investigate the irradiation samples in more detail. [4]. In DTA, the temperature difference between the sample reference material before and after irradiation is recorded and the corresponding data obtained from the thermograms generated is used in interpreting the thermophysical changes taking place in the sample [5]. The SDT Q600 TA Instrument (USA) was used to carry out the thermal analysis. It is a composite device that provides output for differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA) data in addition to the DTA results. All of these are plotted on a more comprehensive thermogram (Fig. 1), for quicker analysis and convenience. The measurement error for SDT Q600 TA is: Q = ±1.8 %, T = 0.1 $^{\circ}$C, m = 10^{-4} mg.

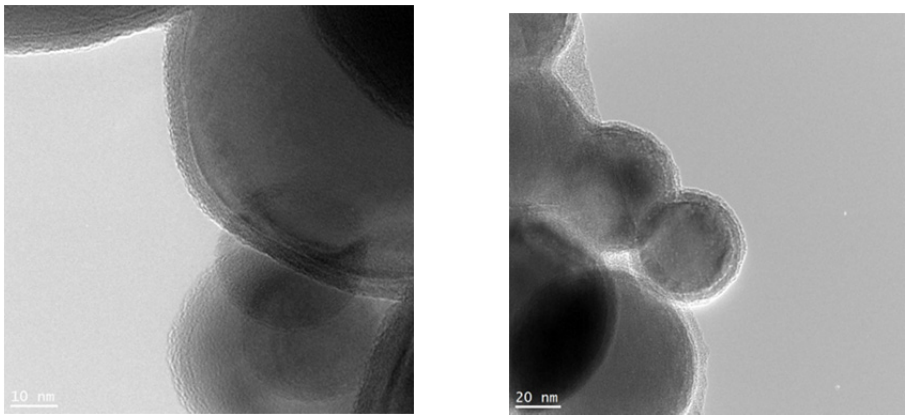


Fig. 1. Microscopy of aluminum a and iron b nanoparticles

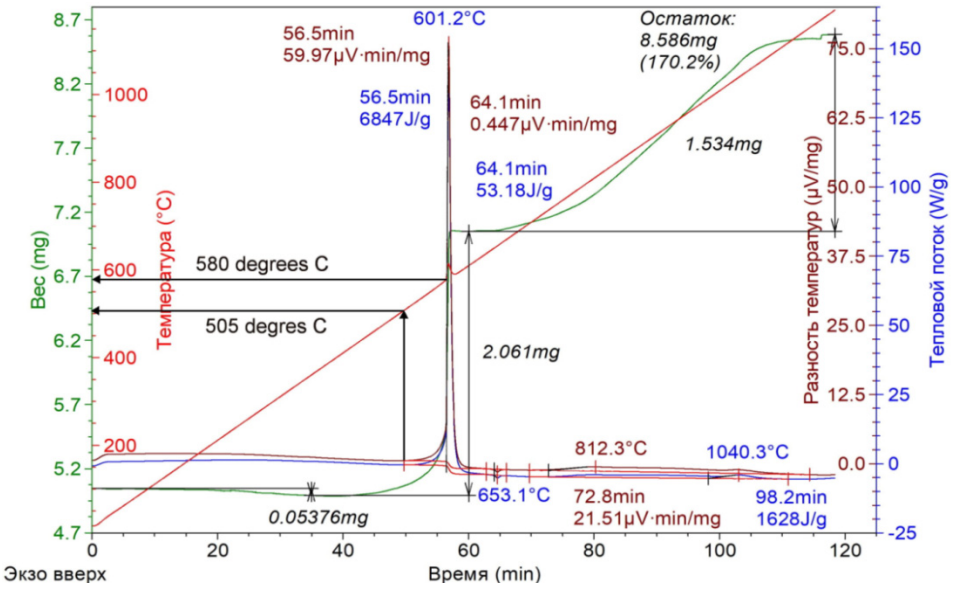


Fig. 2. A thermogram of aluminum nanopowder before irradiation

3. Result and discussion

The acquired experimental results suggest that metal nanopowders are ionized by the action of an electron beam, which also contributes to electron emission and charge adjustment through the sorbed water from the air. The same process of particle surface charge following irradiation and the development of active centers on their surface was observed after exposure to synchrotron radiation [6]. Because micropowders have a lower surface area to volume ratio than nanopowders, this effect is less noticeable. In Fe nanopowders, the amount of desorbed water essentially decreases as the irradiation dose increases (0.49 %). On the other hand, as the irradiation dose increases, the mass change following the desorption of impurities in aluminum nanopowder exhibits greater values (1.97 %). In addition, the values of the 1st stage of oxidation in the Fe nanopowders have higher values of thermal effect. While the spread of values for iron is 1225, it is 1104 J/g for aluminum. Changes in the temperature and heat of the onset of oxidation, which may be promising for the creation of information accumulation systems in the form of long-lived defects in the structures, indicate the effect of electrons in introducing defects in the crystal structure.

4. Conclusion

It was discovered during this research that irradiating metal nanopowders with electron beams affects not only the heat of oxidation, but also the temperature and heat of melting (aluminum).

Based on this, electron irradiation at 360 keV is suggested for altering the structure and properties of metal powders. This can be used in 3D printing to reduce the sintering temperature of products, resulting in lower energy consumption and production costs.

REFERENCES

1. Ivanov G.V. Activated aluminum as a stored energy source for propellant s/ G.V. Ivanov, F. Tepper // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 1997. – Vol. 4, Iss. 1–6. – P. 636–645. (doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v4.i1-6.600)
2. Biswas P. Nanoparticles and the Environment / P. Biswas & Y. W. Chang //Journal of the Air & Waste Management Association. – 2005. – Vol. 55, No. 6. – P. 708–746.
3. Wunderlich B. The tribulations and successes on the road from DSC to TMDSC in the 20th century the prospects for the 21st century / B. Wunderlich // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2004. – No. 78. – P. 7–31 (https://doi.org/10.1023/B:JTAN.0000042150.03836.27)
4. Egorov I.S. The Astra repetitive-pulse electron accelerator / I.S. Egorov, M.I. Kaikanov, E.I. Lukonin et al. // Instruments Exp. Tech. – 2013. – Vol. 56, No. 5. – P. 568–570 (doi: 10.1134/S0020441213050035)
5. Ol'Khovik E. A method for determination of heat storage capacity of the mold materials using a differential thermal analysis: IOP Conference Series / E. Ol'Khovik // Materials Science and Engineering / IOP Publishing. – 2016. – Vol. 12, No. 1. – P. 012133. (doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012133)
6. Mostovshchikov A.V. Effect of synchrotron radiation on thermochemical properties of aluminum micro- and nanopowders / A.V. Mostovshchikov, B.G. Goldenberg, O.B. Nazarenko // Materials Science and Engineering: Solid-State Materials for Advanced Technology. – 2022. – Vol. 285, No. 115961 (https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115961)

СТРУКТУРА ПОТОКА ВОЗДУХА В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Ф.Ю. Салихов, С.О. Салагаев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ24

Научный руководитель: В.И. Максимов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Использование газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) имеет ряд преимуществ относительно традиционных систем отопления вследствие возможности создания локальных тепловых зон в крупногабаритных производственных помещениях [1–4].

Формирование полей температуры и скоростей воздуха осуществляется в результате нескольких взаимосвязанных процессов, образующихся в результате работы ГИИ: перенос теплоты излучением от излучающей поверхности ГИИ к поверхностям ограждающих конструкций и оборудования, смешанная конвекция в неравномерно прогретом воздухе.

Использование ГИИ в условиях крупных габаритов помещения с относительно малыми площадями, в которых находится работающий, влечет положительный экономический эффект из-за уменьшения капитальных затрат, связанных с проектированием системы отопления, и эксплуатационных за счет меньшей инерции нагрева необходимой области [5, 6].

Целью работы заключается в определении скорости и направления передвижения масс воздуха в локальной рабочей зоне.

Экспериментальные исследования проводились в помещении с размерами 4,4×5×10 м с наличием двух вентиляционных шахт: приточной и вытяжной. Использовались газовый инфракрасный излучатель светлого типа мощностью 5 кВт и горизонтальная панель, имитирующей рабочее пространство, размерами 1,2×0,6×0,05 м. Центр панели совмещен с проекцией

центра излучателя на плоскость YX при x=3,29 м, y=3,13 м. Измерения скоростного поля воздуха проводились PIV методом, для реализации которого использовались высокоскоростная камера, лазерная головка, система линз для создания плоскопараллельного луча и трассер для PIV метода – порошок тетрасиликата магния $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ с размером частиц 0,3–10 мкм. Обработка экспериментальных данных проводилась в ПО «MATLAB» с использованием инструмента «PIVlab» [7]. На рис. 1 представлена схема экспериментального бокса.

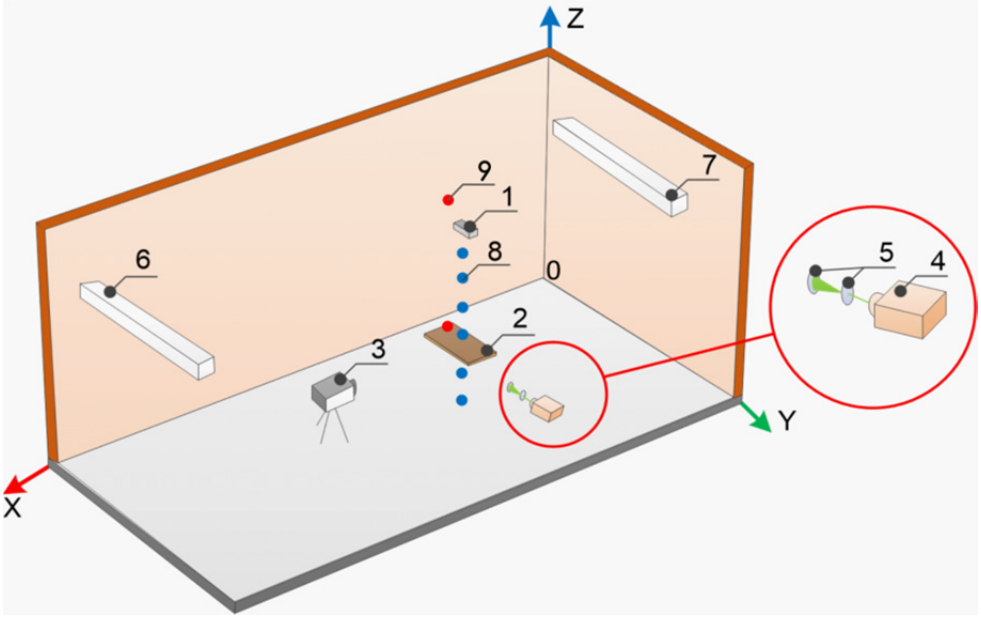
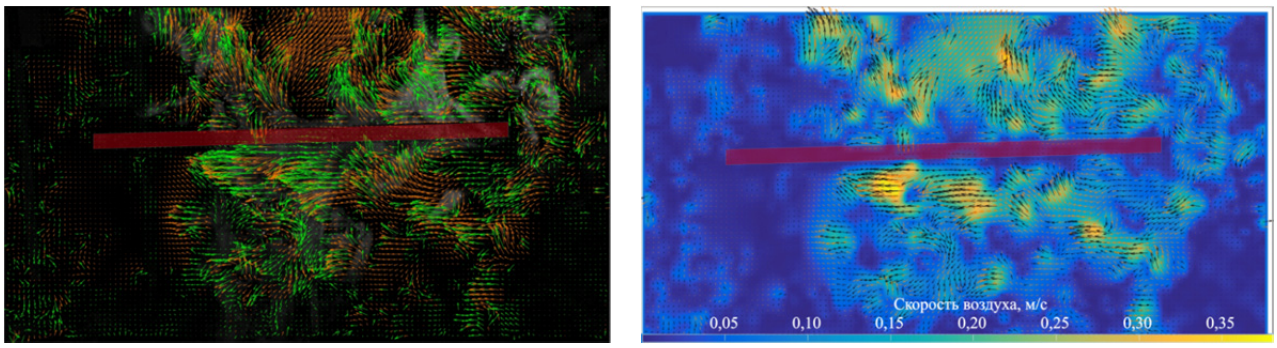


Рис. 1. Схема экспериментального бокса.
1 – ГИИ; 2 – горизонтальная поверхность; 3 – высокоскоростная камера; 4 – лазерная головка; 5 – система создания плоскопараллельного луча; 6 – область притока воздуха; 7 – область оттока воздуха; 8 – термопары; 9 – датчики концентрации CO_2

На рис. 2 представлены векторные и скоростные поля воздуха в плоскости ZX при Y равном 1 м после 60 минут работы ГИИ.



а *б*

Рис. 2. Векторное поле (а), скоростное поле (б) воздуха в плоскости ZX при Y равном 1 м после 60 минут работы ГИИ

В условиях свободной конвекции воздушные массы двигаются справа налево и по мере нагрева от стола под действием термогравитационных сил начинают устремляться вверх. Максимальное значение скорости около 0,35 м/с. Сформированный тепловой факел остается в основном по центру горизонтальной панели. Далее представлен профиль скорости воздуха по высоте от рабочей поверхности в центральном сечении рис. 4.

На рис. 3 большую долю скорости занимает вертикальная составляющая. По мере увеличения высоты скорость воздушного потока больше, из-за того что он успевает разогнаться за счет теплоты, полученной от рабочей поверхности, а в приповерхностом слое скорость минимальна из-за притока более холодных масс, которые находятся почти в неподвижном положении до момента их нагрева.

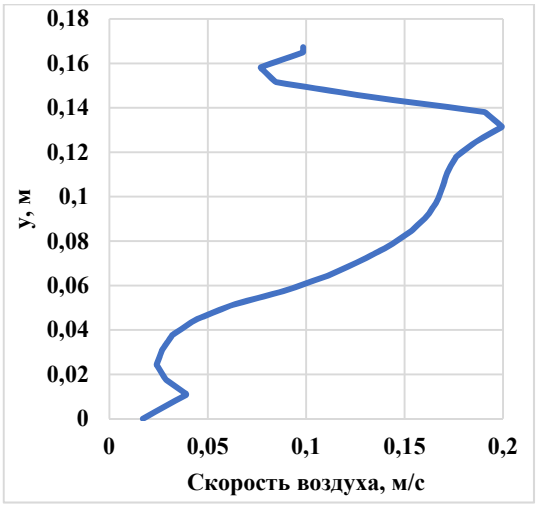
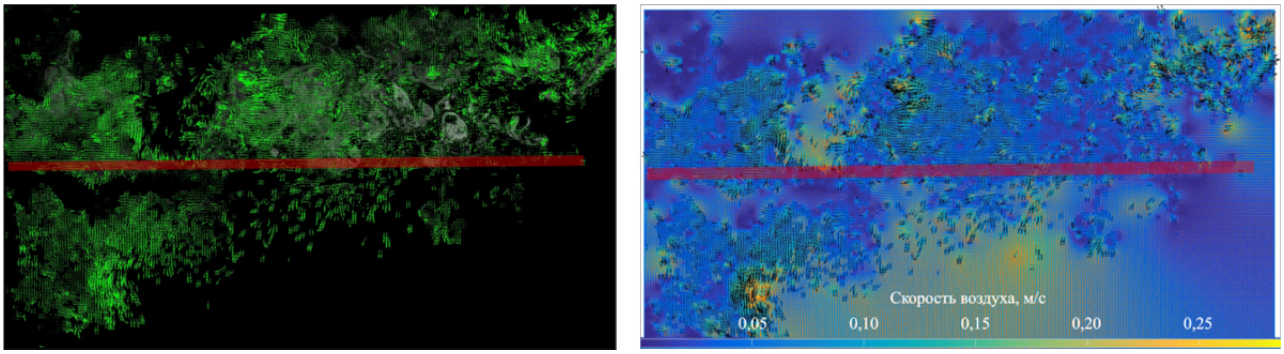


Рис. 3. Профиль скорости воздуха по высоте от рабочей поверхности после 60 минут работы ГИИ

Основное движение воздуха горизонтальное. По мере нагрева появляется и вертикальная составляющая скорости. Таким образом тепловой факел от горизонтальной поверхности формируется преимущественно налево. Максимальная скорость потока воздуха лежит в окрестностях значения 0,25 м/с. Распределение значений скорости по высоте в центральном сечении горизонтальной панели рис. 5.

Наблюдается такая же картина, как и на рис. 3, чем ближе к поверхности тем меньше скорость, а по высоте скорость растет.



а *б*

Рис. 4. Векторное поле (а), скоростное поле (б) воздуха в плоскости ZY при X равном 4,6 м после 60 минут работы ГИИ

Тепловой факел образованый от поверхности горизонтальной панели формируется в течении 60 минут работы ГИИ, с направлением влево наверх в плоскости ZY и остается в центре сечения ZX. Таким образом теплоту, полученную от рабочей поверхности, воздух уносит в стороны ближайшей ограждающей конструкции в данных условиях, это происходит из-за несемметричности постановки эксперимента. При горении газа в камере ГИИ создается тяга воздуха снизу вверх. Смесь воздуха и продуктов горения при столкновении с верхним перектрытием начинает радиально расходится во все стороны. Потоки воздуха нисходят вдоль вертикальных ограждающих кострукций из-за оттока теплоты и создаются основные вихревые структуры. Самый малый вихрь формируется у ближайщей сте-

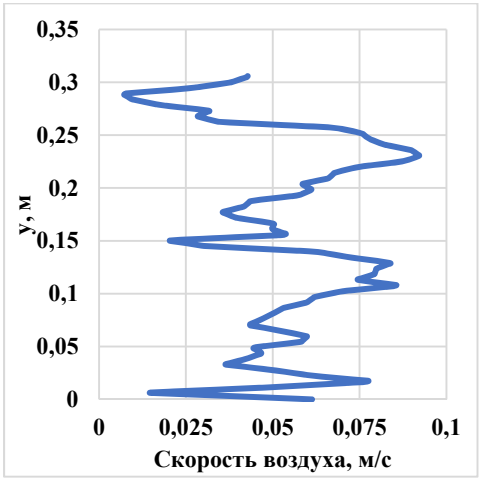


Рис. 5. Профиль скорости воздуха по высоте от рабочей поверхности после 60 минут работы ГИИ

ны. Из-за меньшего расстояния, этот вихрь образуется быстрее. И в его сторону подсасывается воздушный тепловой факел.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2021. – Vol. 332, № 9. – P. 128–141.
2. Kobelev N., Emelyanov S., Kretova V., Morzhavin A., Amelin V., Kobelev V. Energy-saving Solution in the Heating System of Buildings // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 117. – P. 186–190. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.139.
3. Shen P., Wang Z., Ji Y. Exploring potential for residential energy saving in New York using developed lightweight prototypical building models based on survey data in the past decades // Sustainable Cities and Society. – 2021. – Vol. 66. – P. 102659. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102659.
4. Nielsen S. Möller B. GIS based analysis of future district heating potential in Denmark // Energy. – 2013. – Vol. 57. – P. 458–468. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.041.
5. Бодров В.И. Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций в промышленных помещениях с системами отопления на базе инфракрасных излучателей / В.И. Бодров, М.В. Бодров, А.А.Смыков // Приволжский научный журнал. – 2018. – № 2, no. 46. – С. 29–36.
6. Максимов В.И. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления / В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Н.И. Кириленко, И.В. Волошко // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – № 9. – С. 128–141.
7. Thielicke W., Sonntag R. Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and Enhanced Algorithms in PIVlab // Journal of Open Research Software. – 2021. – Vol. 9, no. 1. – P. 12. doi:10.5334/jors.334.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Ф.Ю. Салихов, С.О. Салагаев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ24

Научный руководитель: В.И. Максимов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Комфортность условий работающего в локальных рабочих зонах крупногабаритных производственных помещений при использовании газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) как источников нагрева, оценивают по температуре воздуха и концентрации вредных веществ [1, 2]. Формирование полей температуры и концентрации газов осуществляется в результате трех взаимосвязанных процессов, определяющих перенос теплоты и антропогенных оксидов, образующихся в результате работы ГИИ: перенос теплоты излучением от излучающей поверхности ГИИ к поверхностям ограждающих конструкций и оборудования, смешанная конвекция в неравномерно прогретом воздухе и вынужденная конвекция в результате работы системы воздухообмена, перенос теплоты и загрязнений в результате смешанной конвекции и диффузии. Молекулярная диффузия достаточно медленный процесс и распространение CO_2 осуществляется главным образом конвекцией [3]. Необходимость работы системы воздухообмена, обеспечивающей движение воздуха при работе ГИИ светлого типа, объясняется поступлением продуктов сгорания непосредственно в воздух.

При создании тепловых зон для работающего целесообразны регламентные тепловые условия (микроклимат) [5–9]. Для их обеспечения необходимо поддерживать в заданных пределах совокупность таких параметров как температура, скорость перемещения и состав воздуха. Согласно [5] в составе воздуха для помещений, в которых находятся люди среднесменное значение концентрации CO_2 не должно превышать 1000 ppm (табл. 1).

Целью данной работы является определение концентраций CO_2 в реперных точках рабочей области при свободной и смешанной конвекции и анализ формирования потоков диоксида углерода в крупногабаритном помещении.

Таблица 1. Классификация воздуха в помещении (ГОСТ 30494-2011) [1, 2]

Класс	Качество воздуха в помещении		Допустимое содержание CO_2^*, ppm
	Оптимальное	Допустимое	
1	Высокое		400 и менее
2	Среднее		400–600
3		Допустимое	600–1000
4		Низкое	1000 и более

** Допустимое содержание CO_2 в помещении принимают сверх содержания CO_2 в наружном воздухе за пределами помещения, ppm*

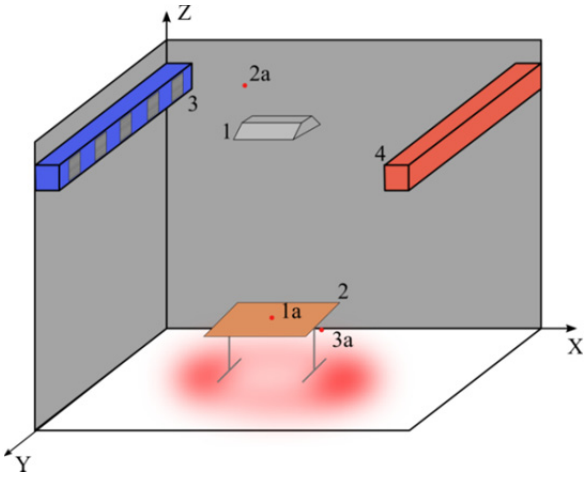


Рис. 1. Схема экспериментального бокса:
1 – ГИИ, 2 – горизонтальная поверхность; 3 – область притока воздуха;
4 – область оттока воздуха; 1а, 2а. 3а – датчики концентрации CO_2

Таблица 1. Расположение датчиков концентраций CO_2

Вариант расположения датчика	X, м	Y, м	Z, м
1а	1,26	3,29	0,78
2а	1	3,29	3,6
3а	1,26	0	0

На рис. 2 представлены график изменения концентрации CO_2 в условиях естественной конвекции при расположении датчика в точке 3а.

С течением времени концентрация CO_2 возрастает линейно. Вследствие отсутствия притока и оттока воздуха, концентрации продолжат возрастать с течением времени до тех пор, пока весь кислород не будет израсходован в процессе горения. Далее представлен график изменения концентрации CO_2 в условиях естественной конвекции при расположении датчиков в точках 1а и 2а.

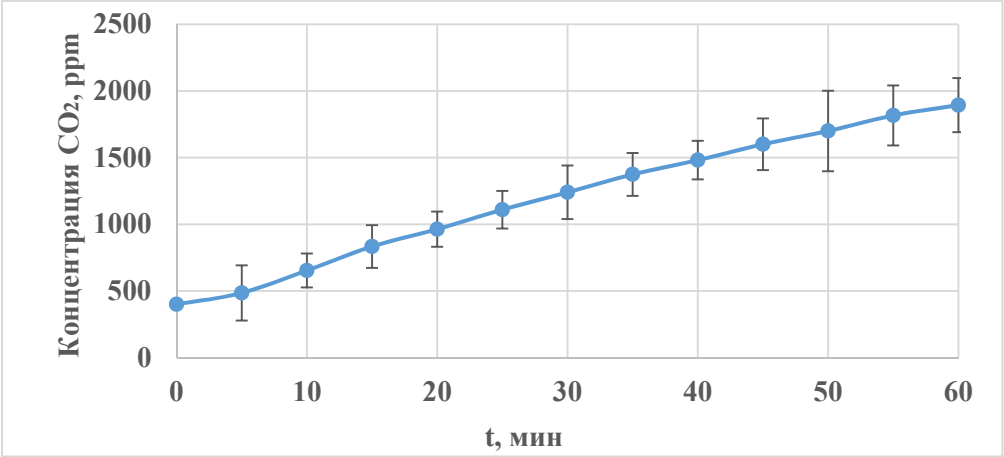


Рис. 2. График изменения концентраций CO_2 при расположении 3а

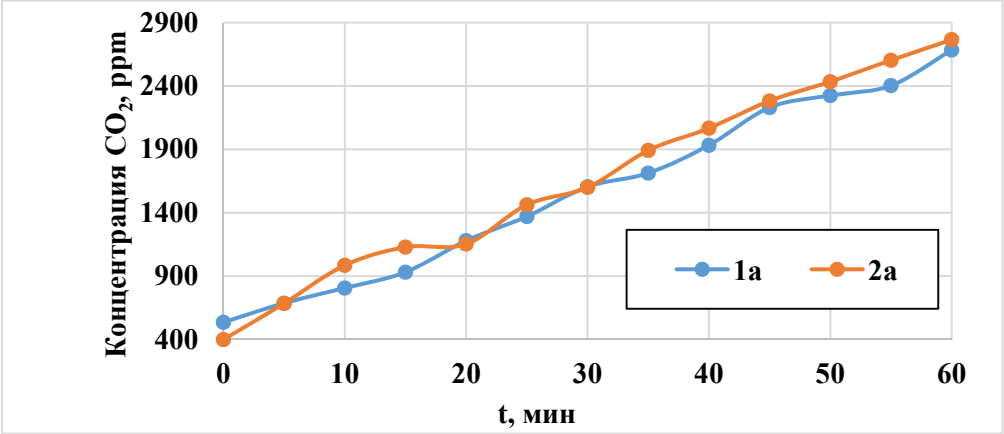


Рис. 3. График изменения концентраций CO_2 при расположении 1а и 2а

Исходя из рис. 3 можно сделать вывод, что в условиях естественной конвекции концентрации CO_2 значения концентраций в точках 1а и 2а практически идентичны. В конечном итоге концентрации продалжат возрастать, как было описано в предыдущем случаи. Рассматривая рис. 2 и 3 совместно, можно заметить, что в условиях естественной конвекции рост концентраций диоксида углерода имеет линейный характер. Далее на рис. 4 представлен график изменения концентрации CO_2 в условиях смешанной конвекции при расположении датчиков в точках 1а и 2а.

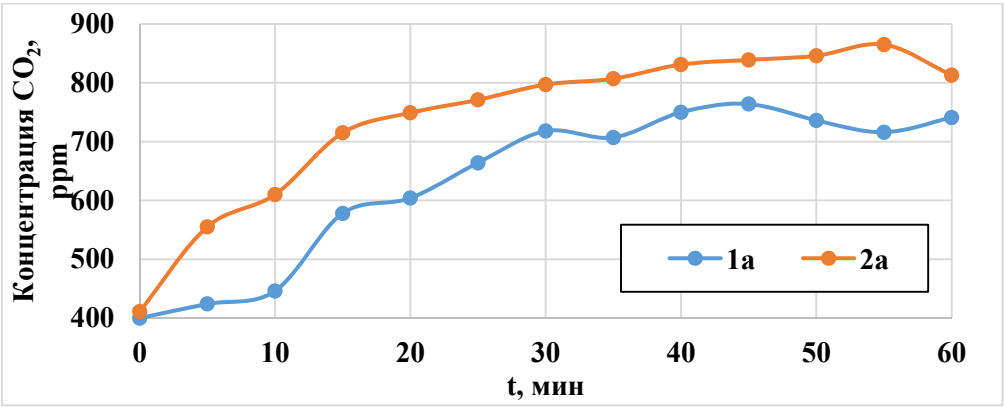


Рис. 4. График изменения концентраций CO_2 при расположении 1а и 2а в условиях смешанной конвекции

При смене режима течения воздуха отчётливо заметно как уменьшение уровня концентрации CO_2, так и характер изменения за счёт притока свежего воздуха. Можно отметить, что это не повлияло на перепад концентрации CO_2 по высоте в точках 1а и 2а. Среднеее значение перепада в случаи естественной концекции состовляет 107 ppm, в то время как значение перепада при смешанной конвекции состовляет 105 ppm.

По итогам работы определено, что изменение режима течения воздуха оказывает значительное влияение на формирование полей концентраций CO_2. При использовании системы воздухообмена уровень загрязнения снижается в среднем на 50 %, при этом не оказывая влияния на перепад по высоте. Скорость увеличения концентрации диоксида углерода в условиях естественной в 4,5 раза больше чем при смешанной конвекции. Важно также отметить, что максимальное значение концентрации CO_2 при смешанной конвекции не превышало допустимого значения в 1000 ppm в данных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures.
2. ASHRAE 55-2017. Standard 55-2017–Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved). ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2017.
3. Majumdar D., Chatterjee S. Modelling accumulation of respiratory-$_{CO2}$ in closed rooms leading to decision-making on room occupancy // MAPAN-Journal of metrology society of India. – 2020. – Vol. 35(3). – P. 323–332. https://doi.org/10.1007/s12647-020-00372-7.

СОУДАРЕНИЕ КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ КОМПОНЕНТОВ ВОДОМАСЛЯНЫХ СУСПЕНЗИЙ

С.А. Шуляев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5ВМ31

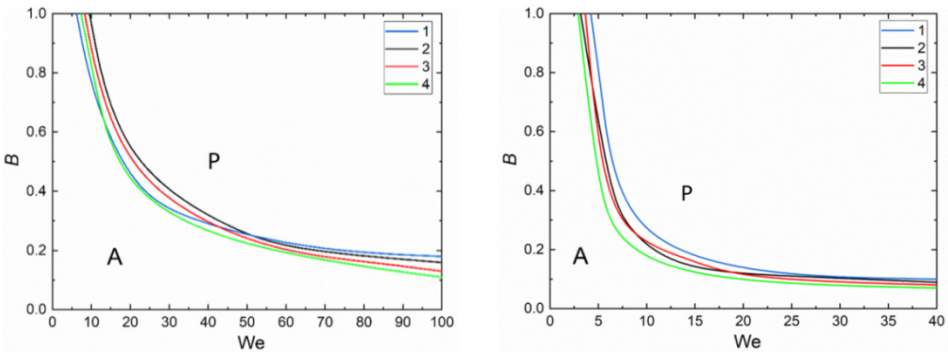
Научный руководитель: А.Г. Исламова, к.ф.-м.н., доцент ИШФВП ТПУ

Закономерности взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц изучаются на протяжении многих лет в связи с их широким применением в технических приложениях. Взаимодействие между каплями жидкости и твердой частицей или массивной поверхностью встречается в таких областях, как напыление, покраска и печать [1], плазменное напыление, охлаждение распылением в металлургической промышленности, испарение в двигателях внутреннего сгорания, охлаждение лопаток турбин, охлаждение активной зоны ядерных реакторов и испарение сырья в кипящем слое [2]. Опубликованы результаты исследований процессов взаимодействия капель воды [3], растворов [4], суспензий [5] с различными материалами, такими как металлы [6], стекло [7] и др.

Большинство исследовательских работ в данной области сосредоточены на соударении капель с плоскими твердыми поверхностями. К настоящему времени определены основные факторы и параметры, влияющие на режимы столкновения капель жидкости с твердыми поверхностями, в частности, скорость движения капли, угол столкновения, свойства поверхности. Также значимую роль в процессе взаимодействия капли с частицей играют свойства жидкости (вязкость, плотность, поверхностное натяжение). Известно ограниченное количество результатов исследований, посвященных изучению столкновения капель с твердыми частицами [8, 9]. Данных результатов недостаточно для проведения достоверного прогно-

стического моделирования процессов, происходящих в технологических блоках, узлах и агрегатах. Построенные на их основе математические модели должны учитывать ряд особенностей. В частности, при столкновении капель с искривленными поверхностями общая динамика процесса существенно зависит от кривизны поверхности мишени (частицы). Для обоснования больших перспектив существенного вторичного измельчения капель суспензионных топлив при соударениях построены карты режимов и вычислены характеристики (количество, размеры, скорости движения, энергии, импульсы и др.) вторичных фрагментов. Карты режимов соударений и их последствия при использовании соразмерных капель и частиц топлив пока не изучались. Как следствие, важно изучить бинарные соударения капель и частиц этих компонентов. Цель работы – построение карт режимов соударений капель и твердых частиц, при разной последовательности их взаимодействия и различных внешних условиях, соответствующих топливным технологиям.

На рис. 1 представлены карты соударения капель воды и отработанного моторного масла (R_d = 1,1–1,2 мм) с угольными частицами различных марок. При анализе карт было установлено, что марка угля слабо влияет на режим взаимодействия. При соударении капли жидкости с фрагментом фильтр-кека коксующегося угля происходит налипание угольной пыли на поверхности капли. Для дистиллированной воды и отработанного моторного масла в области B>0,5 режим агломерации с частицами фильтр-кека коксующегося угля зарегистрирован только при малых значениях числа Вебера (We<4). Причиной этого эффекта является угольная пыль, образующаяся при флотации угля в процессе его обогащения. Увеличение числа Вебера до 60–80 силы инерции преобладали над силами поверхностного натяжения, что приводило к разрушению капли. Снижение поверхностного натяжения у масла приводит к смещению границы раздела между режимами разрушения и агломерацией в сторону меньших чисел Вебера по сравнению с каплями воды. Однако масло обладает большей вязкостью, вследствие чего наблюдалось меньшее количество вторичных фрагментов в результате разрушения капли.



а *б*

Рис. 1. Карта режимов взаимодействия капель дистиллированной воды (а) и моторного масла (б) с углеродистыми частицами различных марок углей при $R_d = R_p$ = 1,1–1,2 мм:
1 – фильтр-кек коксующегося угля; 2 – бурый уголь; 3 – коксующийся уголь; 4 – антрацит.
А – агломерация; Р – разрушение

Полученные величины входных параметров дают представление о том, что для устойчивой агломерации капли воды и угольной частицы необходима малая относительная скорость движения. С целью получения малой относительной (результирующей) скорости при одновременном движении твердых частиц и капель жидкости следует варьировать угол атаки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10040 (https://rscf.ru/project/23-71-10040/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li J., Yang K., Liang Y., Liu C. Hydrodynamic analysis of the energy dissipation of droplets on vibrating superhydrophobic surfaces // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2022. – V. 137. – P. 106264.
2. Mitra S., Sathe M.J., Doroodchi E., Utikar R., Shah M.K., Pareek V. et al. Droplet impact dynamics on a spherical particle // Chemical Engineering Science. – 2013. – V. 100. – P. 105–119.
3. Jiao Y., Xue X., Ding S., Zhou Q., Tian Y., Liu X., et al. Influence of Poly (Ethylene Glycol) 20,000 Concentration on Atomization and Deposition Characteristics of Nozzle // Appl Sci. – 2021. – V. 100. – P. 10513.
4. Azmi W.H., Sharma K.V., Mamat R., Najafi G., Mohamad. The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 53. – P. 1046–1058.
5. Fujimoto H., Obana W., Ashida M., Hama T,. Takuda H.Hydrodynamics and heat transfer characteristics of oil-in-water emulsion droplets impinging on hot stainless steel foil // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – V. 85. – P. 201–212.
6. Sen S., Vaikuntanathan V. Impact dynamics of alternative jet fuel drops on heated stainless steel surface // International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – V. 121. – P. 99–110.
7. Shao L., Liu D., Ma J., Chen X. Normal collision between partially wetted particles by using direct numerical simulation // Chemical Engineering Science. – 2022. – V. 247. – P. 117090.
8. Mitra S., Evans G.M., Doroodchi E., Pareek V. Interactions in droplet and particle system of near unity size ratio // Chemical Engineering Science. – 2022. – V. 170. – P. 154–175.
9. Islamova A.G., Kerimbekova S.A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Droplet-droplet, droplet-particle, and droplet-substrate collision behavior. – 2022. – V. 43. – P. 117371.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МИКРОКЛИМАТА ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЯ С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ ОКОННЫМИ БЛОКАМИ

Г.И. Парфенов[1], М.О. Абышкин[2]

Ивановский государственный энергетический университет,
ТЭФ, [1]аспирант каф. ПТЭ, [2]гр. 3-7

Научные руководители: В.В. Тютиков, д.т.н., проректор по научной работе ИГЭУ;
Н.Н. Смирнов, к.т.н., доцент каф. ПТЭ

Через светопрозрачные ограждающие конструкции (далее СПК) в окружающую среду теряется весомое количество тепловой энергии, что связано с недостаточной тепловой защитой и небольшими значениями R_0 данных элементов здания. Согласно данным исследователей Грахова В.П., Мохначева С.А., Егоровой Е.Г. [1] среди общих тепловых потерь для пяти- и девятиэтажных зданий трансмиссионные потери через светопрозрачные ограждающие конструкции составляют от 27 до 34 %, что является достаточно весомым фактором и обладает значительным потенциалом по энергосбережению.

В то же время, микроклимат оказывает важное влияние на самочувствие и производительность труда персонала. Так, динамический микроклимат, при котором изменение температуры и скорости приточного воздуха осуществляется по закону гармонических колебаний, благотворно влияет на улучшение производительности труда. Из-за воздействия на систему терморегуляции человека повышается его работоспособность, качество труда и продукции, внимательность и сосредоточенность.

Таким образом, снижение потребления топливно-энергетических ресурсов в системах энергообеспечения зданий благодаря уменьшению тепловых потерь через окна при одновременном повышении производительности труда сотрудников приведет к снижению себестоимости продукции.

Учеными ИГЭУ были созданы конструкции оконных блоков с теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими панелями. Данные экраны целесообразно применять в СПК в темное время суток или при отсутствии персонала в комнатах. Исследования теплотехнических показателей оконных блоков с экранами были осуществлены как с помощью физического лабораторного эксперимента в климатической камере, а также при имитационном моделировании [2]. Установлено снижение тепловых трансмиссионных потерь через окна с экранами в 1,5–3,8 раза. Однако влияние заполнения прослоек малотеплопроводными газами на тепловую защиту СПК с экранами не было исследовано.

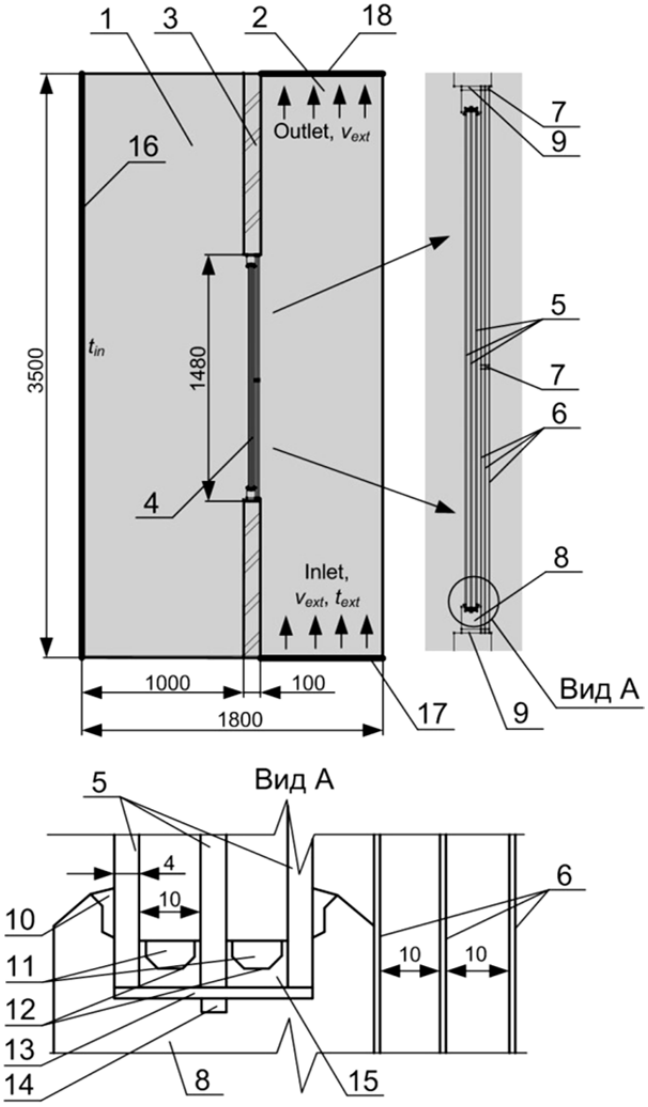


Рис. 1. Расчетная схема модели:
1, 2 – теплое и холодное отделения климатической камеры;
3 – кирпичная перегородка; 4 – испытуемый оконный блок;
5 – стекла; 6 – металлические экраны; 7 – разделительная пластиковая планка; 8 – деревянная рама;
9 – теплоизоляция из пенополиуретана;
10 – силиконовый герметик; 11 – осушитель;
12 – дистанционная рамка; 13 – пластиковая проставка;
14 – паз для вентиляции; 15 – герметик; 16 – «теплая» стена; 17, 18 – подача, отвод воздуха в отделение

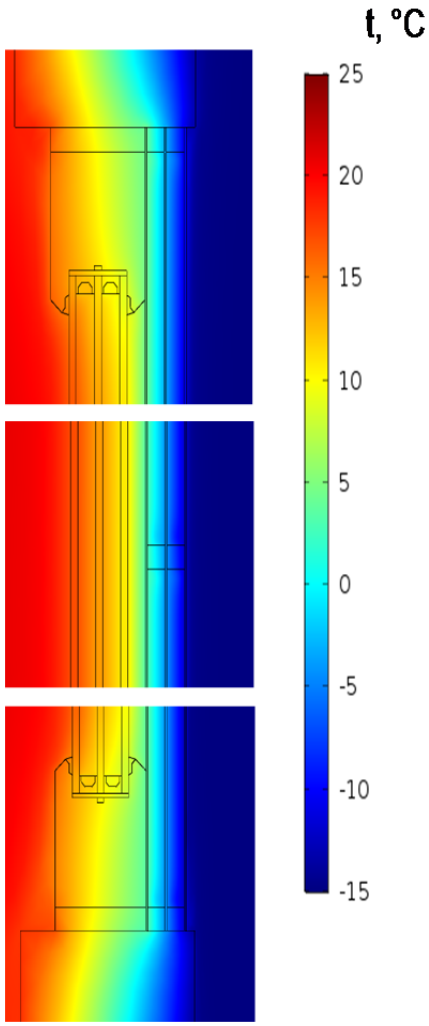


Рис. 2. Температурное поле оконного блока с экранами

В первой части исследования было выполнено имитационное численное моделирование процесса теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами и малотеплопроводными газами, установленный в проеме климатической камеры, с помощью метода конечных элементов на основании фундаментальных законов теплообмена. Климатическая камера (см. рис. 1) состоит из теплого и холодного отделений, разделенных между стеной из силикатного кирпича. В стене установлен оконный блок в виде стеклопакета формулой СПД $4M_1$-10-$4M_1$-10-$4M_1$ в раме, изготовленной из дерева. Алюминиевые экраны из алюминиевой полированной фольги установлены в оконном блоке со стороны холодного отделения. Начальные граничные условия задавались таким образом, чтобы температура воздуха в теплом отделении на расстоянии 150 мм от оконного блока составляла 21 °С, а в холодном – минус 15 °С, причем скорость воздушных потоков v_{ext} – 5 м/с.

Задача решалась в двумерной постановке как стационарная.

Исследовались базовый вариант окна без экранов и случаи с одним, двумя и тремя теплоотражающими экранами при заполнении газовых прослоек воздухом, аргоном и криптоном. Теплопроводность аргона, при температуре 21 °С составляет 0,016 Вт/(м·°С), что в 1,5 раза меньше теплопроводности воздуха, а теплопроводность криптона – 0,008 Вт/(м·°С), т. е. в 3,0 раза ниже.

Локальные значения скорости воздуха, сопротивления теплопередаче, удельного теплового потока и температуры были найдены в ходе анализа результатов моделирования. Поле температур оконного блока с 3 экранами представлено на рис. 2. Необходимо отметить образование «застойных» зон в верхней и нижней частях воздушных прослоек. На рисунке можно отметить и зону приграничного слоя со стороны теплого и холодного отделений камеры. Сам оконный блок благодаря использованию экранов находится в диапазоне положительных температур.

Для анализа теплозащитных характеристик оконного блока особый интерес представляют графики изменения значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока R_0 в разных точках замера для стеклопакета с изменяемым количеством экранов в случае заполнения прослоек воздухом, а также аргоном и криптоном (см. рис. 3). На рис. 3 приведены данные эксперимента, осуществленного в камере АНО «Ивановостройиспытания» (показано штриховыми линиями), а также результаты имитационного моделирования (сплошные линии).

Относительная погрешность для приведенного сопротивления R_0 между результатами имитационного моделирования и экспериментально полученными данными не превысила 4,3 % для стеклопакета (СПД), 6,5 % – для СПД и 1 экрана, 5,6 % – для СПД и 2 экранов, 14,6 % – для СПД и 3 экранов.

Максимальный эффект по увеличению тепловой защиты оконных блоков с экранами был получен при заполнении прослоек криптоном и использовании 3 теплоотражающих экранов (СПД 4М1-Kr10-4М1-Kr10-4М1 + Э-Kr10-Э-Kr10-Э). По сравнению с контрольным вариантом (стеклопакет формулой СПД 4М1-10-4М1-10-4М1) R_0 в центральной зоне увеличилось с 0,48 до 2,43 ($м^2$·°С)/Вт (или в 5 раз). Особый интерес представляет определение эффекта от использования в качестве заполнения прослоек аргона и криптона (вместо воздуха) на приведенное сопротивление теплопередаче идентичных конструкций (см. табл. 2). Необходимо отметить, что чем больше количество экранов, тем значительнее эффект от использования инертных газов. Так, при определении эффекта от заполнения прослоек аргоном можно констатировать, что без использования экранов относительное увеличение сопротивления δR_0 находится в диапазоне от 6 до 17 %, при трех экранах – от 21 до 23 %. Эффект от применения криптона еще более значителен: без экранов относительное увеличение сопротивления δR_0 находится в диапазоне от 8 до 19 %, при трех экранах – от 44 до 58 %. Использование теплоотражающих экранов позволяет значительно уменьшить тепловые потери через данные светопрозрачные конструкции.

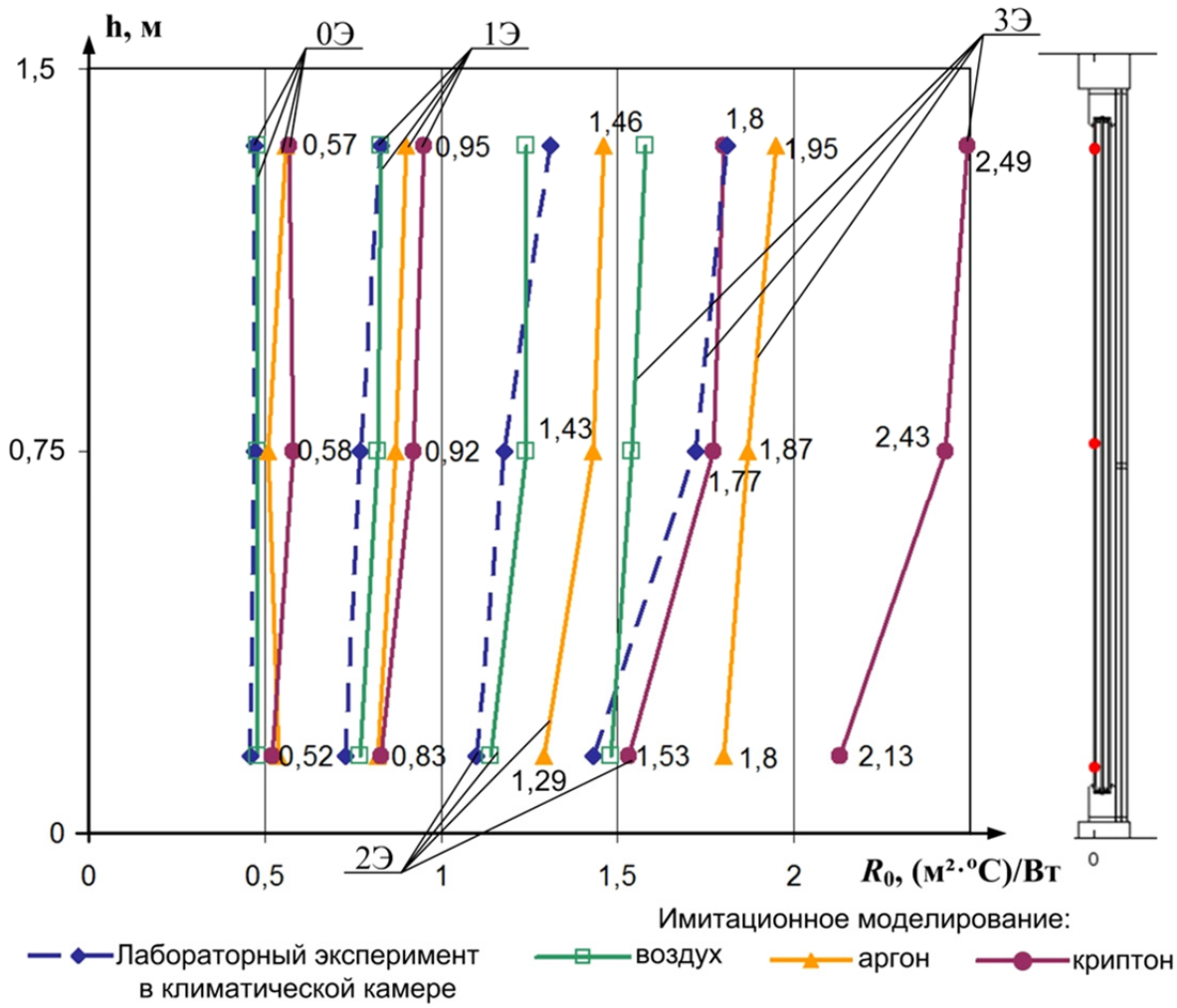
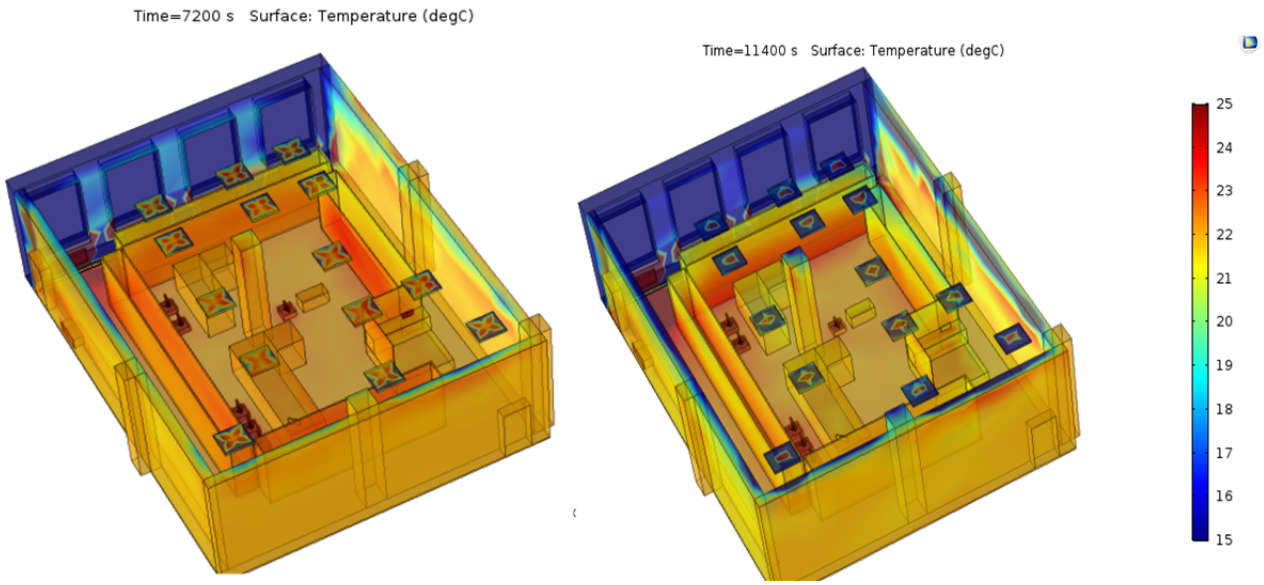


Рис. 3. Графики изменения значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока R_0 в нижней, центральной и верхней точках замера для стеклопакета с одним (1Э), двумя (2Э) и тремя (3Э) экранами (0Э – без экранов), полученных в ходе имитационного моделирования и физического эксперимента в камере, в случае заполнения прослоек различными газами

В продолжение исследований было выполнено численное трехмерное моделирование динамического микроклимата для помещения БЩУ АЭС, расположенного в Ивановском государственном энергетическом университете (см. рис. 4). В оконных блоках используются теплоотражающие экраны, заполненные аргоном. Присутствуют тепловыделения от персонала, оборудования, осветительных приборов, отопительного оборудования и т. д. Основные потери приходятся именно на светопрозрачные конструкции, что явно следует из анализа температурных полей на внутренней поверхности наружной ограждающей стены (см. рис. 4).

В рабочее время для обеспечения поддержания режима динамического микроклимата изменение температуры приточного воздуха, подаваемого из воздухораспределителей, было задано по закону гармонических колебаний. В нерабочее время подача воздуха прекращалась, и контролировался тепловой режим при остывании помещения и расположенного в нем оборудования. В случае использования дежурного режима отопления, теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях, предварительной осушки воздуха потребление теплоты СКВ снизилось на 70,2 % (по сравнению с базовым вариантом), а выработка электрической энергии в солнечных батареях составила 1627 кВт·ч за год.



а *б*

Рис. 4. Динамика остывания поверхностей ограждающих конструкций и оборудования после прекращения условий января: рабочая смена (а) и спустя 70 минут после окончания рабочей смены (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грахов В.П., Мохначев С.А., Егорова В.Г. Эффективность энергосберегающих мероприятий в жилищном строительстве // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 273–280.
2. Смирнов Н.Н. Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями: дис. … канд. техн. наук. – Иваново, 2022. – 333 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ПЕЛЛЕТ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

А.В. Губин[1], К.Б. Ларионов[2,3,4]

[1] Севастопольский государственный университет, avgubin@sevsu.ru
[2] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, avg77@tpu.ru, aka2@tpu.ru
[3] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, asg47@tpu.ru
[4] Университет науки и технологий МИСиС, laryk070@gmail.com

Изделия из древесины окружают человека в его повседневной жизни – это элементы декора, мебель, посуда, строительные материалы и т. д. Вследствие повышения спроса на данный материал происходит и постоянное развитие промышленности, использующей в качестве основного материала – дерево. Главная проблема любого вида промышленности – утилизация и переработка отходов, которые образуются на всех этапах производства [1]. Формирование отходов, в том числе, происходит и из-за различной бытовой деятельности: ремонты, выброс старой мебели и т. д. Стоит уделить отдельное внимание износу старой мебе-

ли, ведь, в большинстве случаев, она подвергается захоронению на свалках. Использование биомассы в качестве возобновляемого источника энергии может стать перспективным методом утилизации отходов с хорошими экономическими и экологическими показателями.

В рамках приведенного исследования в качестве исходных образцов использованы опилки следующих видов древесины: ель, береза, сосна, лиственница, а также отходы мебельного производства. Определение технических характеристик (влажность, зольность, выход летучих соединений и низшая теплота сгорания) были определены согласно стандартным методикам: ГОСТ 9516–92, ГОСТ 11022–95, ГОСТ Р 55660–2013 и ГОСТ 147–2013 соответственно. Элементный состав был определен с использованием анализатора элементного состава Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США). Методика подготовки образцов включала два этапа: первый – измельчение исходного сырья, второй – фракционирование с использованием лабораторных сит. Размер ячеек сетки менее 80 мкм. Для создания топливных пеллет использовался гидравлический пресс, давление на одну пеллету составляло около 2 т. Габаритные размеры образцов: высота – 12 мм, диаметр – 10 мм.

В табл. 1 представлены технические характеристики исследуемых образцов древесных отходов.

Отличительной особенностью древесины как биомассы, является отсутствие в ее составе топливной серы, что говорит о том, что эмиссия оксидов серы при горении образцов исключена. По данным измерения теплоты сгорания, наибольшее значение наблюдалось у образца ели. Это обусловлено наибольшим содержанием несвязанного углерода в элементном составе, а также относительно низким значением зольного остатка.

Таблица 1. Технические характеристики исходных образцов

Тип древесины	Влажность, W^r	Зольность, A^d	Летучие вещества, V^{daf}	Теплота сгорания, Q_r^i	Элементный состав^d, %				
					C	H	N	S	O
	мас. %			МДж/кг	%	%	%	%	%
Ель	5,6	0,6	68	19,0	49,3	6,2	0,6		43,9
Береза	9,8	0,1	74	17,6	45,5	5,9	0,4		48,2
Сосна	6,7	0,9	71	18,2	47,4	5,8	0,5		46,3
Лиственница	2,1	0,6	69	17,2	47,4	5,9	0,7		46
Мебель	7,1	1,0	69	17,9	45,0	6,0	5,6		43,4

^{r} – рабочее состояние, ^{d} – сухое состояние, ^{daf} – сухое беззольное состояние

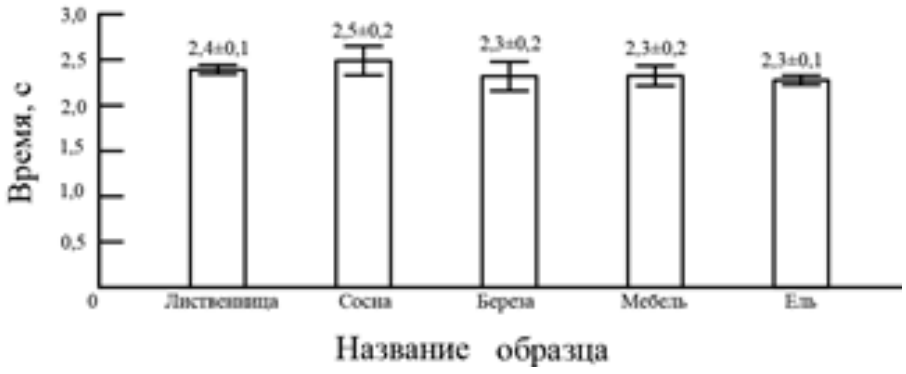


Рис. 1. Значения времени задержки зажигания образцов

Реакционная способность топлива оценивалась с помощью лабораторного стенда, включающего в себя: муфельную печь, координационное устройство с топливной навеской, приводимое в движение с помощью шагового двигателя, газоанализатор и высокоскоростная видеокамера [2]. Температура греющей среды в зоне горения T_g = 700 °C.

Время задержки зажигания принималось как разница между кадром, на котором начинается процесс горения образца и моментом попадания топливной пеллеты в фокус камеры. Полученные значения реакционной способности, как показано на рис. 1, имеет схожие значения для всех типов древесины, что связано с похожими значениями их технических характеристик. Наибольшее значение параметра τ_i прослеживается для образца сосны (τ_i = 2,5±0,2 с), а наименьшее для образца ели (τ_i = 2,3±0,2 с).

На рис. 2 представлены кадры зажигания и последующего развивающегося пламенного горения исследуемых образцов древесных отходов.

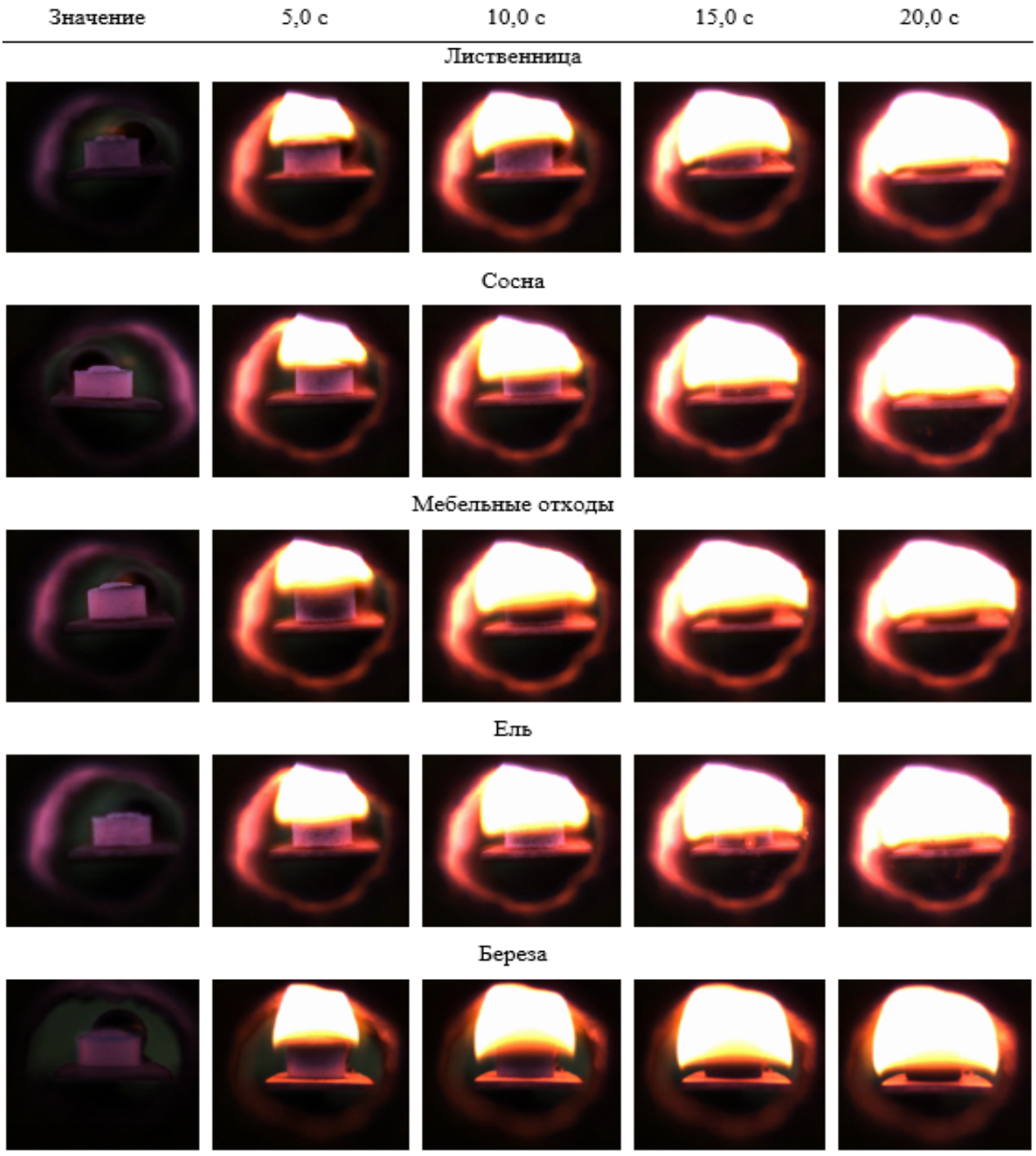


Рис. 2. Карды высокоскоростной видео фиксации процессов зажигания и горения исследуемых образцов, изготовленных из древесных отходов

Ранняя стадия процесса горения сопровождалась образованием микровзрывов, что вызвано выделением относительно большого количества горючих газов. Интенсивный поток газов способствует уносу мелких частиц с поверхности топливной пеллеты, которые впоследствии зажигаются и горят во взвешенном состоянии. Следующая стадия горения – окисление образовавшегося коксового остатка.

В работе исследованы физико-химические характеристики отходов лесотехнической промышленности, оценены их реакционная способность и приведена визуализация процессов зажигания и пламенного горения. Разница между максимальным и минимальным значениями времени задержки зажигания составила около 7–8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. – 2012. – № 3.
2. Slyusarsky K.V. и др. Ignition and Emission Characteristics of Waste Tires Pyrolysis Char Co-Combustion with Peat and Sawdust // Energies. – Vol. 16. – P. 4038. 10.3390/en16104038.
3. Смертин Н.В. Актуальность применения отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности при производстве строительных материалов / Н.В. Смертин, С.Н. Долматов // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 04–05 июня 2020 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. – С. 243–246.
4. Макарычев С.В. Теплофизические свойства термопластов, изготовленных на основе древесины из отходов лесной промышленности / С.В. Макарычев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6(128). – С. 139–142.
5. Кочева М.Н. Использование древесных отходов в лесной промышленности и разработка предложений по переработке их на предприятиях Республики коми / М.Н. Кочева // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 3. – С. 35–40.

МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПЛАМЕНИ

Д.С. Баршутина

Тамбовский государственный технический университет,
ЭПТ, гр. БТЭ-221

Научный руководитель: С.Н. Баршутин, к.т.н., доцент ЭПТ ТГТУ

Основным источником для производства тепловой и электрической энергии остаются традиционные виды топлива. Повышения эффективности преобразования потенциальной энергии топлива в тепловую или электрическую является актуальной задачей.

Одним из способов повышения эффективности преобразования энергии является увеличение количества ионизированных состояний газообразных компонентов пламени.

Рассмотрим процесс горения топлива в газообразной фазе. Основными процессами ионизации в пламени являются: термическая ионизация, которая описывается уравнением Саха и хемиоионизация, определяемая процессом химической реакции, при которой высвобождаемая энергия приводит к ионизации компонента пламени. Так как на процессы хемиоионизации повлиять в заданной системе не представляется возможным, ввиду их зависимости только от компонентного состава, то для повышения степени ионизации подробно рассмотрим термическую ионизацию.

Основным механизмом в термической ионизации выступает ударная ионизация, которая за счет кинетической энергии соударяющихся молекул переводят связанный электрон молекулы в свободное состояние, образуя при этом положительный ион.

В равновесном состоянии распределение энергии молекул подчиняется распределению Максвела [1]:

$$f(v) = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T} \right) \cdot v^2, \quad (1)$$

где m – масса молекулы, k – постоянная Больцмана, T – температура, v – скорость молекулы.

Функция распределения (1) по скоростям движения молекул углекислого газа при температуре 1500 К представлена на рис. 1.

Для определения количества молекул с кинетической энергией достаточной для ионизации, формулу (1) представим в виде $f(E)$:

$$f(E) = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k^3 \cdot T^3}} \cdot E \cdot \exp\ -\frac{E}{k \cdot T}\ . \quad (2)$$

Тогда график распределения энергии будет иметь вид рис. 2.

Для определения количества молекул обладающих кинетической энергией выше энергии ионизации воспользуемся следующим соотношением:

$$\frac{dn(E)}{n_0} = f(E)\,dE, \quad (3)$$

где n_0 – общее количество молекул в заданном объеме.

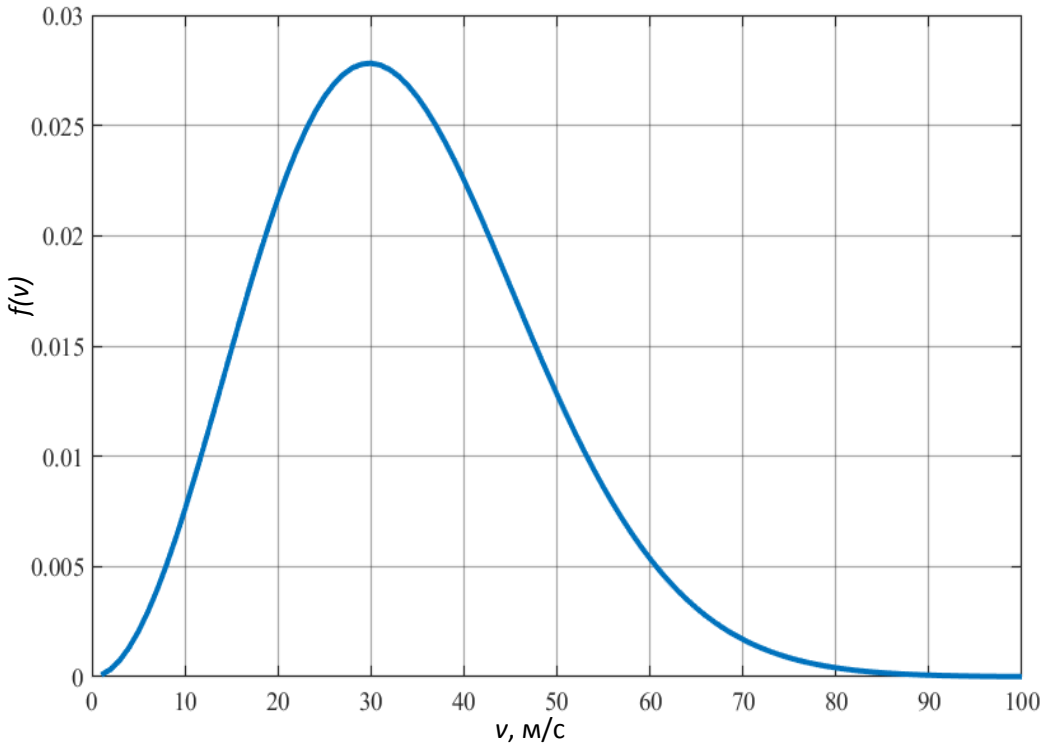


Рис. 1. График функции распределения скорости молекул.

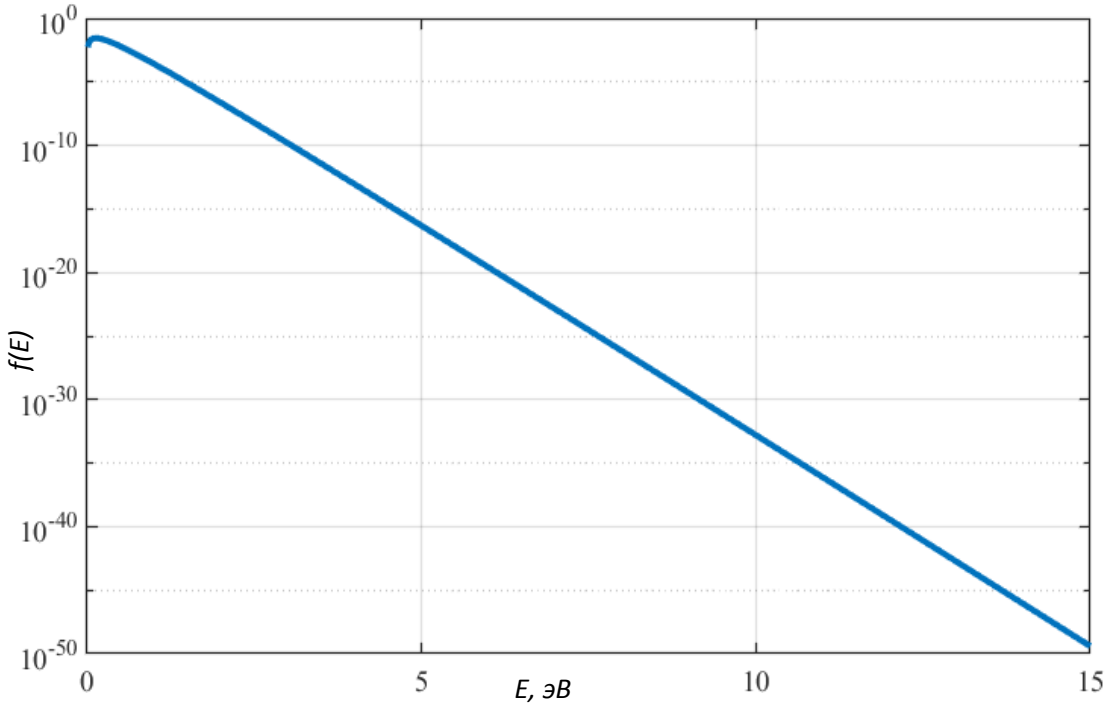


Рис. 2. График функции распределения кинетической энергии молекул

Проведем интегрирование:

$$n = n_0 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k^3 \cdot T^3}} \cdot \int_{E_a}^{E_b} E \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right) dE\,, \tag{4}$$

где E_a, E_b – минимальное и максимальное значение энергии.

Нормируем полученную функцию таким образом, чтобы при интегрировании от 0 до ∞ получалось равенство $n=n_0$.

$$n = n_0 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k \cdot T}} \cdot \left(E_a + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) - \left(E_b + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{k \cdot T}\right). \tag{5}$$

Соответственно при $E_a=0$ и $E_b=\infty$ из уравнения (6) находим поправочный коэффициент p_k

$$p_k \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k \cdot T}} \cdot \left(\left(0 + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{0}{k \cdot T}\right) - \left(\infty + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{\infty}{k \cdot T}\right)\right) = 1\,, \tag{6}$$

так как

$$\left(\left(0 + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{0}{k \cdot T}\right) - \left(\infty + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{\infty}{k \cdot T}\right)\right) = k \cdot T\,, \tag{7}$$

то

$$p_k = \sqrt{\frac{\pi}{8 \cdot m \cdot k \cdot T}}\,. \tag{8}$$

В итоге уравнение (5) приобретет вид:

$$n = \frac{n_0}{k \cdot T} \cdot \left(\left(E_a + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) - \left(E_b + k \cdot T\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{k \cdot T}\right)\right). \tag{9}$$

Анализ функции зависимости количества молекул с энергий, которая превышает энергию ионизации углекислого газа от температуры показал, что процесс ионизации для молекул углекислого газа начинается с температуры 2716 K и выше рис. 3.

А так как, температура горения углеводородов в среде воздуха не превышает 2800 К, то ионизация молекул азота при горении углеводородов в среде воздуха происходить не будет.

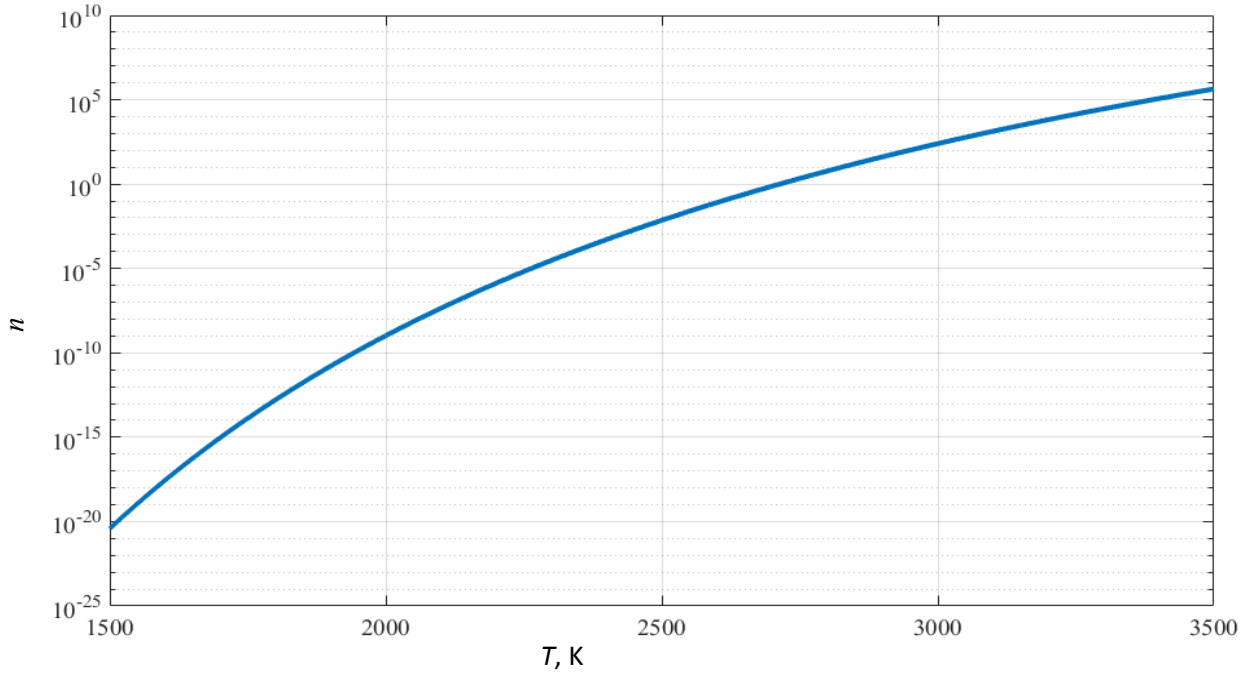


Рис. 3. График зависимости количества молекул, обладающих энергией достаточной для ионизации углекислого газа, от температуры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики: учебное пособие для вузов: в 3 томах / И.В. Савельев. – 10-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – Том 1: Механика. Молекулярная физика. – 356 с.

ADVANCING TECHNIQUES FOR PREDICTING HEAT AND MASS TRANSFER PERFORMANCE IN ENERGY DEVICES

E.K. Ketter

Tomsk polytechnic university,
Group A1-43И

Supervisor: A.G. Korotkikh

As energy technologies evolve, the optimization of heat and mass transfer processes becomes integral for enhanced efficiency and sustainability. This abstract provides an overview of cutting-edge techniques that are shaping the prediction of heat and mass transfer performance in energy devices, contributing to the forefront of technological advancements.

Computational Fluid Dynamics (CFD) stands as a cornerstone in predictive modeling, employing numerical methods to simulate fluid dynamics, heat transfer, and mass transport within energy devices [1]. By providing detailed insights into complex interactions, CFD facilitates the optimization of device designs for superior performance. Task distribution in a CFD process is shown in the figure below.

Machine Learning (ML) and Predictive Analytics are gaining prominence in predicting heat and mass transfer. ML algorithms analyze extensive data sets from experimental studies and theoretical simulations, identifying patterns for more accurate predictions [3]. This intersection of data science and thermophysics refines our understanding of energy device dynamics.

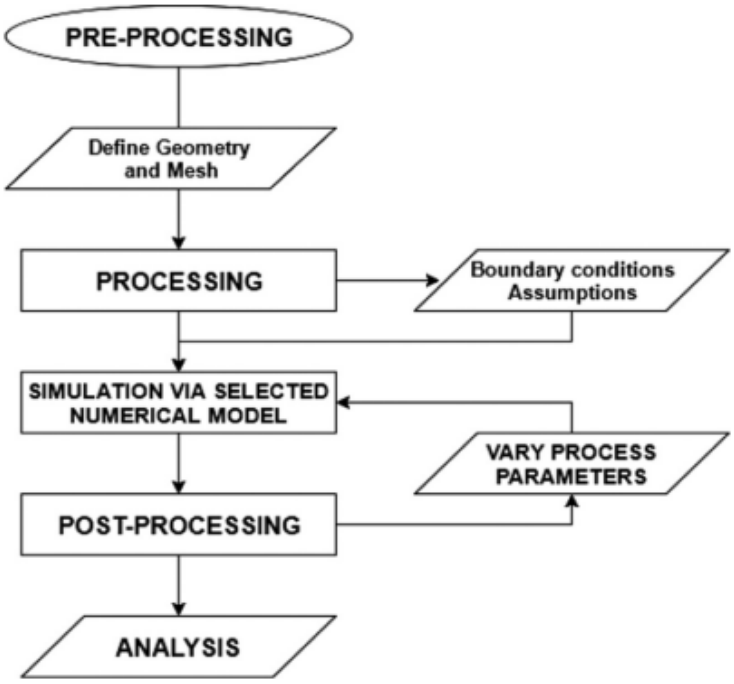


Fig. 1. Task distribution in a CFD process

MultiPhysics Simulations integrate various physical phenomena into a unified framework, offering a realistic representation of complex interactions within energy devices [4]. This holistic approach contributes to the accuracy of predictions, especially in systems with diverse physical processes.

Optimization Algorithms for Design Iterations are essential for achieving peak performance in energy devices. These algorithms, coupled with predictive models, expedite the exploration of design spaces, enabling engineers to identify configurations that maximize heat and mass transfer efficiency [5, 6].

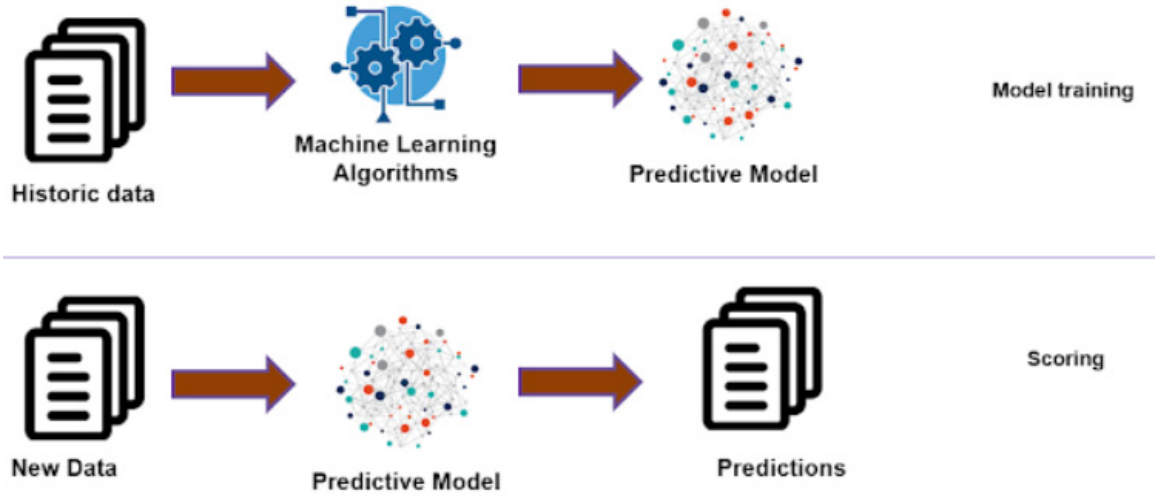


Fig. 2. Machine Learning training and scoring

In conclusion, the continuous advancement of predictive techniques is reshaping the landscape of energy technologies. From the digital precision of CFD to the data-driven insights of machine learning and the innovative approaches of inverse design and multi-physics simulations, these techniques collectively contribute to a more comprehensive understanding of heat and mass transfer dynamics within energy devices.

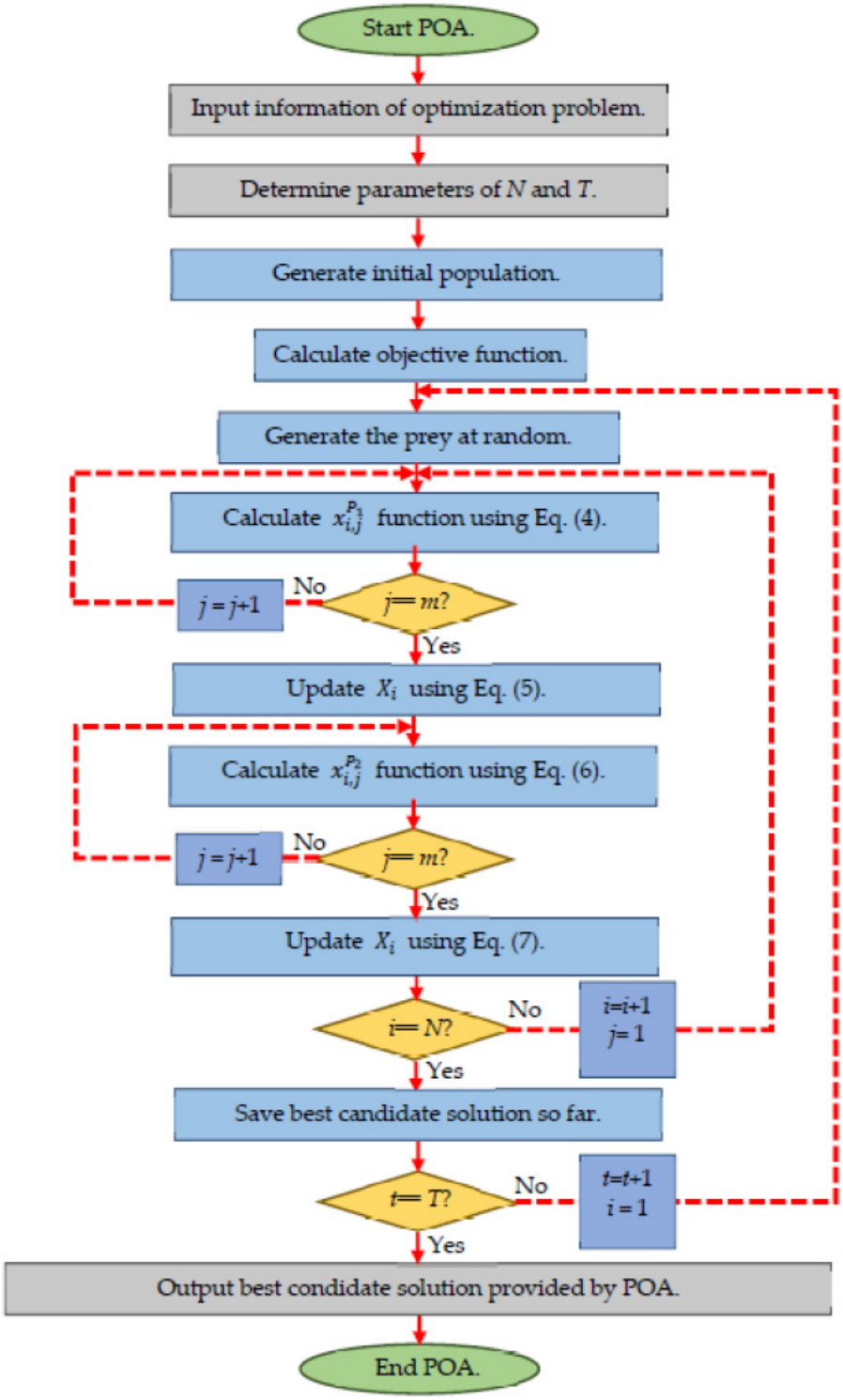


Fig. 3. Flow chart of Pelican Optimization Algorithm

REFERENCES

1. Anderson J.D, Wendt J.Computational fluid dynamics. – New York: McGraw-hill. – 2009. – V. 206. – P. 332.
2. Cruz P.A.D., Yamat E.J.E., Nuqui J.P.E., Soriano A.N. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the heat transfer and fluid flow of copper (II) oxide -water nanofluid in a shell and tube heat exchanger // Digital Chemical Engineering. – 2022.
3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H., Friedman J.H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction // New York: springer. – 2009. – V. 2. – P. 1–758.
4. Hughes T.J. Multiscale phenomena: Green's functions, the Dirichlet-to-Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2009. – Vol. 127(1–4). – P. 387–401.
5. Deb K. Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction. In Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing. – London: Springer London, 2011. – P. 3–34.
6. Trojovský P., Dehghani M. Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications // Sensors – 2022. – P. 855.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.О. Малинин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А3-13

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Лесные пожары представляют собой природное явление, которое приводит к экономическим и социальным потерям во всем мире [1, 2]. Площадь лесного пожара в 3–5 % случаев достигает 100 гектаров [3]. В то же время только на 1 % крупнейших пожаров приходится 80–96 % выгоревшей площади [4]. Распространение зон АВП обеспечивает больший контакт между дикой растительностью и антропогенной активностью, что может привести к увеличению зон возможных источников возгорания и, как следствие, к усилению разрушительного воздействия [5, 6].

Существует множество моделей распространения лесных пожаров, от простых геометрических моделей [7] до более сложных [8]. В случаях, когда детерминиваронные модели представляют большие расчетные сетки либо имеют сложные итерационные расчеты время работы алгоритма может быть большим, что может ограничивать область применения.

Скорость работы алгоритмов расчета детерминированных моделей может быть увеличена за счет параллельных вычислений. Так, в работе [9] использование параллельных вычислений сократило время вычислений и объем требуемой памяти, что позволило добавить учет прогнозируемого индекса погоды.

Для численного решения дифференциального уравнения теплопроводности был использован метод конечных разностей, описанный в [10, 11]:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + q \cdot e^{(-k_i p_i x)} \quad (1)$$

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \quad (2)$$

где ρ, c, λ, T – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температура; k – коэффициент для закона, аналогичного закону Буге–Ламберта–Бира; t – время; x, z – координаты точки.

Конфигурация узла кластера:

- 2 процессора Intel Xeon Gold 6140, 2,3 ГГц, 18 ядер/36 потоков, 10,4 Гбит/с, 24,75 МБ кэш-памяти, Turbo, HT (140 Вт), DDR4 2666 МГц.
- 8 модулей памяти RDIMM по 32 ГБ, 2666 МТ/с.
- SATA 200 ГБ.

Параллельная программа написана на Python 3.x. В качестве интерпретатора использовалась Anaconda версии 4.6.2. Затем эффективность рассчитывается для каждого из расчетных блоков отдельно.

Производительность параллельных вычислений рассчитывается по формулам представленным в [12]:

$$E = \frac{T_0}{MT_M}, \tag{3}$$

где – T_0 – время расчета в синхронном режиме. T_M – время расчета в каждом процессе M – количество процессов.

Данное соотношение позволяет рассчитать коэффициент эффективности без учета потерь.

В случае, когда при работе алгоритма присутствуют потери производительности на создание и закрытие процессов, а также потери на обмен данными. В таком случае время работы процесса будет описываться параметром T'_M. Эффективность рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{T_0}{MT_M} = \frac{T_0}{M(T_M^0 + \alpha T_M^0)}, \tag{4}$$

где $\alpha = \frac{T'_M}{T_M^0}$

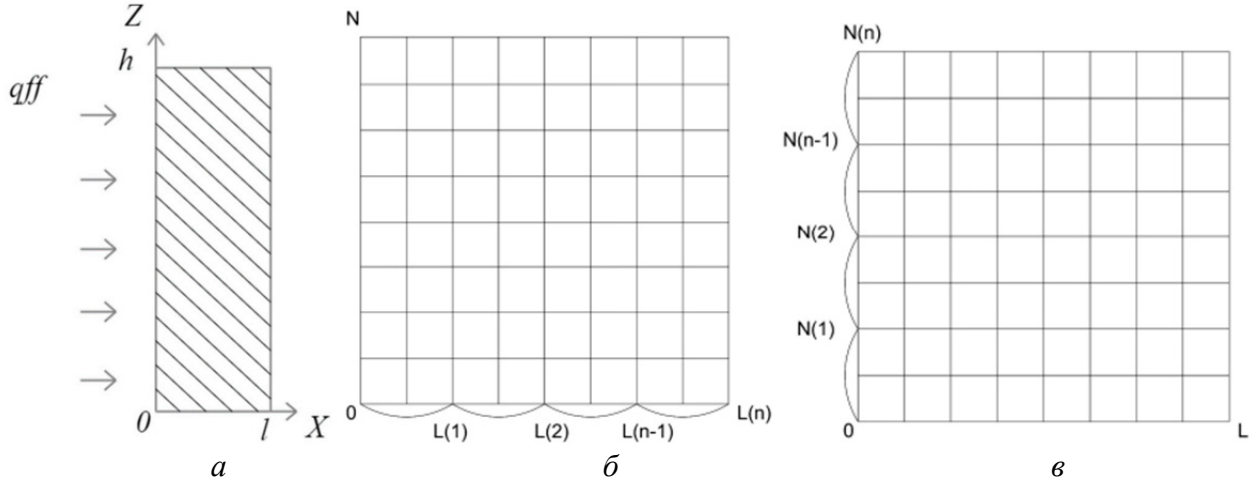


Рис. 1. Схема области решения и распределения областей решения по оси N(б), L(в)

Ускорение можно рассчитать по формуле:

$$S_M = M/(1 + \alpha_M)\ . \tag{5}$$

На рис. 2, 3 показано, как эффективность параллельной программы зависит от количества процессов, участвующих в вычислении для первого и второго вычислительного блока соответственно.

Зависимость ускорения от программы в первом и втором блоке показана на рис. 4, 5 соответственно.

Скорость работы оказалась противоречивой. С одной стороны, наблюдается рост производительности, но при увеличении числа процессов свыше 16 наблюдается замедление вычислений.

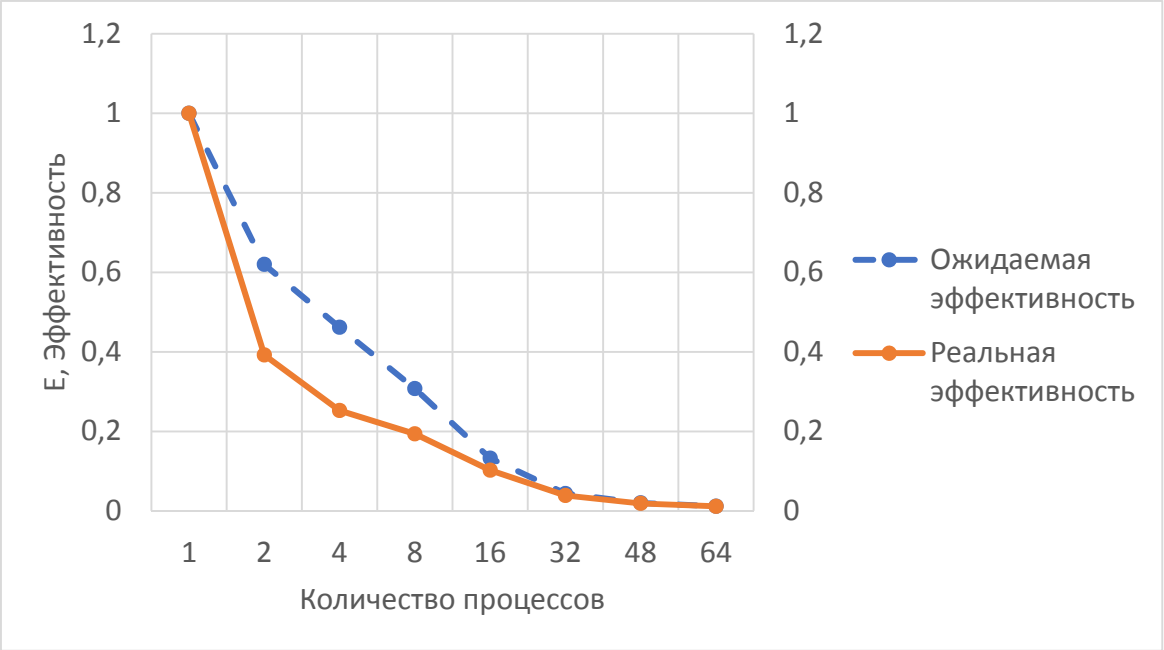


Рис. 2. Эффективность параллельной реализации первого расчетного блока

Таким образом, разработанный алгоритм имеет большое практическое значение. За счет распределения нагрузки на разные процессоры снижается скорость вычисления модели. Это позволяет применять более сложные математические модели и повышать точность расчетной сетки. Это также открывает простор для экспериментов по одновременному расчету задач с различными начальными условиями и условиями протекания процессов теплопередачи. Дальнейшая разработка позволит применять эти алгоритмы при расчете пожарной опасности целого населенного пункта при различных условиях воздействия фронта лесного пожара на конструкцию зданий.

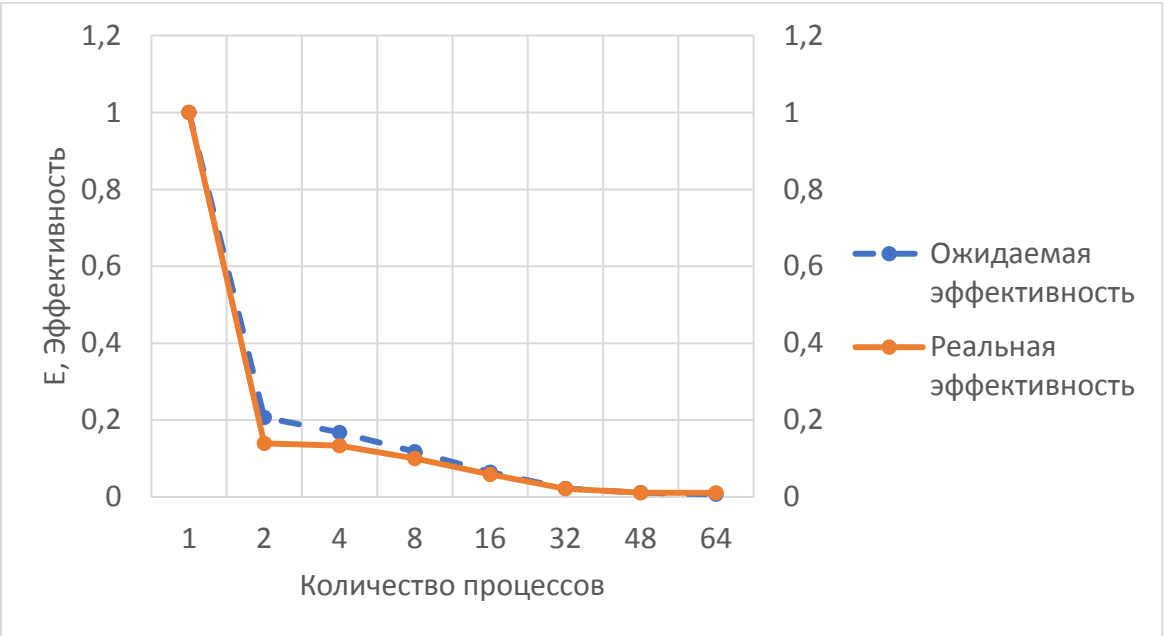


Рис. 3. Эффективность параллельной реализации второго расчетного блока

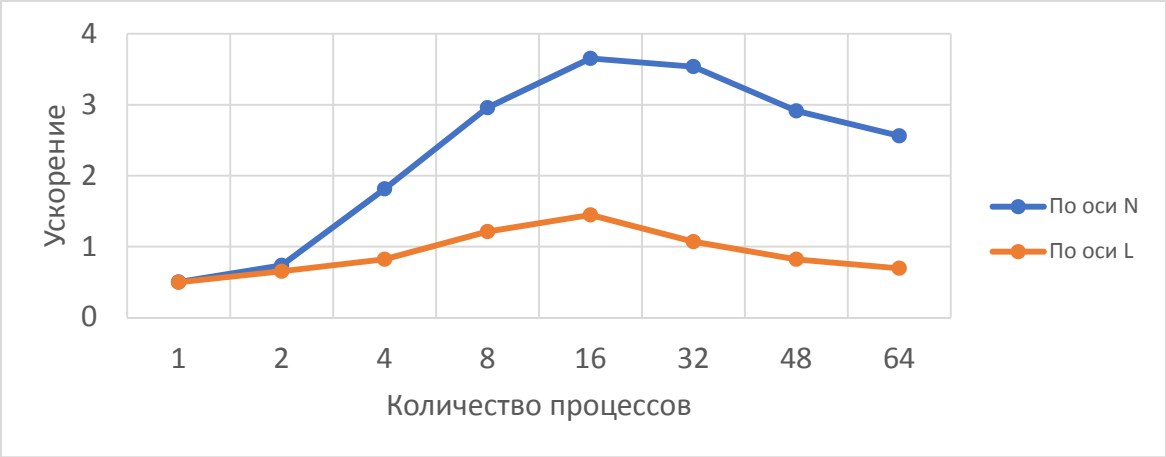


Рис. 4. Ускорение работы первого и второго расчетного блока

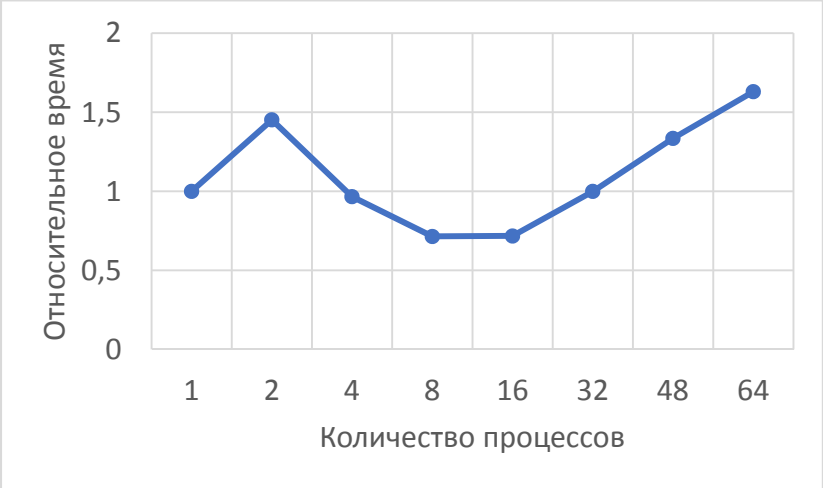


Рис. 5. График изменения времени работы алгоритма от количества запущенных процессов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McNamee M. et al. IAFSS agenda 2030 for a fire safe world //. Fire Saf. J. – 2019. – Vol. 110. – P. 102889.
2. Liu D., Xu Z., Wang Z., Zhou Y., Fan C. Estimation of effective coverage rate of fire station services based on real-time travel times // Fire Saf. J. – 2021. – Vol. 120. – P. 103021.
3. Calkin D.E., Gebert K.M., Jones J.G., Neilson R.P. Forest service large fire area burned and suppression expenditure trends, 1970–2002 // J. For. – 2005. – Vol. 103. – P. 179–183.
4. Short K.C. A spatial database of wildfires in the United States, 1992–2011 // Earth Syst. Sci. Data. – 2014. – Vol. 6. – P. 1–27.
5. Monedero S., Ramírez J., Molina-Terrén D., Cardil A. Simulating wildfires backwards in time from the final fire perimeter in point-functionalfire models // Environ. Model. Softw. – 2017. – Vol. 92. – P. 163–168.
6. Zárate L., Arnaldos J., Casal J. Establishing safety distances for wildland fires // Fire Saf. J. – 2008. – Vol. 43. – P. 565–575.
7. Plourde F., Doan-Kim S., Dumas J., Malet J. A new model of wildland fire simulation // Fire Saf. J. – 1997. – Vol. 29. – P. 283–299.
8. Novozhilov V., Moghtaderi B., Fletcher D., Kent J. Computational fluid dynamics modelling of wood combustion // Fire Saf. J. – 1996. – Vol. 27. – P. 69–84.
9. Singh,K.R. et al. Parallel SVM model for forest fire prediction/ Soft Comput. Lett. 2021. – Vol. 3. – P. 100014.
10. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer; Volume 1: Mathematical Modelling. – Wiley: Chichester, UK, 1995. – P. 418.
11. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer; Volume 2: The Finite Difference Method. – Wiley: Chichester, UK, 1995. – P. 432.
12. Baranovskiy N.V. Forest fire danger assessment using SPDM-model of computation for massive parallel system.

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.Е. Посаднов, В.Д. Малышенков, В.С. Исаев

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), ЭПМЭМ, П-186, П-477

Научный руководитель: А.Е. Бычков, к.т.н., доцент ЭПМЭМ

В каждом промышленном предприятии есть электрические двигатели, служащие для выполнения того или иного технологического процесса. Один из основных показателей работы электрической машины – ее температура. Само по себе тепловыделение связано непосредственно с процессами, протекающими в электрической машине. Возникают ситуации, когда работа двигателя может быть нарушена или невозможна по условиям нагрева. В связи с этим контроль температуры электромашин крайне важен для сохранения их надежности и эксплуатационных свойств. Для правильного измерения и получения наиболее верных кривых нагрева к датчику температуры предъявляются требования как к методике измерений, так и его установке. Именно поэтому был проведен ряд исследований температуры электрических двигателей лаборатории электропривода ЮУрГУ при помощи датчиков термосопротивления ОВЕН ДТС3014-Pt1000.B3.50/2, ОВЕН ДТС014-50М.В3.25/1,5 и ТСМ. 50М-К2-В3, а также измерителей-регуляторов ОВЕН-ТРМ201 и ТРМ2210 [1, 2].

Главная задача экспериментов состоит в том, чтобы расположить датчик температуры на двигателе, а также создать необходимые условия для получения кривой нагрева, которая будет близка к ее теоретическому виду в длительном режиме работы, который изображен на рис. 1 [3].

Для проведения экспериментальной работы был выбран стенд № 4 лаборатории автоматизированного электропривода ЮУрГУ с асинхронным двигателем MTF 111-6 и преобразователем частоты ABB ACS880.

В первом опыте было произведено снятие кривых нагрева корпуса электродвигателя. Измерение проходило при помощи мультиметра и датчика термосопротивления ОВЕН ДТС3014-Pt1000.B3.50/2, чувствительный элемент которого, располагался непосредственно на корпусе электрической машины. Результаты измерений представлены на рис. 2.

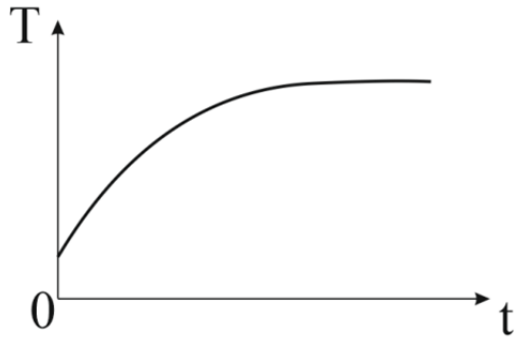


Рис. 1. Идеальный вид обобщенной кривой нагрева электрической машины

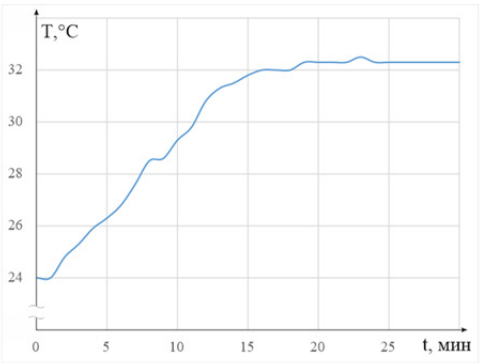


Рис. 2. Кривая нагрева эксперимента № 1

Анализируя полученную кривую, мы видим, что она существенно отличается от теоретической. Наблюдаются видимые колебания температуры и перепады значений. В процессе проведения опыта были выделены возможные причины:

- низкая точность измерения мультиметра;
- неудачная установка датчика;
- кусочно-линейная аппроксимация НСХ при трарировке;
- нежелательное охлаждение потоками воздуха.

Чтобы разобраться в данных причинах, был произведен второй эксперимент. В нем использовались два датчика термосопротивления – ОВЕН ДТС014-50М.В3.25/1,5 и ТСМ.50М-Л2-В3, а также использовались измерители-регуляторы ОВЕН – ТРМ201 и ТРМ210.

Так как в данном эксперименте использовалось два комплекта датчиков, стало возможным одновременное снятие температуры на корпусе электродвигателя, так и внутри корпуса (лобовой части обмотки статора).

Единственным внесенным коррективом для расположения датчика на корпусе двигателя было прижатие его в плотную. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

Кривая, полученная при измерении обмотки, является удовлетворительной. Рассматривая те же возможные причины, которые вносили изменения в методику снятия, можно сделать вывод:

- при измерении температуры обмотки датчик располагался таким образом, что имел большую площадь контакта с объектом;
- аппроксимация при тарировке, неточность измерения практически исключены, так как измеритель имеет настраиваемые заводские настройки, которые специализированы под конкретный вид датчика;
- потоки воздуха, циркулирующие внутри двигателя со стороны контактных колец, менее заметно влияют на кривую. Наблюдается все лишь незначительные отклонения кривой от экспоненциального характера, чем можно пренебречь.

Если рассмотреть кривую нагрева корпуса, то она все равно имеет перепады и колебания.

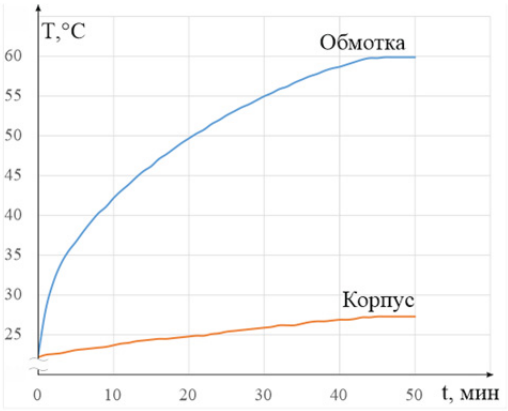


Рис. 3. Кривая нагрева эксперимента № 2

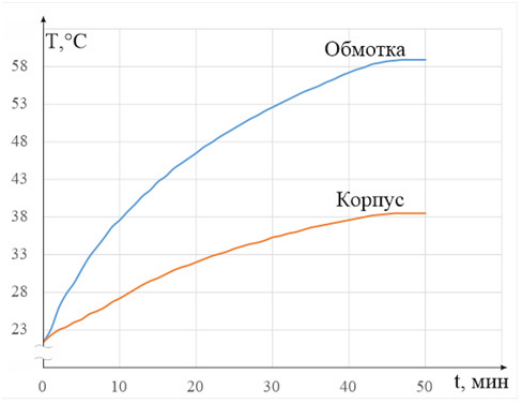


Рис. 4. Кривые нагрева при введении препятствия

Предположительно это может происходить от воздействия потоков воздуха от вентилятора, обдувающего пространство между ребер охлаждения на корпусе, что мешает датчику фиксировать реальную температуру корпуса. В доказательство данной теории был проведен третий эксперимент.

Для следующего опыта было создано искусственное ограничение циркуляции воздуха. Результаты опыта изображены на рис. 4. Из данного графика мы видим, что температурные кривые стали схожими на теоретический вид.

Таким образом, проведя серию экспериментов, выявив и устранив возможные причины, воздействующие на снятие температурной кривой электрического двигателя, был получен искомый график температуры двигателя в длительном режиме работы, который соответствует теоретическому виду. Убедились, что для верного исследования температуры, нужно соблюдать требования как к методике измерений, так и установке датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Датчики температуры компании ОВЕН. Каталог. – https://owen.ru/catalog/datchiki temperaturi (дата обращения 7.11.2023).
2. Измерители-регуляторы компании ОВЕН. Каталог. – https://owen.ru/catalog/izmeriteli_ regulyatori (дата обращения 7.11.2023)
3. Шпаков Б.А. Экспериментальное исследование метода метрологической самодиагностики датчика температуры на двух термосопротивлениях / Б.А. Шпаков, А.Н. Тырсин // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – Т. 6. – С. 124–127. – EDN MHSWTD

СЖИГАНИЕ НЕПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 150 МВТ

Н.В. Абрамов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А2-46

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Реформирование энергетической отрасли предполагает пересмотр условий работы объектов энергетической инфраструктуры, в частности паровых котлов.

При проектировании ТЭС зачастую закладывается определённый тип топлива, добываемый на определенном месторождении, поэтому в новых условиях, для достижения требуемых экономических показателей необходимо изменять поставщиков, а как следствие и тип топлива.

Использование непроектного топлива может привести к ограничению нагрузки, снижению показателей работы котла, повышенному шлакообразованию, а также неудовлетворительным показателям работы котла [1].

Также стоит отметить, что сжигание небольших партий непроектного топлива не даёт всей картины, так как многие негативные факторы проявляются в течении больших промежутков времени [2].

Решение проблемы прогнозирования параметров топочной камеры котлов связано с разработкой актуальной математической модели рабочего процесса, для удовлетворения требований к разработке численных моделей выбран программный комплекс FIRE 3D.

Создание математической модели топочной камеры котельной установки мощностью 150 МВт, с тангенциальным расположением горелок, а также анализ топочных процессов на основе численного решения является целью данного исследования.

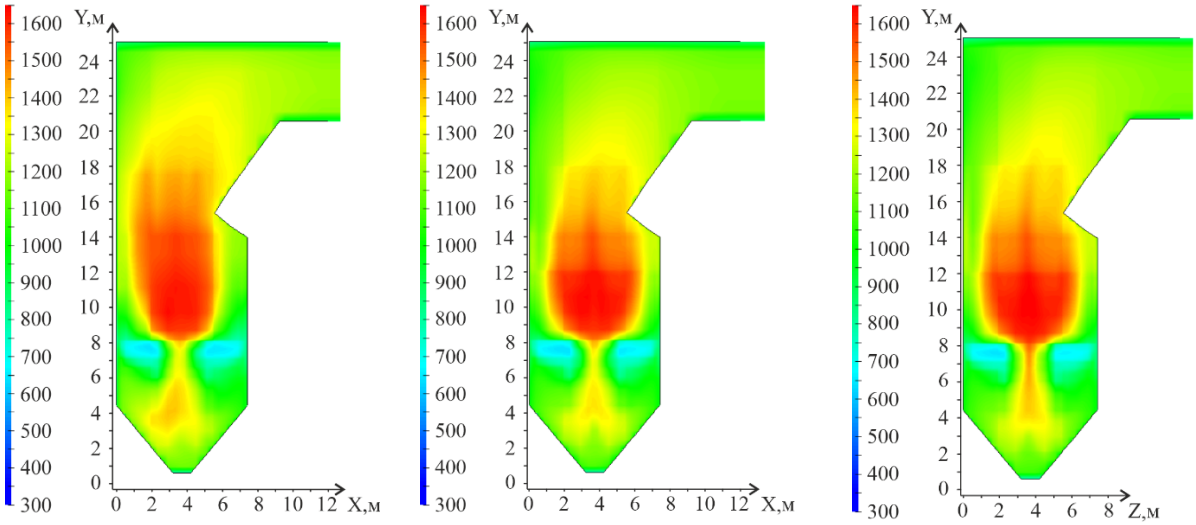
Анализ характеристик камеры сгорания, разработанной для работы на буром угле, при переводе на каменный уголь в трёх вариантах: базовый вариант, с 4 соплами третичного дутья и с 6 соплам третичного дутья.

Предметом и объектом исследования является топочная камера, которая в плане имеет размеры 7424×7808 мм, экранирована трубами D=60 мм, с толщиной стенки 5,5 мм, трубы расположены с шагом в 65 мм. Камера сгорания оборудована четырьмя прямоточными горелками, установленными в углах, тангенциально к окружности диаметром 900 мм.

Для достижения результата исследования применена двухпараметрическая «k-ε» модель турбулентности, которая при расчёте трубулизованного потока учитывает наличие дисперсных частиц [3]. Аэродинамика топочной камеры котлоагрегата исследовалась с учётом переноса тепла конвекцией и излучением. Лагранжев подход PSICELL применён для моделирования движения и теплообмена топлива и золы в камере сгорания, данный подход позволяет с достаточной точностью исследовать процессы выхода летучих и сгорания коксового остатка. Для расчёта переноса тепла излучением выбран метод P1-приближения, хорошо зарекомендовавший себя в исследованиях физико-химических процессов в топочных камерах котлоагрегатов [4]. Для решения системы уравнений использован алгоритм Патанкара и Сполдинга SIMPLE. Методика исследования опробована в предыдущих исследованиях и показала достаточную точность и сходимость результатов с натурными испытаниями [5].

На основании построенной численной модели получены численные решения разделения в объеме топочной камеры температур, концентраций компонентов горения, аэродинамической структуры потоков и др.

На рис. 1 представлены результаты распределения температурных полей в продольном сечении топочной камеры. Во всех исследованных вариантах ядро горения располагается выше горелочных устройств, вследствие более медленного прогрева топливно-воздушной смеси при формировании вертикального вихря. При этом в базовом варианте ядро горения более вытянуто по высоте топки. Во всех исследованных вариантах происходит устойчивое формирование вертикального вихря и активное выгорание топлива.



а *б* *в*

Рис. 1. Распределение температур в продольном сечении топочной камеры: а) базовый вариант; б) с 4-мя соплами; в) с 6-ю соплами

На основании проведенного исследования можно отметить малое влияние сопел третичного дутья на аэродинамическую структуру факела вследствие невозможности перераспределения больших объемов воздуха между горелками и соплами третичного дутья при использовании прямоточных горелок для бурых углей.

Результаты могут быть использованы для технико-экономического обоснования целесообразности и эффективности смены проектного топлива на ТЭС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, https://rscf.ru/project/23-29-00274/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо : монография. Томск : STT, 2011. – 183 с. ISBN 978-5-93629-440-2.
2. Исследование аэродинамики и горения в топке котла бкз-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников [и др.] // Известия Томского политехнического университета. –2007. – С. 175–181.
3. Đugum A Numerical simulation of coal-air mixture flow in a real double-swirl burner and implications on combustion anomalies in a utility boiler / A Đugum, K Hanjalić // Energy. – 2019. – Vol. 170. – P. 942–953. – ISSN 0360-5442.
4. Neumann L.E. Implementation of quadratic upstream interpolation schemes for solute transport into HYDRUS-1D / L.E. Neumann, J Šimůnek, F.J. Cook // Environ. Model. Softw. – 2011. – Vol. 26, № 11. – P. 1298–1308.
5. Теплофизическая и экологическая оценка использования природного газа при реконструкции пылеугольного котла / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, Н.В. Абрамов, С.А. Пузырев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 30–38.

ПРИЧИНЫ МИКРОВЗРЫВНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ СМАЧИВАНИЯ И ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ

Е.Ю. Лага, Д.М. Клепиков, Г.Е. Котельников, С.П. Бондарчук

Томский политехнический университет,
ИШФВП

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

К одному из перспективных направлений развития систем охлаждения для теплонагруженных поверхностей, относится новый способ охлаждения, основанный на микровзрывном диспергировании капель теплоносителей. Такое охлаждение позволяет повысить интенсивность и равномерность теплоотвода, значительно сократить расход теплоносителя. В условиях нагрева капель полярных теплоносителей, на поверхности пропитанной дисперсионной жидкостью, происходит их полное микровзрывное диспергирование, что ведет к многократному увеличению площади орошения. Следовательно, микровзрывное диспергирование капель теплоносителей приводит к более равномерному отводу теплоты от теплонагруженных поверхностей [1]. Целью настоящей работы является разработка нового подхода к охлаждению теплонагруженного оборудования за счет диспергирования капель полярных теплоносителей при дозировании их на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью.

В экспериментальных исследованиях в качестве поверхности нагрева использовались пластины алюминиевого сплава АМГ-2 размером 15×15 мм, толщиной 2 мм. На поверхности пластин было сформировано три вида текстур, в т. ч. полированная поверхность.

Первая гр. образцов (№ 1) характеризуется заводской полировкой. По хорошо апробированной методике [2], с помощью абразивного материала со средним размером зерна 100 мкм, сформирована текстура для поверхностей второй группы образцов алюминиевого сплава (№ 2). Поверхности третьей группы образцов (№ 3) модифицировались наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics (IPG-Photonics, Russia). Параметры лазерного излучения: длительность импульса 120 нс, частота 20 кГц. Двухосевым гальваносканером контролировалась скорость перемещения луча 191 мм/с и количество линий прохода 105 на 1 мм. Текстура на поверхности сформирована в условиях однократного прохождения луча.

После модификации поверхностей, образцы очищались в ультразвуковой ванне последовательно в среде изопропилового спирта и ультрачистой воды. Анализ поверхностей показал, что в результате абразивной обработки формируется текстура, состоящая из микро- и наноразмерных неровностей, углублений в виде хаотично расположенных каналов. Поверхность, модифицированная лазерным излучением, имеет более развитую, многоуровневую шероховатость, по сравнению с абразивной обработкой, состоящую преимущественно из элементов в форме шара.

Экспериментальные исследования процессов микровзрывного диспергирования и паффинга в условиях интенсивного кондуктивного нагрева выполнены на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 1.

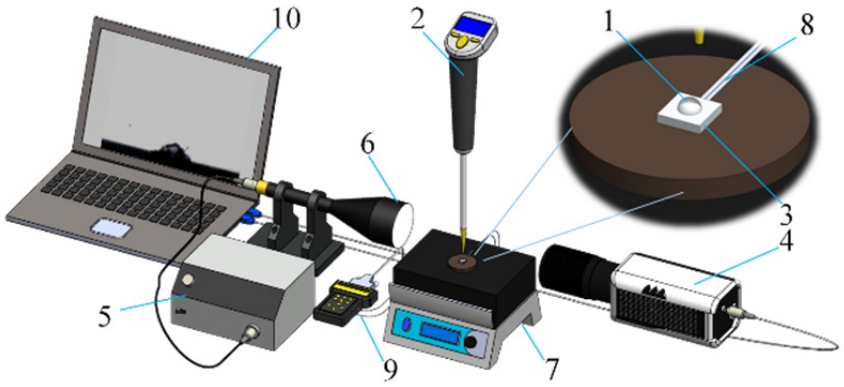


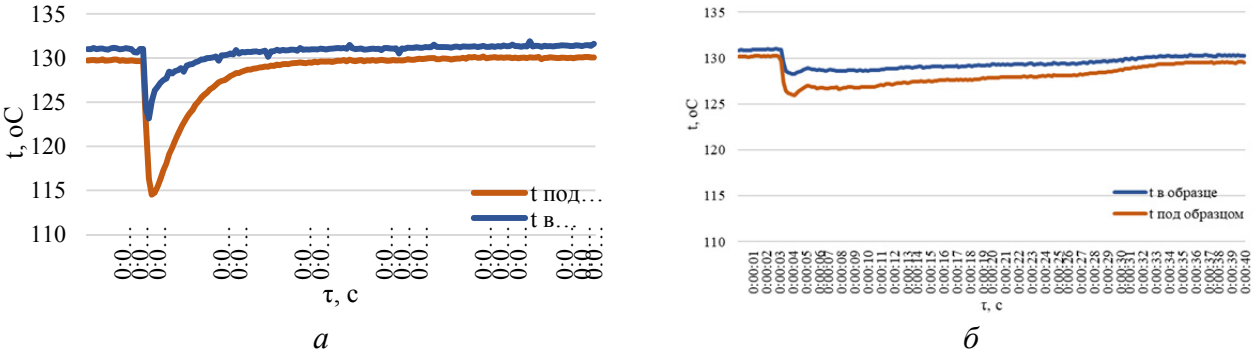
Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – капля объемом 5 мкм; 2 – электронный дозатор; 3 – образец алюминиевого сплава; 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная объективом; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – стеклокерамическая плита; 8 – термопара; 9 – контроллер; 10 – персональный компьютер

Капля *1* дистиллированной воды электронным дозатором *2* помещалась на поверхность образца *3*, нагретого до заданной температуры. Исследуемые процессы регистрировались с использованием теневой оптической системы, состоящей из видеокамеры *4*, источника света *5* и телецентрической оптической трубы *6*. Скорость съемки составляла 1000 к/с. Нагрев образцов осуществлялся при помощи стеклокерамической плиты *7* в диапазоне от 100 до 200 °С при шаге в 10 °С. Малоинерционные хромель-алюмелевые термопары *8*, подключенные к контроллеру температуры *9*, использовались для регистрации температуры образца. Одна термопара располагалась под алюминиевым образцом, вторая регистрировала изменение температуры образца под каплей жидкости и устанавливалась в отверстие, выполненное с торцевой стороны образца. Толщина стенки между спаем термопары и верхней границей поверхности, на которой расположена капля, не превышала 160 мкм. Погрешность измерения температуры не превышала ±0,1 °С. Данные выводились на персональный компьютер *10*. Экспериментальные исследования проводились в двух условиях: в первом случае каплю дистиллированной воды дозировали непосредственно на нагретую поверхность образца, во втором случае поверхность образца пропитывали дисперсионной жидкостью, затем дозировали каплю воды.

На рис. 2 приведены типичные временные зависимости температуры нагрева образца, при начальной температуре 130 °С для поверхности, модифицированной лазерным излучением (рис. 2, *а*), и поверхности, модифицированной лазерным излучением и пропитанной дисперсионной жидкостью (рис. 2, *б*).

Установлено, что в диапазоне температур нагрева от 120 до 180 °С, для образцов с поверхностью, модифицированной лазерным излучением и пропитанной дисперсионной жидкостью, в среднем величина охлаждения составила 5,5 °С, что в 3,2 раза ниже, чем у образ-

цов, непропитанных дисперсионной жидкостью (17,7 °С). При этом время прогрева до начальной температуры образца с поверхностью, пропитанной дисперсионной жидкостью, в среднем составляет 20 с, что в 2,9 раз выше по сравнению с образцами, непропитанными дисперсионной жидкостью (7 с).



а *б*

Рис. 2. Типичные временные зависимости температуры нагрева образца алюминиевого сплава при дозировании дистиллированной воды объемом 5 мкл: а) поверхность, модифицированная лазерным излучением; б) поверхность, модифицированная лазерным излучением и пропитанная дисперсионной жидкостью

Предположительно, такой эффект реализуется за счет процесса микровзрывного диспергирования капель дистиллированной воды при их дозировании на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью. Формируемые при взрывном диспергировании вторичные капли на порядок меньше размеров капли, формируемой при прямом дозировании (5 мкл), что позволяет сократить величину охлаждения в среднем в 3,2 раза. А кратное увеличение площади охлаждения, за счет диспергирования исходной капли на десятки и сотни мелкодисперсных фрагментов ведет к более плавному прогреву до начальной температуры образца. Такой эффект позволяет реализовать равномерный отвод тепловых потоков высокой плотности от нагретых поверхностей.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при дозировании капли дистиллированной воды на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью, с различными видами обработки (полированная, абразивная обработка, модифицированная лазерным излучением) диаметр образованных пузырей в среднем равен 3 мм, что превышает диаметра капли воды объемом 5 мкл (2 мм), что приводит к диспергированию частиц воды. При дозировании воды на поверхности, непропитанные дисперсионной жидкостью, образование пузырей происходит в объеме капли, и средний диаметр (0,3 мм) не превышает диаметр капли. На рис. 3 и 4 представлены типичные видеограммы нагрева капли дистиллированной воды при дозировании на поверхность № 1–3.

В результате анализа видеограмм установлено, что для протекания физико-химических процессов при нагревании капли воды на поверхностях, пропитанных дисперсионной жидкостью, требуется больше энергии, это выражено в увеличении начальной температуры нагрева поверхности или увеличении времени контакта капли с поверхностью.

Предположительно, увеличение размеров зарождающихся газовых пузырей при дозировании воды на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью, происходит за счет повышенного поверхностного натяжения, обусловленного присутствием дисперсионной жидкости и ее паров.

Разработан новый подход к охлаждению теплонагруженного оборудования, основанный на диспергировании капель полярных теплоносителей при дозировании их на поверхность образца алюминиевого сплава, пропитанного дисперсионной жидкостью.

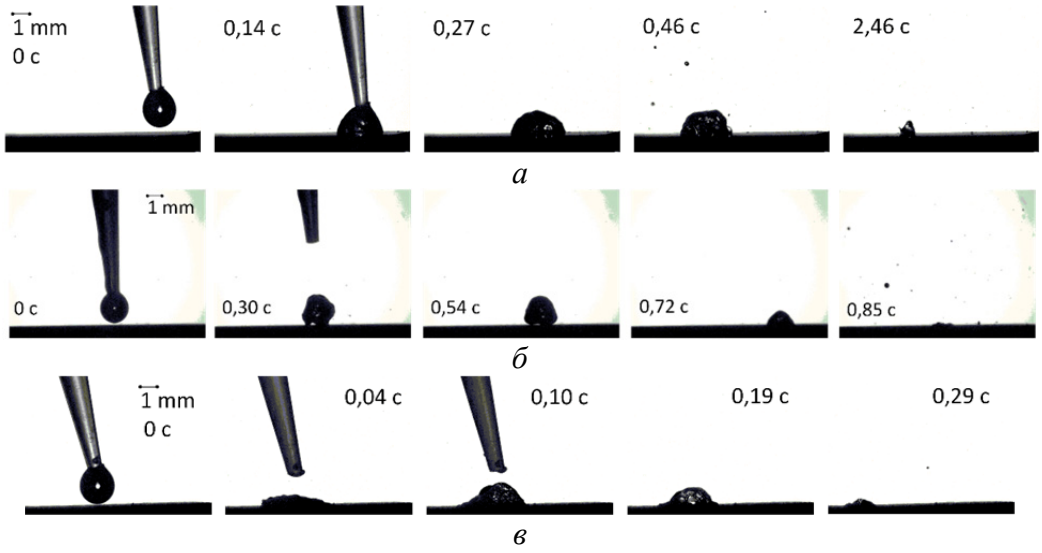


Рис. 3. Типичные видеограммы капли дистиллированной воды объемом 5 мкл при дозировании на нагретую до t = 140 ℃ поверхность образца алюминиевого сплава: а) поверхность № 1; б) поверхность № 2; в) поверхность № 3

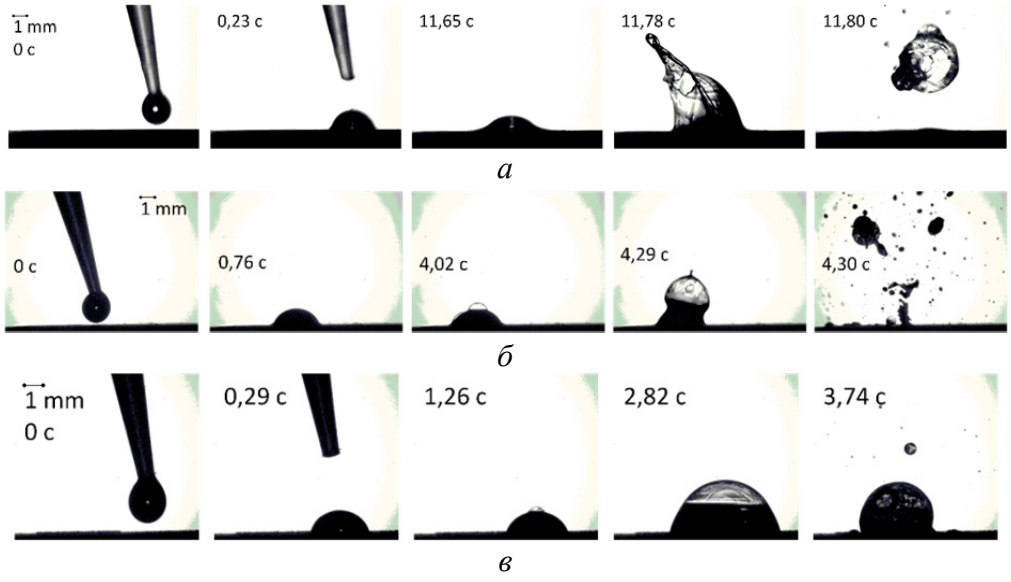


Рис. 4. Типичные видеограммы капли дистиллированной воды объемом 5 мкл при дозировании на нагретую до t= 140 С пропитанную дисперсионной жидкостью поверхность образца алюминиевого сплава: а) поверхность № 1; б) поверхность № 2; в) поверхность № 3

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00417, (https://rscf.ru/project/23-29-00417/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур / Д.В. Феоктистов, Г.В. Кузнецов, А. Абедтазехабади и др. // Известия Томского политехнического университета Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 72–88
2. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces / G.V. Kuznetsov, A.G. Islamova, E.G. Orlova et al. // Surface and Coatings Technology. – 2021. – V. 422. – P. 127518.

Секция 3
Производство тепловой и электрической энергии

МЕРЫ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА В ТОПКАХ КОТЛОВ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

С.А. Пузырёв

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5ВМ31

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

Широкое распространение технологии циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) в мировой энергетике обусловлено возможностью сжигания различных топлив, в том числе низкосортных с низкой теплотой сгорания, при малых выбросах вредных веществ за счёт особенностей организации внутритопочных процессов и при минимальной подготовке топлива посредством дробления.

Освоение технологии в России осложнено отсутствием промышленных установок, низким финансированием исследований, а также отсутствием кооперации с зарубежными научными и исследовательскими организациями. Проводимые исследования в основном посвящены изучению теплообмена и гидродинамических процессов в двухфазном потоке в топочной камере и в контуре циркуляции частиц.

Внедрение технологии может затруднить высокий эрозионный и абразивный износ поверхностей нагрева. Теплообмен в топках котлов с ЦКС совершается в условиях периодического контакта экранных поверхностей со снисходящим вдоль стен потоком частиц [1]. Контактный способ передачи тепла обеспечивает высокие коэффициенты теплоотдачи при высокой частоте контактов, однако приводит к износу и повреждению труб, особенно в нижней части топки, т. е. в зоне высокой концентрации частиц. В том числе, при эксплуатации единственного в отечественной энергетике котла с ЦКС, происходили частые остановы, вызванные разрывами труб экранных панелей. По причине эрозионного износа возникали многочисленные дефекты футеровки [2].

В Китае разработан комплексный подход к решению данной проблемы. На этапе внедрения технологии ЦКС в 90-х годах прошлого века, эксплуатация оборудования при высоких скоростях псевдоожижения приводила к частым аварийным остановам по причине эрозионного износа труб [3]. Средняя продолжительность работы оборудования без аварийных остановов составляла 74 дня [4]. Организация плотного сотрудничества высших учебных заведений с котлостроительными компаниями в 2000-х гг. позволила сформировать собственную методику конструкторского теплового расчёта [4]. Основополагающими параметрами при

конструировании топочной камеры являются скорость псевдоожижения u_f и расход циркулирующих частиц на выходе из топки G_s. Скорость псевдоожижения выше 6 м/с является нежелательной [1, 3]. Выбор параметров определяется по номограмме, представленной на рис. 1. Указанные рекомендации используются при разработке нового и эксплуатации действующего оборудования в Китае [3].

Дополнительный эффект снижения износа поверхностей нагрева достигается при внедрении в топочный контур новых элементов – футеровочных поясов. Размещение нескольких по высоте футеровочных поясов позволяет разрушить непрерывность нисходящего потока частиц вдоль стен, рис. 2, что снижает скорость падения с 8 до менее 3 м/с [4]. Количество поясов и высота между ними определяются конструктивно, из условия ликвидации высокого разгона частиц вдоль стен. Чрезмерная установка поясов приведет к заметному снижению коэффициента теплопередачи и росту температур в топке.

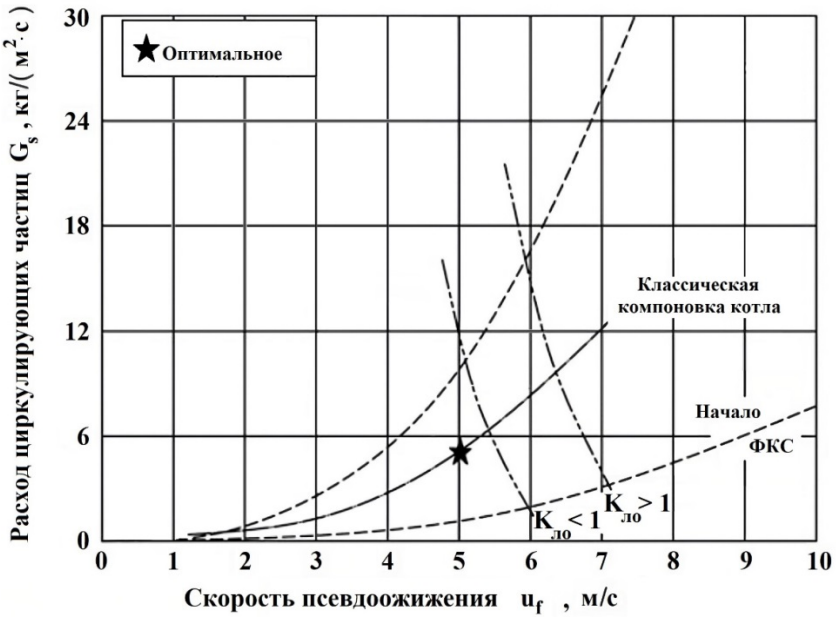


Рис. 1. К определению параметров псевдоожижения (изменено)

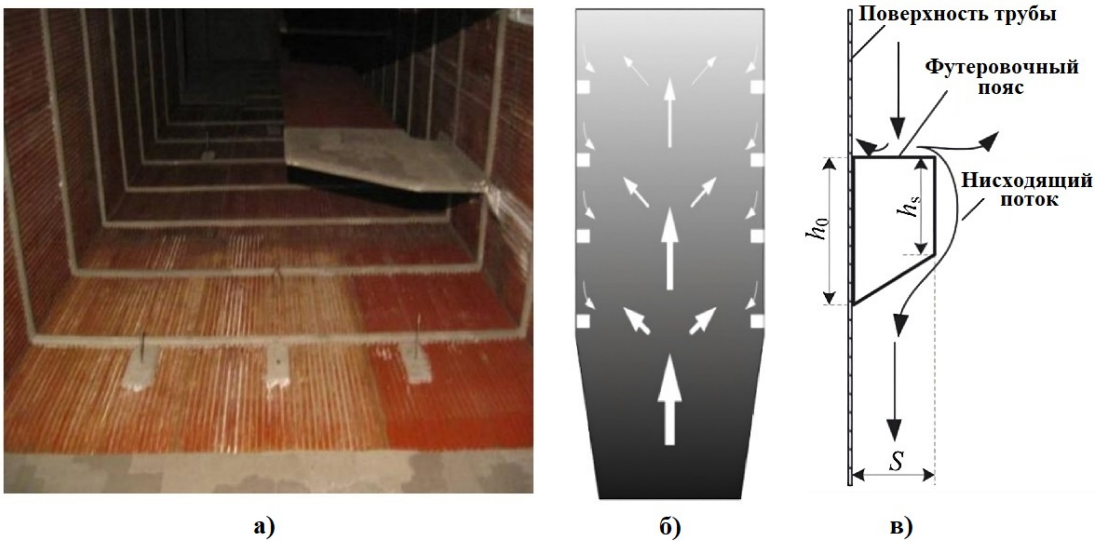
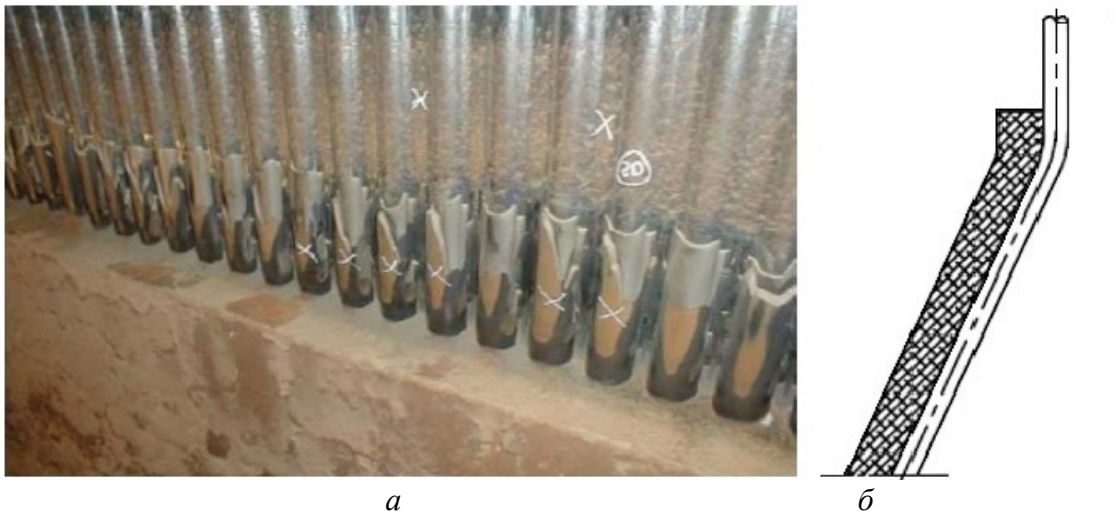


Рис. 2. Футеровочные пояса:
а) на действующем котле; б) влияние на формирование нисходящих потоков;
в) схематическое изображение

Технология минимизирует эрозионный износ в нижней части топки и на участке под поясами. Для повышения надежности необходимо предусмотреть нанесение на трубы слоя износостойкого материала на небольшом по высоте участке прямо над выступами, ввиду отскоков от них частиц в сторону поверхностей нагрева. Рекомендуемые размеры футеровочных поясов по сечению, рис. 2: ширина S = 6 мм, меньшее основание трапеции h_s – 14 мм, большее основание трапеции h_0 = 20 мм [5].

Внедрение в топочный контур футеровочных поясов снижает средний коэффициент теплопередачи от двухфазного потока к трубам примерно на 2,3 % и повышает температуру на выходе из топки, примерно на 30 °С [6]. Технология используется на более чем 200 котлах с ЦКС китайского производства [4].

Минимизация коррозионно-эрозионного воздействия на экранные трубы в нижней части топки, в зоне придонного слоя, достигается путём нанесения на экраны слоя футеровки. Высота футерованной части определяется конструктивно, из условия размещения в ней течек подвода топлива, золы и известняка, а также сопел вторичного воздуха. Рекомендуемая высота 3–10 м [7]. Толщина слоя обычно составляет от 114 до 127 мм [8]. При кирпичной кладке, граница между защитным слоем и самими экранами может представлять собой перпендикулярный вертикальным панелям выступ, рис. 3. В таком случае, возникает отскок частиц нисходящего потока от выступа в сторону труб, что приводит к их повреждению [9]. Недостатком конструкции также является низкая устойчивость к абразивному износу.



а *б*

Рис. 3. Выступ слоя футеровки: а) на действующем котле; б) схематическое изображение

Ликвидация выступающего участка позволяет избежать износа труб при отскоке частиц от выступа и минимизировать разрушение слоя защитного материала при прямом контакте с частицами возвратных потоков. В связи с этим, применение находят конструкции, где граница футеровки расположена в одной плоскости с экранными трубами [9]. В патенте [10] представлены два варианта выполнения футерованной нижней части, без образования выступов. Запатентованные конфигурации проиллюстрированы рис. 4.

Ввод в эксплуатацию котлов с ЦКС связан как с высокой стоимостью самих установок, так и с высокой стоимостью их обслуживания. Приведённые выше меры, в своей совокупности, позволяют предотвратить интенсивный износ поверхностей нагрева при контакте с частицами нисходящих потоков, продлить срок службы оборудования и сократить необходимость в аварийных остановах. Рассмотренные методы подавления износа могут быть использованы и у нас, например, при реконструкции котлов с форсированным кипящим слоем (ФКС), либо при разработке и проектировании новых котлов с ЦКС.

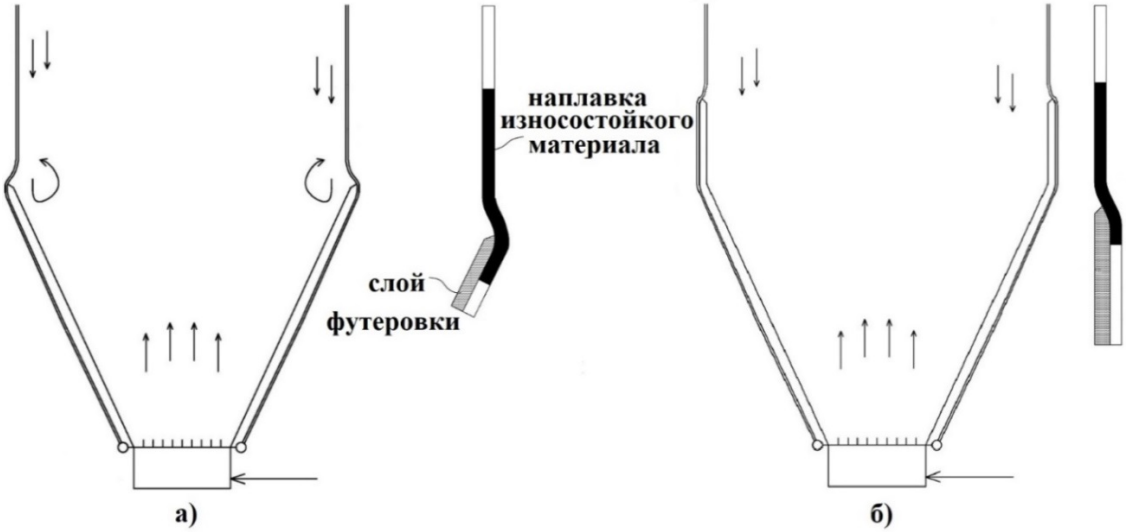


Рис. 4. Конфигурация ската нижней части топки без образования выступа: а) первый вариант; б) второй вариант

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basu P. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance. – Berlin: Springer International Publishing, 2015. – 366 p.
2. 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.
3. Development and application of the design principle of fluidization state specification in CFB coal combustion / G. Yue, J. Lyu, H. Yang, M. Zhang, H. Zhang, R. Cai // Fuel Processing Technology. – 2018. – V. 174. – P. 41–52.
4. Development and technical progress in large-scale circulating fluidized bed boiler in China / Z. Huang, L. Deng, D. Che // Frontiers in Energy. – 2020. – V. 14. – P. 699–714.
5. Anti-wear beam effects on water wall wear in a CFB boiler / Z. Luo, Q. Wang, L. Xu, R. Huang, L. Cheng, Y. Xia // Fuel. – 2016. – V. 181. – P. 1179–1183.
6. Effect of anti-wear beams on waterwall heat transfer in a CFB boiler / Q. Wang, J. Ji, L. Cheng, L. Xu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 115. – P. 1092–1098.
7. Рябов Г.А. Научное обоснование использования технологии сжигания твёрдых топлив в циркулирующем кипящем слое: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – М., 2016. – 291 с.
8. Grace J.R., Avidan A.A., Knowlton T.M. Circulating Fluidized Beds. – Dordrecht: Springer Dordrecht, 1997. – 608 p.
9. A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers / B. Acharya, P. Basu, A. Arjunwadkar // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 102. – P. 672–694.
10. Часть водотрубной панели и способ изготовления части водотрубной панели в реакторе с псевдоожиженным слоем: пат. Рос. Федерация, No 2745849, заявл. 22.02.2018; опубл. 01.04.2021. Бюл. No 10. – 21 с.

НИЖНЕ-СВИРСКАЯ ГЭС: ИСТОРИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В.С. Салюков, Н.М. Космынина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, гр. 5А11

Научный руководитель: Н.М. Космынина, к.т.н., доцент

Нижне-Свирская ГЭС, названная в честь выдающегося инженера и академика Генриха Осиповича Графтио, представляет собой яркий образец российской инженерной гениальности.

Графтио Г.О. родился в семье железнодорожника, потомка дворянского рода из Нидерландов Осипа Ивановича Графтио (рис. 1).

В 1888 г. окончил Симферопольскую гимназию; в 1892 г. – физико-математический факультет Новороссийского университета; в 1896 году – институт Корпуса инженеров путей сообщения и по 1900 год был за границей – изучал гидроэлектрические станции и электрические железные дороги в Европе и США.

В 1927–1935 годах руководил строительством Нижнесвирской ГЭС, где впервые в практике мирового гидростроительства реализовал опыт возведения плотины с большим напором на слабых грунтах, положив в основу строительства принцип распластанного основания.

Рис. 1. Генрих Осипович Графтио, выдающийся русский инженер

Рис. 2. Бюст Генриха Осиповича Графтио на Нижнесвирской ГЭС

Современное состояние электростанции

Станция на реке Свири, расположенная в Ленинградской области, играет ключевую роль в региональной энергетике и является важной частью Каскада Ладожских ГЭС.

Технические характеристики

В настоящее время Нижне-Свирская ГЭС обладает установленной мощностью 99 МВт и выпускает в среднем 490,5 млн кВтч электроэнергии в год. Эта гидроэлектростанция, представляющая собой низконапорную русловую станцию, способствует образованию Нижне-Свирского водохранилища, занимающего площадь 24,4 км², с максимальной глубиной 18,5 метра.

Рис. 3. Гидроагрегат

Рис. 4. Щит управления электростанции

Уникальные технические решения

Четыре вертикальных гидроагрегата с поворотно-лопастными турбинами обеспечивают станцию необходимой мощностью. Размеры машинного зала – впечатляющие 111,1 м в длину, 18,5 м в ширину, и 22,3 м в высоту.

Культурное наследие

Нижне-Свирская ГЭС несет в себе не только техническое значение, но также и культурное наследие. Станция признана частью культурного наследия России, представляя собой классический образец советского конструктивизма.

Энергетическая значимость

Станция обеспечивает регион электроэнергией через линии электропередачи напряжением 220 кВ и 35 кВ, играя ключевую роль в обеспечении стабильности энергосистемы.

Вывод

Нижне-Свирская ГЭС, наряду с историческим значением и культурным наследием, продолжает служить примером инженерной гениальности и технического совершенства России. Ее важная роль в обеспечении региона электроэнергией подчеркивает влияние выдающихся инженеров, таких как, Генрих Осипович Графтио, на технологический и культурный ландшафт страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – Режим доступа: https://etu.ru/ru/muzej/vydayushhiesya-uchenye/graftio-g-o
2. Системный оператор Единой энергетической системы. – Режим доступа: https://portal-slovo.ru/impressionism/36303.php

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТОЙ АТОМНОЙ ГТУ С ВОДОРОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Н.В. Стецов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова, гр. 5091

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ

Возможность работы газотурбинного энергоблока с высокотемпературным гелийохлаждаемым ядерным реактором совместно с установкой, генерирующей водород, дает в перспективе существенные преимущества этой технологии для атомной энергетики.

В настоящее время наиболее распространенной схемой замкнутых ГТУ является схема с регенератором. Температура отработавших газов после турбины велика и при работе по простому циклу Брайтона бесполезно теряется большое количество теплоты. В регенеративном цикле часть этой теплоты может быть возвращена в цикл путем передачи ее от отработавшего газа газу, сжатому в компрессоре, перед его поступлением в реактор. Это позволяет повысить КПД установки без повышения начальной температуры газа перед турбиной и снизить расход топлива [6].

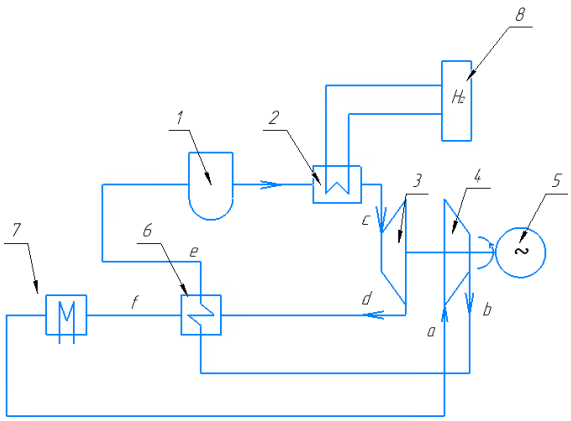


Рис. 1. Схема замкнутой атомной ГТУ с регенерацией теплоты и водородным комплексом:
1 – реактор; 2 – парогенератор;
3 – турбина; 4 – компрессор; 5 – генератор;
6 – электрогенератор;
7 – охладитель; 8 – электролизёр

В рассматриваемой одноконтурной установке рабочим телом ГТУ и теплоносителем реактора является гелий, который работает в замкнутом газотурбинном цикле с регенерацией теплоты (рис. 1). Часть теплоты, полученной в активной зоне реактора, гелий отдает в парогенераторе на генерацию высокоперегретого пара для электролизной установки водородного модуля. Подвод и отвод теплоты в аппаратах (реакторе, парогенераторе, регенераторе, охладителе) происходит в изобарных процессах с некоторыми потерями давления; процессы расширения и сжатия гелия в турбине и компрессоре носят адиабатный характер.

Для исследования показателей установки в широком диапазоне изменения исходных параметров использовалась методика расчета тепловой схемы ГТУ, реализованная в виде модели и программы в пакете электронных таблиц Excel и COOLPROP. В основе модели лежат уравнения энергетических балансов и закономерностей адиабатных процессов расширения и сжатия газа гелия с использованием относительных внутренних КПД для учета неизоэнтропности в реальных процессах. Достоверность модели и метода расчетов проверялась ручными расчетами, погрешность расчетов не превысила 2,5 %.

Данная работа является продолжением работ [7, 8], в которых приведены результаты анализа энергетической эффективности энергокомплекса с одноконтурным энергоблоком, схема которого приведена на рис. 1. Исследовались зависимости основных характеристик газотурбинного энергоблока от степени повышения давления и степени регенерации при заданном значении потерь давления в регенераторе. Показано, что эффективность работы энергоблока

с регенератором зависит от степени регенерации σ. С увеличением σ растёт КПД энергоблока и мощность электрогенератора. Однако рост степени регенерации вызывает увеличение площади поверхности теплообмена регенератора, что ведет к росту его аэродинамического сопротивления, и, как следствие – к снижению давления гелия на входе в газовую турбину и увеличению давления на выходе из нее [6]. Это отрицательно сказывается на располагаемом теплоперепаде, мощности турбины и КПД ГТУ. Очевидно, что при повышении степени регенерации необходимо определить изменение сопротивления регенератора как с греющей, так и с нагреваемой стороны.

Целью данной работы является анализ влияния учета изменения потерь давления в регенераторе при изменении степени регенерации на характеристики энергоблока. Для определения значений управляемых параметров при проектировании установки (степени повышения давления, степени регенерации) необходимо рассчитать значения электрической мощности и других характеристик энергоблока при учете изменения сопротивления регенератора и определить оптимальное значение степени регенерации.

Для различных значений степени регенерации рассчитаны значения сопротивления регенератора. Далее по ранее использованному алгоритму проведены вариантные расчёты тепловой схемы с учётом роста сопротивления регенератора при увеличении σ.

Исходные данные приняты такими же, как в [7]: температура гелия на входе в газовую турбину принята 1123 К; температура гелия на выходе из реактора равна 1223 К, на входе в турбину 1123 К; давление гелия на входе в компрессор принято равным 3,0 МПа; степень повышения давления равна 2,4. Расчёты проводились для тепловой мощности реактора, равной 200 МВт. Параметры пара, генерируемого для электролизной установки водородного модуля: давление 1 МПа, температура 800 °С.

В качестве допущения принято, что при изменении степени регенерации меняется только сопротивление регенератора, а сопротивление остальных элементов (активной зоны, парогенератора, тракта «компрессор-газовая турбина», теплообменника-охладителя, патрубков и трубопроводов) остаются неизменными и можно исключить их из рассмотрения.

Регенератор (Р) представляет собой гелий-гелиевый противоточный трубчатый теплообменник, обозначения параметров в нем показаны на рис. 2.

Зависимость коэффициента сопротивления от степени регенерации (рис. 2) имеет гиперболический характер в соответствии с формулой [6]:

$$\xi_p = \frac{\beta_p \cdot \sigma}{1-\sigma},$$

где β_p – относительные потери давления в регенераторе, принятые в базовых расчётах равными 0,03 [6]. Зависимость сопротивления регенератора от σ приведена на рис.3; в диапазоне σ от 0,4 до 0,85 сопротивление P возрастает незначительно. Дальнейший рост σ вызывает резкое увеличение сопротивления регенератора. При достижении значения σ, равного 0,9765 потери давления с обеих сторон поверхности теплообмена регенератора становятся настолько большими, что теплоперепад турбины оказывается равным 0.

С учётом роста сопротивлений изменяются давления перед турбиной p_c и за турбиной p_d. Следовательно, $p_c = p_b \cdot \lambda_1$, $p_d = \frac{p_a}{\lambda_1}$, где $\lambda_1 -$ коэффициент потерь по тракту высокого давления $\lambda_1 = 0{,}95 - \xi_{\text{р1}} + \xi_{\text{рэ}}$, где $\xi_{\text{рэ}} -$ сопротивления элементов схемы. Результаты вариантных расчетов сведены в табл. 1.

На рис. 4–9 приведены полученные расчётные зависимости, на них обозначены: линии красного цвета – без учёта сопротивления, линии синего цвета – с учётом сопротивления. Коэффициент использования теплоты топлива (КИТТ) (с учётом электрической мощности ГТУ и тепловой мощности парогенератора, рис. 4) показывает эффективность процесса. На графике видно, что при значении степени регенерации 0,8 КИТТ составил 29 %. Дальнейший рост КИТТ обусловлен увеличением количества подводимой теплоты для производства водорода.

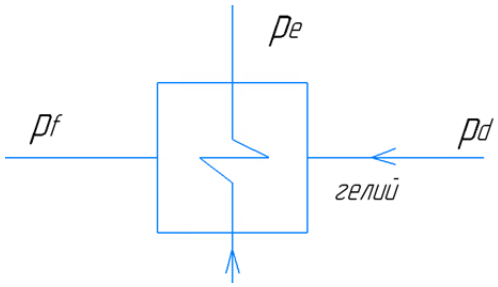


Рис. 2. Параметры гелия в регенераторе:
p_d – давление на выходе из турбины,
p_f – давление на входе в компрессор,
p_e – давление на входе в активную зону

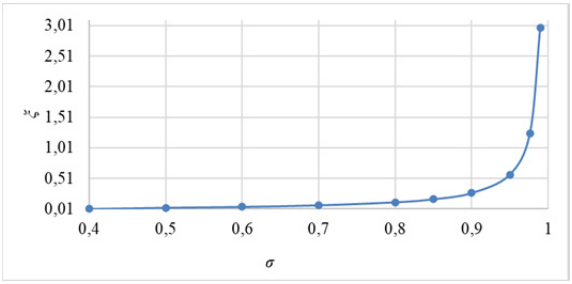


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления регенератора от степени регенерации

Таблица 1. Показатели ГТУ

№	σ	ξ_{p1}	λ_1	p_c, МПа	G, кг/с	H_T, кДж/кг	H_K, кДж/кг	$N_э$, МВт	$\Delta\eta$(ГТУ), %	*КИТТ*
1	0,4	0,01	0,96	69,12	62,96	1315	899	25,16	-24,13	0,210
2	0,5	0,015	0,955	68,76	67,57	1299		26,01	-26,72	0,220
3	0,6	0,0225	0,9475	68,22	72,90	1276		26,43	-30,74	0,238
4	0,7	0,035	0,935	67,32	79,16	1236		25,68	-37,74	0,259
5	0,8	0,06	0,91	65,52	86,586	1154		21,26	-52,63	0,284
6	0,85	0,068	0,90	64,92	90,84	1068		14,77	-68,52	0,297

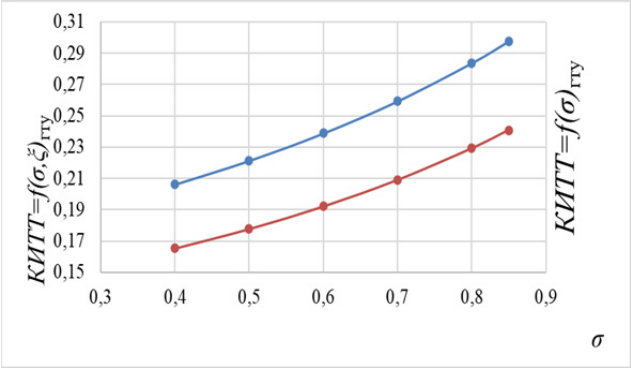


Рис. 4. Зависимость КИТТ ГТУ от степени регенерации

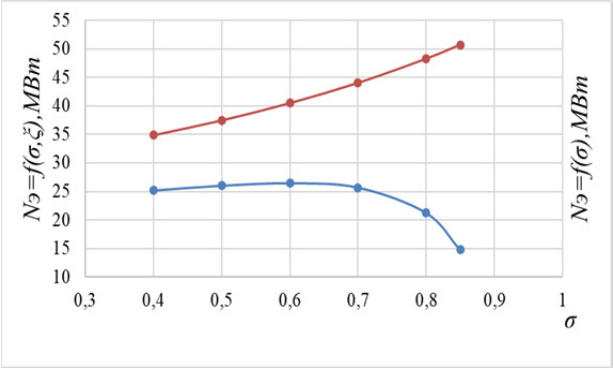


Рис. 5. Зависимость электрической мощности от степени регенерации

Мощность установки с учётом степени регенерации для первых трёх точек имеет возрастающий характер, затем при достижении значения степени регенерации 0,7 резко снижается из-за высокого влияния сопротивления. Удельная подведённая теплота обратно пропорциональна степени регенерации (рис. 6). Зависимости расположены эквидистантно, это объясняется одинаковой степенью влияния сопротивления в каждой точке.

Увеличение расхода гелия с ростом степени регенерации (рис. 7) приводит к увеличению размеров оборудования, при этом растет расход генерируемого пара (рис. 8).

Исходя из полученных результатов, КИТТ одноконтурного энергоблока с гелийохлаждаемым реактором в комплексе с установкой генерации водорода по технологии высокотемпературного электролиза водородным комплексом может достигать почти 30 % с учётом изменения потерь давления в регенераторе по двум трактам при степени регенерации 0,85 и степени сжатия в компрессоре 2,4. Однако следует учитывать целевое назначение установки. С точки зрения повышения эффективности генерации электроэнергии, оптимальным значении степени регенерации будет 0,6, что будет соответствовать максимальной электрической мощности.

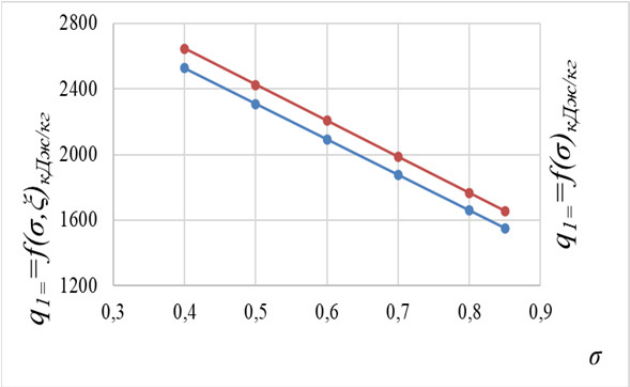


Рис. 6. Влияние степени регенерации на удельную подведённую теплоту

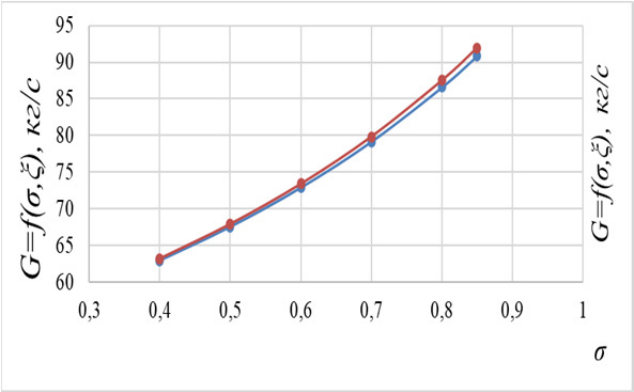


Рис. 7. Зависимость расхода гелия от степени регенерации

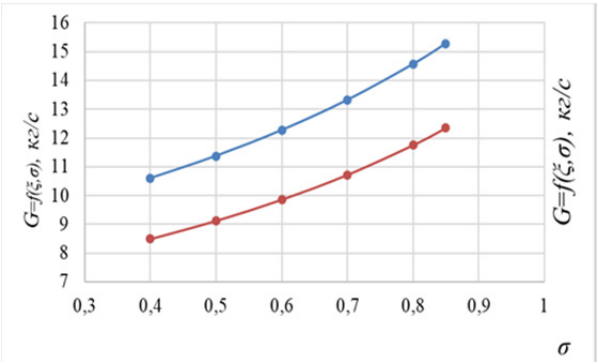


Рис. 8. Зависимость расхода пара от степени регенерации

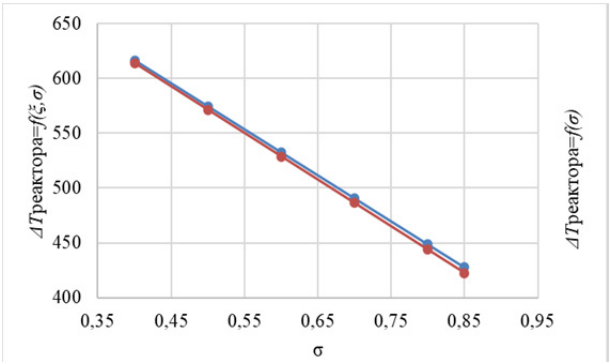


Рис. 9. Зависимость разности температур от степени регенерации

В дальнейшем планируется уточнить полученные результаты после выполнения конструкторского расчёта регенератора и определения его аэродинамического сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов С.И. др. Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. – 2020. – № 11 (153).
2. Xing L.Ya. et al. GTHTR300 cost reduction through design upgrade and cogeneration. Proceedings of the HTR 2014 Weihai, China, October 27-31, 2014 Paper HTR2014-21436.
3. Hiroyuki S. et al. GTHTR300 – A nuclear power plant design with 50 % generatingefficiency // Nuclear Engineering and Design. 2014. – Vol. 275. P. 190–196.
4. Васяев А.В. и др. Обоснование параметров и схемно-конструктивных решений блока преобразования энергии с газотурбинным циклом в составе АЭС с ВТГР // Атомная энергия. 2005. – Т. 98, вып. 1. – С. 24–36.
5. Горюнова И.Ю. Г71 Регенераторы ГТУ: учебно-методическое пособие / И.Ю. Горюнова, И.Д. Ларионов. – Екатеринбург: Изд.-во Урал. ун-та, 2017. – 80 с. ISBN 978-5-7996-2259-6.
6. Паровые и газовые турбины для электростанций: 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. ISBN 978-5-383-01025-9.
7. Стецов Н.В. Анализ влияния управляемых параметров на работу замкнутой ГТУ с водородным комплексом // Бутаковские чтения: Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 427–430.
8. Антонова А.М., Воробьев А.В., Стецов Н.В. Анализ влияния управляемых параметров на эффективность замкнутой ГТУ с водородным комплексом. // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2022. – С. 51–57.

УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РАДИОТРЕЙСИНГ

Р.В. Дадашов, Н.В. Стецов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5091

Научный руководитель: к.т.н. Д.В. Гвоздяков, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Актуальность проблемы

На сегодняшний день одной из многих проблем в эксплуатации тепломеханического оборудования является трата времени на остановы, что влечёт за собой дорогостоящий ремонт, потери в отпуске электроэнергии и провалах в энергосистеме. Многие энергетические компании РФ ставят задачу перед научным блоком страны в поиске и разработке системы предиктирования и обнаружения дефектов в работающем оборудовании. Генерирующие энергоблоки, которые часто цикличны от пуска до останова, подвергаются высокому риску утечек в трубах котлов, парогенераторах, вызванных термическим и химимческим воздействием.

В настоящее время выделяют несколько видов дефектов и их причин возникновения, табл. 1.

Таблица 1. Причины появления дефектов

Виды дефектов	Причины возникновения
Коррозия	Окисление металла растворённым кислородом в воде
Эрозия	Удары капель с примесями и «утонение» слоёв металла со временем
Отсутствие предиктивной аналитики	Невозможность предсказать аварию
Качество сварки/сборки	Человеческий фактор при сборке, отсутствие контроля качества сборки
Заводские дефекты	Брак при изготовлении
Тяжёлые условия работы	Высокие параметры работы оборудования
Большие габариты оборудования	Сложность эксплуатации и большие временные затраты

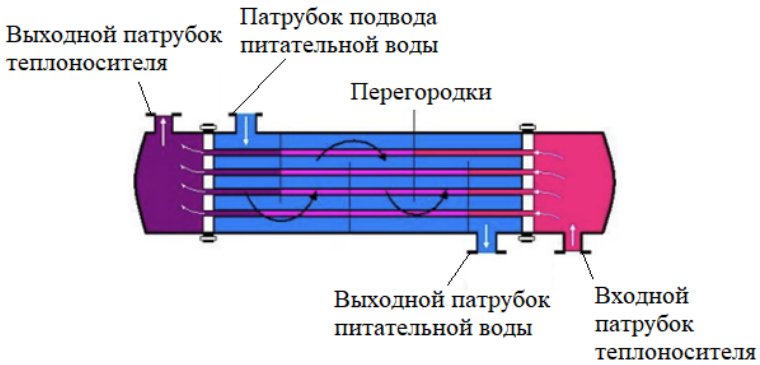


Рис. 1. Схема теплообменного агрегата

Радиотрейсинг

Исходя из анализа табл. 2 только радиотрейсинг имеет возможность измерений, предоставляя информацию в кратчайшие сроки и с максимальной точностью. Излучение является специфическим свойством радиоизотопа, на которое не влияют помехи от других материалов в системе. Гамма-излучение, испускаемое радиометчиками, проникает сквозь стенки теплообменников и предоставляет информацию об очень небольших утечках даже в тех случаях, когда прямой доступ к теплообменным трубам невозможен из-за ограждающих конструкций или других барьеров.

Таблица 2. Анализ методов поиска дефектов

Методы/ требования	Работа в экстремальных условиях	Чувствительность	Компактность	Безотказность	Отсутствие зависимости от внешних условий
Тепловидение	1	2	2	2	1
Пояснение: Тепловизоры не приспособлены к работе при высоких температурах >200 °С, и в большинстве случаев имеют большие габариты, что является невозможным размещение их в корпусах теплообменных устройств.					
Акустический контроль	3	2	3	1	1
Пояснение: акустические приборы способны работать в экстремальных условиях, но акустические контроллеры имеют большую погрешность на посторонние шумы.					
Radiotracing	3	3	3	3	3
Пояснение: датчики могут работать в экстремальных условиях, сверхчувствительный метод, практически не зависит от внешних условий. Суперкомпактное оборудование.					
Вибро-диагностика	1	2	3	1	1
Пояснение: особые требования к способу крепления, зависимость параметров вибрации от большого количества факторов и сложность выделения вибросигнала.					
Магнитная память металла	1	3	1	1	1
Пояснение: не подходит из условий параметров среды и габаритов установки					
Масс-спек-р	3	2	2	1	1
Пояснение: недостаточная точность метода, зависимость от условий внешней среды, высокая частота отказов					

Стоит отметить, что радиотрейсеры обладают высокой устойчивостью к суровым технологическим условиям теплообменников. Поскольку характеристики излучений отличаются от одного радиоизотопа к другому, при необходимости для обнаружения утечек можно использовать несколько радиотрейсеров и измерять их одновременно.

Принцип работы

При появлении дефекта (разрыве, трещине) датчик улавливает утечки изотопов из пространства, сведения о которых цифровизируются и отправляются диспетчеру на монитор с указанием места и скорости распространения.

Энергия гамма-излучения является достаточно высокой, для проникновения через стенки труб или сосудов. Кроме того, при выборе радиотрейсера следует учитывать следующие параметры:

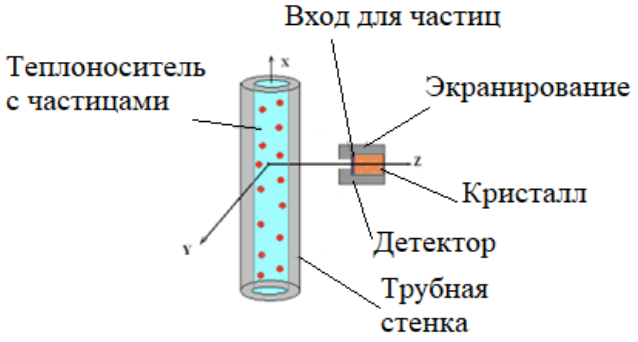


Рис. 2. Принцип работы детектора

- физико-химическое поведение индикатора должно быть таким же, как у отслеживаемой жидкости;
- период полураспада радиоизотопа должен быть сопоставим с продолжительностью эксперимента.

Требования к датчику

Высокотемпературные детекторы ядерного излучения на основе 4H-SiC ионно-легированных p+−n-переходов (микрополосковые детекторы излучения из карбида кремния) могут быть установлены в межтрубном пространстве или на стенке оборудования. Также может потребоваться дополнительное оборудование, включающее в себя обвязку, цифровые устройства.

Возможность работы датчиков в тяжелых условиях запылённости, высоких температур позволяет обслуживать его всего 1 раз в квартал [2].

Впрыск изотопов в среду происходит с помощью инъекционных устройств, которые контролируют время и объём подачи изотопов.

Стоит отметить экологичность метода. Малый период полураспада изотопа брома и малое значение выбросов в атмосферу, которые не превышают гостированные значения абсолютно не загрязняют окружающую среду.

Пример расчёта

Необходимая активность препарата для обнаружения утечки в кожух трубном теплообменнике, который имеет следующие параметры:

Объём корпуса теплообменника $V = 10\ м^3$, бъёмный расход теплоносителя $Q = 0{,}1 \frac{м^3}{с}$, пусть величина утечки составляет 1 % от основного расхода.

Минимальная активность, необходимая для обнаружения утечки в кожухотрубном теплообменнике, составляет:

$$A_m = 18 \cdot \frac{(N \cdot V \cdot Q)^{1/2}}{k \cdot L_m}, \text{ Бк}$$

Объем (V) и объёмный расход (Q) известны из конструкции теплообменника, минимальная скорость утечки (L_m) может быть указана инженерами в качестве ожидаемой оценки утечки. Скорость подсчета фона (N) измеряется, в то время как эффективность обнаружения (k) получается в лаборатории или рассчитывается с помощью программного моделирования. Зная эти параметры, можно легко рассчитать минимальную активность, необходимую для обнаружения утечки, используя приведенное выше уравнение.

Тогда эффективность обнаружения $k = 8{,}7 \cdot 10^{-5}\ \frac{имп \cdot м^3}{Бк}$. В качестве радиотрейсера используется ^{82}Br. Фоновая скорость счёта N=100 имп/с. Тогда, $A_m = 20{,}68 \cdot 10^7$ Бк, что является минимальной активностью радиотрейсера [2].

На практике рекомендуется применять активность выше для повышения точности, особенно при расчете расхода при утечке. Тем не менее, рекомендуется провести валидацию этого подхода перед реальным испытанием радиотрейсера на предприятии.

Технология, несомненно, отвечает вызовам в уменьшении простоев оборудования и согласованной работе всей энергосистемы, с предприятиями которой связан наш объект. Данная технология, исходя из её характеристик, рассмотренных в работе, может быть применена на тепломеханическом оборудовании ТЭС, АЭС, трубопроводах большого диаметра (теплосетей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова А.Г., Качан С.А. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС. Электронный учебно-иетодический комплекс по учебной дисциплине. – Белорусский национальный технический университет.
2. Leak detection in heat exchangers and underground pipelines using radiotracers. Material for education and no-the-job training for practitioners of radiotracer technology. International Atomic Energy Agency. Vienna 2009.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА ДЛЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЛИГНИТОВ

А.С. Почтарь, С.В. Виноградов

Новосибирский государственный технический университет, ФЭН, ТЭС, гр. ТЭМ-31

Научный руководитель: О.В. Боруш, д.т.н., доцент ТЭС ФЭН НГТУ

В мировой энергетике угольная генерация занимает важное место в производстве электрической и тепловой энергии. На данный момент доля угольного энергоносителя в мировом промышленном производстве энергии составляет примерно 28 %. При использование пылевидного угля на станции в качестве основного топлива возникает необходимость в проведении розжига и подсветки факела в котлоагрегате. Данные понятия часто встречаются в процессе эксплуатации котельного оборудования на угольных ТЭС.

В планах некоторых стран на ближайшее время есть увеличение угольного энергоносителя в энергобалансе, в связи с дешевизной и доступностью. Например, в Сербии идёт разработка месторождения лигнита с низшей теплотой сгорания (Q_i^r) равной 2581 ккал/кг, данное ископаемое вещество является разновидностью молодого бурого угля, его элементный состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав лигнита

Показатели	C_t^{daf}	H_t^{daf}	O_d^{daf}	N^{daf}	S_t^d	A^d	W_t^r	V^{daf}
Содержание	64,7 %	5,8 %	23,1 %	1,52 %	1,52 %	29,8 %	35,4 %	58,8 %

Исходя из элементного состава данного энергоносителя и приобретённого опыта воспламенения углей в предыдущей работе [1] можно сделать вывод, что данное топливо требует частой подсветки в процессе работы котлоагрегата. В настоящее время для растопки и стабилизации горения факела используют высокореакционное топливо – мазут. В результате применения данного энергоносителя образуются токсичные продукты сгорания, а именно оксидов серы (SO_x), бензпирен ($C_{20}H_{12}$) и соединения ванадия (V). Ежегодно по всему миру ужесточаются нормативы по выбросам продуктов сгорания, этот факт увеличивает стоимость применения мазута. Кроме этого, мазут имеет высокую стоимость относительно угольного топлива и создаёт эксплуатационные проблемы. Учитывая вышеперечисленные недостатки использования мазута, можно сделать вывод, что в наше время весьма актуально исследование технологий, позволяющих уйти от использования мазута. В данном случае система безмазутного розжига (СБР) способна постностью заменить растопочное топливо – мазут в момент розжига и подсветки факела пылеугольного котлоагрегата [1, 2].

СБР представляет собой комплекс, объединяющий в себе непосредственно циклонное горелочное устройство с осевым электромуфелем (ГУ) и устройство воспламенения электроионизационное (УВЭИ) [3, 4]. Суть технологии заключается в термохимическом инициировании горения пылеугольной смеси из-за выхода летучих элементов, содержащихся в угле. Благодаря этому воспламеняется топливовоздушная смесь и горение стабильно поддерживается даже в холодной топке котлоагрегата [5].

Работоспособность СБР была доказана авторами при работе на буром угле марки Б2 Бородинского разреза, а также при работе на каменном угле марки Д Кузнецкого угольного бассейна. В результате работ был обнаружен диапазон расходов топлива и воздуха для удачного воспламенения различных углей [1].

Основываясь на предыдущих результатах целью нынешней работы, является удачное воспламенение лигнита на принятой геометрии ГУ (рис. 1), для этого проведётся поиск подходящей тонины помола энергоносителя.

В ходе проведения лабораторных исследований, было подготовленно семь проб с разной тониной помола, шесть из которых на лабораторной шаробарабанной мельнице (ШБМ) и одна на виброцентробежной мельнице (ВЦМ). Помол лигнитов осложнен высоким содержанием молодых пород, в связи с чем частицы «расплющиваются» вместо дробления. Результаты рассевки проб с помощью вибросита представлены в табл. 2.

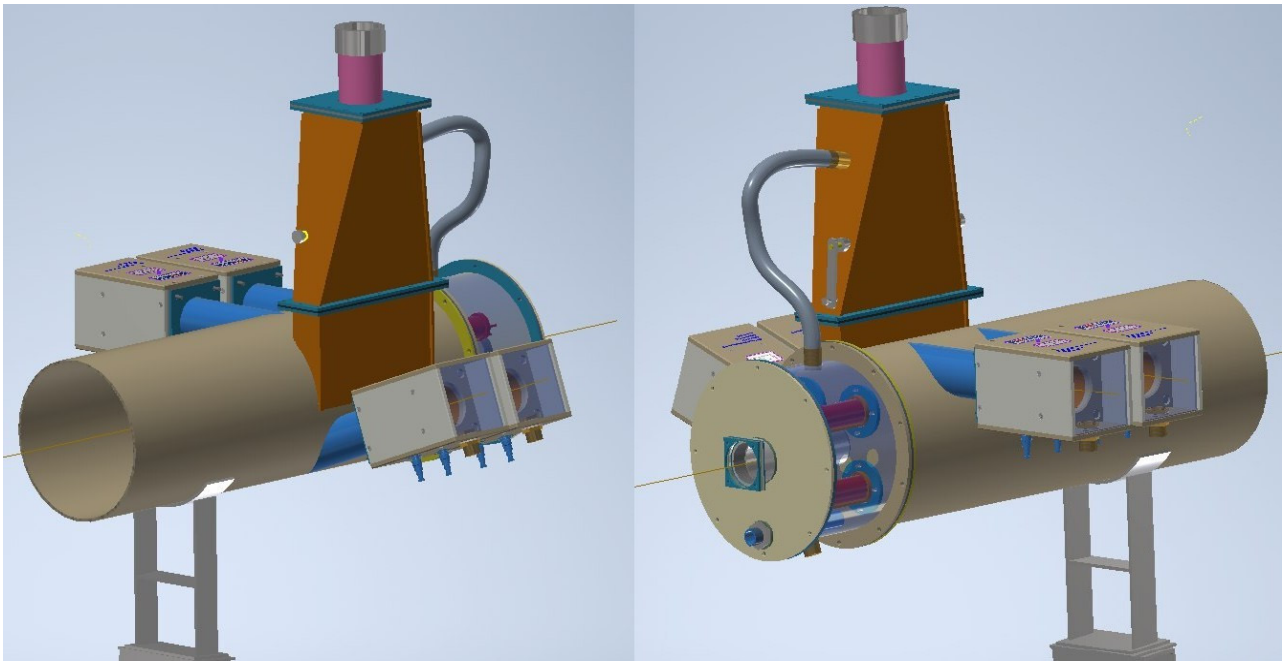


Рис. 1. Виды 3D-модели исследуемого горелочного устройства

Таблица 2. Результат рассевки помолотого лигнита

Номер рассевки	Помол	R1000	R200	R90	R менее 90	Навеска
		%	%	%	%	грамм
1	Исх. помол	14,00	46,50	76,00	24,00	20
2	Исх. Помол + 10 мин домола в ШБМ	2,50	34,50	65,50	34,50	20
3	Исх. Помол + 15 мин домола в ШБМ	2,00	34,00	62,00	38,00	20
4	Исх. Помол + 20 мин домола в ШБМ	1,50	27,00	59,00	41,00	20
5	Исх. Помол + 30 мин домола в ШБМ	1,00	20,00	53,00	47,00	20
6	Исх. Помол + 40 мин домола ШБМ	0,50	9,00	45,00	55,00	20
7	ВЦМ	0,50	6,50	35,00	65,00	20

В рамках проведения экспериментальной части на стенде СБР было принято решение выполнить испытания с разным функционалом силовой части стенда для каждой пробы, а именно с включённым и выключенным электромуфелем. Результаты удачных экспериментов, где удалось воспламенить лигниты с функционирующим электромуфелем, представлены ниже (табл. 3).

В ходе экспериментов фиксировалась температура в характерных точках ГУ.

Таблица 3. Результаты экспериментов

Номер эксп-та	Номер рассевки	Работа электромуфеля	Расход топлива, кг/ч	Расход воздуха, $м^3$/ч	dTмонит 700, °С/с	dTух 200, °С/с	Наличие факела
1	3	Вкл.	123	92	12,8	1,4	+
2	3	Выкл.	123	96	–	–	–
3	4	Вкл.	123	100	15,4	1,5	+
4	4	Выкл.	123	97	–	–	–
5	5	Вкл.	123	96	15,9	1,6	+
6	5	Выкл.	123	93	–	–	–
7	6	Вкл.	123	100	17,1	1,7	+
8	6	Выкл.	123	99	10,5	1,3	+
9	7	Вкл.	123	95	18,4	1,7	+
10	7	Выкл.	123	100	11,2	1,3	+

По результатам проведения испытаний сформулированы следующие выводы:

1. Пробы номер 1 и 2 не воспламенились даже с функционирующем электромуфелем.

2. Автотермический режим работы СБР, который характеризуется высокой температурой ствола ГУ (550–650 °С), был достигнут в экспериментах под номером 7 и 9.

3. Из особенностей горения лигнитов, было отмечено, что температура внутри факела не повышалась выше 1000 °С, в основном значение температуры находилось в районе 850 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почтарь А.С., Боруш О.В. Безмазутный розжиг пылеугольных котлоагрегатов // Дни науки НГТУ-2023: Материалы научной студенческой конференции – 2023. – С. 100–103.
2. Зверева Э.Р., Фарахов Т.М. Энергосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах / под ред. А.Г. Лаптева. – М.: Теплотехник, 2012. – 181 с.
3. Патент 2410603, МПК F23Q5/00, F23Q13/00 Российская Федерация. Устройство плазменного воспламенения пылеугольного топлива / Ю.И. Наумов – заявл. 17.11.2009; опубл. 27.01.2011
4. Патент 2704178, МПК F23C99/00, F23Q5/00 Российская Федерация. Устройство факельного сжигания топлива / Ю.И. Наумов, П.Б. Стерлигов – заявл. 21.02.2019; опубл. 24.10.2019
5. Почтарь А.С., Виноградов С.В., Кучанов С.Н. Безмазутный розжиг пылеугольных котлоагрегатов // Наука. Технологии. Инновации: XVI Всероссийская научная конференция молодых ученых – 2022. – С. 219–220.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГРАДИРЕН ОДНОЙ ИЗ КУЗБАССКИХ ТЭЦ

В.З. Горина, В.А. Тараймович, Е.Ю. Темникова

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, институт энергетики, кафедра теплоэнергетики

Для эффективной работы теплоэнергетического оборудования необходима его рационально организованная эксплуатация, так как при выборе режима эксплуатации и обслуживания оборудование должно обеспечивать бесперебойную и экономичную выработку электрической и тепловой энергии и тем самым осуществлять качественное и надежное энергоснабжение потребителей [1].

Повышение эффективности и надежности эксплуатации тепловых электростанций связано в основном с поиском решений, направленных на усовершенствование основного технологического оборудования электростанций. При этом не уделяется должного внимания систе-

мам низкопотенциальной охлаждающей части, которая включает в себя конденсаторы паровых турбин и систему технического водоснабжения с градирнями. Из общего теплового баланса электростанции количество тепла, отдаваемого в атмосферу градирнями, или сбрасываемого в природные источники воды, составляет 50–60 %. От конструктивного исполнения водоохлаждающих устройств зависит не только возможность станции работать с установленной мощностью без ограничений, но и рациональное использование топливных и водных ресурсов, снижение выбросов вредных газов в атмосферу [2].

Цель работы – определение эффективности работы градирен, например, № 4 и № 6 кузбасской ТЭЦ.

ТЭЦ снабжает теплом и горячей водой около трети левобережной части города Кемерово, вырабатывает электроэнергию в единую сеть, снабжает паром крупные промышленные предприятия. Система технического водоснабжения ТЭЦ оборотная, с тремя башенными градирнями [3]. В период проведения испытаний 28.05.2023, 01.06.2023 и 05.06.2023 в работе находились градирни № 4 и № 6, В табл. 1 приведены характеристики градирен № 4 и № 6 кузбасской ТЭЦ.

Таблица 1. Характеристика градирен

Параметры	Градирня № 4	Градирня № 6
Площадь орошения, $м^2$	1610	1600
Расчетная гидравлическая нагрузка, $м^3/ч$	10000	12400
Перепад температур, °С	8–10	8–10
Высота вытяжной башни, м	53,6	54,0
Материал обшивки	Антисептированная древесина	Листовой пластик типа ЭПЛ-200
Система водораспределения	Напорная с центральным стояком	
Разбрызгивающие сопла	Металлические сопла эвольвентного типа $d_{вых}$ = 25 мм	
Количество сопел, шт.	1650	1650
Оросительное устройство	Полимерный трехярусный ороситель	Полимерный двухярусный ороситель
Противообледенительный тамбур	Вертикальные поворотные створки из стального листа	
Высота воздуховходных окон, м	3,3	5
Каплеуловитель	Сетчатый слой	Двухрядный полимерный
Диаметр напорных водоводов, мм	∅1200	∅1000

Для определения эффективности работы градирен проведены измерения с определением параметров атмосферного воздуха: температуры, относительной влажности, скорости воздуха. По измеренному среднему значению скорости в воздуховходных окнах и их площади, определили расход воздуха. Проводили измерения температуры поступающей воды в градирню и на выходе из нее. Для нахождения гидравлической нагрузки градирни принят расход рабочих насосов в турбинном цехе.

Количество испаренной воды рассчитано на основе начальных и конечных параметров воздуха, тепловой КПД градирен по охлаждаемой воде рассчитали по [4], тепловую эффективность градирни по воздуху по [5].

Результаты измерений и расчетов представлены в табл. 2.

Заключение

В работе отражены характеристики градирен № 4 и 6 кузбасской ТЭЦ, проведены натурные измерения расходных характеристик воздуха и воды, и параметров, характеризующих состояние воды и воздуха, представлены данные измерений, по которым осуществлены расчеты гидравлической нагрузки, перепада температур воды, количества испарившейся воды. Показано, что у градирни № 4 тепловая мощность ниже, а разность температур между вхо-

дом и выходом градирни – выше. Соотношение расхода воздуха к расходу воды у градирни № 4 при практически равном расходе воздуха во всех опытах выше. На градирню № 6 приходится большая гидравлическая нагрузка, и тепло и-массообмен в градирне № 6 осуществляется более эффективно, так как количество испарившейся воды, пошедшей на ее охлаждение, больше.

Таблица 2. Результаты испытаний и расчетов

Наименование градирни	Испытания № 1 от 28.05.2023		Испытания № 2 от 01.06.2023		Испытания № 3 от 05.06.2023	
	Градирня № 4	Градирня № 6	Градирня № 4	Градирня № 6	Градирня № 4	Градирня № 6
Температура воздуха по сухому термометру на входе в градирню, t, °С	22,5		30		38	
Температура воздуха по сухому термометру над каплеуловителями, $t_к$, °С	–	–	27	28,7	33	35
Относительная влажность воздуха на входе в градирню, φ, %	21		18		28	
Относительная влажность воздуха над каплеуловителями, $\varphi_к$, %	–	–	79	83,5	63,7	78,5
Энтальпия воздуха на входе в градирню I, кДж/кг	–	–	42,4		69,3	
Влагосодержание воздуха x, кг воды/кг сухого воздуха на входе в градирню	–	–	$4{,}82\cdot10^{-3}$		$12{,}12\cdot10^{-3}$	
Энтальпия воздуха на выходе из градирни I, кДж/кг	–	–	75,0	83,9	88,2	112,5
Влагосодержание $x_к$, кг воды/кг сухого воздуха на выходе из градирни	–	–	$18{,}76\cdot10^{-3}$	$21{,}66\cdot10^{-3}$	$21{,}48\cdot10^{-3}$	$30{,}09\cdot10^{-3}$
Температура воздуха по влажному термометру, $t_м$, °С	14		18,5		24	
Тепловая мощность, МВт	85,14	115,56	57,73	69,83	74,49	83,79
Расход воздуха на градирню, м^3/ч	4129200	4284000	3200000	3600000	3400000	4050000
Гидравлическая нагрузка градирни, $Q_{гр}$, м^3/ч	5100	7100	6200	12000	8000	12000
Соотношение расхода воздуха и воды, λ м^3/м^3	809	604	516	300	425	337
Разница температур воды на входе и на выходе, °С	16	14	8	5	8	6
Количество испаренной воды по параметрам воздуха, м^3/ч	–	–	52,24	72,3	36,94	82,6
$\eta_ж$ градирен, %	61	53	55	37	57	43
$\eta_г$ градирен, %	–	–	55	71	22	50

Опытные данные и проведенные расчеты показывают, что если разгрузить градирню № 6 до расчетной, то на ней можно получить перепад температур между входом и выходом выше по сравнению с перепадом, полученным в процессе работы градирни № 4. Поэтому рекомендуется подключить в систему циркуляции оборотной воды третью градирню, находящуюся в резерве, что даст возможность снизить гидравлическую нагрузку по воде у градирни № 6, и тем самым повысить перепад температур между входом и выходом, то есть увеличить эффективность ее работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008) от 28.09.2021 г. о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хвостиков А.С., Богданов К.С. Модернизация башенных градирен эксплуатируемых в сложных климатических условиях // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – С. 22–26. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=41262938 (дата обращения: 25.10.2023). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – Текст : электронный.
2. Калатузов В.А. Низкопотенциальная часть тепловых электростанций одна из причин ограничения их мощности // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – С. 34–37. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15223315 (дата обращения: 20.10.2023). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – Текст : электронный.
3. Сибирская генерирующая компания : официальный сайт – URL: https://sibgenco.ru/ (дата обращения: 26.10.2023).
4. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен: монография. – Казань: КГЭУ, 2004. – 180 с.
5. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Показатели энергоэффективности градирен // Надежность и безопасность энергетики. – 2018 – Т. 11, № 3. – С. 217–221. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-217-221

EFFECT OF POWER EXCURSION ON THE THERMAL CHARACTERISTICS OF VVER-1200 REACTOR

C.J. Odii, A.G. Korotkikh

Tomsk Polytechnic University,
SEPE, SNSE, Group A2-43I

Scientific supervisor: A. G. Korotkikh, DSc, Professor of BRC SEPE TPU

This work involved performing a thermal hydraulics calculation on VVER-1200 reactor. In this calculation, the thermal power of the reactor was varied in steps from 100 to 180 % power to determine its influence on the thermal-hydraulics parameters, especially the points of onset of nucleate boiling (ONB) and the onset of significant void (OSV) which is also referred to as point of net vapor generation (NVG). The exit coolant temperature, predicted coolant temperature at ONB, predicted coolant temperature at OSV, maximum heat flux, variation of linear heat generation rate along the heat channel, minimum point of critical heat flux (CHF) and the corresponding minimum departure from nucleate boiling ratio (MDNBR) were all noted for each power step. The result showed that at about 130 % power, the descending predicted coolant temperature at ONB crossed below the ascending exit coolant temperature, indicating an ONB, furthermore, at about 165 % power, the descending predicted coolant temperature at OSV crossed below the ascending exit coolant temperature, indicating an OSV. In this calculation, there were no variation in any other parameter of the reactor and the inlet enthalpy remained constant throughout the step variation of power.

1. Introduction

One of the most crucial parameters in nuclear reactor operation is heat flux. It describes how the heated fluid in a flow channel distributes heat per unit area. Evaluating the reactor core's point of critical heat flux is one of the biggest thermal-hydraulic problems. There are differences in the names given to CHF in Light Water Reactors (PWR and BWRs). In PWRs, it is called Departure from Nucleate Boiling (DNB) and it is a local phenomenon which varies from point to point in the channel, whereas in BWRs, it is called Dry-out and it is a global phenomenon, it encompasses all the channel as a whole. This is why the MDNBR depends on the channel heat flux, while the minimum critical power ratio (MCPR) depends on the channel thermal power. Whatever the prevailing mechanism, CHF may cause a sudden and significant temperature spike that could further cause an early burnout and a number of potential safety incidents if the working fluid's

ability to remove heat from the heated cladding surface is somewhat compromised, if the rate of heat removal is lower than the rate of heat generation, or if coolant loss is the cause of the inability of the coolant to remove all the heat generated by the fuel element over a specific area within a given time frame [1]. In order to ensure reactor safety and nuclear fuel design, CHF is one of the most crucial phenomena to look into. Enhancing safety and improving operating economics are the outcomes of improving CHF prediction. Because of this, the nuclear industry must talk about and conduct research on CHF enhancement and forecast accuracy [1] In this work, we investigate the response of thermal hydraulics parameters to power excursion in VVER-1200, this is to ascertain the points of possible thermal crisis during this stepwise increase in power. It is worthy of note that in the design of VVER-1200 reactor, there are quite a number of design safety limits imposed on certain thermal-hydraulics parameters such as; pressure, coolant temperature, clad temperature, fuel centerline temperature, MDNBR etc. These safety limits help operators to carryout reactor operation safely, it also helps the structures systems and components (SSCs) important to safety to be able to serve their design lifetime without major problem.

2. Calculation method

We calculated the various thermal hydraulics parameters with the various formulas shown below.

The linear heat flux, q_l' is a measure of heat generated per unit length of the fuel rod. It is in direct proportionality to the area heat flux and volumetric heat flux.

$$q_l'(z) = q_{l,\max}' \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{eff}}\right). \tag{1}$$

Using the modified Zuber and Findlay [2] model neglecting the effect of drift velocity with a distribution parameter, C_o of 1.3, we calculated the area void fraction, α as follows where ρ_l and ρ_v are liquid and vapor densities:

$$\alpha = \frac{x_{true}\rho_l}{C_o\left[x_{true}\rho_l + (1 - x_{true})\rho_v\right]}. \tag{2}$$

Manon true quality, x_{true} formula [3] for OSV void fraction prediction accounts for a non-zero true quality at OSV which was zero for the Levy model. The expression is shown here as, where x_{eq} is the equilibrium quality;

$$x_{true}(z) = x_{eq}(z) + \left[x_{OSV} - x_{eq}(z_{OSV})\right]\exp\left(\frac{x_{eq}(z)}{x_{eq}(z_{OSV})} - 1\right). \tag{3}$$

Due to the inability of the Manon model to predict void fraction at the ONB, Delhaye formula [3] is used to predict void fraction at ONB. The expression is shown here as, where ξ is the adjustment parameter to fit with the OSV void fraction;

$$x_{true}(z) = 0.01\xi\left\{x_{eq}(z) - x_{eq}(z_{ONB})\left\{\tanh\left(\frac{x_{eq}(z)}{x_{eq}(z_{ONB})} - 1\right) + 1\right\}\right\} \tag{4}$$

Using Saha and Zuber [4] and Frost and Dzakowic [5] relations, predicted coolant temperature, T_l at OSV and ONB respectively. T_{sat} is the saturation temperature, q'' is the heat flux, G is the mass flux, c_p is the specific heat capacity of the coolant, h_{fg} is the heat of vaporization, h_{lo} is the

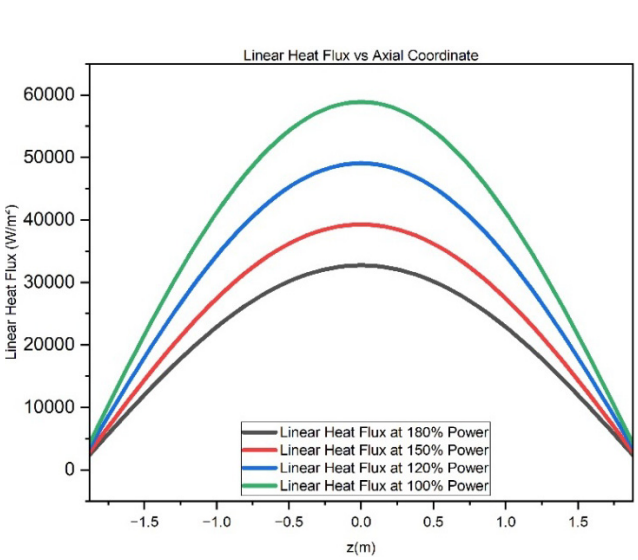
coolant heat transfer coefficient, σ is the coolant surface tension, k_l is the thermal conductivity of coolant, Pr_l is the coolant Prandtl number.

$$T_l\left(z_{OSV}\right) = T_{sat} - 153.8\frac{q''}{Gc_p}, \tag{5}$$

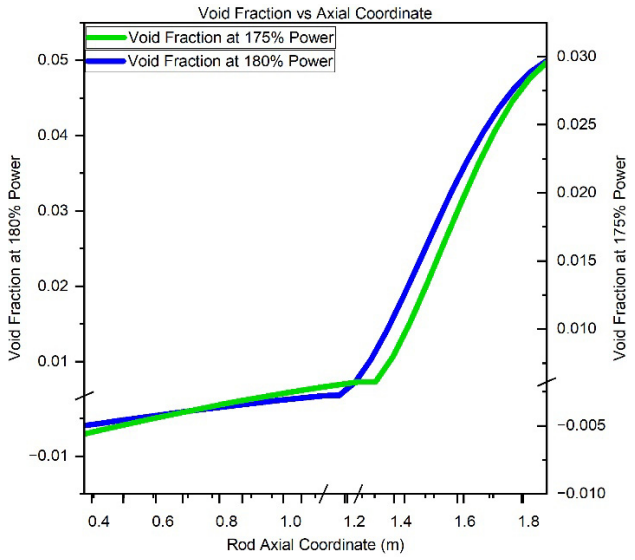
$$T_l\left(z_{ONB}\right) + \frac{q''}{h_{lo}} = T_{sat} + \left(\frac{8q''\sigma T_{sat}}{\rho_v h_{fg} k_l}\right)^{0.5} \mathrm{Pr}_l . \tag{6}$$

3. Results and Analysis

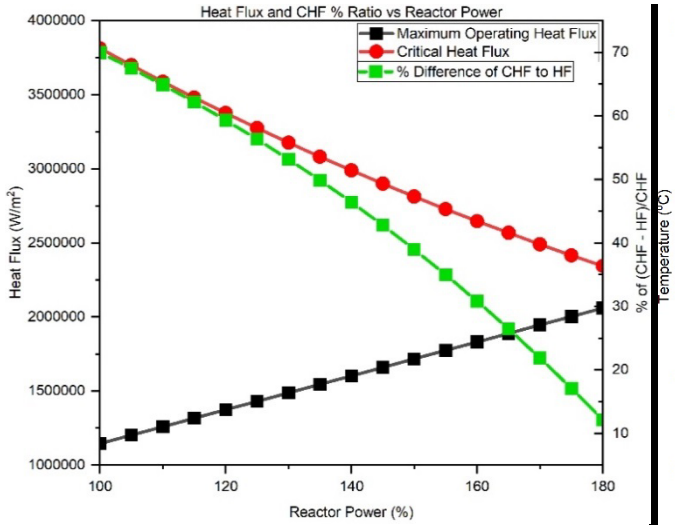
Calculation of thermal and hydraulic characteristics was carried out using initial data: thermal power of reactor, 3200$\mathrm{MW_{th}}$; pressure of the coolant in the reactor, 16.2 MPa; and inlet temperature of the coolant, 298.2 °C. In the analysis of the result, the linear heat flux was calculated for four (4) different power step increase; at 100, 120, 150 and 180 % rated thermal power respectively. It was found that the linear heat flux increases in direct proportionality to the power increment as shown in Fig 1 (a), indicating a linear relationship between the thermal power and linear heat flux.



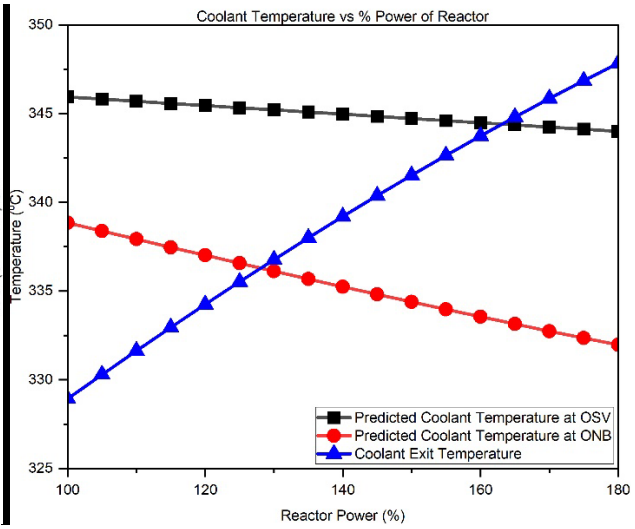
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. (a) Linear heat flux vs height, (b) Void fraction vs height, (c) Heat flux density vs reactor power, (d) Coolant temperature vs reactor power

The void fraction distribution in Fig1 (b) are for 175 and 180 % power, the OSV point actually started at 165 % power, but it was at these powers (175 and 180 %) that the boiling became a fully developed boiling encompassing both the ONB and OSV regions. As seen from the Fig 1 (b), the OSV point at 180 % occurred at about 3m of channel height, while that of 175 % power occurred at about 3.17 m. The OSV point also mark a major milestone in the heat removal in PWR reactor core, it indicates the beginning of thermal crisis which is the point of intersection of the maximum heat flux and CHF ratio as seen in Fig 1 (c). The maximum heat flux increased as the power increased while the critical heat flux continuously decreased as seen in Fig 1 (c). This means as the power increases the ratio of CHF to maximum heat flux will continue to decrease until it gets to a safety limit beyond which a thermal crisis will take place, this limit point is the point of intersection of the maximum heat flux and the CHF ratio shown in Fig 1 (c). The ascending exit coolant temperature and the descending predicted coolant temperature at ONB and OSV indicates that as the power increases, the exit coolant temperature will meet the temperature at ONB and at OSV. The point at which the ONB temperature meets the coolant temperature, is the ONB point, this happened at 130 % power, while the point at which OSV temperature meets the coolant temperature is the OSV point, this happened at 165 % power.

3. Conclusion

The conclusion of this calculation is that by theoretically increasing VVER-1200 thermal power beyond the maximum permissible thermal power of about 102–105 % power, while keeping other influencing parameters constant, the void fraction will increase, this increment will eventually lead to thermal crisis if the incremental power goes on continuously, as seen in Fig 1 (b). Also, it was noted in this calculation that the predicted CHF value will continue to race towards the maximum operating heat flux value until the CHF ratio intercepts the maximum heat flux which marks the beginning of thermal crisis, as seen in Fig 1 (d).

REFERENCES

1. Yang B.W. et al. Progress in rod bundle CHF in the past 40 years // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Iss. 376. – P. 111076.
2. Cai C. et al. Assessment of void fraction models and correlations for subcooled boiling in vertical upflow in a circular tube // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Iss. 171. – P. 121060.
3. Delhaye J.M., Maugin F., Ochterbeck J.M. Void fraction predictions in forced convective subcooled boiling of water between 10 and 18 MPa // International journal of heat and mass transfer. – 2004. – V. 47. – Iss. 19-20. – P. 4415–4425.
4. Pradip S., Zuber N. Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling // International Heat Transfer Conference: Digital Library. Begel House Inc., 1974.
5. Frost W., Dzakowic G.S. An extension of the method for predicting incipient boiling on commercially finished surfaces. USA: ASME, 1967.

СИСТЕМЫ ТРИГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

К.Д. Вьюгова

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

Научный руководитель: А.Ш. Низамова, к-т техн. наук

В настоящее время остро встает вопрос, касающийся экономии энергетических ресурсов, возможность повышения экономической эффективности их использования [1]. Так, к примеру, производится комбинированная выработка тепловой и электрической энергии – наиболее ярким примером здесь служит теплоэлектроцентраль (ТЭЦ).

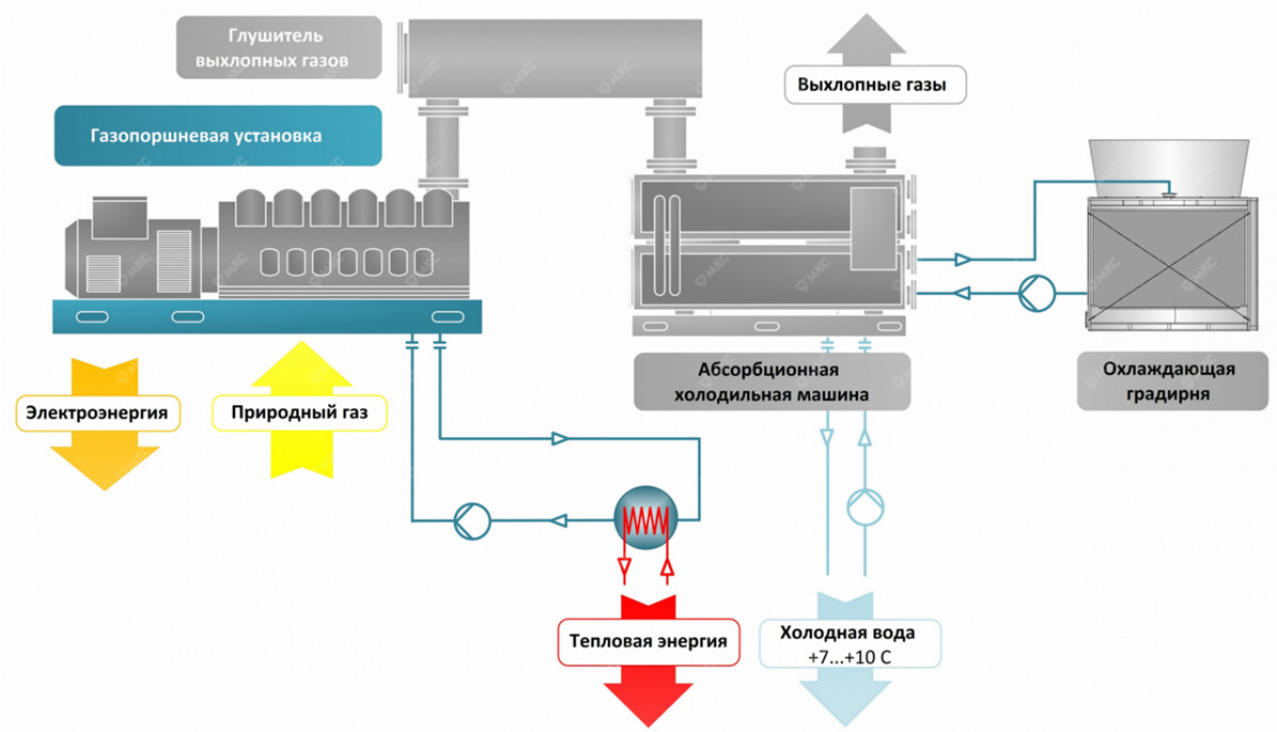


Рис. 1. Тригенерационная установка

Но с развитием современных технологий выросла потребность не только в электроэнергии и теплоте, но и в холоде. Различные холодильные установки находят все более широкое применение, как в промышленности, так и в быту. Ввиду вышеизложенного, возникла необходимость в создании установки, генерирующей энергии всех трех видов – тригенерационные.

Тригенерация – это процесс, в котором часть тепловой энергии, вырабатываемой при работе газопоршневой установки, используется для генерации холода, который применяется для технологических нужд предприятия и для кондиционирования помещений.

Внедрение системы тригенерации также может оказать колоссальное влияние на работу газотурбинной установки (ГТУ). Ввиду того, что забор воздуха для работы компрессора ГТУ осуществляется из атмосферы, температура наружного воздуха тесно коррелирует с работой установки [2]. А именно: с увеличением температуры наружного воздуха увеличивается работа сжатия воздуха в компрессоре. Данное утверждение можно описать формулой:

$$N_{\text{гту}} = 82{,}896 - 0.0029 \cdot (t_{\text{нв}})^2 - 0{,}265 \cdot t_{\text{нв}} - 0{,}00009 \cdot (t_{\text{нв}})^3, \quad (1)$$

где $N_{\text{гту}}$ – мощность газовой турбины, МВт; $t_{\text{нв}}$ – температура окружающего воздуха, ℃

С целью обеспечения долговременной и бесперебойной работы установки в цикл работы ГТУ может быть внедрена абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина, которая, в свою очередь, сможет обеспечивать оптимальный температурный и тепловой режим. Основным теплоносителем здесь служит пар, но при использовании адсобционных чиллеров, тепловая энергия может быть использована и для воды, имеющей температуру 50–80 ℃.

Интеграция подсистем отопления и охлаждения в традиционную электростанцию может повысить эффективность станции до 80 % [3].

Тригенерационные установки представляют собой весьма выгодное техническое оборудование в области малых децентрализованных систем генерации, так как они позволяют эффективно использовать отходящее тепло, производимое газопоршневыми установками, не только для отопления в зимний период, но и в летний сезон для кондиционирования помещений или охлаждения в технических целях. Многократное использование тепла способствует повышению общей эффективности таких установок, что делает их пригодными для непрерывного использования в течение всего года, сохраняя при этом высокий уровень эффективности.

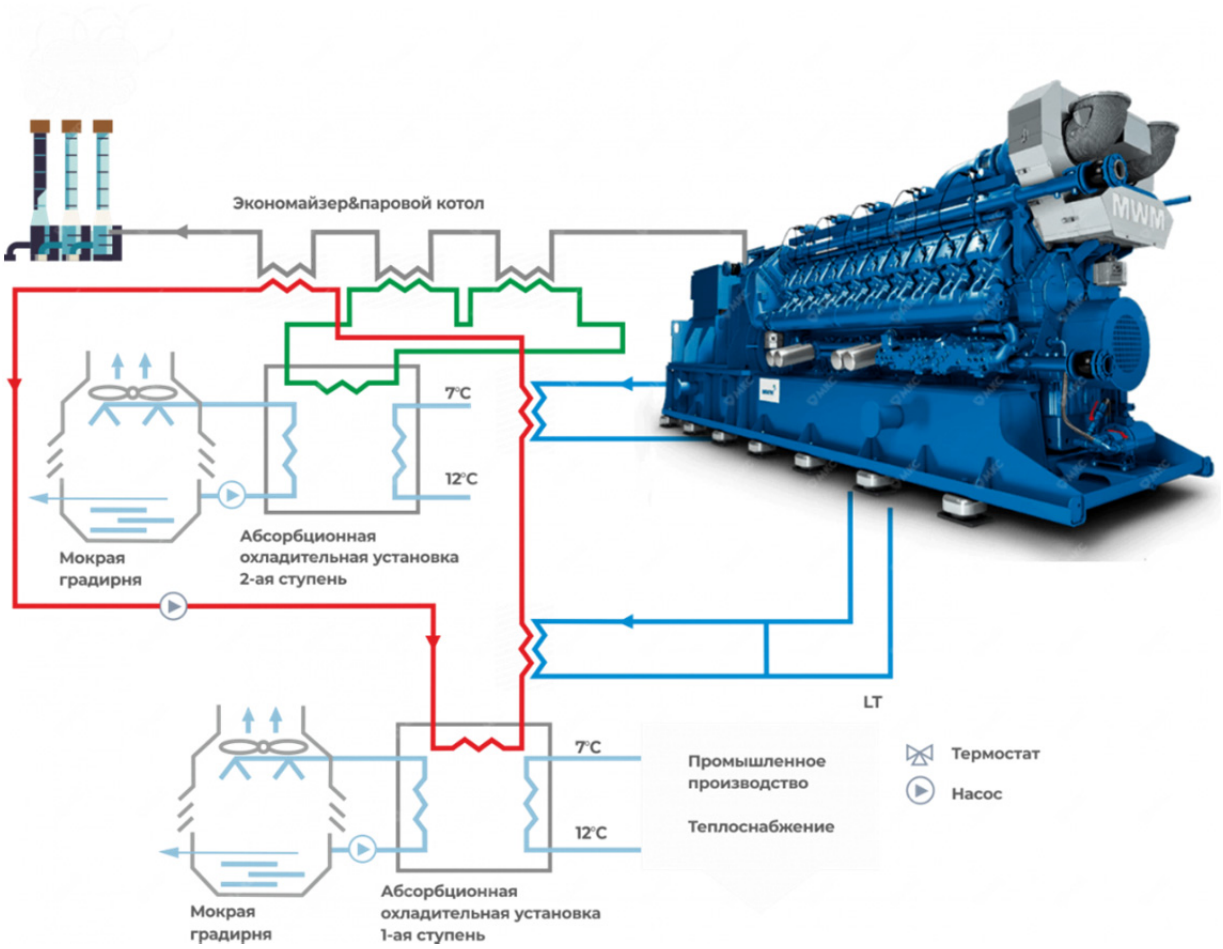


Рис. 2. Цикл работы ГТУ, содержащий АБХМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадек Е.Г. Тригенерация как технология экономии энергоресурсов // Энергосбережение. – 2015. – №. 2. – С. 52–57.
2. Менделеев Д.И. и др. Исследование влияния условий эксплуатации на эффективность использования абсорбционно-холодильной машины в цикле газотурбинных и парогазовых установок // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – №. 4 (153). – С. 821–831.
3. Al-Sulaiman F.A., Hamdullahpur F., Dincer I. Trigeneration: a comprehensive review based on prime movers // Int. J. Energy Res. – 2011. – V. 35. – P. 233–258.

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТАНОВЛЕНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

В.Г. Горячев, Е.А. Бирюков

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5ВМ31

Научный руководитель: А.И. Артамонцев, к.т.н., НИ ТПУ

Рассматриваются существующие подходы к решению проблем, не предусмотренных во время проектирования, которые, в свою очередь, приводят к вынужденным снижениям установленных параметров котельных агрегатов.
Ключевые слова: котельный агрегат, проектирование, тепловые станции, паропроизводительность, перемаркировка, тепловосприятие.

Проектирование котельной установки – сложный и комплексный процесс, который требует большого количества времени и специальных знаний. Он включает в себя множество факторов, таких как тип котла, топливо, конструктивные и режимные характеристики и другие параметры, которые необходимо учитывать при расчете оптимальных параметров работы котла.

В процессе эксплуатации тепловой электростанции возможны внесения следующих изменений: модернизация оборудования или его замена на более подходящее, снижение параметров рабочего тела, замена морально и физически изношенных агрегатов. Все перечисленные изменения могут позволить улучшить технико-экономические показатели станции, снизить удельный расход топлива, улучшить показатели надежности, ремонтопригодности и безопасности эксплуатации оборудования, снизив в тоже время вредное экологическое воздействие на окружающую среду [1].

В процессе эксплуатации при проведении пуско-наладочных и исследовательских работ ряд проблем, связанных с невыходом на номинальную нагрузку, объясняется выявлением проектировочных недочетов. Примерами могут послужить перемаркировки котлов П-67 Березовской ГРЭС и котлов БКЗ-420-140 ПТ1 Красноярской ТЭЦ-2.

Причиной перемаркировки котлоагрегатов БКЗ-420-140 ПТ1 ст. № 1–3 Красноярской ТЭЦ-2 является недостаточное тепловосприятие водяного экономайзера второй ступени, вследствие чего температура дымовых газов перед воздухоподогревателем, при расчётной 418 ℃, превышает 480 ℃. Температура металла трубной доски ВЗП, при максимально допустимой для стали 3 по условиям надёжности 425 ℃, превышает 460 ℃. Номинальное значение температур достигается лишь при снижении паровой нагрузки котлоагрегатов с 420 т/ч до 380 т/ч. В результате произведённой перемаркировки паропроизводительность устанавливается на уровне 380 т/ч, со снижением установленной мощности электростанции на 40 МВт [2].

На стадиях опытных сжиганий березовского угля в различных котельных агрегатах, проектирования, наладки, исследований и длительной эксплуатации специально разработанных котлов П-67 блоков 800 МВт Березовской ГРЭС-1 не удалось в полной мере устранить недостатки, связанные с интенсивным шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева котлов. Так, одной из главных причин перемаркировки энергоблоков с 800 до 700 МВт в 2000 г. стала недостаточная эффективность проектной системы очистки поверхностей нагрева: образование у блоков горелок глыб шлака и падение их в холодную воронку с разрушением шнеков шлакоудаления, рост максимальных температур газов в поворотной камере перед выходными пакетами конвективного пароперегревателя до температуры начала шлакования, образование прочных отложений, снижающих тепловую эффективность и повышающих аэродинамическое сопротивление пакетов труб в конвективной шахте [3].

Комплекс научно-исследовательских, реконструктивных и наладочных работ, связанных с повышением интенсивности теплообмена в топочной камере котла П-67, позволил уточнить причины снижения бесшлаковочной мощности котла, прогнозировать качество березовского угля для проектирования последующих блоков, рекомендовать и внедрить на основе результатов численного эксперимента механическую очистку экранов, «угрубление» помола топлива, загрузку нижних ярусов горелок с нижним дутьем горячего воздуха и двухступенчатое сжигание с системой диагностики шлакования экранов и управления аппаратами обдувки [3, 4].

Балансовые испытания реконструированного котла П-67 за период 2006–2008 гг. с оценкой изменения во времени коэффициентов тепловой эффективности поверхностей нагрева при базовых нагрузках энергоблока 740–800 МВт показали положительные результаты (рис. 1) [4].

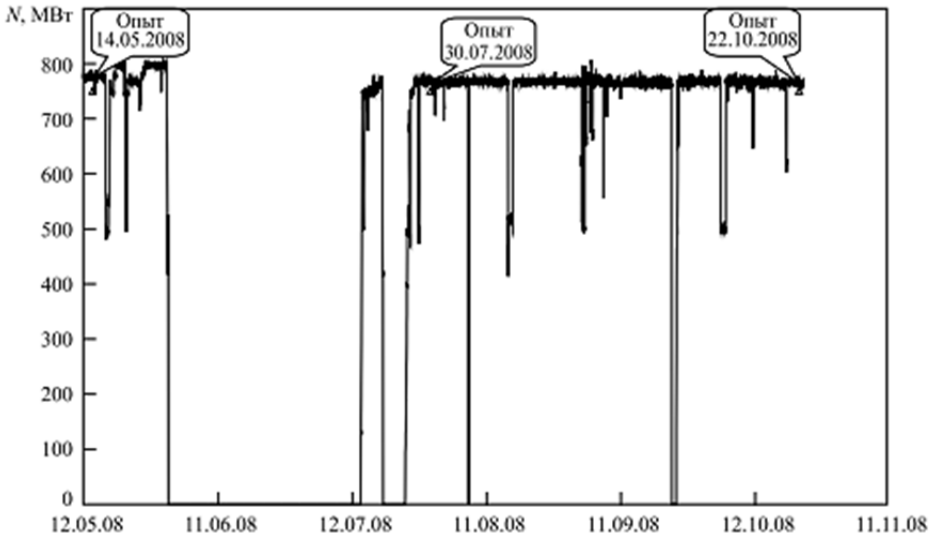


Рис. 1. Изменение мощности энергоблока ст. № 1 в 2007–2008 гг.

Таким образом, проанализировав основные причины перемаркировки энергоблоков, главным фактором является недостаточная эффективность проектной разработки. Среди этого отмечаются ошибки конструкторов, а также факторы, которые невозможно было учесть. Перемаркировка также может быть необходима для приведения оборудования в соответствие с новыми стандартами и нормами и обусловлена изменениями в технологиях и требованиях к оборудованию. Это может включать изменение параметров рабочего тела, замену устаревших и слабоэффективных компонентов на более инновационные и технологичные, а также переход на другой вид топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есенкова М.Ю. Реконструкция ТЭЦ в целях повышения надежности на примере Красноярской ТЭЦ-1 // Проспект Свободный – 2023: Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 24–29 апреля 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 2615–2617.
2. Технический акт №37 от 25.10.1991 г. перемаркировки парового стационарного котла БКЗ-420-140 ПТ1 ст. № 2 Красноярской ТЭЦ-2 ПО «Красноярскэнерго».
3. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт / В.В. Белый, С.В. Порозов, В.В. Васильев и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 299–312.
4. Результаты испытаний котла П-67 энергоблока мощностью 800 МВт / П.Ю. Гребеньков, В.В. Васильев, В.Н. Борисов и др. // Теплоэнергетика. – 2011. – № 12. – С. 2.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ ПРИ АРМИРОВАНИИ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОМ

Е.В. Дьячук

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, ЭОС, гр. ЭОСм-1-22

Железобетонные колонны являются важными компонентами различных конструкций, включая здания и мосты, отвечающими за поддержку и передачу нагрузок от конструкции на фундамент. Однако напряженно-деформированное состояние этих опор при различных условиях нагрузки является решающим фактором, определяющим их долговечность и прочность. Целью данной статьи является изучение напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны при армировании сталефибробетоном.

Сталефибробетон – краткий обзор

Сталефибробетон – это композитный строительный материал, в котором смешиваются гидравлический цемент, вода и заполнители со стальными волокнами. Благодаря превосходным характеристикам пластичности, прочности, усталости и трещиностойкости, обеспечиваемым стальными волокнами, этот материал все чаще используется для армирования и восстановления бетонных конструкций, включая обычные железобетонные колонны.

Когда сталефибробетон используется в качестве армирующего компонента, он повышает прочность бетонной матрицы на растяжение и изгиб, позволяя ей выдерживать большие нагрузки без образования трещин, тем самым значительно улучшая ее деформационную способность под напряжением [1].

Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн

Анализ соотношения напряжения и деформации железобетонных колонн включает в себя оценку того, как колонны деформируются под действием приложенного напряжения. Бетон, будучи по своей природе прочным на сжатие, но слабым на растяжение, имеет тенденцию растрескиваться и разрушаться при растягивающих нагрузках. Этот недостаток компенсируется добавлением стальной арматуры (арматуры).

Благодаря использованию сталефибробетона в качестве армирования и без того превосходная прочность на сжатие традиционной железобетонной колонны подкрепляется лучшими характеристиками растяжения, обеспечиваемыми стальными волокнами [2]. Это двойное улучшение характеристик приводит к тому, что колонна демонстрирует более нелинейную и пластичную реакцию напряжения и деформации, в отличие от линейно-упругой и хрупкой, что является важной характеристикой для динамических несущих конструкций.

Влияние армирования сталефибробетона на напряженно-деформированное состояние:

1. Повышенная пластичность. Стальные волокна в бетонной матрице повышают способность бетона деформироваться под приложенными нагрузками без потери его несущей способности.

2. Улучшенная трещиностойкость. Стальные волокна играют ключевую роль в ограничении распространения трещин внутри бетонной матрицы, значительно повышая долговечность армированной колонны [3].

3. Разнонаправленное армирование. В отличие от обычной арматуры, которая обеспечивает армирование в том направлении, в котором она размещена, стальные волокна, случайно ориентированные внутри бетона, обеспечивают трехмерное армирование.

4. Превосходное поглощение энергии. Сталефибробетон может поглощать значительное количество энергии до разрушения, что жизненно важно для конструкций, испытывающих динамические нагрузки, такие как землетрясения или силы ветра.

Методы оценки

Для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн со стальной фиброй могут быть использованы методы как экспериментального, так и численного моделирования [4]. Экспериментальные методы предполагают воздействие на армированную колонну контролируемых нагрузок и регистрацию соответствующей деформации. С другой стороны, численное моделирование использует вычислительные методы, такие как анализ методом конечных элементов (FEA), для моделирования поведения колонны в различных условиях нагрузки.

Заключение

Таким образом, сталефибробетон продемонстрировал значительный потенциал в улучшении характеристик напряжения и деформации традиционных железобетонных колонн. Обладая резистивными свойствами, такими как пластичность, трещиностойкость и поглощение энергии, сталефибробетон представляет собой многообещающее направление для разработки упругих и долговечных несущих конструкций. Однако необходимы постоянные исследования, чтобы в полной мере использовать потенциальные преимущества и возможности применения этого композитного материала в области проектирования и проектирования конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 52-104-2009 Сталефибробетонные конструкции. – М.: ОАО НИЦ Строительство, 2010. – 63 с.
2. Сикорская О.В. Сравнение эффективности усиления внецентренно-сжатых железобетонных колонн при помощи сталефибробетона и железобетона методом двустороннего наращивания / О.В. Сикорская, А.О. Хегай // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 8(20). – С. 24–29.
3. Радайкин О.В. К оценке совместного влияния начальных напряжённо-деформированного состояния и силовых трещин на прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных балок, усиляемыхсталефибробетонной "рубашкой", на основе компьютерного моделирования в ПК "ANSYS" / О.В. Радайкин, Л.А. Шарафутдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 1(47). – С. 155–165.
4. Радайкин О.В. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной "рубашкой", на основе компьютерного моделирования в ПК "ANSYS" / О.В. Радайкин, Л.А. Шарафутдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1(39). – С. 111–120.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕМПОВОЙ ФОРМЕ ЗАПИСИ

А.А. Ермакова

Самарский государственный технический университет,
ТЭФ, УСАТСК, гр. 2-УПНК-5.2.2

Научный руководитель: М.В. Цапенко, к.э.н., доцент УСАТСК, ТЭФ

Важнейшим элементом экономики любой страны является энергетика. Энергетика – отрасль, определяющая уровень и качество жизни, динамику развития страны. Энергия позво-

ляет обеспечить большинство факторов благосостояния человека: от предоставления доступа к воде и сельскохозяйственным продуктам до добычи полезных ископаемых.

Теплоэнергетика преобразует теплоту в энергию. Наиболее часто используемыми видами топлива являются природный газ, уголь и нефть. Статистически объемы производимой энергии из теплоты значительно превышают объемы энергии от возобновляемых источников. Поэтому главной задачей производства тепловой энергии является экономичное и грамотное использование природных ресурсов. Более эффективного использования ресурсов в этой области возможно достичь путем регулирования соотношения затрачиваемых ресурсов к производству конечного продукта. Оценить такое соотношение позволяют модели класса производственных функций.

Довольно часто для анализа таких процессов применяется производственная функция Кобба-Дугласа, имеющая вид [1], [2]:

$$Y = A \cdot K^{\alpha} \cdot L^{\beta} \cdot e^{\gamma t}, \quad (1)$$

где Y – объем выпуска продукции; K – затраты капитальных ресурсов; L – затраты трудовых ресурсов; A – масштабный коэффициент; α, β – факторные эластичности, $e^{\gamma t}$ – множитель, учитывающий влияние научно-технического прогресса.

Подробное описание моделирования производственной функции Кобба-Дугласа в классической форме записи рассмотрено в работе [3].

Выражение (1) отражает связь между абсолютными значениями затрат и произведенной продукции, однако существуют методы оценки этой зависимости путем определения темпов изменения указанных ранее величин. Производственная функция Кобба-Дугласа в темповой форме записи имеет вид:

$$\frac{Y_t'}{Y_t} = \alpha \cdot \frac{K_t'}{K_t} + \beta \cdot \frac{L_t'}{L_t} + \gamma, \quad (2)$$

Темповые значения в (2) определяются с помощью численного дифференцирования:

$$y_t = \frac{Y_t - Y_{t-1}}{Y_{t-1}};\ k_t = \frac{K_t - K_{t-1}}{K_{t-1}};\ l_t = \frac{L_t - L_{t-1}}{L_{t-1}}, \quad (3)$$

где y, k, l – темпы прироста соответствующих величин.

Линейная форма (2) имеет вид:

$$y_t = \alpha \cdot k_t + \beta \cdot l_t + \gamma. \quad (4)$$

Вычисление неизвестных параметров выражения (4) осуществляется методом наименьших квадратов.

Вид исходной функции (1) был модифицирован – в качестве капитальных затрат K приняты затраты топлива на производство тепловой энергии (T).

Сбор и обработка данных для расчета осуществлены на основе официальной статистики в период с 2012 по 2022 гг. [4]. За параметр Y принят объем производства тепловой энергии, затраты топлива на выработку тепла – T, количество занятых в отрасли – L. Затраты топлива на выработку тепла рассчитаны с помощью метода КПД отбросов [5].

Модель процесса производства тепловой энергии в темповой форме в период с 2012 по 2022 гг. представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлено сравнение фактического значения производства электрической энергии в России и темповое значение этого показателя. Для наглядности произведено масштабирование темповой переходной характеристики.

При логарифмировании и дифференцировании выражения (1) получим:

$$\frac{dY_t}{Y_t} = \alpha \cdot \frac{dK_t}{K_t} + \beta \cdot \frac{dL_t}{L_t} + \gamma dt. \quad (5)$$

При замене линейных частей приращения в (5) на сами приращения получим формулу вида (4). Таким образом, объемная (1) и темповая (4) записи производственной функции Кобба-Дугласа являются эквивалентными.

В случае эквивалентности выражений возможно подставить в (1) параметры, идентифицированные с использованием выражения (4). Результат моделирования представлен на рис. 3.

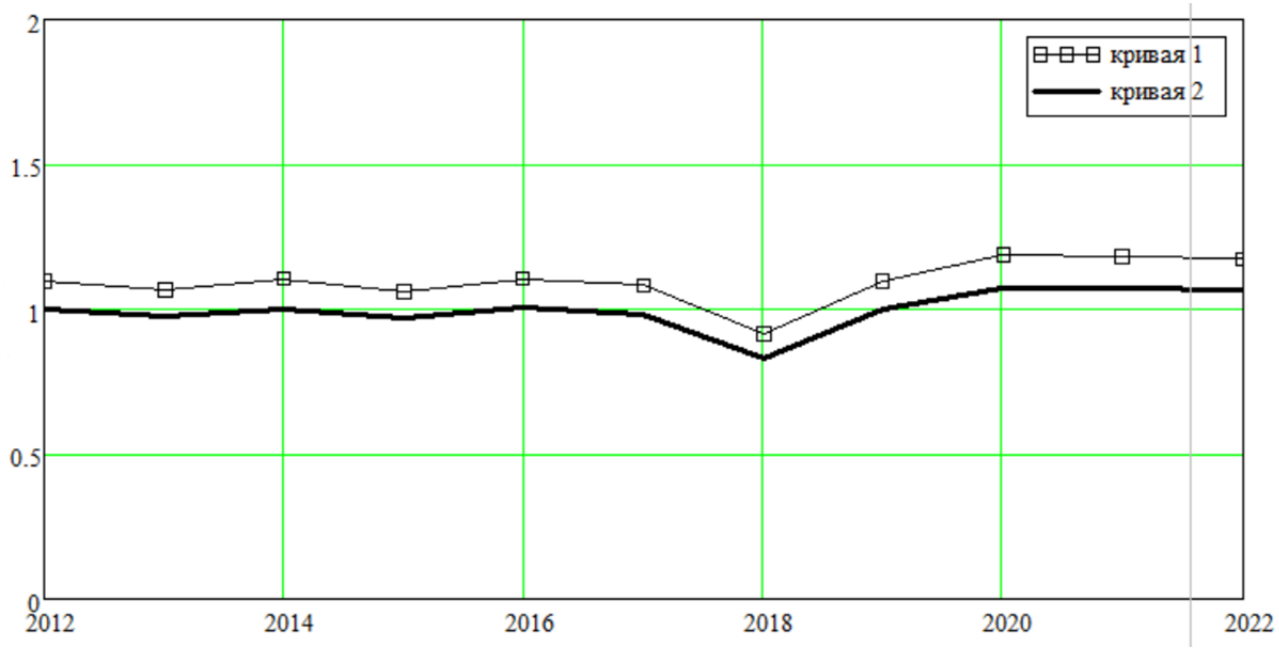


Рис. 1. Результаты моделирования ПФ в темповой записи:
1 – темповое значение выработки тепловой в России;
2 – идентифицированная ПФ в темповой записи

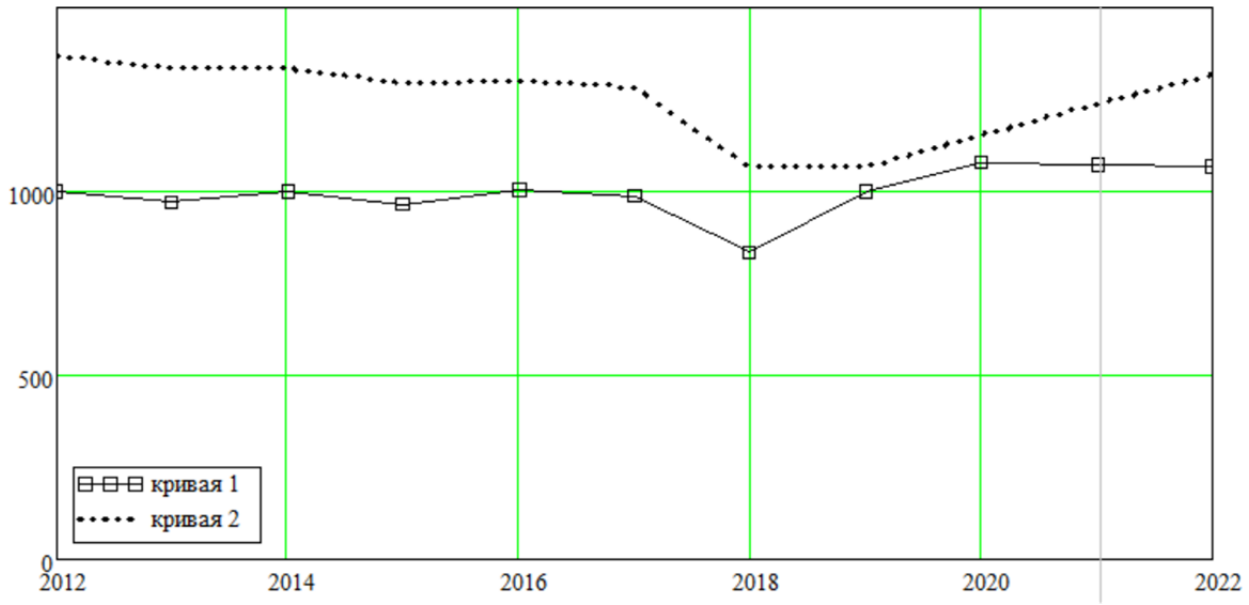


Рис. 2. Сравнение:
1 – производство тепловой энергии в темпах; 2 – фактическое производство тепловой энергии

Результаты моделирования в дискретном времени отражают существенные различия между объемной и темповой записью одной и той же производственной функции и единых статистических данных [6]. Такой вывод подтверждается ухудшением показателей качества модельных решений: коэффициент детерминации для ПФ Кобба-Дугласа в классическом представлении был равен R^2=0,97, а при подстановке темповых данных $R_t^2 = 0{,}099$; критерий Дарбина-Уотсона: DW=1,831; DW_t=0,0135. Для улучшения качества модельных решений необходимо расширение временного интервала моделирования – добавления новых данных за предыдущие периоды.

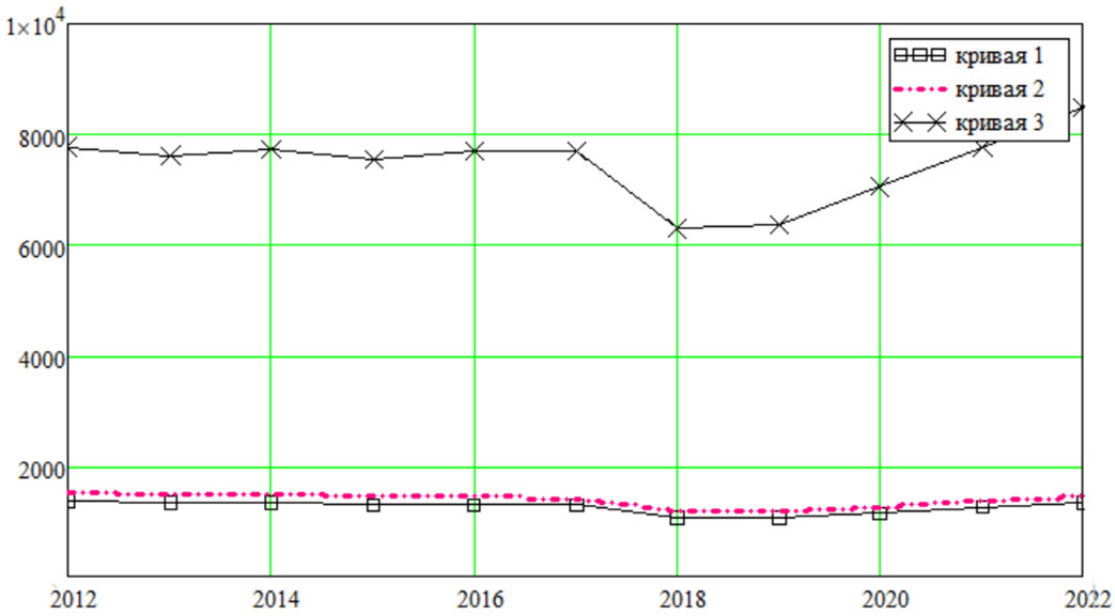


Рис. 3. Проверка эквивалентности ПФ в темповой и объемной записях:
1 – фактический объем выработки тепловой энергии; 2 – ПФ Кобба-Дугласа;
3 – ПФ Кобба-Дугласа с параметрами, найденными по темповой записи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение. –М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
2. Дилигенский Н.В. Математическое моделирование и обобщённое оценивание эффективности производственно-экономических систем / Н.В. Дилигенский, М.В. Цапенко // Проблемы управления и моделирования в сложных системах, Самара, 14–17 июня 2004 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. – С. 96–106.
3. Ермакова А.А. Моделирование производства тепловой энергии в России / А.А. Ермакова // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 13. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 144–147. – EDN YRJYFM.
4. Российский статистический ежегодник. 2022: Стат. сб.\ Росстат. 117 с., 395 с.
5. Кузнецов А.М. Экономия топлива при переводе турбин в теплофикационный режим / А.М. Кузнецов // Энергетик. – 2007. – № 1. – С. 21–22.
6. Грачева М.В., Фадеева Л.Н., Черемных Ю.Н. Моделирование экономических процессов: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальностям экономики и управления. – 2-е изд. изд. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. – 543 с.

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЖКХ

Р.Н. Газизова

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, АТЭС, гр. ЭЖКХ-1-21

Научный руководитель: Р.Р. Вилданов, к.т.н., доцент АТЭС ИТЭ КГЭУ

Значительным направлением становления систем энергоснабжения во времена Советской энергетики являлось конструирование и сооружение различных электростанций, использующих в качестве топлива непрерывный поток воды, распад ядер урана в реакторе, сжигание в котельных установках твердого, жидкого и газообразного топлива. Совместно с этим шло строительство электро- и теплосетей для обеспечения крупных предприятий, коммунально-бытовых потребителей: близлежащих городов и пригородных зон. В настоящее время наблюдается вывод существенной части сетей и оборудования электростанции по нормативным соображениям безопасности, а также затрудняется поставка тепловой энергии ввиду территориального расположения в удаленных или недоступных местах, где подключение к центральной энергоснабжающей сети экономически не выгодно или технически сложно. Следовательно, необходимо организовывать строительство новых электрических станций, что в свою очередь нерентабельно, так как период окупаемости может составить 30 лет. Автономные источники энергоснабжения в ЖКХ обеспечивают надежное и устойчивое энергетическое решение, которое может быть экономически эффективным и экологически безопасным. Появляются технические задачи перед жилищно-коммунальным хозяйством страны, которые возможно урегулировать с помощью создания и внедрения, более совершенных энергоснабжающих технологий и агрегатов, разработка которых снижает теплопотребление и металлоемкость при использовании индивидуальных тепловых пунктов в системах централизованного теплоснабжения. Сформулируем более точное определение данному понятию. Автономные источники энергоснабжения в ЖКХ – это системы, которые обеспечивают независимое (от центральной электрической сети) и устойчивое энергоснабжение для жилых или коммерческих объектов. Такие источники могут быть использованы для обеспечения основных потребностей в энергии в случае отключения центральной сети, а также помогают снизить зависимость от колебаний и перебоев в централизованном электроснабжении. Рассмотрим более детально некоторые виды энергетических машин, которые широко применимы в жилищно-коммунальном хозяйстве:

1. Газовые генераторы – это устройства, которые производят электроэнергию и тепло с помощью сгорания газообразного топлива, такого как природный газ или биогаз. Они могут использоваться для обеспечения электроснабжения и отопления жилых и коммунальных объектов. Из достоинств можно выделить экономичность – связано это с тем, что цена газа часто ниже цены на бензин или дизельное топливо; возможность переключения на иные виды горючих, таких как пропан-бутан; экологичность – по сравнению с другими типами генераторов, так как они выделяют значительно меньше вредных выбросов и загрязнений в атмосферу. Такого типа электрогенераторы с автоматическим вводом резерва не имеют потребности в обязательном участии людей при запуске, отключении и стабилизации работы. Также важно заметить недостатки, которые связаны с требовательностью к высококачественному топливу, с низкой эффективностью преобразования энергии, с высокими исходными затратами и с необходимостью регулярного обслуживания и ремонта для поддержания их надежной работы.

2. Дизельные генераторы сжигают дизельное топливо для производства электричества. Преимущественно используются в ситуациях, когда требуется независимая электроподача, например, в строительстве, в регионах с ограниченным доступом к электроснабжению или в

экстремальных погодных условиях. Также могут использоваться в качестве резервного источника энергии в случае отключения основного электроснабжения. Генераторы широко применяются в ЖКХ для резервного энергоснабжения и обеспечения работы важных систем, таких как освещение, лифты, системы безопасности и т.д. Они отличаются от бензиновых генераторов тем, что используют более тяжелое топливо – дизельное топливо, которое имеет достаточно высокую плотность энергии. Кроме того, данные источники более эффективны, имеют достаточно длительный срок службы и намного мощнее по сравнению с бензиновыми генераторами. Однако нельзя забывать о недостатках дизельного генератора, которые могут быть громкими и производить выбросы выхлопных газов, поэтому вынуждены использоваться с учетом экологических требований [1]. В некоторых странах могут существовать ограничения на использование дизельных генераторов в густонаселенных городских районах или в экологически чувствительных областях. В целом, дизельные генераторы являются надежными и эффективными источниками электропитания в различных ситуациях, где требуется независимая подача энергии. Впрочем, перед использованием следует учитывать требования по безопасности и экологической совместимости.

3. Бензиновые генераторы могут использоваться в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ) как автономные источники энергоснабжения в случае отключения электричества или в условиях временной необходимости дополнительного энергопотребления. Их главное преимущество в высокой эффективности, так например они могут обеспечивать продолжительное время микрорайоны с достаточно большим КПД. Ко всему прочему генераторы легко устанавливаются, быстро запускаются, предоставляют электроэнергию в течение нескольких минут, и без особой нагрузки могут быть перенесены в другое место. Однако существуют некоторые недостатки, из которых можно выделить большой уровень шума, выделение выхлопных газов, регулярная нужда в топливе, проблема с надежностью и износом различных компонентов генератора. При использовании бензиновых генераторов в ЖКХ необходимо учитывать все эти факторы и принимать меры для минимизации их негативного влияния на окружающую среду и жителей.

В случае теплоснабжения в ЖКХ применимы разного рода источники энергии:

1. Газовые котельные – это системы отопления, которые работают на газе. Они используют котлы для нагрева воды, которая затем циркулирует по радиаторам или трубам в помещении, обеспечивая тепло. Газовые котельные могут быть индивидуальными (для одного дома, квартиры) или централизованными (для нескольких домов). Они широко используются в качестве основных систем отопления в жилых и коммерческих зданиях, так как работают эффективно и экономически выгодно. Однако необходимо учитывать безопасность при использовании и регулярно проводить обслуживание и проверку. Хотелось бы акцентировать внимание на достоинствах. В первую очередь затронуть экономичность: газ является относительно дешевым топливом, поэтому эксплуатация газовых котельных обычно стоит дешевле, чем других видов отопления. Немаловажной особенностью является высокий КПД, что позволяет достичь эффективного отопления при минимальных потерях тепла. Газовые котельные удобны в использовании, так как для работы не требуется особого усилия или поддержания. Они обычно надежны и долговечны, если проводить регулярное техническое обслуживание и проверку. Главным недостатком является риск утечки газа, поэтому существует необходимость установления газового оборудования и системы с безопасными функциями.

2. Крышная котельная – это котельная, которая расположена на крыше здания. Данное размещение может снизить риск утечек воды или газа, поскольку любая утечка будет легче замечена и обнаружена. Она часто используется в случаях, когда нет места внутри здания для размещения котельной или для эффективной подачи топлива. Крышные котельные могут быть как встроенными, так и пристроенными котельными, в зависимости от их конструкции и размещения. Встроенная котельная – это котельная, которая находится внутри здания и ин-

тегрирована в его конструкцию. Она может быть размещена в подвале, технической комнате или специально предназначенном помещении [2]. А пристроенная котельная – это часть здания или сооружения, специально предназначенная для установки специализированного оборудования. Она может быть расположена на территории здания, в отдельном строении или контейнере. Занимает меньше места на земле и позволяет освободить пространство под строительство или другое использование. В такой котельной обычно находятся котлы, смесительные узлы, насосы, трубопроводы и другое оборудование, необходимое для поддержания теплообмена и обеспечения отопления здания.

3. Мини-ТЭЦ, или мини-теплоэлектростанция – это компактная версия теплоэлектростанции, установленная недалеко от потребителей, которая позволяет производить электрическую и тепловую энергию на месте. Она часто монтируется в жилых или коммерческих зданиях, обеспечивая энергетическую автономность. Основной принцип работы мини-ТЭЦ такой же, как и у обычной теплоэлектростанции: происходит сгорание топлива, что приводит к нагреву воды в котле, затем пар используется для привода турбины, которая генерирует электрическую энергию. Однако, в отличие от крупных станций, мини-ТЭЦ технически адаптируется к небольшим объемам производства и потребления энергии. Преимущества мини ТЭЦ включают экономическую эффективность за счет использования отходов производства (например, отходов от деревообработки), снижение издержек на перевозку электроэнергии и потери энергии на длинных расстояниях, а также экологическую безопасность в сравнении с традиционными энергетическими источниками. Мини-ТЭЦ, как автономный источник, может быть использован в регионах, где существует проблема снабжения электроэнергией и теплом, например, отдаленных сельских районах, комплексных жилых комплексах или промышленных зонах. Они также могут быть установлены в качестве резервного источника энергии для предприятий или организаций. Однако у мини-ТЭЦ есть и недостатки. Их стоимость может быть выше, чем у обычных систем отопления, и требуется специальное разрешение и согласование со стороны властей для их установки. Они также сложны в обслуживании и требуют постоянного контроля и технического обслуживания. В целом, мини-ТЭЦ представляют собой перспективное решение для энергетической автономности и устойчивости в сфере потребления энергии. Они позволяют уменьшить зависимость от традиционных источников энергии, снижают затраты на энергоносители и способствуют уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

4. Геотермальное автономное теплоснабжение в ЖКХ – это система, которая использует тепло грунта или воды, находящихся в недрах земли, для обеспечения отопления и горячего водоснабжения в жилых домах и коммунальных зданиях. Принцип работы такой системы заключается в использовании геотермального тепла, которое получается с помощью глубинных скважин, термальных насосов и системы теплообмена. Глубинные скважины проникают в землю на значительное расстояние, где температура постоянно выше, чем на поверхности земли [3]. Термальные насосы работают на основе теплового насоса, перекачивая теплоизбыток из земли в систему отопления и горячего водоснабжения. Система теплообмена передает полученное геотермальное тепло в частный дом или здание. Главным преимуществом геотермальных установок является экологическая чистота, что обуславливается снижением выбросов парниковых газов, так как не требует сжигания топлива. Кроме того, их работа не зависит от погодных условий, что обеспечивает непрерывность и стабильность производства энергии. В целом, геотермальное теплоснабжение в ЖКХ является перспективным и эффективным решением для обеспечения надежного и экологически чистого отопления и горячего водоснабжения в жилых и коммунальных зданиях.

Эти автономные источники энергоснабжения позволяют повысить надежность и эффективность работы систем ЖКХ, а также снизить затраты на энергию и негативное воздействие на окружающую среду.

Вопрос о том, что лучше – центральные или автономные источники энергоснабжения, зависит от различных факторов и конкретной ситуации. Центральные источники энергоснабжения, такие как электростанции или тепловые сети, могут обеспечить эффективную передачу энергии на большие расстояния и снабжать большое количество потребителей. Они могут быть эффективными и экономически выгодными, особенно в плотно населенных городах или индустриальных зонах. Однако центральные источники энергоснабжения также имеют недостатки. Они подвержены сбоям в работе и неполадкам, которые могут привести к простоям в энергоснабжении. Есть также вопросы относительно неравного доступа к энергии и возможных экологических проблем, связанных с определенными типами центральных источников энергии, такими как энергетика на основе угля.

Таким образом, анализ показал, что автономные источники энергоснабжения могут быть более устойчивыми, особенно полезны в удаленных районах, где установка центральной инфраструктуры является дорогой или сложной. Однако, автономные источники энергии зачастую требуют больших начальных затрат, имеют ограниченную мощность, иногда бывают недостаточно эффективными и надежными для обеспечения большого количества потребителей или поддержания стабильного энергоснабжения в течение длительного времени. Поэтому решение применения автономных источников энергоснабжения зависит от конкретных условий и потребностей. Оптимальным решением могут быть гибридные системы, которые комбинируют оба типа источников энергии для обеспечения надежного и устойчивого энергоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошниченко А.А., Гордиевский Е.М., Кулганатов А.З., Сироткин Е.А., Ковалёв А.А. О недостатке использования дизельных генераторов при электроснабжении автономных потребителей // Научно-издательский центр "Империя". – 2018. – № 8 – С. 599–600.
2. Кокорина О.И. Преимущества и недостатки крышных газовых котельных // Прорывные научные исследования: проблемы, пределы и возможности: сб. ст. по итогам Межд. научно-практ. конф. – Новосибирск: АМИ, 2020. – С. 47–49.
3. Дворов И.М. Глубинное тепло Земли; отв. ред. доктор геолого-минералогических наук А.В. Щербаков. – М.: Наука, 1972. – 208 с.

МЕТОДИКА ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА ВОДЫ НА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МЕТОДОМ TOPSIS

М.И. Погодаев

Братский государственный университет,
управление аспирантурой и докторантурой, гр. ММЧМа-23

Научный руководитель: Д.С. Колтыгин, к.т.н., доцент каф. УТС ФЭиА БрГУ

Повышение надежности работы энергетического оборудования тепловой станции является актуальной проблемой для большинства тепловых электростанций на территории РФ. На сегодняшний день одним из ведущих нормативных документов, регулирующих процесс эксплуатации электрических станций, является Приказ Минэнерго России от 04.10.2022 N 1070 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. N 757, от 12 июля 2018 г. N 548» [1].

Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации устанавливают требования к эксплуатации объектов по производству электрической энергии и объектов электросетевого хозяйства, функционирующих в составе Единой энергетической системы России и технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем, в части обеспечения надежности функционирования указанных электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и возможности их использования по функциональному назначению в составе указанных электроэнергетических систем.

Совершенствование техники, увеличение единичных мощностей агрегатов и электростанций, повышение параметров пара (давления и температуры) предъявляют высокие требования к управлению технологическими процессами, которые в ряде случаев не могут быть выполнены руками человека. Для управления и регулирования процессами производства электрической и тепловой энергии широко применяются различные автоматические устройства, работающие в составе АСУТП (автоматизированной системы управления технологическими процессами) [1].

Сегодня АСУ ТП на ТЭС устаревают или вовсе отсутствуют. Процесс автоматизации требует дополнительных доработок и модернизации составных частей оборудования. Однако максимальную эффективность по учету комплексных показателей надежности состава оборудования ТЭС может принести внедрение современной системы учета параметров работы оборудования. Такая система позволит определить эффективность таких процессов, как сжигание угля в котлах, КПД котлов, содержание кислорода и иных составляющих в отработанных газах.

Для анализа существующей системы учета параметров оборудования рассмотрим оборудование котлотурбинного цеха (КТЦ) типовой ТЭС, установленной электрической мощностью 270 МВт. Пусть выработка электроэнергии за год составляет 928,3 млн кВт·ч, коэффициент использования установленной мощности – 42 %. ТЭЦ осуществляет свою работу в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Установленная тепловая мощность станции составляет 1529,3 Гкал/ч, в том числе 656,3 Гкал/ч – БРОУ, 873 Гкал/ч – отборов турбин.

Первый этап анализа системы учета параметров работы оборудования КТЦ предполагает подбор приборов учета расхода воды. Датчики учета позволяют определить баланс общего поступления питательной воды к котлоагрегатам, а также диагностировать процесс преобразования воды в перегретый пар. Кроме того, приборы учета позволяют выявить дополнительные расходы на восполнение потерь, образовавшихся в ходе производственной деятельности, что в свою очередь определяет возможность выявления мест повышенного расхода воды и устранения причин возникновения роста небаланса «питательная вода – пар». На втором этапе анализа параллельно с приборами учета по воде, в течении всего календарного года на каждом из десяти паровых котлов предполагается анализ работы приборов, позволяющих определять расход воды на котел, объем, давление и температуру пара на выходе из котла, расход газа на каждый котел, содержание кислорода в отработанных газах. Показания всех приборов учета в режиме онлайн выводятся на мониторы компьютеров, находящихся в тепловых щитах управления паровыми котлами. Предполагается, что архивирование полученных данных осуществляется на непрерывной основе, это позволяет проводить анализ работы котлов за любой период.

Для учета расхода воды на ТЭЦ (цеха, где вода используется для технологических нужд), необходимы промышленные приборы учета воды.

Промышленные расходомеры предназначены для измерения объема воды, проходящего по трубопроводу за единицу времени. Эти счетчики позволяют существенно сокращать расходы: предприятия платит лишь за тот объем, который был потреблен. Нередко промышлен-

ные приборы учета воды используются в качестве элемента контроля, когда для анализа нужна информация об объемах потребляемой жидкости.

Для определения оптимального датчика расходомера применим метод многокритериальной оценки альтернатив TOPSIS. Данный метод обширно используется в таких сферах, как энергетика [2], стратегическое планирование [3], интернет-индустрия [4], геолокационная оптимизация. Основная концепция метода заключается в том, что измеряется расстояние до идеального позитивного (ИПР) и идеального негативного решения (ИНР), и наилучшей признается альтернатива, имеющая наименьшее расстояние до первого и соответственно наибольшее до второго [5].

Для оценки параметров учета расхода воды на ТЭЦ автором работы были подобраны шесть моделей датчиков-расходомеров, которые соответствуют параметрам оборудования КТЦ ТЭЦ (табл. 1). Стоит отметить, что из представленных моделей акцент был сделан на датчики отечественного производства.

Таблица 1. Характеристика расходомеров

Наименование	Тип	Стоимость, руб.	Срок службы, лет	Межпроверочный интервал	Максимальное рабочее избыточное давление	Класс точности
Метран-360М	Кориолисовый	400 000	18	4	25	0,2
ИРГА-РВ	Вихревой	192 800	15	4	40	1
ТИРЭС ДУ 400	Вихревой, фланцевый	297 420	20	4	32	1,5
ЭМИС-ВИХРЬ 200	Вихревой, фланцевый	120 000	12	5	30	0,7
Sitrans FM MAG 3100	Электромагнитный	169000	25	5	69	1
ЭЛЕМЕР-РВ	Вихревой	284000	15	4	20	1

Параметры оценки для наиболее «привлекательного» варианта расходомера оценивались по таким параметрам как: стоимость, срок службы, межпроверочный интервал, максимальное рабочее избыточное давление, класс точности. Анализ литературы и исследований в сфере АСУ ТП позволили определить эффективность выбранных моделей,

Метод TOPSIS включает в себя ряд этапов [5]:

- нормализация оценок по критериям (1):

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \tag{1}$$

где x_{ij} – оценка альтернативы i по критерию j; m – количество альтернатив.

- определение взвешенной матрицы нормированных решений с учетом весов критериев, элементы которой определяются как:

$$u_{ij} = w_j \times n_{ij}, i = 1 \dots m; j = 1 \dots n \tag{2}$$

где w_j – вес j-го критерия; n_{ij} – нормализованное значение оценки альтернативы i по критерию j; n – количество критериев.

- определяется идеальное позитивное (ИПР) и негативное (ИНР) решение;

$$A^+ = ((\max_i u_i/j \in I), (\min_i u_i/j \in J)) \tag{3}$$

$$A^- = ((\min_i u_i/j \in I), (\max_i u_i/j \in J)) \tag{4}$$

- вычисляется расстояние альтернатив до ИПР и ИНР;

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(u_{ij} - A_j^+)^2},\ j = 1,2, \dots, m \tag{5}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(u_{ij} - A_j^-)^2},\ j = 1,2, \dots, m \tag{6}$$

- определяется интегральный показатель (коэффициент близости) для каждой сравниваемой альтернативы.

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (7)$$

Результаты расчетов, полученные методом многокритериальной оценки альтернатив TOPSIS представлены в табл. 2. Стоит отметить, что наибольший вес при принятии решения по выбору оптимального датчика задан параметру «Стоимость».

Таблица 2. Результаты расчетов коэффициента близости методом TOPSIS (критерий «Стоимость»)

Конфигурация	*Rj*	*Rj* норм	Ранг
Метран-360М	0,4731	0,1347	6
ИРГА-РВ	0,6510	0,1854	2
ТИРЭС ДУ 400	0,5180	0,1475	5
ЭМИС-ВИХРЬ 200	0,6721	0,1914	1
Sitrans FM MAG 3100	0,6242	0,1778	3
ЭЛЕМЕР-РВ	0,5733	0,1632	4

Таким образом, можно сделать вывод о том, что лучшим вариантом расходомера является ЭМИС-ВИХРЬ 200 (относительно низкая стоимость, срок службы, который позволит выполнить замену датчика через 12 лет на более технологически совершенный), а худшим – Метран-360М (высокая стоимость).

Рассмотрим еще два дополнительных сценария по выбору оптимального решения методом TOPSIS: наибольший вес принимает критерий Срок службы», все критерии имеют одинаковый вес (результаты расчетов представлены в табл. 3 и 4 соответственно).

Таблица 3. Результаты расчетов коэффициента близости методом TOPSIS (критерий «Срок службы»)

Конфигурация	*Rj*	*Rj* норм	Ранг
Метран-360М	0,5686	0,1672	3
ИРГА-РВ	0,5132	0,1509	4
ТИРЭС ДУ 400	0,6167	0,1813	2
ЭМИС-ВИХРЬ 200	0,4420	0,1299	6
Sitrans FM MAG 3100	0,7560	0,2223	1
ЭЛЕМЕР-РВ	0,5047	0,1484	5

Результаты расчетов отразили следующее: лучшим является датчик Sitrans FM MAG 3100 (самый высокий срок службы), худший вариант – ЭМИС-ВИХРЬ 200.

Таблица 4. Результаты расчетов коэффициента близости методом TOPSIS (баланс весов критериев)

Конфигурация	*Rj*	*Rj* норм	Ранг
Метран-360М	0,6682	0,1819	4
ИРГА-РВ	0,6185	0,1684	3
ТИРЭС ДУ 400	0,5172	0,1408	5
ЭМИС-ВИХРЬ 200	0,6921	0,1884	1
Sitrans FM MAG 3100	0,5519	0,1502	6
ЭЛЕМЕР-РВ	0,6260	0,1704	2

По результатам расчетов при балансе весов критериев лучшим является вариант ЭМИС-ВИХРЬ 200, худшим – Sitrans FM MAG 3100.

Для наглядности полученных результатов представим итоговые расчеты метода TOPSIS в виде графика.

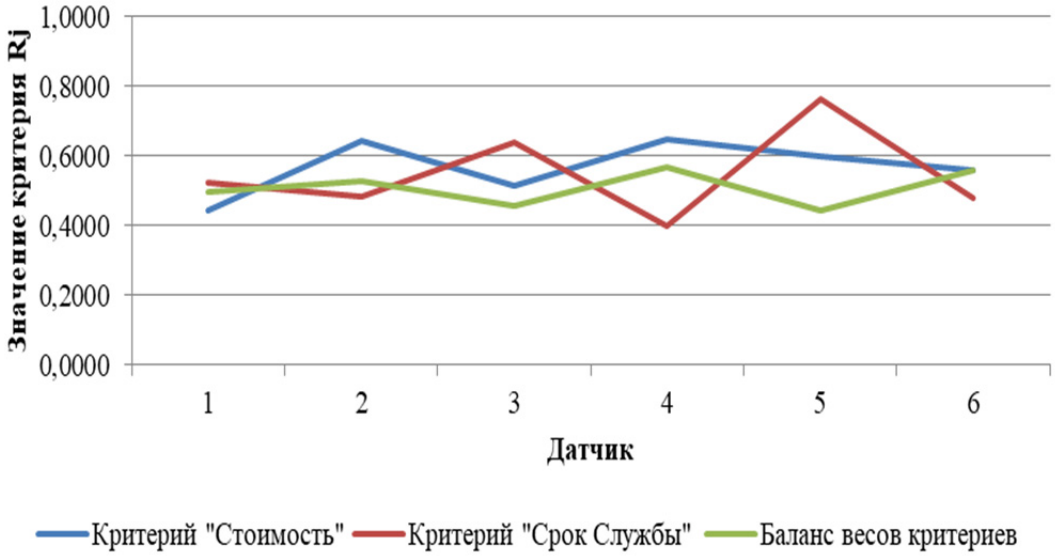


Рис. 1. График изменения коэффициента близости для рассматриваемых альтернатив

Комплексные меры по анализу и мониторингу АСУ ТП позволят снизить расходы на уголь и воду и, соответственно, отразятся на росте тарифов на теплоэнергию и электроэнергию. Кроме того, предполагается, что анализ системы учета параметров работы оборудования КТЦ позволит контролировать не только расход воды и пара, но и предоставит возможность определения КПД каждого котла, что позволит выбирать наиболее приоритетные и эффективные агрегаты для работы. С практической точки в ходе анализа можно провести модернизацию таких процессов как: подбор расхода угля; формирование отчета по процессу сжигания угля (содержание остаточного кислорода, серы и оксида углерода в уходящих газах); возможность проведения комплексного мониторинга показателей работы ТЭЦ с применением современных технологий, что, в будущем, может быть направлено на развитие исследований по получению «голубого водорода» на тепловых станциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АСУ ТП для систем накопления электроэнергии – ключевой элемент энергетической инфраструктуры // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 4(79). – С. 32–33. EDN HMNVEA.
2. Ching-Lai H., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making // In Multiple attribute decision making. – 1981. – P. 58191.
3. José F., Mousseau V., Roy B. ELECTRE methods // In Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. – 2005. – P. 133–153.
4. Bernard R. Classement et choix en présence de points de vue multiples // Revue franȷaise d'informatique et de recherche opérationnelle. – Vol. 2, iss. 8. – P. 57–75.
5. Assari Ali, T.M. Mahesh, Erfan Assari. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method // Indian Journal of Science and Technology. – Vol. 5, iss. 3. – P. 2289–2294.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И.А. Степин

ООО “ДЖЭТ ЛАБ”,
инженер 3 категории, проектный офис Томск

Научный руководитель: С.В. Букреев, директор, ООО “ДЖЭТ ЛАБ”

В рамках доклада рассматриваются результаты разработки имитационной модели подогревателя низкого давления (ПНД) и опытов, проведенных с её использованием.

Имитационная модель является основной для дальнейшей разработки цифрового двойника и представляет собой логико-математическую визуальную полномасштабную модель реального оборудования, воспроизводящую его внутренние процессы с максимально возможной точностью и обеспечивающую тепловые и энергетические балансы.

Создание имитационной модели включает в себя не только непосредственно ее разработку, но и комплексное исследование объекта моделирования. Поэтому данный этап является наиболее трудозатратным при создании цифрового двойника [1].

С помощью элементарных блоков ПО “САПФИР” выполнена разработка имитационной модели подогревателя низкого давления, представленной на рис. 1 [2].

Имитационная модель позволяет:

- проанализировать режимы работы теплообменного аппарата;
- проследить изменение параметров в контрольных точках при изменении свойств пара/основного конденсата;
- моделировать течи теплообменной поверхности и корпуса подогревателя;
- оценить влияние изменения геометрических характеристик оборудования;
- построить распределение температуры основного конденсата по тракту.

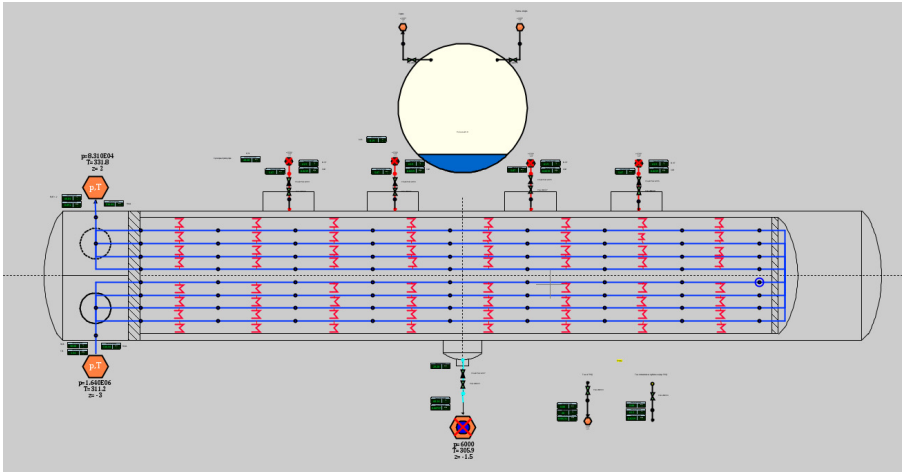


Рис. 1. Разработанная имитационная модель

Разбиение теплообменной поверхности

Модель выполнена с использованием 18 разбиений по ходу основного конденсата в теплообменнике. Разбиение теплообменной поверхности на узлы позволяет получать данные температур основного конденсата при его движении в теплообменнике.

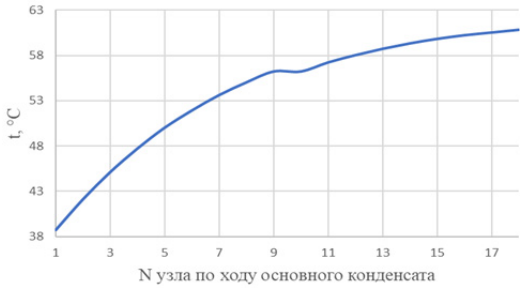


Рис. 2. Изменение температуры по узлам тракта основного конденсата

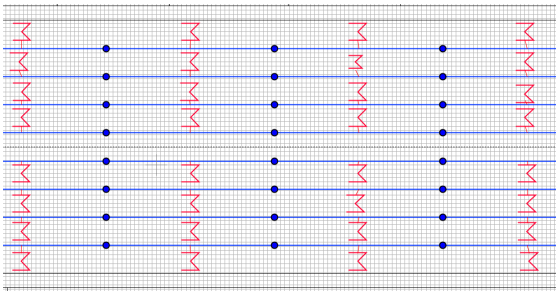


Рис. 3. Фрагмент теплообменной поверхности

Моделирование аварийных ситуаций

Имитационная модель позволяет моделировать аварийные ситуации, характерные для данного типа оборудования.

Течь теплообменной поверхности

Течь возникает в момент времени 5800 с.

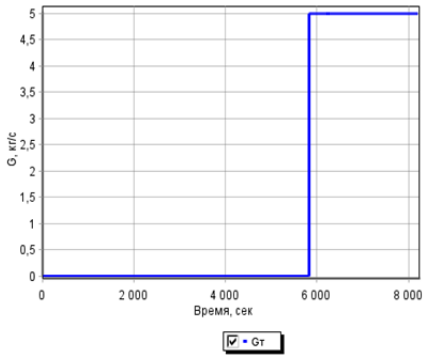


Рис. 4. Изменение расхода течи теплообменной поверхности ПНД

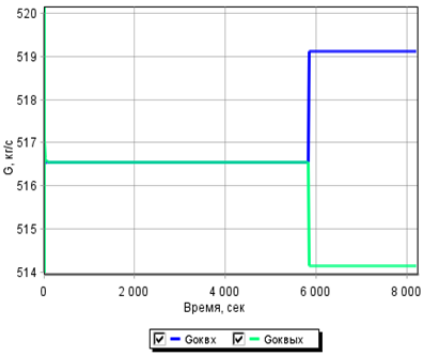


Рис. 5. Изменение расхода основного конденсата на входе и выходе ПНД при течи теплообменной поверхности

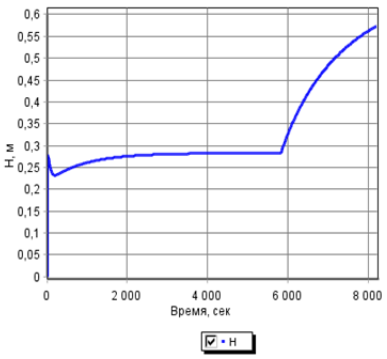


Рис. 6. Изменение уровня в корпусе ПНД при течи теплообменной поверхности

Течь корпуса подогревателя

Течь возникает в момент времени 5700 с.

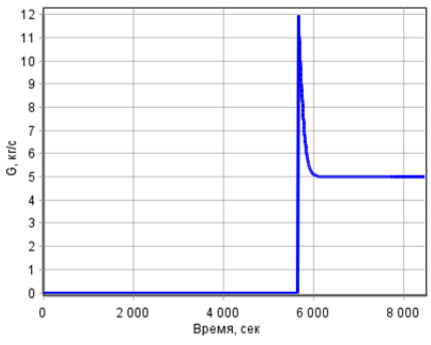


Рис. 7. Изменение расхода течи корпуса ПНД

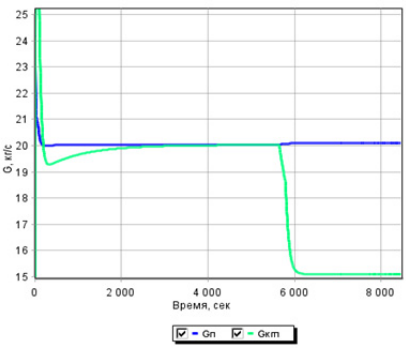


Рис. 8. Изменение расхода пара и конденсата греющего пара ПНД при течи корпуса

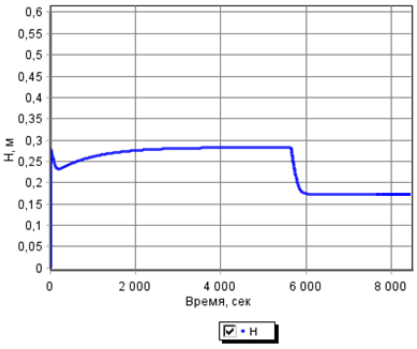


Рис. 9. Изменение уровня в корпусе ПНД при течи корпуса

Анализ изменения процессов теплообмена

Возможность введения коэффициентов коррекции на рассчитываемые коэффициенты теплоотдачи позволяет анализировать режимы ухудшенного теплообмена и оценивать процессы в теплообменном аппарате при наличии отложений.

Произведено моделирование при снижении коэффициентов теплоотдачи теплообменной поверхности на 10 %.

Снижение коэффициентов теплоотдачи на 10 % ведёт к снижению:

- температуры выхода основного конденсата на 0,64 %;
- расхода пара на 1,73 %;
- уровня в корпусе ПНД на 1,58 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с., ил.
2. Теплогидравличекий код CMS. Описание кода. Верификационный отчет. Книга 1, 2015. – 120 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИХРЯ В КАМЕРНОЙ ТОПКЕ

К.И. Мальцев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А0-46

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Уголь на протяжении многих десятилетий является одним из самых дешевых и доступных источников энергии. Но при этом более 60 % генерирующих мощностей в Российской Федерации имеют срок эксплуатации 30 лет и более [1, 2]. В связи с этим в процессе выработки разреза происходит изменение теплотехнических свойств сжигаемого топлива и исчерпание его запасов.

Одним из способов сжигания твердого топлива является факельное сжигание и применение тангенциальной схемы, которая создает в центре топочной камеры высокотемпературное ядро горения, при этом в непосредственной близости у экранных поверхностей температура снижается и находится в допустимых значениях [3].

Применение тангенциальной схемы сжигания имеет положительный эффект при одинаковых размерах ширины и глубины топочной камеры. В случае превышения соотношения сторон топочной камеры более 1,2 аэродинамическая структура изменяется, и может происходить наброс факела на экранные поверхности нагрева. Например, топочная камера парового котла БКЗ-220-100 прямоугольного сечения 6656×9536 снабжена четырьмя щелевыми горелочными устройствами, направленными по касательной к окружности 1330 мм (рис. 1).

Результаты численного моделирования [4] показали смещение высокотемпературных потоков на выходе из горелок на экранные поверхности в углах топки. Потоки с наименьшим углом атаки отклоняются и ударяются о фронтовой и тыльный экраны топки, создавая опасные условия по температурным напряжениям и шлакованию.

С целью устранения негативных факторов воздействия на экранные поверхности предлагаются два варианта установки сопел: четырех на высоте 4325 мм на фронтовом и тыльном экранах и восьми на высоте 4325 и 5925 мм соответственно. Через сопла прямоугольного се-

чения 500×250 мм в первом варианте и 400×150 мм во втором со скоростью 50 м/с осуществляется подача вторичного воздуха в размере 20 % от теоретически необходимого.

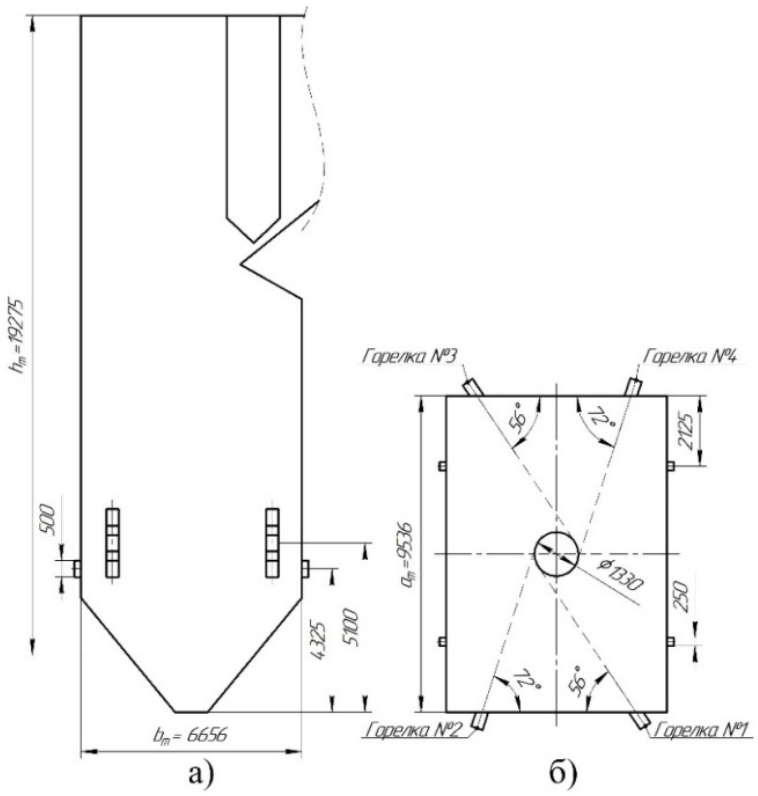


Рис. 1. Эскиз топки парового котла БКЗ-220-100:
а – продольное сечение; б – сечение в плане с расположением горелочных устройств

Численные исследования процессов в топочной камере проведены с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent, который является передовым программным продуктом для моделирования гидрогазодинамических процессов с использованием метода конечных элементов.

Воздушные сопла обеспечивают создание вихря преимущественно в центре топочной камеры, поток воздуха, подаваемого через четыре сопла, отбивает поток дымовых газов от фронтовой и тыльной стен (рис. 2, *а*), тем самым снижая температуру продуктов горения в районе экранных поверхностей. Наименьший эффект представляет собой наличие восьми сопел (рис. 2, *б*), в виду уменьшенного массового расхода воздуха для соблюдения скоростей окислителя.

В горизонтальном сечении на уровне горелочных устройств при использовании 4 сопел (рис. 3, *а*) ядро горения располагается преимущественно в центре топочной камеры и не имеет прямого контакта с экранными поверхностями, что снижает вероятность шлакования и пережога экранных труб.

Применение восьми сопел (рис. 3, *б*) не способствуют изменению положения факела по сравнению с базовым вариантов [5], что обуславливается уменьшенным расходом воздуха, подаваемого через них.

В результате численного моделирования выполнено сравнение влияния воздушных сопел на процессы в топочной камере парового котла БКЗ-220-100. Применение четырех сопел способствует снижению температуры у фронтового и тыльного экранов топки ниже температуры начала шлакования. Использование же восьми сопел не дает какого-либо эффекта в виду сниженных расходов воздуха на каждое сопло.

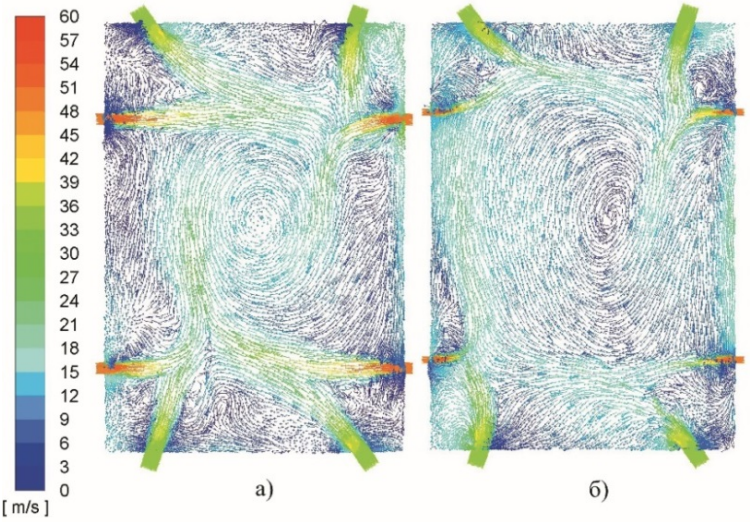


Рис. 2. Векторное поле скоростей в горизонтальном сечении на высоте 4325 мм: а – 4 сопла; б – 8 сопел

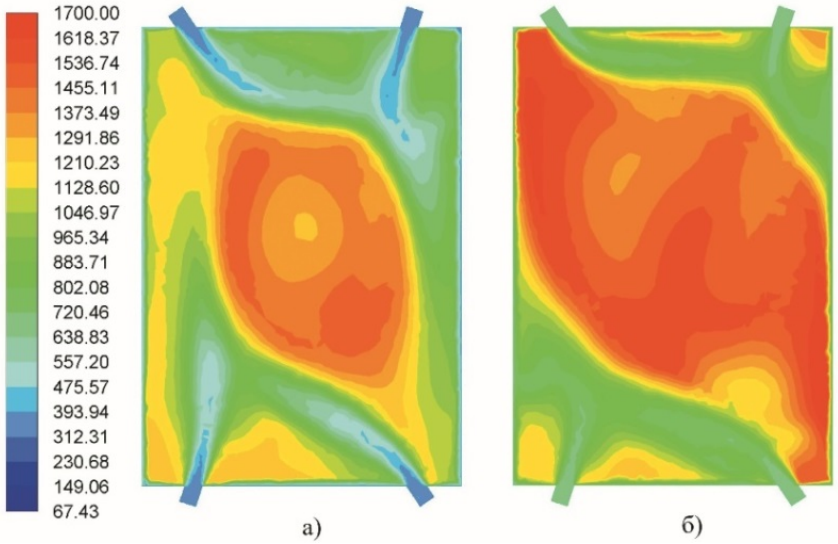


Рис. 3. Распределение температуры в горизонтальном сечении на уровне горелочных устройств: а – 4 сопла; б – 8 сопел

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00274, https://rscf.ru/project/23-29-00274/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов. – Л: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Хзмалян Д.М., Каган А.Я. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
3. Математическое моделирование топочных процессов при факельном сжигании твердого топлива / А.В. Гиль, К.И. Мальцев, А.С. Заворин, А.В. Старченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2022. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 44–58.
4. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле паропроизводительностью 220 т/ч / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь // Теплоэнергетика. – 2022. – Т. 12. – № 12. – С. 73–83.
5. 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.

Секция 4
Экологические проблемы энергетики

БИО-УГОЛЬНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ СВЧ-ПИРОЛИЗА

И. Калинич[1], Р.Б. Табакаев[2]

[1] Томский политехнический университет, ОЭФ
[2] Тюменский государственный университет, X-BIO. Лаборатория РТТПБ

[1] Научный руководитель: А.В. Мостовщиков, д.т.н., профессор, ОХИ ТПУ

По оценкам экспертов [1] ископаемое топливо (уголь, природный газ, нефтепродукты) на протяжении значительного времени будет оставаться основным ресурсом в топливно-энергетическом балансе. Однако традиционная энергетика является одним из главных источников выбросов парниковых газов и вредных веществ (NOx, SOx, CO и др.) [2]. Стремясь снизить количество таких выбросов, активно внедряются технологии на возобновляемых источниках энергии, в частности CO_2-нейтральной биомассы. Одним из перспективных направлений в данный момент рассматривается использование био-угольных топливных композиций и бездымного топлива на их основе [3, 4].

В последнее время активно развивается направление СВЧ-пиролиза органических топлив с целью получения ценных энергетических продуктов для энергетики, химической и металлургической промышленностей. Этот подход представляется актуальным из-за многочисленных преимуществ использования микроволновой энергии, наиболее значимыми из которых являются сокращение времени и энергетических затрат процесса [5]. Развитие данного направления требует расширения имеющихся знаний в данной области. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза био-угольных топливных композиций на основе каменного угля и навоза крупнорогатого скота.

Экспериментальные исследования выполнены на лабораторном стенде СВЧ-пиролиза (рис. 1), подробно описанным в работе [6]. В качестве объекта исследования рассмотрены каменный уголь и навоз крупнорогатого скота (табл. 1), и топливные композиции на их основе (доля навоза в угле – 10 и 20 % мас.). Пробы предварительно выдерживали до воздушно-сухого состояния, измельчали менее 200 мкм, затем прессовали в гранулы массой 3 г (диаметр 12 мм). Гранулы размещали в кварцевой трубке реактора, после чего генерировали СВЧ-излучение при помощи магнетрона (частота 2,45 ГГц, мощность 750 Вт). Поглощая излучение, образец нагревался, в результате чего происходила его термическая деструкция с выделением «летучих» продуктов (пары смолы и пирогенетической воды, газа). Летучие

продукты направляли через систему очистки в газоанализатор для определения состава генерируемого газа. Углеродистый остаток извлекали, взвешивали его массу, составляли материальный баланс.

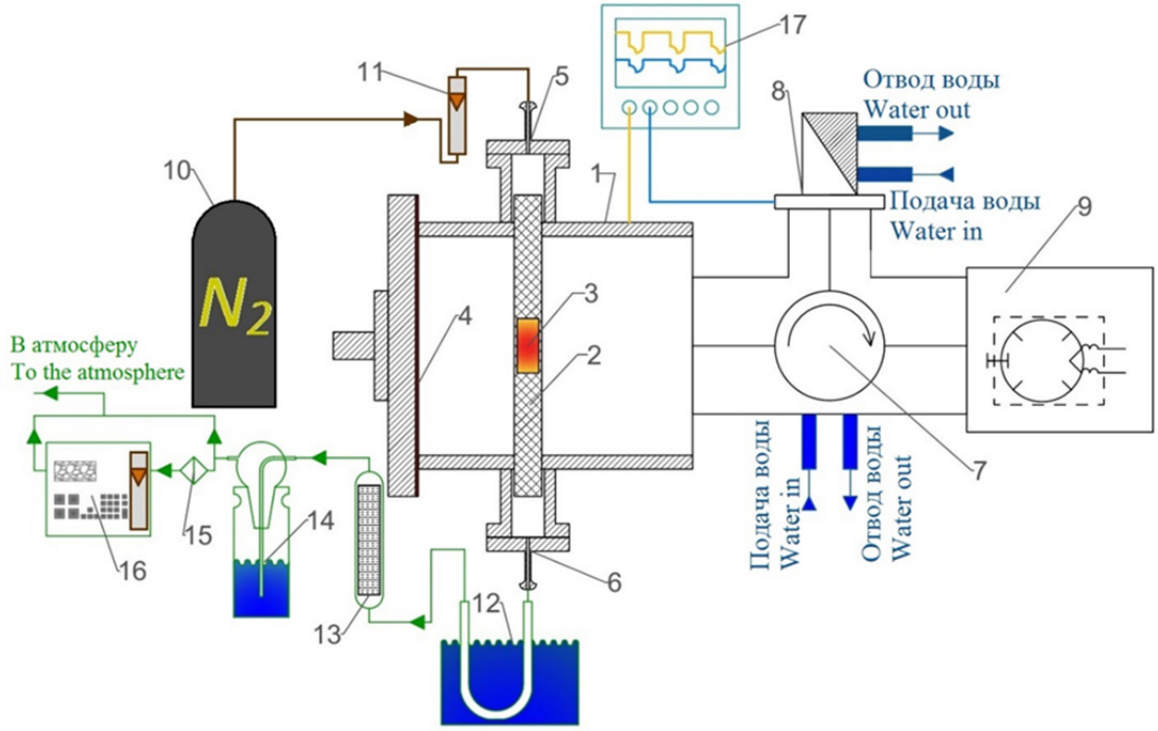


Рис. 1. Установка микроволнового пиролиза:
1 – реактор, 2 – кварцевая трубка, 3 – цилиндрический образец,
4 – подвижная мембрана с механизмом регулировки, 5 – штуцер подачи азота,
6 – штуцер отвода газа; 7 – микроволновый циркулятор, 8 – нагрузка,
9 – магнетронный СВЧ генератор, 10 – бак с азотом, 11 – ротаметр, 12 – теплообменник,
13 – стеклянный фильтр, 14 – гидравлический затвор, 15 – фильтр очистки пробы
(PTFE, пористость 0,2 мкм), 16 – газоанализатор, 17 – осциллограф

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья и топливных композиций на его основе

Образец	Рабочая влажность, %	Зольность на сухую массу вещества, % мас.	Выход летучих веществ, % мас.	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Элементный состав на сухую массу вещества, % мас.				
					C^d	H^d	N^d	S^d	O^d
Каменный уголь (КУ)	10,6	8,3	37,7	24,88	74,00	4,11	2,25	0,45	10,89
Навоз (Н)	9,0	15,6	75,2	14,92	45,05	4,98	2,27	0,19	31,91
КУ (90) + Н (10)	10,4	9,0	41,6	23,88	71,11	4,20	2,25	0,42	13,02
КУ (80) + Н (20)	10,3	9,8	45,2	22,89	68,21	4,28	2,25	0,40	15,06

Результаты проведенного исследования показаны на рис. 2 и табл. 2. Видно, что при пиролизе исходного сырья (каменного угля и навоза) получен пиролизный газ с высоким содержанием водорода (21 и 31 % об. для навоза и каменного угля соответственно). При этом газ, полученный из каменного угля, практически не содержит диоксида углерода. Используя методику [7], определена теплотворная способность полученных газов по их компонентному составу: Q_i^d для газа из навоза – 21,32 МДж/м^3, Q_i^d для газа из каменного угля – 24,16 МДж/м^3. Полученные результаты согласуются с литературными данными [8, 9].

Стоит отметить, что в составе пиролизного газа (рис. 2), полученного из био-угольных композиций, отсутствует диоксид углерода (CO_2), который должен присутствовать при расчетной оценке (табл. 3). Остальные определенные компоненты газовой смеси (H_2, CO и CO_2) отличаются от расчетных значений менее чем на 10 % отн. При этом добавление навоза к каменному углю позволяет существенно сократить время на инициирование процесса: добавление 10 % навоза – в 3.1 раза, 20 % – в 3.7 раза.

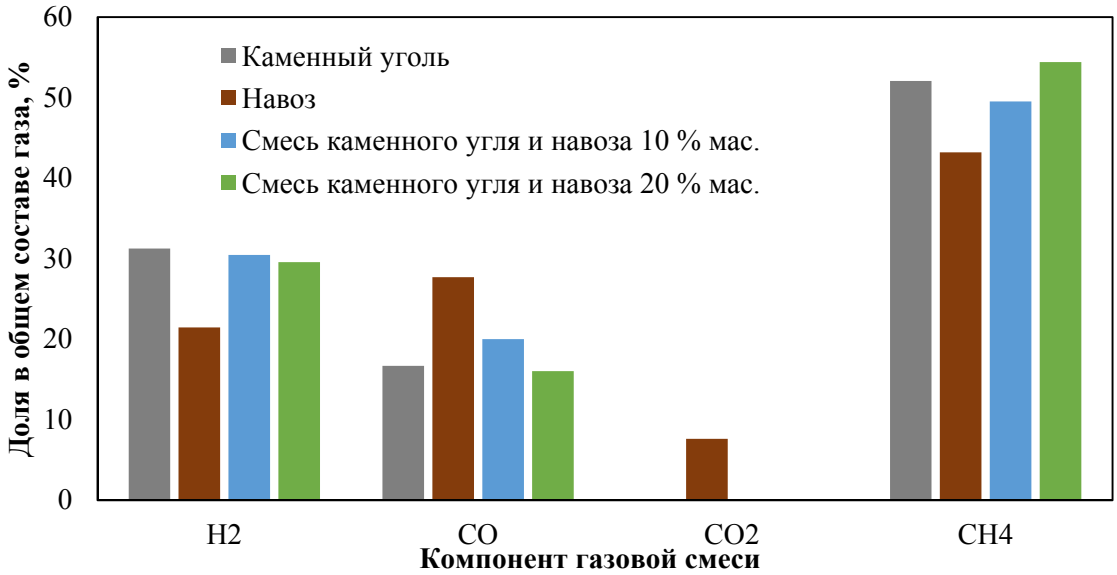


Рис. 2. Экспериментально полученный состав пиролизного газа

Таблица 2. Времена инициирования процесса СВЧ-пиролиза в зависимости от перерабатываемого сырья

Параметр	Перерабатываемое сырье			
	Каменный уголь (КУ)	Навоз (Н)	КУ 90 %, Н 10 %	КУ 80 %, Н 20 %
Время инициирования процесса, с	660	76	211	179
Выход твердого продукта, %	62,0	34,5	60,1	56,5

Таблица 3. Состав генерируемого пиролизного газа, полученный расчетным путем

Перерабатываемое сырье	Состав генерируемого газа, %				Теплота сгорания Q_i^d,МДж/м^3
	Водород (H_2)	Монооксид углерода (CO)	Диоксид углерода (CO_2)	Метан (CH_4)	
Каменный уголь (90 %) и навоз (10 %)	30,3	17,8	0,8	51,1	23,85
Каменный уголь (80 %) и навоз (20 %)	30,5	17,6	0,6	51,3	23,91

Таким образом, можно прийти к выводу, что добавление биомассы (например, навоза крупнорогатого скота в количестве 10–20 % по массе) к углю позволяет существенно снизить время инициирования процесса СВЧ-пиролиза (более чем в 3 раза). При этом теплотворная способность газа изменяется несущественно, а состав генерируемого газа можно предварительно оценивать расчетным путем, зная выход и состав продуктов для каждого из компонентов био-угольной смеси.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 22-19-00410 «Разработка научно-технических основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang L., Xue D., Wei Z., Chen Zh., Mirzayev M., Chen Y., Chen Sh. Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification // Energy Reviews. – 2022. – Vol. 1. – Iss. 1. – Art. no 100004. https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100004
2. World Energy Outlook Special Report (2016) Energy and air pollution. International Energy Agency, Paris.
3. Косторева Ж.А. Обоснование параметров древесно-угольных смесей в качестве топлива котельных агрегатов: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – 2022, 110 с.
4. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. Coal–biomass co-combustion: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 39. – P. 575–586. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106
5. Arpia A.A., Chen W.H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 403. – Art. no 126233. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126233
6. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив / Р.Б. Табакаев, И.Д. Димитрюк, И.К. Калинич, А.В. Астафьев, А.В. Гиль, К.Т. Ибраева, П.Ю. Чумерин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 190–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
7. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.
8. Fernández Y., Menéndez J.A. Influence of feed characteristics on the microwave-assisted pyrolysis used to produce syngas from biomass wastes // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2011. – Vol. 91. – P. 316–322. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.03.010.
9. Matamba T., Tahmasebi A., Yu J., Keshavarz A., Abid H.R., Iglauer S. A review on biomass as a substitute energy source: Polygeneration influence and hydrogen rich gas formation via pyrolysis // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – Vol. 175. – Art. no. 106221. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106221

ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР

Д.Г. Веретенников

Томский политехнический университет,
ИЯТШ, ОЯТЦ, гр. 0АМЗИ

Научный руководитель: С.В. Беденко, к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ

В реакторах ВВЭР используется топливо UO_2, обогащенное до 3–5 % по U^{235}. Такое топливо обладает сравнительно низкой радиационной и термической стойкостью, что ограничивает эффективность работы реактора и снижает его безопасность.

Практическое применение получило уран-гадолиниевое топливо UO_2 + 5–8 мас. % Gd_2O_3. Ведутся исследования топлива с добавкой с AmO_2, которую предлагается использовать как выгорающий поглотитель нейтронов [1]. Для длительной и эффективной работы реактора топливо легируют различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями. В качестве легирующих добавок также рассматриваются B, Be, B, C, Mg, Al, Si, Hf, Er, Pa и др. Эти элементы улучшают радиационную и термическую стойкость топлива, его теплопроводность, теплофизические и нейтронно-физические параметры активной зоны. Например, теплопроводность топлива улучшается при добавлении в него различных соединений бериллия [2]. При внедрении добавок алюминия и кремния возрастает механическая прочность топливной таблетки UO_2 благодаря увеличению размеров зерна [3].

Тем не менее, не смотря на ряд преимуществ, некоторые из вышеперечисленных элементов являются целевыми для (α, n)-реакций и потому могут существенно осложнить радиационную обстановку на различных стадиях открытого и закрытого ядерно-топливного цикла. Используемое на практике уран-гадолиниевое топливо имеет сниженное значение теплопро-

водности (на 20 %) [3], поэтому проводятся исследования по поиску иных выгорающих поглотителей.

Целью данной работы является определение нейтронно-физических и радиационных характеристик наиболее оптимального состава модифицированного топлива для реактора ВВЭР-1200. В рамках данной работы поставлен ряд задач: анализ источников альфа- и нейтронного излучения свежего и облученного топлива, анализ выходов и спектров (α, n)-нейтронов из легирующих элементов малой и средней атомной массы, нейтронно-физический расчёт (k_{eff}) ТВС и расчёт выгорания ($N_i(t)$) топлива, расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения ОЯТ.

Расчёты выходов и спектров (α, n)-нейтронов из элементов малой и средней атомной массы выполнены в программе Sources-4C. В качестве расчётной модели использовалась модель плоскопараллельного моноэнергетического пучка α-частиц, падающего на материал мишени с интенсивностью 10^6 α-частиц/с. Энергия α-частиц принята равной 5,15 МэВ как средняя по спектру α-частиц отработавшего ядерного топлива реактора типа ВВЭР при значении выгорания равного 60 МВт·сут/т(U), при этом выдержка составляет год и более, а удельная активность радиоизотопов – $2{,}58\cdot10^{15}$ Бк/ТВС. Рассматриваются нейтроны с энергией 0–12 МэВ, данный диапазон разделен на 48 моноэнергетических групп для расчёта и представления спектра в групповом виде.

Рассматриваются два топливных состава с обогащением 4,9 % по U^{235}: UO_2 и UO_2+0,2 ат. % AmO_2.

Расчёт нейтронного излучения ОЯТ выполнен в Sources-4C с использованием гомогенной модели топлива. Источниками альфа-частиц и нейтронов спонтанного деления являются различные тяжелые изотопы, возникающие в топливе в результате ядерных реакций. Материалом мишени являются изотопы O^{17} и O^{18}, являющиеся целевыми для (α, n)-реакции и входящие в состав UO_2. По полученным данным о нейтронных спектрах рассчитана мощность эквивалентной дозы согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 года.

Активность источника α-частиц ОЯТ получена с помощью MCNP6.2 и данных авторов [1]. Нейтронно-физический расчёт и расчёт изотопного состава ОЯТ проведены в программах WIMS-D5B и MCNP6.2. Расчётная модель WIMS-D5B представляет собой элементарную ячейку упрощенной геометрии ТВС ВВЭР-1200, где реальные шестигранные ячейки заменяются на эквивалентные им цилиндрические.

На рис. 1 демонстрируются результаты расчета по Sources-4C выхода нейтронов (Y_n) и их энергетического распределения для элементов (E_n), которые рассматриваются для применения с целью улучшения свойств топлива и активной зоны реактора типа ВВЭР

В табл. 1 сведены результаты расчетов выходов (α, n)-нейтронов на Be, Al, Si и O (UO_2) в случае их присутствия в составе ОЯТ. Результат получен по данным рис. 1 (выход на ядрах O получен по гомогенной модели для UO_2) для ОЯТ активностью $2{,}58\cdot10^{15}$ Бк/ТВС ($\omega_\alpha = 4{,}47\cdot10^{-3}$ Бк·с$^{-1}$). Для сравнения также представлены характеристики спектров нейтронов спонтанного деления ^{244}Cm.

Таблица 1. Радиационные характеристики спектров нейтронов в сравнении

	^{9}Be	^{27}Al	^{29,30}Si	^{17,18}O (UO_2)	^{244}Cm
Y_n, нейтр./с	$1{,}308\cdot10^{9}$	$6{,}490\cdot10^{6}$	$1{,}922\cdot10^{6}$	$3{,}315\cdot10^{5}$	$5{,}773\cdot10^{6}$
$E_{ср}$, МэВ	4,787	0,992	1,318	2,510	2,109
E_{max}, МэВ	10,75	2,25	3,5	6,5	>12

Нейтронно-физический расчёт ТВС с топливом из UO_2 показывает, что на начало кампании реактора k_{eff} составляет 1,35. При гомогенном введении 0,2 ат. % AmO_2 начальный k_{eff} снижается до 1,27. В обоих случаях k_{eff} на конец кампании реактора равен 0,77.

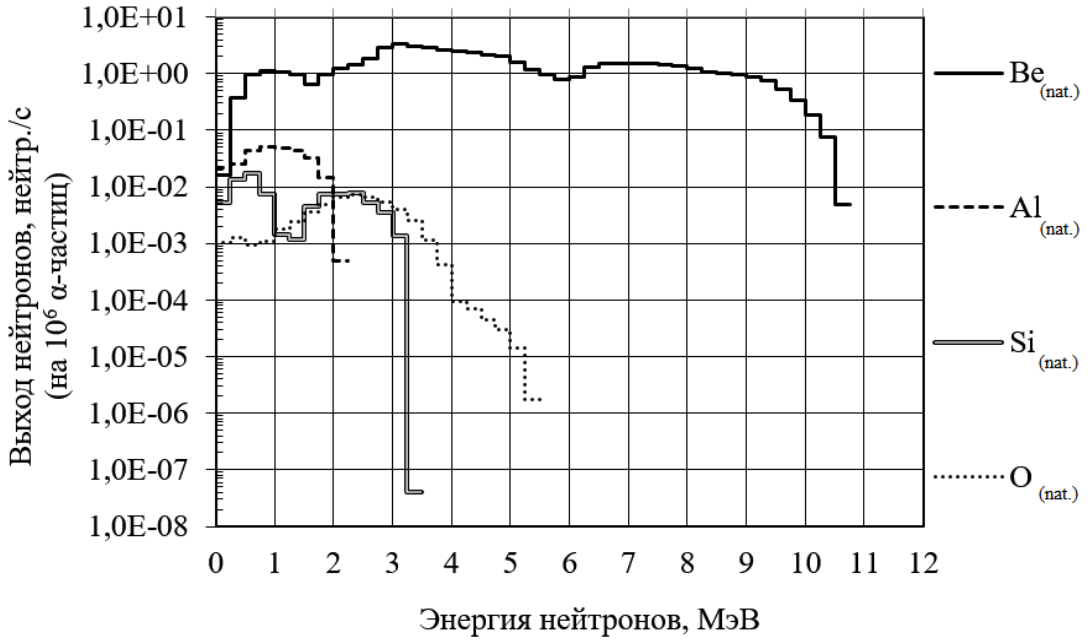


Рис. 1. Нейтронные спектры целевых для (α, n)-реакции элементов

Результаты расчёте мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения ($H_{T,R}$) после 7 лет выдержки следующие: при использовании топлива из UO_2 $H_{T,R}$ = 6,18 Зв/(ч·ТВС), при введении 0,2 % AmO_2 $H_{T,R}$ увеличивается до 15,98 Зв/(ч·ТВС).

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и табл. 1 показывает, что ^{9}Be, ^{27}Al и ^{29,30}Si обладают большим выходом (α, n)-нейтронов по сравнению с ^{17,18}O в составе UO_2. При этом бериллий имеет выход даже более значительный, чем выход нейтронов спонтанного деления ^{244}Cm, являющегося основным источником нейтронов ОЯТ. Учитывая, что данные элементы также уменьшают ураноёмкость топливных таблеток и усложняют технологический процесс их изготовления, сделан вывод о нецелесообразности их применения в качестве легирующих добавок.

Результаты нейтронно-физического расчёта подтверждают эффективность применения AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя нейтронов в UO_2. Так как америций является более слабым поглотителем по сравнению с гадолинием, топливо размещается в твэлах без изменения обогащения. В таком случае легирующая добавка не влияет на неравномерность энерговыделения в ТВС. Кроме того, AmO_2 (0,2 ат. %) в гомогенном исполнении не ухудшает теплопроводность топлива, в отличие от Gd_2O_3 [1].

Результаты расчёта мощности эквивалентной дозы показывают, что дозовая нагрузка при использовании топлива с AmO_2 возрастает, но остаётся приемлемой при обращении с ОЯТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shelley A. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor / A. Shelley, M.H. Ovi // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 2454–2463.
2. Савченко А.М. Перспективные научно-технические разработки материалов и технологий безопасных твэлов коммерческих водо-водяных реакторов // Технико-экономическая оценка (исследование – ТЭИ) Проекта. – 2017. – 41 с.
3. Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива / В.Г. Баранов и др. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 1. – С. 36–40.

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ ПРИ СЖИГАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ НЕФТЕШЛАМА

Д.К. Шведов, В.В. Дорохов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ33

Научный руководитель: В.В. Дорохов, инженер-исследователь, НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В современном мире при активном развитии нефтяной промышленности невозможно полностью устранить ее негативное воздействие на окружающую среду. При этом значительный вклад в загрязнение экосистемы вносят нефтесодержащие отходы. Они образуются в результате добычи, транспортировки, переработки нефти. Кроме того, крупные области загрязненных нефтесодержащих отходов распространяются на значительные территории и служат источником дополнительного загрязнения почвы, воздуха, поверхностных и подземных вод, что представляет серьезную угрозу для здоровья человека. На сегодняшний день наиболее распространенным методом обращения с нефтешламами является их складирование в хранилищах-накопителях непосредственно на территории предприятий топливно-энергетического комплекса. В связи с вышеперечисленным появляется научный интерес в исследовании методов утилизации нефтяных отходов [1].

Нефтешламы представляют собой сложные физико-химические составы, состоящие из нефтепродуктов, воды и механических примесей. Концентрации элементов зависят от источника образования, условий и времени хранения смесей [2].

В качестве исследуемых топлив использовались смеси нефтешлама с различными добавками (дизель, спирт, техническая вода).

Схема стенда, использующегося для определения антропогенных выбросов представлена на рис. 1. В результате сжигания нефтешлама образуются оксиды азота, углерода и серы.

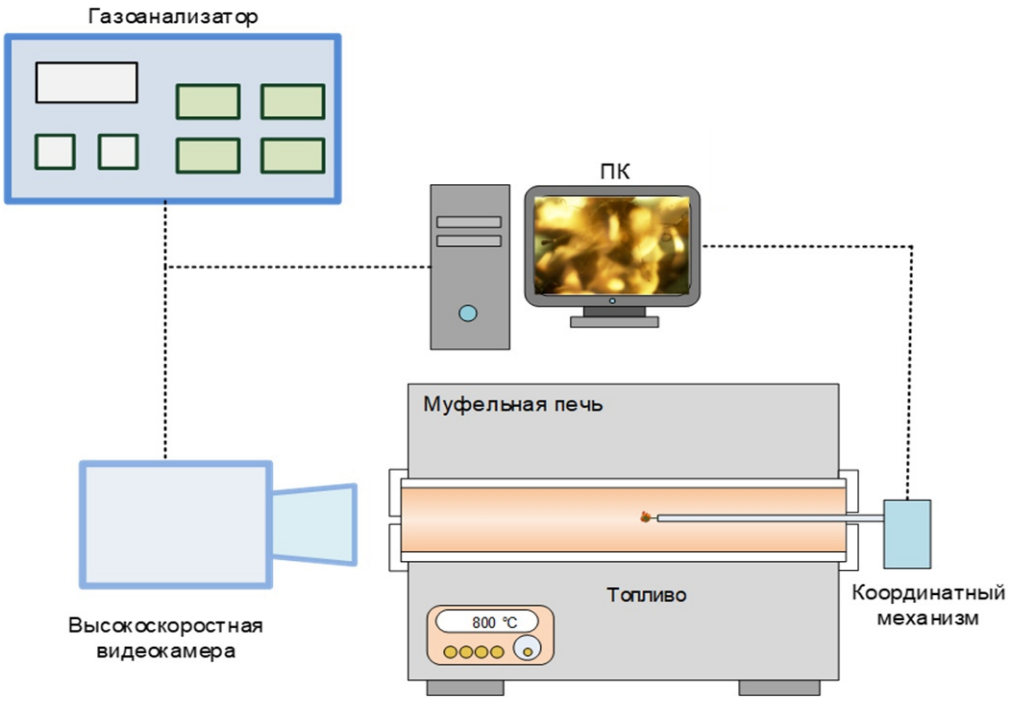


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Отношение оксидов углерода в составе дымовых газов показывает, насколько полно происходит выгорание топлива. CO_2 является продуктом полного выгорания, а CO в составе дымовых газов говорит о неполном сгорании образца топлива. Соответственно, чем выше отношение CO_2/CO в дымовых газах, тем более полно происходит выгорание топлива.

Существует несколько механизмов, приводящих к образованию оксидов азота. Большая часть NO_x образуется в процессе сгорания азотистых частиц, выделяющихся вместе с летучими веществами. Другими словами, большая часть оксидов азота образуется непосредственно при термическом разложении топлива. Также существует механизм образования термических оксидов азота, при котором оксиды азота образуются в зоне максимальной температуры (механизм Зельдовича), и «быстрых оксидов», когда оксиды азота образуются в начальной части факела (механизм Фенимора).

Механизм Зельдовича описывается системой реакций [3]:

$$O + N_2 \rightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2)$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (3)$$

Образование «быстрых» оксидов азота более сложный, в нём участвуют радикалы CH, выступающие в качестве промежуточного компонента в процессе горения. Радикалы CH, образующиеся во фронте горения, реагируют с азотом и образуют цианистоводородную кислоту HCN, которая затем реагирует с образованием NO. Лимитирующей стадией в этом случае является реакция:

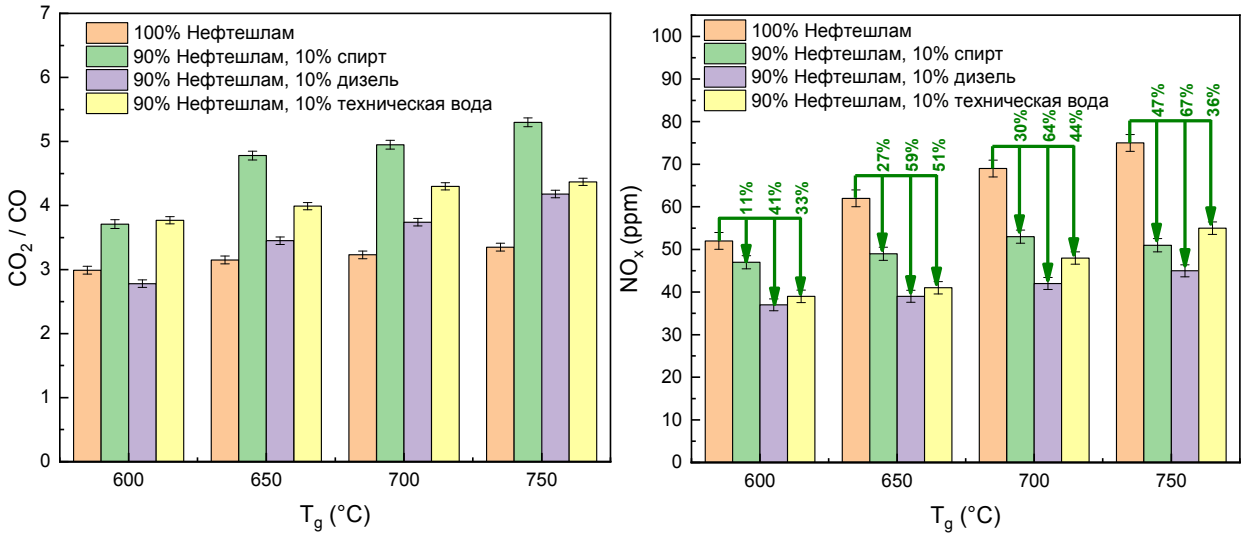
$$CH + N_2 \rightarrow HCN + N \quad (4)$$

На рис. 2, *а* представлены отношения концентраций углекислого и угарного газов в составе продуктов сгорания. Отчетливо видно, что использование добавок позволяет увеличить соотношение CO_2/CO. Это позволяет сделать заключение о том, что добавки спирта, дизельного топлива и технической воды приводит к увеличению полноты выгорания топливной смеси. Исключением является добавка дизельного топлива при температуре 600 °C, поскольку для эффективного сжигания дизельного топлива в данном случае недостаточно температуры в камере сгорания, а при увеличении температуры окислительной среды до 650 °C и более наблюдается положительный эффект от использования добавки дизельного топлива.

Наибольшего эффекта удается достичь при использовании добавки метилового спирта. В зависимости от температуры окислительной среды в камере сгорания, добавка метилового спирта с массовой долей 10 % позволяет увеличить соотношение CO_2/CO на величину 24–58 %. Увеличение температуры в камере сгорания приводит к росту полноты выгорания всех исследуемых видов топлив. При увеличении температуры в камере сгорания в диапазоне 600–750 °C, отношение CO_2/CO для топлив с составом «100 % нефтешлам», «90 % нефтешлам, 10 % спирт», «90 % нефтешлам, 10 % дизель» и «90 % нефтешлам, 10 % техническая вода» увеличилось на 12, 43, 50 и 16 % соответственно.

На рис. 2, *б* представлены концентрации оксидов азота в составе продуктов сгорания исследуемых топлив. Наименьший уровень выбросов NO_x регистрировался при сжигании композиционного топлива с добавкой дизельного топлива. Причиной этого служит тот факт, что горение такого топлива наиболее равномерно. Соответственно, не происходило локальных подъемов температуры, приводящих к образованию дополнительных оксидов азота.

В зависимости от температуры в камере сгорания, по сравнению с «100 % нефтешлам», выбросы оксидов азота при сжигании композиционного топлива «90 % нефтешлам, 10 % дизель» снизились на величину в 41–67 %. При использовании любого вида добавки с массовой долей 10 % отмечалось снижение выбросов оксидов азота, поскольку внесение добавки приводило к снижению доли нефтяного компонента в составе композиционного топлива.



а *б*

Рис. 2. Отношение оксидов углерода (а) и концентрации оксидов азота (б) в составе дымовых газов при сжигании композиционных топлив на основе нефтешлама с массовыми долями добавок спирта, дизеля и технической воды 10 %

Вывод. Использование добавок в составе композиционного топлива на основе нефтешлама позволяет увеличить соотношение CO_2/CO в составе дымовых газов. Это позволяет сделать заключение о том, что добавки спирта, дизельного топлива и технической воды приводит к увеличению полноты выгорания топливной смеси.

Наименьший уровень выбросов NO_x регистрировался при сжигании композиционного топлива с добавкой дизельного топлива. Причиной этого служит тот факт, что горение такого топлива наиболее равномерно. Соответственно, не происходило локальных подъемов температуры, приводящих к образованию дополнительных оксидов азота. В зависимости от температуры в камере сгорания, по сравнению с «100 % нефтешлам», выбросы оксидов азота при сжигании композиционного топлива «90 % нефтешлам, 10 % дизель» снизились на величину в 41–67 %.

Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2020-806 (договор №13.1902.21.0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korshunova T.Y., Loginov O.N. Oil Sludge: Conditions of the Problem in the Russian Federation and Methods To Reduce Their Negative Influence on the Environment // Èkobioteh. – 2019. – Vol. 2, no. 1. – P. 75–85 doi: 10.31163/2618-964x-2019-2-1-75-85.
2. Самигуллина Л.М. Анализ состава и источников образования нефтешламов на нефтеперерабатывающих заводах // Молодой ученый. – 2022. – № 48 (443). – С. 70–73. – URL: https://moluch.ru/archive/443/96998/ (дата обращения: 10.11.2023).
3. https://ru.wikibrief.org/wiki/Zeldovich_mechanism (дата обращения 10.11.2023).

СПОСОБЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЁРДЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ НИЗКОЙ И СРЕДНЕЙ АКТИВНОСТИ

Д.И. Маленко, Е.А. Самохина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5001

Научный руководитель: А.Ж. Калтаев, ассистент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

Одной из главных проблем атомных электростанций (АЭС), является обращение с радиоактивными отходами (РАО). Отходы являются результатом процесса эксплуатации АЭС, особенно велико их количество при выводе станции из эксплуатации. Например, современный энергоблок может накопить в среднем от 200 до 400 м^3 твёрдых радиоактивных отходов (ТРО) ежегодно [1]. Стоимость хранения 1 м^3 низкоактивных РАО составляет более 60 000 рублей в год [2]. Таким образом, переработка РАО является необходимым условием для обеспечения радиационной безопасности и снижения экономических затрат. Основными принципами осуществления деятельности комплекса работ с ТРО являются: осуществление приемлемой по всем стандартам организации МАГАТЭ уровня радиационной безопасности, учитывающих социальные и экологические аспекты; выбранные методы должны отвечать всем запросам по сферам экономической составляющей, технологии обязаны оправдывать целесообразность переработки отходов, а также удовлетворять требованиям радиационной безопасности обслуживающего персонала; включение максимально возможного количества обработанных отходов, то есть конструкционных материалов и радионуклидов, в промышленный комплекс страны.

Выбор подхода к управлению РАО обусловлен характеристиками отходов, их количеством, уровнем радиоактивности и химическим составом. Уже при сборе отходов, строго соблюдается их классификация. В зависимости от физического состояния, радиоактивные отходы разделяют на жидкие (ЖРО), твердые (ТРО) и газообразные (ГРО) [3]. Согласно уровню загрязненности, ТРО делятся на три категории, и их характеристики приведены в табл. 1. Отходы, входящие в последнюю категорию и составляющие небольшую часть общего объема радиоактивных отходов АЭС, не подлежат переработке, а проходят процедуры кондиционирования и последующего захоронения.

Таблица 1. Классификация ТРО по уровню радиоактивной загрязнённости [3]

Критерий	Излучатели, единица	Гр. отходов		
		1 низкая	2 средняя	3 высокая
1	мэВ/ч	$1 \cdot 10^{-4} - 0{,}3$	$0{,}3 - 10{,}0$	10,0
2	β-Излучатели, Бк/кг;	$7{,}4 \cdot 10^4 - 3{,}7 \cdot 10^5$	$3{,}7 \cdot 10^6 - 3{,}7 \cdot 10^9$	$3{,}7 \cdot 10^9$
	α-Излучатели, Бк/кг.	$7{,}4 \cdot 10^4 - 3{,}7 \cdot 10^5$	$3{,}7 \cdot 10^5 - 3{,}7 \cdot 10^8$	$3{,}7 \cdot 10^8$
3	β-Излучатели, аст./(см^2·мин); α-Излучатели, аст./(см^2·мин).	$5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$ $5 - 1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^6$

На данный момент доступно несколько различных методов для переработки и последующей утилизации радиоактивных отходов. Выбор метода зависит от характеристик конкретного вещества и его активности, с учетом ранее описанных концепций [4, 5].

Сжигание – эффективный способ сокращения объема горючих отходов, таких как пластмассы, древесина, спецодежда, обтирочные материалы и т. д. В работе [1] авторами было установлено, что газовым поток уносит вплоть до девяноста девяти процентов нуклидов, которые присутствуют в форме солей, сажи, золы. Оставшуюся долю радиоактивных частиц,

один-два процента от общего числа, составляют смолы и пары. Такие отходы, как резины и прочие полимерные материалы, в твёрдой фазе покидают камеру сгорания и составляют от десяти до двадцати процентов от массы всех смол. Как отмечалось выше, процент уноса радионуклидов очень велик. В частности, речь идёт о ^{137}Cs, который составляет от десяти до шестидесяти процентов исходной активности в твёрдых радиоактивных отходах [1], более детальный радионуклидный состав можно увидеть в табл. 2.

При сжигании радиоактивных отходов, количество радионуклидов уменьшается в сорок пять раз. Однако следует также отметить, что при сжигании образуются дымовые газы в большом объеме. Образовавшимся газам необходима дополнительная очистка от радиоактивных и вредных химических веществ перед тем, как они будут выброшены в атмосферу [7]. Помимо газов, образуется зола, в которой сконцентрированы радиоактивные изотопы. Проблема заключается в отсутствии эффективной технологии по безопасной перевозке и захоронения радиационной золы. В настоящее время, для этих целей укомплектовывают целые промышленные установки, что становится дополнительной энергетической, финансовой нагрузкой для предприятия [1].

Таблица 2. Радионуклидный состав радиоактивных отходов низкой и средней активности Нововоронежской АЭС [6]

Радионуклиды	Доля в общей активности, %	Удельная активность твёрдых отходов, Бк/кг	Удельная активность отработанных ионообменных смол, Бк/кг
Cs-137	54,0	$7{,}94 \cdot 10^5$	$7{,}02 \cdot 10^6$
Cs-134	4,5	$6{,}62 \cdot 10^4$	$5{,}85 \cdot 10^5$
Co-60	22,00	$3{,}23 \cdot 10^5$	$2{,}86 \cdot 10^6$
Co-58	1,5	$2{,}2 \cdot 10^4$	$1{,}95 \cdot 10^5$
Sr-90	13,0	$1{,}9 \cdot 10^5$	$1{,}7 \cdot 10^6$
Mn-54	5,0	$7{,}4 \cdot 10^4$	$6{,}5 \cdot 10^5$
Сумма	100,0	$1{,}47 \cdot 10^6$	$1{,}3 \cdot 10^7$

Альтернативной метод обращения с РАО является плазменно-пиролитическая технология. Данная технология переработки является одностадийной и способна перерабатывать отходы смешанной морфологии [8]. Конечный продуктом является расплавленный шлаковый компаунд, который характеризуется высокой степенью химической и радиационной стойкости, отвечает всем требованиям экологической безопасности [9]. Согласно методике [8], сжигание РАО включает следующие операции: сжигание, прессование или суперкомпактирование. В результате проведения этих операций объем отходов уменьшается в 4–8 раз. В то же время при плазменно-пиролитическом методе переработки, объем отходов уменьшается в 40–45 раз [10, 11]. К достоинствам плазменно-пиролитической технологии перед уже рассмотренным сжиганием относят и другие показатели. Поскольку плазменно-пиролитическая технология переработки подходит для отходов смешанной морфологии, это исключает необходимость в дополнительных операциях по сортировке. Кроме того, технология имеет широкий диапазон применения, возможно эффективно перерабатывать промышленные, медицинские и бытовые отходы [11]. Характерный для технологии одностадийный процесс даёт преимущества в скорости и дешевизне обработки одного кубометра отходов, при этом существенно уменьшается объём, выбрасываемый в атмосферу вредных газов, вплоть до половины в сравнении с сжиганием. Вместе с тем, нельзя не обратить внимание на существенный недостаток плазменно-пиролитической технологии, в процессе работы, наблюдается высокий процент (десятки процентов) уноса легколетучих радионуклидов, в частности радиоактивного Cs^{137} [1].

Другая используемая технология по обращению с ТРО – метод прессования. Твёрдые отходы подлежат прессованию, если доза излучения на расстоянии 10 см от поверхности отхо-

дов не превышает 0,5 мЗв/ч. Производительность условной прессовочной установки составляет около 3 кубометров в час, при том, что время одного цикла равняется трём секундам. Результатом работы считаются пакеты, то есть кипы, твёрдых отходов. Технология улучшалась и в настоящее время используют метод горячего прессования, что даёт выигрыш в уменьшения объема полимерных отходов. При горячем прессовании гранулы полимерных поливинилхлоридных пластиков расплавляются под воздействием температуры и давления. К преимуществам можно отнести: уменьшение объема в два-три раза; в отличие от предыдущих методик, отсутствует выделение радиоактивных аэрозолей; спрессованные отходы можно транспортировать и хранить в более безопасных условиях.

Другой перспективной технологией является метод микробиологической переработки. Он основан на способности бактерий разлагать органические вещества, такие как пластмассы, резина, целлюлоза, ионообменные смолы. Для этого используется биореактор, в котором штамм бактерий разрушает предварительно обработанный синтетический материал. В процессе переработки происходит уменьшение объема отходов в 10–20 раз. Продуктом являются следующие газы: 50–80 % метана от общего числа газов, около 20 % углекислого газа, 1–2 % водорода и сероводорода. Часть радионуклидов, например, ^{14}C и ^{3}H выходят в виде газов, оставшиеся элементы пребывают в жидком или твердом состоянии их можно обрабатывать известными способами [1]. Кроме того, добавление биоцидных добавок в цементный компаунд повышают безопасность долгосрочного хранения кондиционированных РАО в приповерхностных хранилищах [12]. Однако, при этом происходят микробиологической деструкции цементных компаундов, которые можно устранить полимерными добавки класса полигексаметиленгуанидинов [12].

Можно заключить, что плазменно-пиролитическая технология переработки твердых радиоактивных отходов является наиболее перспективной. Несмотря на повышенные операционные издержки, данная технология позволяет обращаться с большей номенклатурой отходов и их более эффективное концентрирование [11]. Тем не менее, подчёркнутые недостатки технологии требуют подходить к проблеме обращения с ТРО системно, поскольку анализ методик обращений с РАО показал, что универсальный подход так и не разработан. Для эффективного обращения с радиоактивными отходами необходимо комбинировать различные методики, модифицировать существующие технологии, уделять внимание принципиально новым и улучшать техническую политику, которая должна охватывать весь жизненный цикл радиоактивных отходов, начиная с момента их появления и заканчивая безопасной изоляцией от окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2007. – Т. 448.
2. Polkanov M.A., Semenov K.N. e. a. WM2011 Conference, February 27 March, 2011, Phoenix, AZ.
3. Ядерная индустрия России. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 1040 с.: ил ISBN 5-283-03180-2
4. Маркитанова Л.И. Проблемы обезвреживания радиоактивных отходов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2015. – № 1. – С. 140–146.
5. Баринов А.С., Волков А.С., Лащенов С.М. Технологии переработки и кондиционирования РАО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2011. – № 1. – С. 156–161.
6. Бобраков А. Н. и др. Российский опыт переработки твердых радиоактивных отходов: достижения и перспективы // Российский химический журнал. – 2012. – Т. 56. – №. 5–6. – С. 76–86.
7. Dmitriev S.A., Gorbunov V.A., Knyazev I.A., Kobelev A.P., Kornev V.I. e. a. Proc. ENS Topseal'99 «RAWM: Commitment to the Future Environment». Antwerp, Belgium, 1999, v. 1, p. 193–200.
8. Gorbunov V.A., Polkanov M.A., Kadyrov I.I. et al. Plasma Technologies: The Enhancement of the Joint Treatment of Combustible and Noncombustible Solid Radioactive Wastes / KONTEC 2011. Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes: Proc. of the 10th International Symposium, Dresden, Germany, April 06–08 2011. – CD-ROM, ID 067.
9. Патент RU 2320038 C2, МПК G21F 9/00 Способ и установка для переработки радиоак- тивных отходов / ЗАО «Альянс-Гамма», ГУП МосНПО «Радон», Арустамов А.Э., Васендин Д.Р., Горбунов В.А., Дмитриев

С.А., Лифанов Ф.А., Кобелев А.П., Полканов М.А., Попков В.Н. – № 2005135826/06; Заяв. 18.11.2005; Опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
10. Dmitriev S.A., Lifanov F.A., Kobelev A.P. et al. Technology of plasma for treating radioactive waste: the step forward in comparison with incineration / WM'2010: Proc. Waste Management Conference, March 7–11 2010, Phoenix, Arizona, USA. – CDROM, ID10166.
11. Горбунов В.А. Плазменно-пиролитическая переработка твердых радиоактивных отходов АЭС / В.А. Горбунов, М.А. Полканов // Вопросы радиационной безопасности. – 2014. – № 3(75). – С. 26–31. – EDN STTWSD.
12. Горбунова О.А. Влияние микробиологической деструкции цементной матрицы на безопасность длительного хранения кондиционированных радиоактивных отходов / О. А. Горбунова // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 4. – С. 98–106. – EDN OCSBUJ.

СПОСОБЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМ РЕАКТОРНЫМ ГРАФИТОМ

Е.А. Самохина, Д.И. Маленко

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5001

Научный руководитель: К.Б. Ларионов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Необходимость поиска безопасной утилизации реакторного графита связана с ограниченным сроком службы блоков атомных электростанций. На данный момент в России функционирует восемь энергоблоков с реактором типа РБМК-1000 [1], которые в свою очередь содержат 1850 т чистого графита [2]. Согласно дорожной карте Концерна Росэнергоатом [1], с 2023 по 2027 год запланирован вывод из эксплуатации трех энергоблоков (№ 2 Курской АЭС, № 3 и 4 Ленинградской АЭС). Таким образом, остро встает вопрос о разработке общепризнанной технологии, обеспечивающей безопасную изоляцию отработавшего реакторного графита на весь срок его потенциальной радиоактивной опасности.

Выбор метода обращения с активным графитом зависит от степени его загрязненности радионуклидами. Активность графита определяется целым рядом причин [2], будь то нейтронная активация углерода, загрязнение продуктами активации газа; попаданием в кладку теплоносителя или продуктов деления, ядерного топлива.

Радиоактивность графита обеспечивают следующие изотопы: ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs. Именно такой состав графитовой кладки (при отсутствии просыпей ядерного топлива) был зарегистрирован в Чернобыльской АЭС [3]. Уровень гамма фона от реакторного графита, а следовательно, и мероприятия по защите персонала при обращении с отходами (при демонтаже кладок, обращении с контейнерами и др.), определяются гамма излучающими нуклидами, прежде всего, ^{60}Co, ^{134}Cs [3]. На длительной выдержке графита его активность будет определяться наличием долгоживущих нуклидов ^{3}H, ^{14}C, ^{63}Ni [2].

Согласно нормам действующего законодательства облученный графит является разновидностью радиоактивных отходов, т. к. дальнейшее его использование не предусмотрено. В соответствии с Постановлением Правительства РФ [4] кладки уран графитовых реакторов (УГР) (при отсутствии просыпей топлива) относится ко второму классу удаляемых твердых РАО (долгоживущие отходы средней категории активности) и подлежит утилизации в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО) без предварительной выдержки. Графит, загрязненный продуктами деления топлива, неоднороден по своему загрязнению и будет относиться к первому классу, а также подлежать захоронению в ПГЗРО с предварительной выдержкой в целях снижения его тепловыделения.

Одним из начальных этапов предварительной обработки отработавшего графита может быть его дезактивация. Целью является удаление радионуклидов из объема графитовой

кладки для перевода из одного класса удаляемых твердых РАО в другой. Она осуществляется следующими методами:

- химическим – удаление радиоактивных нуклидов из поверхностных слоев с помощью хим. реагентов;
- электрохимическим – перевод графита из твердого состояния в газообразное за счет электроокисления;
- электрофизическим – способ, основанный на использовании электрического поля для удаления радиоактивных нуклидов;
- механическим – дистанционное снятие поверхностного слоя фрезерованием или электромеханическими металлическими щетками.

Альтернативным решением вопроса является сжигание графитовых стержней и кондиционирование образующейся золы. В результате горения графита образуются газы и зола, которая затем кондиционируется, а газы удаляются из системы [2, 5, 6]. Методика включает [7] операции сжигания в две стадии, очистки от аэрозолей и сублимацию CO_2, с последующей локализацией примеси изотопа ^{14}C в форме водонерастворимого $CaCO_3$. [2]. При сжигании одного моль ^{14}C высвобождается в пять раз больше газообразных продуктов, содержащих 21 % углекислого газа [2], и 79 % азота. Объем радиоактивного графита при этом сокращаются примерно на 98 % [8]. Согласно расчётам [2], в результате утилизации 1 т графита, расходуется 6,17 тонн безводного гидроксида кальция, а образуется 8 кг пыли, 2 кг золы и 8,34 т безводного карбоната кальция, который почти в 6 раз превосходит в объеме исходный графит. Можно заключить, что утилизация реакторного графита путем сжигания, является неэффективной из-за неполной утилизации. Субмикронный аэрозоль, которая образуется в результате конденсации газообразных радиоактивных элементов, способна проникать в оборудование и легко вдыхаются в легкие. Такие частицы могут оседать на поверхности водоемов и сельскохозяйственных культурах [9].

Для решения описанных выше проблем методов сжигания, применяют технологию с использованием технологии высокотемпературного синтеза (СВС – процесса) [10]. Продуктом переработки служит карбидооксидный материал [11]. Он формирует матрицу, где надежно фиксируются радионуклиды. Материал обладает хорошей термической и химической, радиационной стойкостью [2]. Весь процесс характеризуется своей простотой, не требует большого числа операций и не подразумевает использования дорогого высокотемпературного оборудования. Отдельное достоинство метода – отсутствие образования побочных радиоактивных отходов. Поскольку технологический процесс происходит в герметичных контейнерах, то полностью исключается массообмен газообразных продуктов реакции с окружающей средой. При этом, в зоне контакта реагирующей смеси со стенками контейнера происходят высокие теплопотери. В этой зоне не весь графит связывается в карбидооксидном материале, отчего часть углерода осыпается. Другим недостатком технологии является невозможность переработки реакторного графита, который содержит фрагменты конструкционных материалов.

Существует возможность извлечения горючих газов в результате неполного сгорания (при недостатке кислорода) углеродосодержащих веществ. Этот процесс называется газогенераторной переработкой. После дезактивации электрохимическим методом удаляется наиболее радиоактивный внешний слой графитовых блоков толщиной около 1 мм. Из оставшейся внутренней части блока кладки РБМК-1000 можно получить $(1{,}3–1{,}5)\cdot 10^6$ м^3 генераторного газа. Однако для сжигания одной такой кладки потребуется от 3 до 6 лет непрерывной работы газогенератора при производительности 20–50 м^3/ч. Этот способ переработки графита позволяет добиться активности продуктов горения меньшей, чем исходного сырья приблизительно в 3170 раз [2].

Метод фиксации радионуклидов в графитовых блоках представляется альтернативой сжиганию. Он обеспечивает целостность блоков и их защиту от действия окисляющих газов и влаги. В НИКИЭТ была разработана технология пропитки графитовых блоков смесью, в состав которой входит эпоксидная смола, фурфурол, полиэтиленполиамин. Этот консервант имеет высокую радиационную стойкость, упрочняет графит, снижает его пористость и газопроницаемость [2].

Также проводились исследования по фиксации высокоактивных радионуклидов хладоотверждающим консервантом «атомик». Состав отверждается при присутствии специальных ароматических аминов. По итогам оценки радиационной стойкости установлено, что уменьшение прочности образцов консерванта наблюдается только при превышении дозы облучения в 15 Мрад, что эквивалентно 300–500 годам выдержки в реакторе типа РБМК. При гамма-облучении образца наблюдается объемный выход продуктов около $1{,}2 \cdot 10^{-9}$ $см^3/(г \cdot рад)$, основную часть которого составляет водород. Результаты экспериментов позволили установить, что из образцов реакторного графита выщелачиваются α-, β-, γ-излучающие радионуклиды, причем этот процесс идет постоянно. Также выделение радионуклидов не наблюдалось при 20 ℃ в течение 2 лет, а при 50 ℃ – в течение одного года [12].

Для иммобилизации графитовых блоков возможно применение битумирования, однако рациональность его использования неоднозначна из-за низкой радиационной стойкости, возможного разложения бактериями и его пожароопасности.

Эпоксидная смола считается лучшим по сравнению с другими материалами, обеспечивающими фиксацию. Причем, отверждение происходит при комнатной температуре, что исключает необходимость термообработки. Прочность при сжатии увеличивается в 1,7 раза в сравнении с чистым графитом, что позволяет снизить риск повреждения графита при хранении [4].

С учетом вышеизложенных обстоятельств, связанных с обработкой реакторного графита, ключевым аспектом является поиск безопасных и эффективных путей его утилизации. Развитие технологий, способных минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и удовлетворять условиям замкнутого использования, становится важным направлением исследований. Эти усилия направлены не только на текущее поколение, но и на обеспечение устойчивости и безопасности в будущем, подчеркивая важность принятия ответственных, альтернативных решений в области обращения с реакторным графитом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутиков А.В. Ближнесрочные планы Концерна по реализации стратегии развития ядерной энергетики // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция «безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018.
2. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: учебное пособие для вузов / М.А. Скачек.– М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с : ил. ISBN 978-5-383-00057-1
3. Кондиционирование реакторного графита выводимых из эксплуатации уран-графитовых реакторов для целей захоронения. URL: http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585 (дата обращения: 04.11.2023)
4. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. N 1069 «Критерии классификации удаляемых радиоактивных отходов» С изменениями и дополнениями от 4 февраля 2015 г.
5. Шавалеев М.Р., Барбин Н.М., Дальков М.П. и др. Уменьшение количества радиоактивного графита и степени загрязнения окружающей среды // Техносферная безопасность. – 2014. – № 4 (5).
6. Шавалеев М.Р., Барбин Н.М., Дальков М.П. и др. Переработка радиоактивного графита ядерных энергетических установок, вывод из эксплуатации // Техносферная безопасность. – 2015. – № 1 (6) .
7. Натанзон Я.В. Отделение примесей отработанного топлива от графита / Я.В. Натанзон, В.В. Токаревский // Радиоактивные отходы. Проблема и решения. – М.: Ядерное общество, 1992. – Ч. 2.
8. Цыганов А.А. и др. Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2007. – Т. 310, вып. 2.
9. Yang H.C., Eun H.C., Lee D.G. Behavior of radioactive elements during thermal treatment of nuclear graphite waste. Thermodynamic model analysis // J. of nuclear science and technology. – 2005. – V. 42, no. 10.

10. Коновалов Э.Е. Переработка реакторного высокоактивного графита в устойчивые карбидооксидные материалы самораспространяющимся высотемпературным синтезом / Э.Е. Коновалов, О.В. Старков, М.Л. Мышковский и др. // Атомная энергия. – 1998. – Т.84. – Вып. 3.
11. Патент № 2624270 C1 Российская Федерация, МПК G21F 9/28. Способ переработки отходов реакторного графита: № 2016106423: заявл. 24.02.2016: опубл. 03.07.2017 / Ю.А. Похитонов, М.Ю. Киршин; заявитель Акционерное общество «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина». – EDN GADZHZ.
12. Фиксация радионуклидов в облученных блоках реакторного графита / П.А. Платонов, Я.И. Штромбах, О.К. Чугунови др. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – №. 6. – С. 445–451.

УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

А.Д. Кротик

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ23

Научный руководитель: Ю.Л. Шаненкова, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Углекислый газ (CO_2) – это газ, вырабатываемый как природными, так и искусственными источниками, в виде сжигаемого ископаемого топлива для производства электроэнергии.

Активное потребление ископаемых видов топлива для энергообеспечения производственных процессов способствовало общемировому экономическому росту, но также привело к проблемам загрязнения окружающей среды парниковыми газами – углекислым газом CO_2, метаном CH_4, закисью азота N_2O и др. CO_2 является самым распространенным парниковым газом антропогенного происхождения, концентрация которого в атмосфере увеличилась на 47 % с момента индустриальной революции [1–4]. CO_2, являющийся основным продуктом полного сгорания ископаемого топлива, является парниковым газом, поглощающим тепло из атмосферы и способствующим изменению климата [5].

Основные виды деятельности по выбросам парниковых газов являются:

- производство электроэнергии, на основе ископаемого топлива;
- транспорт;
- сельское хозяйство [6].

В настоящее время в энергетике по-прежнему доминирует выработка электроэнергии из ископаемых источников энергии, таких как уголь, нефть и природный газ, что приводит к высоким показателям выброса углекислого газа. Энергетическая отрасль сталкивается с серьезными проблемами в достижении цели углеродной нейтральности [7]. Основными производителями электроэнергии являются теплоэлектростанции. ТЭС за счет меньших размеров, возможности их расположения позволяют получать относительно дешевую энергию за счет сжигания угля [8]. Ископаемое топливо в совокупности является крупнейшим источником выбросов CO_2, на долю которого приходится почти 65 % глобальных выбросов парниковых газов [9].

Углекислый газ можно рассматривать как дешевый и обильный источник мягкого окислителя для производства продуктов с добавленной стоимостью в виде оксидов металлов. При разложении CO_2 образуются молекулы CO и O_2, который и будет являться окислителем. Однако разрыв молекул диоксида углерода требует значительного количества энергии. Плазменные технологии позволяют добиться этого, благодаря достижению высоких температур и давления.

Конструктивно система плазмодинамического синтеза состоит из трех основных элементов (рис. 1): а) секционный емкостный накопитель энергии; б) коаксиальный магнитоплаз-

менный ускоритель с металлическими электродами; в) рабочая камера, где происходит плазмохимическая реакция.

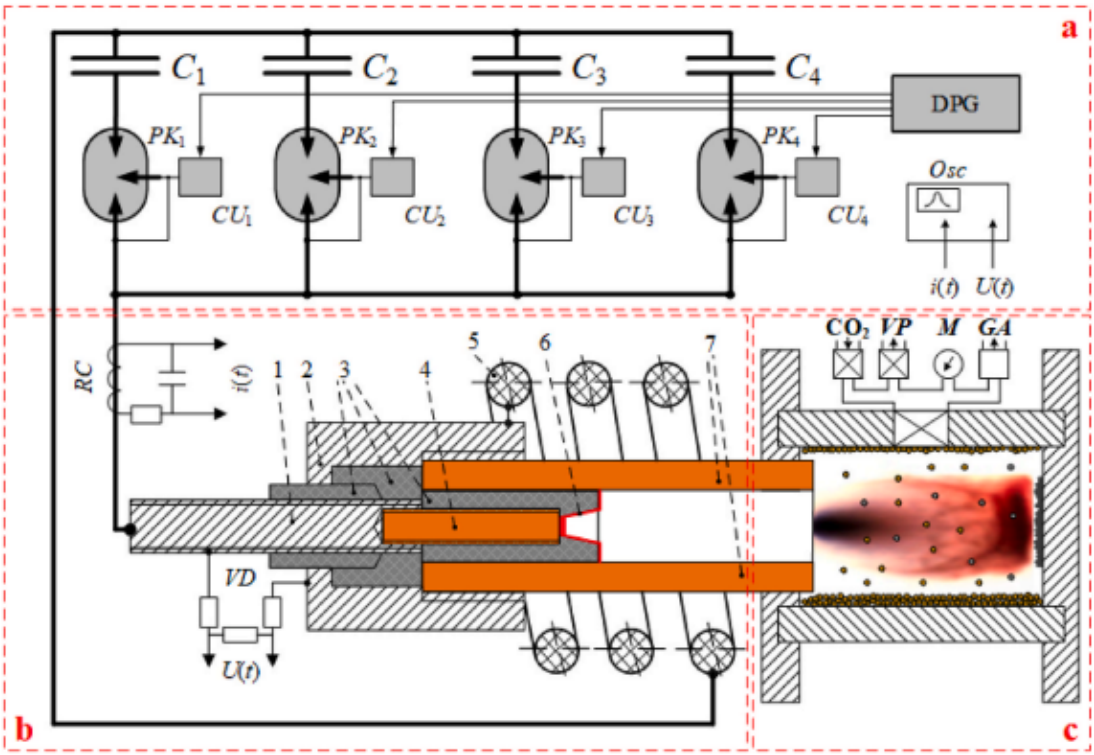


Рис. 1. Эскиз-схема экспериментальной установки:
1 – центральный электрод; 2 – металлический держатель;
3 – изолятор центрального электрода; 4 – металлическая вставка (медь, сталь, титан или алюминий) центрального электрода;
5 – внешняя индуктивная система; 6 – плавкая перемычка;
7 – металлический цилиндрический электрод (медь, сталь, титан или алюминий)

Главной особенностью емкостного накопителя энергии является его секционная конструкция, позволяющая варьировать энергетические параметры процесса (максимум напряжение зарядки U_{ch} = 5,0 кВ, максимальная емкость C_{ch} = 28,8 мФ, максимальная запасенная энергия W_{ch} = 360 кДж) и количество последовательных импульсов питания. Энергетические параметры процесса, а именно ток разряда и напряжение на электродах регистрировались катушкой Роговского (R_C) и омическим делителем напряжения (V_D) соответственно.

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель – это классический ускоритель *Z*-пинча, размещенный внутри мощной индуктивной системы, которая необходима для выравнивания электроэрозионного износа по длине стержневого электрода и дополнительного ускорения генерируемой плазмы. Дуговой разряд инициируется с помощью токопроводящей перемычки, выполненной в виде слоя графита, нанесенного на внутреннюю поверхность изолятора центрального электрода. Когда цепь питания замкнута, ток нагревательного разряда начинает поступать из емкостного накопителя (C), что приводит к тепловому пробой токопроводящей перемычки. Это приводит к образованию плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа *Z*-пинча с кольцевым плазменным поршнем, который впоследствии ускоряется вдоль внутренней поверхности цилиндрического электрода.

Для плазмохимической реакции пространство рабочей камеры заполненяется двуокисью углерода (CO_2) при нормальном давлении и комнатной температуре [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster / S.I. Zandalinas, F.B. Fritschi, R. Mittler // Trends Plant Science. – 2021. – V. 26. – Iss. 6. – P. 588–599.
2. Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments / F. Creutzig, K.H. Erb, H. Haberl, C. Hof, C. Hunsberger, S. Roe // GCB Bioenergy. – 2021. – V. 16. – Iss. 6. – P. 510–515.
3. The estimation of the carbon dioxide emission and driving factors in China based on machine learning methods / J. Qin, N. Gong // Sustainable Production and Consumption. – 2022. – V. 33. – P. 218–229.
4. Global Carbon Budget 2021 / P. Friedlingstein, M.W. Jones, M. O'Sullivan et al. // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – Iss. 4. – P. 1917–2005.
5. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies / A. Fayyazbakhsh, M.L. Bell, X. Zhu et al. // Journal of Cleaner Production. – 2022. – V. 358.
6. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors / S. Vaz Jr., A. Paula R. de Souza, B.E.L. Baeta // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. – V. 8.
7. Clustering of economic efficiency of urban energy carbon emissions based on decoupling theory / R. An, G. Zhu // Energy Reports. – 2022. – V. 8. – P. 9569–9575.
8. The analysis of the innovative potential of the energy sector and low-carbon development: A case study for Poland / M. Dzikuć, J. Gorączkowska, A. Piwowar, M. Dzikuć, R. Smoleński, P. Kułyk // Energy Strategy Reviews. – 2021. – V. 38.
9. Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies / T.M. Gür // Progress in Energy and Combustion Science. – 2022. – V. 89.
10. Plasma dynamic synthesis of dispersed metal oxide materials in CO_2 medium / I. Shanenkov, A. Tsimmerman, A. Nassyrbayev, D. Nikitin, R. Tabakaev, A. Sivkov // Ceramics International. – 2023. – V. 49. – P. 34232–34247.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКА КАРБИДА ХРОМА В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

П.В. Поваляев[1], Е.В. Франция[2], В.В. Егорова[3]

[1,2] Томский политехнический университет
[1,2,3] Сургутский государственный университет
[1]ИШЭ, ОЭЭ, А1-48
[2]ИШЭ, Старший научный сотрудник ЛПМЭО
[3]ИЕиТН, аспирант кафедры химии

Научный руководитель: А. Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Все стадии нефтеиспользования, начиная с разведки, добычи и транспортировки нефти, заканчивая ее переработкой и потреблением, приводят к образованию разнообразных маслянистых и вязких остатков, называемых отходами нефтяной промышленности. Отходы нефтяной промышленности можно разделить по количеству содержания углеводородов (40–60 %), воды (30–90 %) и минеральных частиц (5–40 %) [1].

Существует множество традиционных способов утилизации нефтяных отходов, такие как биоразложение, захоронение и сжигание, однако данные методы утилизации имеют ряд недостатков, например, риск загрязнения окружающей среды, низкую производительность и высокую стоимость. Это приводит к появлению новых методов утилизации нефтяных отходов: ультразвуковое облучение, замораживание/оттаивание, пиролиз, ультразвуковое излучение и прочие методы переработки [2]. Одним из таким методов является газификация нефтяных отходов, данный метод обеспечивает снижение объема перерабатываемого сырья,

отделение тяжелых металлов и производство синтез-газа. Такой процесс протекает при относительно высоких температурах – в диапазоне от 700 до 1000 °С. Помимо получения синтез-газа, который используется в качестве топлива для отопления в паровых турбинах и газовых двигателях, в процессе газификации также формируется углеродный остаток, в результате чего возникает необходимость в поиске промышленного применения данного материала.

Известно множество работ по использованию твердого остатка нефти или нефтепродуктов (нефтяного кокса) для получения других уникальных материалов, например карбидов. Нефтяной кокс, в составе которого основным элементом является углерод, является дешевым побочным продуктом при переработке нефти. Результатом использования такого типа сырья в качестве источника углерода стала возможность получения карбидов титана, кремния, бора и др. [3–5].

Предыдущие работы авторов были посвящены пламенной газификации асфальтенов с получением синтез-газа и углеродного материала (УМ), с дальнейшим изучением свойств и морфологии УМ. Помимо этого, был оптимизирован режим работы электродугового стенда для переработки сырья обогащенного асфальтенами [6]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования по использованию полученного углеродного материала в качестве источника углерода для синтеза порошка на основе фазы карбида хрома Cr_3C_2.

Получение углеродного материала осуществлялось с использованием дугового реактора с горизонтальным расположением электродов без использования защитной среды (вакуум или инертный газ). Для получения углеродного материала использовались асфальтены, выделенные из битума ашальчинской нефти, и асфальт, полученный методом сольвентной деасфальтизации (СДА). Описание работы горизонтального электродугового реактора, методика газификации асфальтенов, а также описание параметров углеродного материала представлены в предыдущих работах научной группы [6, 7]. Картины рентгеновской дифракции исходных компонентов: полученного в результате газификации углеродного материала, а также порошка чистого хрома и промышленного углерода представлены на рис. 1.

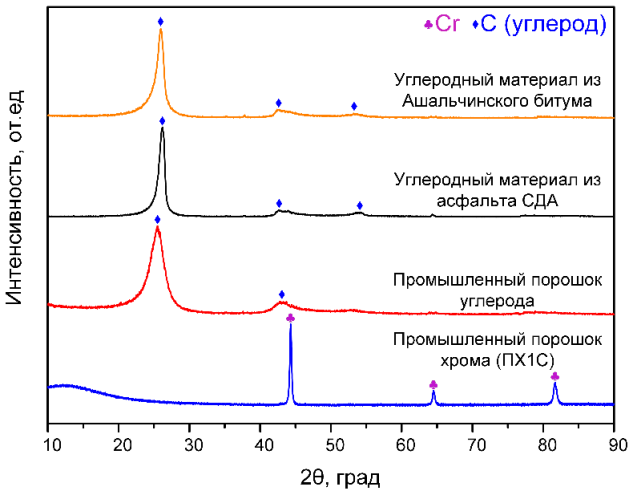


Рис. 1. Картины рентгеновской дифракции исходных компонентов

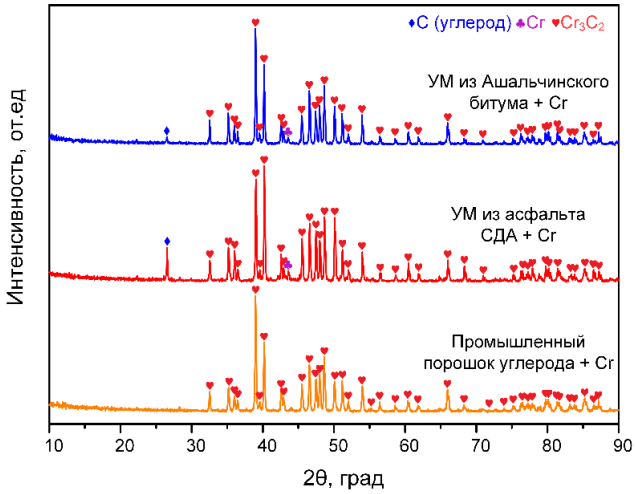


Рис. 2. Картины рентгеновской дифракции порошка карбида хрома, полученного с использованием безвакуумного электродугового реактора

Полученный УМ также, как и промышленный порошок имеет графитоподобную структуру, отличительной особенностью полученного углеродного материала из асфальтенов является меньшая степень кристалличности.

Для проведения исследований по синтезу карбида хрома подготавливались три смеси порошков с разным типом углеродного материала. УМ и порошок хрома (ПХ1С) смешивались в массовом соотношении Cr:C = 3,00:2,45 в вибрационной мельнице Retsch 500 nano в течение 1 часа. После чего данные порошки подвергались воздействию дугового разряда в вертикальном электродуговом реакторе, принципы работы которого представлены в работе [8]. Время дуговой обработки составляло 60 с, сила тока, установленная на источнике постоянного тока, равнялась 200 А.

В полученном порошке карбида хрома из промышленного углерода идентифицированы высокоинтенсивные фазы карбида хрома Cr_3C_2, что соответствует эталону JCPDS 35-0804 из электронной кристаллографической базы данных PDF4+. Полученные порошки карбида хрома с использованием УМ из асфальтенов, также характеризуются наличием высокоинтенсивных максимумов Cr_3C_2, однако, в составе продуктов синтеза также идентифицированы максимумы исходных компонентов – углеродного материала и исходного хрома. Наличие данных соединений в составе конечного продукта может быть вызвано неоднородностью исходной смеси и углеродного материала, в частности, а также наличием примесей в составе УМ, что приводит к частичной реакции между исходными компонентами. Для полного завершения реакции между исходными компонентами необходимо проведение дополнительных серий экспериментов, направленных на определение оптимального соотношения исходных компонентов и режима работы дугового реактора при использовании такого типа углеродного материала.

В результате проведенных экспериментальных исследований показана возможность получения порошка на основе карбида хрома Cr_3C_2 с использованием углеродного материала, полученного при плазменной газификации сырья, обогащенного асфальтенами. Полученный материал исследовался методом рентгеновской дифракции: продукты имеют высокоинтенсивные максимумы Cr_3C_2 и малоинтенсивные максимумы исходных компонентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-13-20016) в Сургутском государственном университете и Томском политехническом университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jagaba A.H., Kutty S.R.M., Lawal I.M.et al. Diverse sustainable materials for the treatment of petroleum sludge and remediation of contaminated sites: A review // Cleaner Waste Systems. Elsevier. – 2022. – Vol. 2. – P. 100010.
2. Murungi P.I., Sulaimon A.A. Petroleum sludge treatment and disposal techniques: a review // Environmental Science and Pollution Research. Springer. – 2022. – Vol. 29, № 27. – P. 40358–40372.
3. Cui X., Cui L., Wang L., Qi M. Synthesis of titanium carbide powder from TiO2 and petroleum coke by reactive milling // Petroleum Science and Technology. Taylor & Francis. – 2002. – Vol. 20, № 9–10.– P. 999–1007.
4. Alizadeh A., Taheri-Nassaj E., Ehsani N. Synthesis of boron carbide powder by a carbothermic reduction method // Journal of the European Ceramic Society. Elsevier. – 2004. – Vol. 24, № 10–11. – P. 3227–3234.
5. Narciso-Romero F.J., Rodríguez-Reinoso F., Díez M.A. Influence of the carbon material on the synthesis of silicon carbide // Carbon. Elsevier. – 1999. – Vol. 37, № 11. – P. 1771–1778.
6. 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.
7. Пак А.Я., Поваляев П.В., Франдина Е.В., Гринько А.А., Петрова Ю.Ю., Аркаченкова В.В. Получение углеродных графитоподобных наноматериалов при переработке отходов на основе асфальтенов // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2022. – Vol. 333, № 12. – P. 25–36.
8. Gumovskaya A., Pak A., Yankovsky S., Nassyrbaev A., Nikitin D., Komkina U. Vacuum-free electric arc synthesis of titanium carbide using plant waste-derived carbon // New Journal of Chemistry. Royal Society of Chemistry. – 2023. – Vol. 47, № 38. – P. 17963–17969.

MODELING OF THE INFLUENCE OF TURBULENCE DIFFUSION COEFFICIENT AND WIND SPEED ON THE VOLUMETRIC ACTIVITY OF THE VERTICAL PROFILE OF RADON AND ITS PROGENY

E. Yeboah[1], G.A. Yakovlev[2]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
[2] National Research Tomsk State University,
ИЯТШ, Гр. А1-43И

Supervisor: V.S. Yakovleva, Doctor of Technical Sciences, Professor, School of Nuclear Technology Engineering, TPU

The purpose of this work is to study the role of turbulence diffusion coefficient and wind speed on the transfer of radon and its progeny in the atmosphere. Radon is a radioactive noble gas that is widely used as a tracer for the investigation of the processes of transporting and mixing atmospheric phenomena. It is very effective for identifying natural air exchange in underground environments [1]. Radon and its progeny have been used as tracers for investigating vertical diffusivity. This is due to the fact that their source and sink are well defined. Atmospheric advection and vertical turbulence play an important role in the transport of momentum, heat, moisture, and trace gases into the atmosphere. Vertical transport also plays a significant role in the transportation of long-range air pollutants into the atmosphere. This is because wind speed increases with height. Different researchers have studied the vertical distribution of radon [2]. This paper presents a model of the influence of turbulence diffusion coefficient for different cases (where there is a positive wind speed, a negative wind speed, or no wind speed) and the effect of wind speed on the vertical profile of the volumetric activity of radon and its progeny.

Mathematical Model

A one-dimensional study of the steady state of the transfer of radon and its progeny in the atmosphere was used. The mathematical model includes a differential equation for radon and thoron with variable coefficients (where $i = 1,2$ represents radon and thoron, respectively) and can be written in the form [3]:

$$0 = \left(D_M + D_T(z)\right)\frac{d^2A_i(z)}{dz^2} - \upsilon_\omega \frac{dA_i(z)}{dz} - \lambda_i A_i(z) \quad (1)$$

The system of the equation was solved with the initial condition of the absence of radon and thoron with increasing height: $A_i(z \to \infty) = 0 \; for \; i = 1,2;$

And a boundary condition for both radon and thoron, taking into consideration the output from the surface of the ground, was given as: $\left(D_M + D_T(z)\right)\frac{dA_i(z)}{dz}\Big|_{z=0} - \upsilon_\omega A_i(z)|_{z=0} = -q_i \; for \; i = 1,2;$

Where D_M is the coefficient of molecular diffusion, m^2/s; $D_T(z)$ is the coefficient of turbulent diffusion, m^2/s; $A_i(z)$ is volumetric activity of radon (i = 1) and thoron (i = 2) with respect to height, Bq/m^3; υ_ω is the wind speed's vertical component, m/s; λ_i is the radioactive decay constant of radon (i = 1) and thoron (i = 2), 1/s; q_i– the radon (i = 1) and thoron (i = 2) flux density from the surface of the ground, Bq/m^2s.

The model was carried out for the range of 0.001–5 m^2/s for the turbulence diffusion coefficient (for cases when there is no wind speed, positive, and negative wind speed) and that of the wind speed ranges from –0.2–0.2 m/s. The negative wind speed indicates the direction of the wind towards the earth's surface.

Results and Discussion

Figs. 1 and 2 illustrate how the volumetric activity of both radon and thoron is dependent on height, respectively.

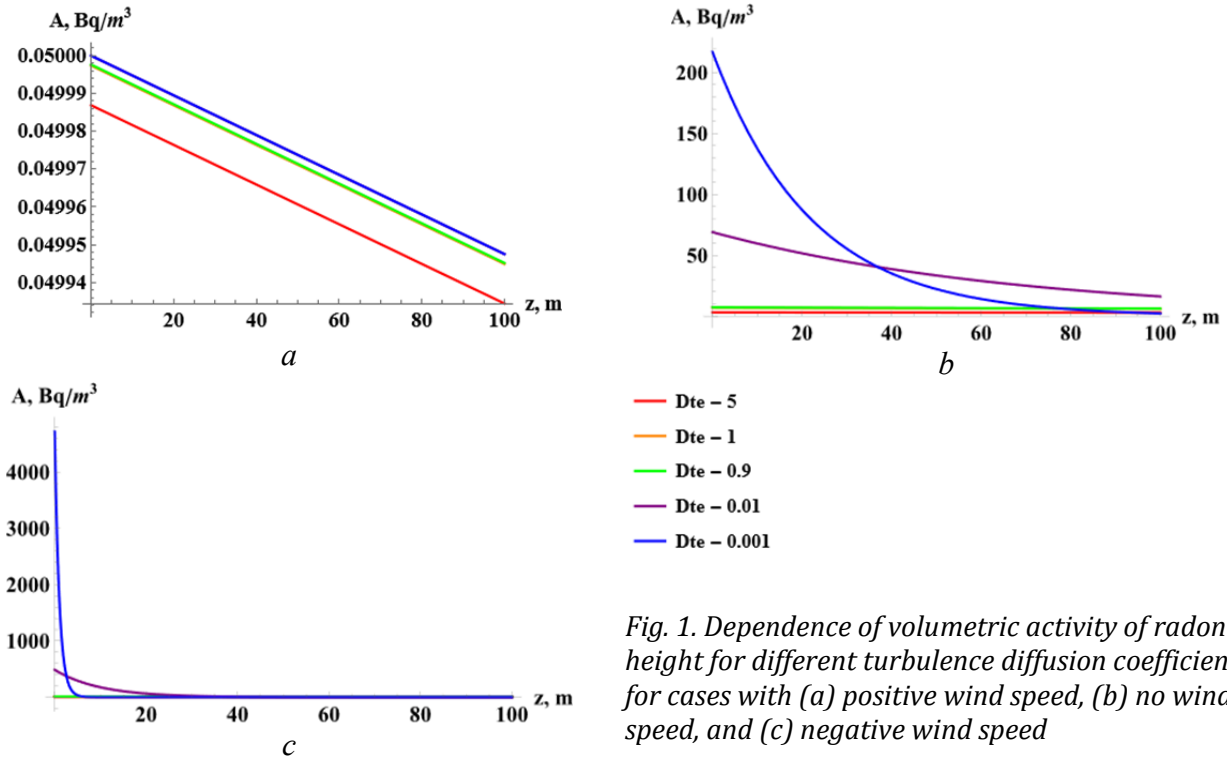


Fig. 1. Dependence of volumetric activity of radon on height for different turbulence diffusion coefficients for cases with (a) positive wind speed, (b) no wind speed, and (c) negative wind speed

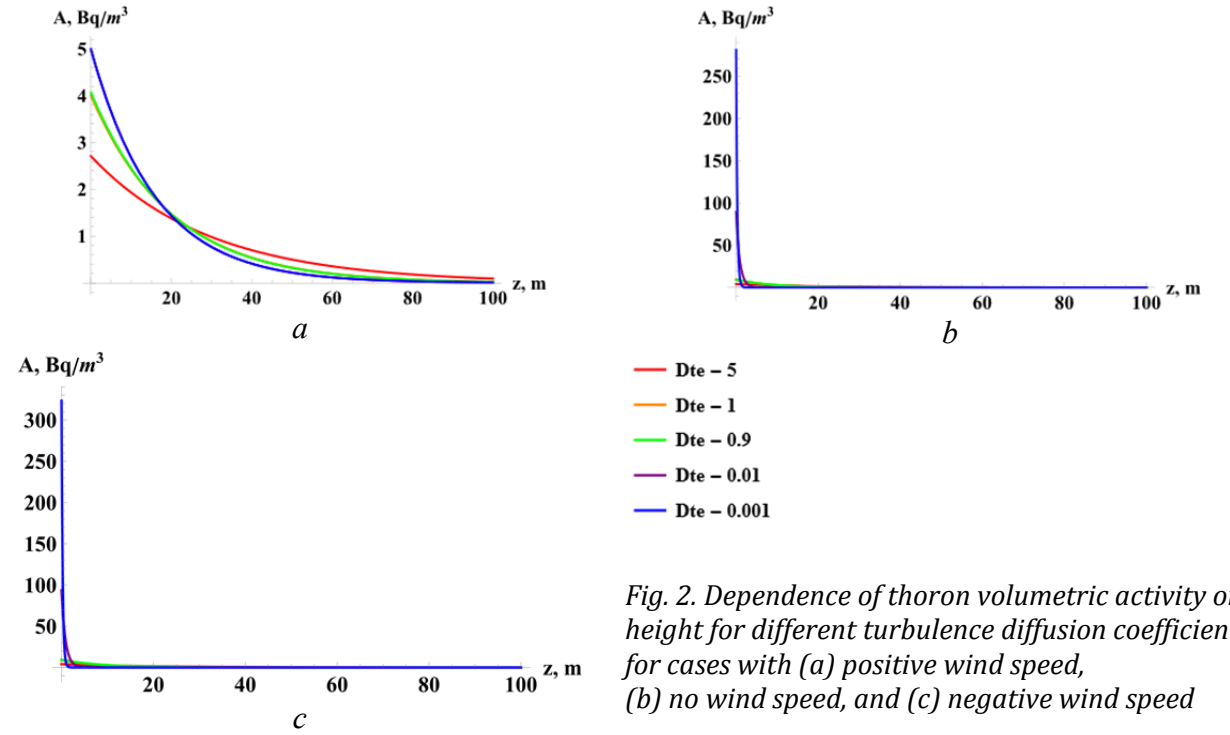


Fig. 2. Dependence of thoron volumetric activity on height for different turbulence diffusion coefficients for cases with (a) positive wind speed, (b) no wind speed, and (c) negative wind speed

The results obtained showed that the coefficient of turbulence diffusion changed from exponential to linear dependence for situations in which there was no wind speed or negative wind speed for radon and thoron. This has caused a significant change in the vertical profile of the radon and thoron volumetric activity, particularly near the earth's surface. Additionally, the volumetric

activity close to the earth's surface decreased very sharply when there was negative wind speed for radon and when there was no wind speed and negative wind speed for thoron. For the case where there was positive wind speed, the volumetric activity for radon has only linear dependence in the turbulence diffusion coefficient and only exponential dependence change for thoron. It was also noted that when there was a decrease in the turbulence diffusion coefficient of less than 0.01 m^2/s, the volumetric activity of radon and thoron at the earth's surface was high in all cases. However, there was a rapid decrease with increasing height. This shows that turbulence diffusion is efficient in rapidly decreasing the concentration of radon released into the atmosphere. It was observed that the volumetric activity of radon was more than 220 Bq/m^3.

Figure 3 illustrates how the volumetric activity of radon and thoron depends on different values of wind speed. Based on the obtained results, it can be seen that the positive and negative wind speed values coincide with the direction of the z-axis. The wind speed strongly changes the vertical profile of the volumetric activity of both radon and thoron. The volumetric activity of radon and thoron decreased as the wind speed increased from the earth's surface. For radon, radionuclides were transferred to altitudes as high as over 100 m. As wind speed increased, the change in dependence for thoron was only exponential, but that of radon changed from exponential to linear. The wind speed greatly increases the volumetric activity at the surface of the earth and decreases at higher altitudes.

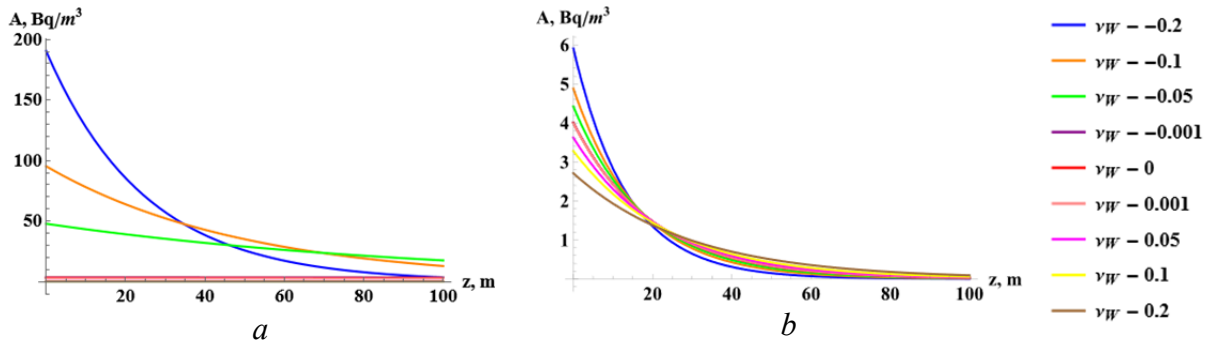


Fig. 3. Dependence of the volumetric activity of the vertical profile of (a) radon and (b) thoron for different wind speeds

Conclusion

In this work, we present the model influence of turbulence diffusion coefficient at different wind speeds and the effect of wind speed on the volumetric activity of radon and thoron.

The presented work shows that the vertical variation of atmospheric stability and wind speed affect the variation of the coefficient of turbulence diffusion with height. The turbulence diffusion coefficient increases rapidly with height in the boundary layer close to the earth's surface. For low turbulence diffusion coefficients, the difference between radon and thoron is relatively high at ground level but decreases with increasing height. This is because of their short half-lives.

The wind speed increases the volumetric activity of radon and thoron at the surface of the earth and decreases with increasing height. The results show that turbulence diffusion coefficient and wind speed affect the volumetric activity of the vertical profiles of radon and thoron.

REFERENCES

1. The use of radon as tracer in environmental sciences / Quindos Poncela L. et al. // Acta Geophysica. – 2013. – V. 61. – P. 848–858.
2. Liu S.C., McAfee J.R., Cicerone R.J. Radon 222 and tropospheric vertical transport // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1984. – V. 89, No D5. – P. 7291–7297.
3. Yakovleva V.S., Nagorskiy P.M., Cherepnev M.S. Generation of ground atmosphere α-, β- and γ-fields by natural atmospheric radionuclides // Vestnik KRAUNC: Fiziko-Matematičeskie Nauki. KamGU by Vitus Bering. – 2014. – No 1(8). – P. 86–96.

ПРОБЛЕМАТИКА ПЕРЕРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

А.С. Горшков, А.В. Губин, В.Е. Губин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А2-46

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Последнее десятилетие солнечная энергетика демонстрировала уверенный рост по объемам генерации, причем согласно прогнозам IEA [1] ожидается увеличение доли солнечной энергетики до 22,2 % к 2027 году (рис. 1). Особенность солнечных панелей заключается также в том, что они являются одним из немногих и самых распространенных источников электроэнергии на бытовом уровне, что не ограничивает их распространение на крупных генерирующих кластерах. Срок эксплуатации панелей составляет 25–30 лет [2], таким образом уже к 2040 году будет необходимо выводить из эксплуатации достаточно большое количество солнечных панелей, именно поэтому зарубежные и отечественные исследователи изыскивают оптимальный вариант. Прямое захоронение панелей нежелательно из-за возможной миграции тяжелых металлов в почву и грунтовые воды [3].

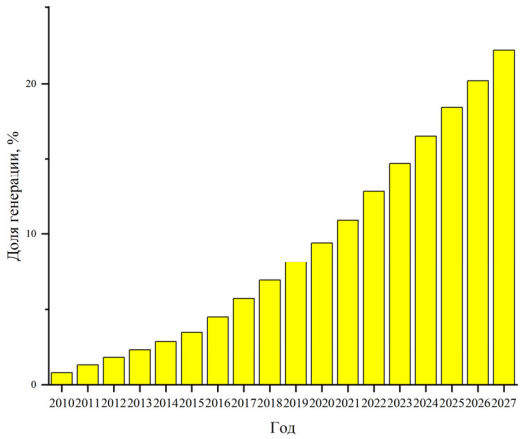


Рис. 1. Доля в генерации электроэнергии солнечных панелей [1]

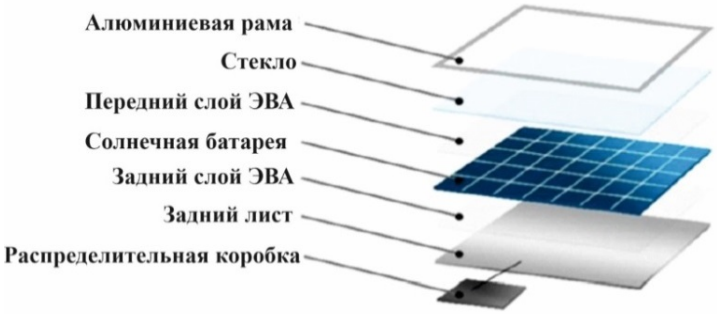


Рис. 2. Типичная сборочная конструкция фотоэлектрического модуля [5]

Типовой сборный модуль (рис. 2) состоит из алюминиевой рамы, стекла, фотоэлектрических ячеек и органического связующего, обеспечивающего фиксацию и прочность, при отличной светопроводимости этиленвинилацетат (ЭВА).

Для возможности извлечения металлов и кремния из утилизированной солнечной панели после механического измельчения применяется термический и химический способ удаления органической части. При термической обработке также осуществляется фрагментирование материала.

Объектом исследования является солнечная панель на основе кристаллического кремния (c-Si панель). Был выполнен термический анализ с использованием термического анализатора STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH, Германия). Производилась декомпозиция в инертной среде, через тигель с образцом проходило 150 мл/мин аргона, скорость нагрева – 10 °C. Результат представлен на рис. 3.

Потеря массы составила 16 %, разложения представлено двумя участками. I участок (270–375 °C) – деполимеризация с формированием преимущественно уксусной кислоты. II участок (375–500 °C) – формирование углеводородов, преимущественно олефинов [6]. По результатам термического анализа выбрана температура реализации пиролиза – 500 °C.

Пиролиз выполнялся в атмосфере азота с подключением поточного газоанализатора Тест-1 (Бонэр, Россия). Согласно концентрационным кривым рекомендуется дожигание отходящих газов, так как присутствуют CO и CH_4, эмиссии водорода не наблюдалось.

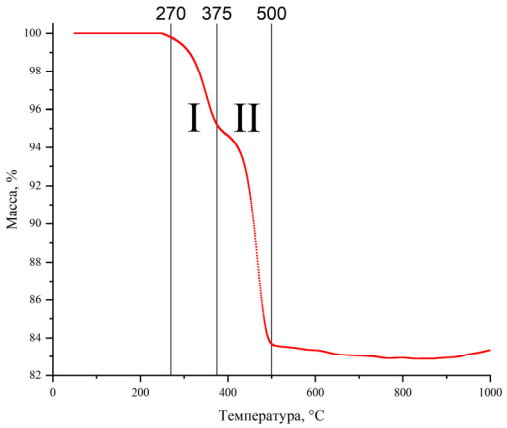


Рис. 3. Изменение массы солнечной панели типа c-Si

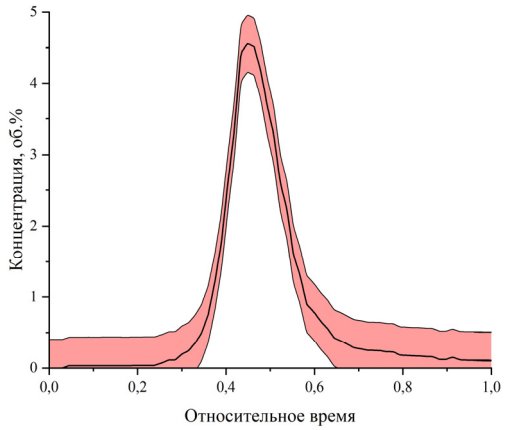


Рис. 4. Концентрационная кривая CH4

Полученный остаток был проанализирован с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора S1 TITAN (Bruker, США). Как в остатке, так и во фракционированном образце наблюдается большое количество кремния, в меньшей степени – алюминия, серебра и титана.

Таблица 1. Элементный состав полученного остатка, мас. %

Элемент	Исходный остаток	Остаток размера фракции <0,2 мм
Si	61,23	44,39
Al	22,19	13,75
Ag	5,14	12,82
Ti	4,42	15,05
Fe	2,52	0,7
Sb	1,9	0,86
Pb	1,06	6,88
Sn	0,85	4,74

Следующим этапом является применение или разделение полученного многокомпонентного остатка. Высокое содержание кремния обеспечивает возможность высокотемпературного плазменного синтеза карбида кремния.

Исследование выполнено за счет средств проекта Государственное задание высшим учебным заведениям РФ FSWW-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA, Share of cumulative power capacity by technology, 2010-2027 // IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027 (дата обращения: 30.10.2023).
2. A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology / X. Wang, X. Tian, X. Chen, L. Ren, C. Geng // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2022. – V. 248. – P. 111976.
3. Environmental impacts of utility-scale solar energy / R.R. Hernandez, S.B. Easter, M.L. Murphy-Mariscal et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 29. – P. 766–779.
4. Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling / X. Li, H. Liu, J. You, H. Diao, L. Zhao, W. Wang // Waste Management. – 2022. – V. 137. – P. 312–318.
5. Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment / R. Wang, E. Song, C. Zhang, X. Zhuang, E. Ma, J. Bai, W. Yuan, J. Wang // RSC Advances. – 2019. – V. 9. – P. 18115–18123.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ОТХОДОВ НА ПРОЦЕСС СОВМЕСТНОГО ПИРОЛИЗА

А.С. Горшков, К.Б. Ларионов, В.Е. Губин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А2-46

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Проблематика обращения с отходами является общемировой и не привязана к конкретным регионам, меняются лишь тип и количество потенциально полезного материала, который можно повторно вовлекать в хозяйственную деятельность. Пиролиз является одним из возможных подходов по обращению с различными отходами, среди которых коммунальные отходы, биомасса, резинотехнические изделия и пластики [1].

Процесс инертного термического разложения можно реализовывать с использованием разных температурных режимов, с различными параметрами инертной среды, что обеспечивает высокую вариативность в получаемом продукте. Обеспечивающим высокую маневренность процесса методом является также и совместный пиролиз. В зависимости от требований к конечному продукту можно варьировать виды, формы и массовые отношения используемых компонентов. Кроме того, зачастую в процессе совместного пиролиза наблюдаются синергетические эффекты, которые выражаются в свойствах конечного продукта или возможности изменения технологических условий протекания процесса. Кроме того, как указывают некоторые авторы [2], конечные продукты со-пиролиза могут отличаться от того, что получается при смешении продуктов двух отдельно реализованных процессов.

Для исследования влияния дисперсности отходов на процесс пиролиза применялись распространенные в нашем регионе материалы. Использовались резиновая крошка крупногабаритных шин, березовые опилки и их 1:1 смесь. Варьировалось четыре размера фракции 10–5, 5–1, 1–0,5 и 0,5–0,2 мм. Как и во многих схожих случаях больший размер фракции предпочтителен, так как обеспечение такой дисперсности менее затратно. Пиролиз выполнялся в небольшом реакторе, обогреваемым внешними электрическими нагревателями, через реакционную зону проходил азот с постоянным расходом 3 мл/мин. Масса обрабатываемого образца – 1 г. Температура процесса – 500 °С, процесс оканчивался по завершению выхода летучих.

Для оценки динамики и кинетики процесса разложения может применяться термический анализ. В данной работе термический анализ проводился в STA 449 C Jupiter (Netzsch, Германия) в присутствии аргона. Масса образца составляла около 10 мг, расход среды 20 мл/мин, диапазон температур 35–1000 °С, скорость нагрева 2,5/5/10/20 °С/мин.

Применять простые кинетические модели и методики по определению констант для разложения многокомпонентных материалов и их смесей не валидно, поэтому для описания конкурирующих и одновременных реакций применяют разложение на отдельные кривые с использованием статистических функций [3]. Широкое применение получили Гауссовская функция, кривая Лоренца, распределение Вейбулла [4, 5].

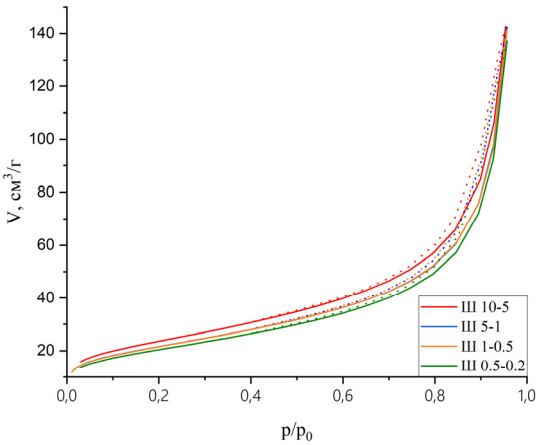


Рис. 1. Изотерма адсорбции-десорбции азота

Текстурные характеристики твердого углеродного остатка необходимы для оценки применимости и ценности данного материала. Анализ удельной поверхности и размера пор выполнялся с использованием Sync 420A (3P Instruments, Германия).

Типичные кривые адсорбции-десорбции азота для углерода из шин представлены на рис. 1. Отчетливо видно, что при пиролизе резиновой крошки различной дисперсности характерный вид кривых сохраняется. Но более крупный материал позволяет получить более высокие величины текстурных характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Текстурные характеристики некоторых образцов углеродного остатка

Образец	Удельная поверхность, $м^2/г$	Объем пор, $м^3/г$	Средний размер пор, нм
Ш 10-5	83,5	0,221	10,6
Ш 5-1	77	0,220	11,4
Ш 1-0.5	76,9	0,218	11,3
Ш 0.5-0.2	72	0,212	11,8

Наблюдается тенденция на увеличение площади поверхности и объема пор при увеличении размера фракции, что может быть вызвано меньшей площадью контакта материала в процессе пиролиза, что обеспечивает большую площадь взаимодействия с инертным агентом и более полный выход летучих соединений.

Исследование выполнено за счет средств проекта Государственное задание высшим учебным заведениям РФ FSWW-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Insights into biochar and hydrochar production and applica-tions: A review / Z. Zhang, Z. Zhu, B. Shen, L. Liu // Energy. – 2019. – V. 171. – P. 581–598.
2. Insight into the co-pyrolysis of different blended feedstocks to biochar for the adsorption of organic and inorganic pollu-tants: A review / M.J. Ahmed, B.H. Hameed // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 265. – 121762.
3. Kinetic Analysis of Complex Solid-State Reactions. A New Deconvolution Procedure / A. Perejón, P.E. Sánchez-Jiménez, J.M. Criado, L.A. Pérez-Maqueda // The Journal of Physical Chemistry B. – 2011. – V. 115 (8). – P. 1780–1791.
4. A theoretical method for resolving overlapping peaks in differential scanning calorimetry / C. Wagner, J. Vázquez, P. Villares, R. Jiménez-Garay // Materials Letters. – 1994. – V. 18 (5–6). – P. 280–285.
5. Kinetic and Kinetic Model Study of Epoxidized Natural Rubber / I.M. Alwaan, A. Hassan // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. – 2014. – V. 30 (3). – P. 153–168.

УТИЛИЗАЦИЯ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В СОСТАВЕ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

А.Ж. Калтаев, К.Б. Ларионов, В.Е. Губин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А1-46

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Проблема утилизация отходов углеобогатительных фабрик (фильтр-кек) возникла в восьмидесятых годах прошлого века и усугублялась ввиду активной электро- и теплофикации регионов. Фильтр-кек имеет консистенцию тяжелой глины с высокой влажностью (до 40 %) и высокой зольностью (до 45 %). По различным оценкам объем фильтр-кека составляет порядка 120 млн т [1]. Такое количество отходов занимает большое количество территории и

требует его утилизации. Ввиду приведенных выше особенностей наибольшее распространение получила технология водоугольного топлива (ВУТ) [2]. Данная технология не получила широкого применения в связи с переходом на экологически более чистое топливо – природный газ [3]. Однако мировое потребление угля остается на высоком уровне [4].

С другой стороны, существует проблема утилизации твердых бытовых отходов, в частности опилок, щепок, древесной пыль, коры и т. д. [5]. Учитывая объемы таких отходов и тенденцию к переходу на возобновляемое источники энергии [6] применение отходов пиломатериалов в качестве топлива является перспективным решение. Однако применение таких отходов в регионах с высокой влажностью и низкой среднегодовой температурой затрудняется по ряду причин. Отходы пиломатериалов, как и любая другая биомасса подвержена гниению, имеет низкую насыпную и энергетическую плотность [7]. По этим причинам, прямое сжигание биомассы в больших масштабах не применяется. Альтернативные методы термической конверсии позволяют получить продукты, применение которых лишено данных недостатков. К таким методам можно отнести пиролиз, газификацию и гидротермальное сжижение [8]. Ввиду особенностей биомассы, наиболее привлекательным методом является низкотемпературный пиролиз [9]. Основными продуктами этого метода являются жидкие углеводороды, полукокс и неконденсируемый газ. Неконденсируемый газ как правило дожигается, и полученная теплота используется на собственные нужды. Полукокс имеет широкий спектр применения, он может быть использован, как печное топливо, для синтеза различных материалов, в качестве сорбента и т. п. Жидкие углеводороды состоят из воды, спиртов, фенолов, кислот и других органических соединений [10]. Ввиду наличия веществ с различной плотностью происходит расслоение на два типа жидкостей: водную и органическую. Органическая жидкость имеет относительно высокую теплоту сгорания и является ценным продуктом [11]. Водная жидкость или пирогенетическая жидкость является балластовой компонентой и требует утилизации [12]. Однако сложный состав жидких углеводородов требует дальнейшего обращения. Технология ВУТ, описанная выше, также подходит для утилизации пирогенетической жидкости.

В настоящее время технология ВУТ широко изучена в различные направления. В частности, изучено влияние различных добавок на реологические свойства [13], горение топлива [14], изучено влияние фракционного состава на вязкость топлива [15] и т. п. ВУТ является многокомпонентным топливом, что позволяет варьировать состав для улучшения необходимых параметров. В частности, возможно частичная замена технической воды на пирогенетическую жидкость. Также можно отметить, пирогенетическую жидкость можно использовать как поверхностно-активное вещество (ПАВ), ввиду наличия полярных и неполярных соединений [16]. ПАВ улучшает смачивание, диспергирование и эмульгирование ВУТ, что является одними из ключевых характеристик для такого вида топлива.

В данной работе представлена возможность утилизации пирогенетической жидкости в составе ВУТ. Рассмотрены характеристики зажигания и горения ВУТ на основе пирогенетической жидкости. Также исследовано влияние пирогенетической жидкости на характеристики распыление ВУТ.

Исследование выполнено за счет средств проекта Государственное задание высшим учебным заведениям РФ FSWW-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение распределения макро- и микроэлементов в отходах обогащения углей Кузнецкого угольного бассейна / Н.В. Журавлева, Р.Р. Потокина, Р. Исмагилов, Н.В. Нагайцева // Химия В Интересах Устойчивого Развития. – 2016. – № 6. – С. 761–767.
2. О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенок, А.Е. Шаньшин, А.Т. Мухтаров // Журнал СФУ. Техника и технологи. – 2020. – Р. 657–668.

3. Sönnichsen N. Natural gas consumption worldwide from 1998 to 2021 // Statista. 2023. URL: https://www.statista.com/statistics/282717/global-natural-gas-consumption/ (Дата обращения: 13.11.2023).
4. World coal consumption 1978-2020. IEA 2023. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-coal-consumption-1978-2020 (Дата обращения: 13.11.2023).
5. FAO. The State of the World's Forests 2022 // Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 2022. – 166 p.
6. Bouckaert S. Net Zero by 2050 // Paris: International Energy Agency, 2021. – 224 p.
7. Anerud E., Krigstin S., Routa J., Brännström H., Arshadi M., Helmeste C., Bergström D., Egnell G. Dry matter losses during biomass storage Measures to minimize feedstock degradation // IEA Bioenergy, 2019. – 45 p.
8. Lewandowski W.M., Ryms M., Kosakowski W. Thermal Biomass Conversion: A Review // Processes. – 2020. – V. 8. – № 5. – P. 516.
9. Wu Y., Zhao Z., Li H., He F. Low temperature pyrolysis characteristics of major components of biomass / // J. Fuel Chem. Technol. – 2009. – V. 37. – № 4. – P. 427–432.
10. Hoang Pham L.K., Vi Tran T.T., Kongparakul S. et al. Data-driven prediction of biomass pyrolysis pathways toward phenolic and aromatic products // J. Environ. Chem. Eng. – 2021. – V. 9. – № 2. – P. 104836.
11. Parihar M.F., Kamil M., Goyal H.B., Gupta A.K., Bhatnagar A.K.An Experimental Study on Pyrolysis of Biomass // Process Saf. Environ. Prot. – 2007. – V. 85 – № 5. – P. 458–465.
12. Showaya A. Decomposition and characterization of Aqueous Pyrolysis Liquid: MS thesis. – South-Eastern Norway, 2022. – 54 p.
13. Borole A.P., Tsouris C., Pavlostathis S.G. et al. Efficient Conversion of Aqueous-Waste-Carbon Compounds Into Electrons, Hydrogen, and Chemicals via Separations and Microbial Electrocatalysis // Front. Energy Res. – 2018. – V. 6. – P. 94.
14. Nyashina G.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals // J. Clean. Prod. – 2018. – V. 172. – P. 1730–1738.
15. Boylu F., Dinçer H., Ateşok G.Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries // Fuel Process. Technol. – 2004. – V. 85. – № 4. – P. 241–250.
16. Oasmaa A., Fonts I., Pelaez-Samaniego M.R., Garcia-Perez M.E., Garcia-Perez M. Pyrolysis Oil Multiphase Behavior and Phase Stability: A Review // Energy & Fuels. – 2016. – V. 30. – № 8. – P. 6179–6200.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК, В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА КАРБИДА БОРА

Ж.С. Болатова[1], Р.Д. Герасимов[2], Ю.З. Васильева[3]

Томский политехнический университет,
[1]ИШЭ, ОЭЭ, гр. А0-08,
[2]ИШЭ, ОЭЭ, гр. А1-36,
[3]ИШЭ, ЛПМЭО, научный сотрудник

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В последнее время существует спрос на материалы, обладающие уникальными свойствами, в том числе на карбиды металлов и неметаллов. Среди таких материалов можно выделить карбид бора B_4C, характеризующийся следующими свойствами: высокая температура плавления, низкий удельный вес, превосходная твердость, химическая стабильность и жаростойкость [1]. За счёт вышеупомянутых свойств карбид бора является перспективным материалом, который применяется в различных отраслях: для улучшения абляционной и температурной стойкости композитов, для добавления в качестве присадки к ракетному топливу; при создании легких средств индивидуальной бронезащиты и бронетехники; в качестве высокотемпературных полупроводников или диэлектриков, высокотемпературных термопар и тиристоров; благодаря активному поглощению нейтронов из карбида бора изготавливают

стержни для регулирования ядерных реакций; в качестве абразивных и шлифовальных материалов; при изготовление сопел и деталей, замена которых представляет трудности [2]. В последнее время также расширяются новые области применения, что приводит к разработке различных синтетических процедур, включая механическое легирование, термическую регенерацию активированного угля и карботермическое восстановление, которые предназначены для получения порошка B_4C с различным размером частиц [3]. В настоящее время все большую популярность набирают плазмохимические методы синтеза карбидов благодаря высокой скорости протекания реакции. В настоящей работе представлены результаты синтеза карбида бора плазменным методом с использованием в качестве сырья углерода, полученного из автомобильных покрышек методом пиролиза. Такой подход позволяет улучшить экологические показатели, связанные с утилизацией автомобильных покрышек.

Экспериментальные исследования производились на лабораторном стенде, который включает в себя: модифицированный плазмотрон косвенного действия марки ВПР-410 (ООО «ШТОРМ», г. Екатеринбург, Россия), источник плазменной резки Сварог CUT-40 (Jasic Technology Company Ltd, Китай), стойку для регулировки положения графитового тигля от среза сопла плазмотрона, систему вентиляции и систему охлаждения плазмотрона. В качестве плазмообразующего газа использовался технический азот чистотой 99,999 %. Принцип действия основан на интенсивном нагреве исходной шихты, состоящей из аморфного бора и углерода, полученного путем пиролиза автомобильных покрышек в соотношении 4:1, которая загружается в графитовый тигель высотой 40 мм, внешним диаметром 30 мм. Дно и стенки тигля выстилаются графитовой бумагой, для снижения доли привнесенного углерода со стенок тигля. Во избежание окисления продуктов синтеза исходная шихта закрывается графитовой бумагой сверху, а до начала и после окончания цикла работы плазмотрона тигель продувается азотом.

Полученный образец исследовали на рентгенофазовом дифрактометре (XRD 7000s, CuKα-излучение; Shimadzu, Япония). На рис. 1 представлена типичная дифрактограмма карбида бора, синтезированного с использованием в качестве сырья углерода, полученного из автомобильных покрышек.

Анализ полученных рентгеновских дифрактограмм (рис. 1) показал образование фаз ромбоэдрального B_4C и графита C. Также при 2θ ~ 22,6° и ~36,3° наблюдаются образование малоинтенсивных пиков в виде гало, свидетельствующие эффекту двойникования [4]. Такой аномальный эффект обусловлен двумерным дефектом. Двойникование также наблюдается в карбидах кремния [5].

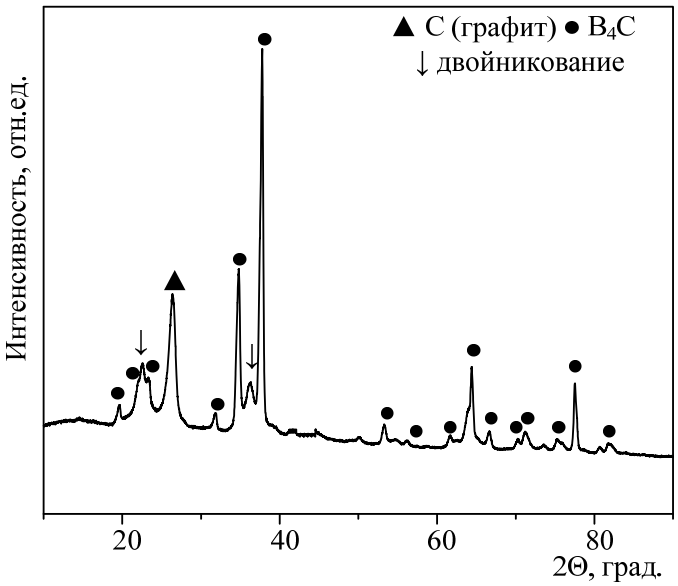


Рис. 1. Типичная рентгеновская дифрактограмма синтезированного карбида бора

Таким образом в работе показана возможность получения карбида бора при воздействии термической плазмы атмосферного давления на исходную шихту, содержащую углерод, полученный из автомобильных покрышек. Синтезированный порошок содержит 95 % мас. карбида бора и незначительные примеси исходного графита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress / V. Domnich, S. Reynaud, R.A. Haber, M. Chhowalla // J. Am. Ceram. Soc. – 2011. – V. 94. – P. 3605–3626.
2. Shaffer P.T.B., Schneider S.J. Engineering properties of carbides. – Ohio: Materials Park, ASTM engineered materials handbook, 1991. – 811 p.
3. Synthesis and consolidation of boron carbide: a review / A.K. Suri, C. Subramanian, J.K. Sonber, T.S.R.-Ch Murthy // Int. Mater. Rev. – 2010. – V. 55. – P. 4–40.
4. Influence of Synthesis Temperature on the Defect Structure of Boron Carbide: Experimental and Modeling Studies / U. Anselmi-Tamburini, Z. A. Munir, Y. Kodera, T. Imai, M. Ohyanagi // Journal of the American Ceramic Society. – 2005. – V. 88. – P. 1382–1387.
5. Microstructural evolution in liquid-phase-sintered SiC: part I, effect of starting powder / H. Xu, T. Bhatia, S.A. Deshpande, N.P. Padture, A.L. Ortiz, F.L. Cumbrera // Journal of the American Ceramic Society. – 2001. – V. 84. – P. 1578–1584.

ПОДХОД К ПРОИЗВОДСТВУ БИОТОПЛИВА ИЗ РАПСОВОГО МАСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОМЕМБРАННОГО РЕАКТОРА ЛАБОРАТОРНОГО МАСШТАБА

В.М. Чоботова, А.Е. Пискунова, Н.А. Хомутов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ33, А2-11, А1-11

Научный руководитель: М.В. Пискунов, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Биодизельное топливо – это возобновляемое топливо, получаемое из различных биологических источников, таких как растительные масла и животные жиры [1]. В настоящее время требуется использование устойчивых альтернативных видов топлива, которые должны быть возобновляемыми, эффективными, экономичными и менее экологически вредными по сравнению с традиционными ископаемыми видами топлива [2]. Разработаны различные виды биотоплива, из которых наиболее распространенными и экономически целесообразными являются биодизельное топливо и этанол. Данные виды топлива не требует существенных изменений в конструкции двигателя и имеют простую технологию производства [3]. Важно отметить, что свойства биодизельного топлива влияют на работу двигателя и наличие вредных выбросов. Для успешного внедрения биодизельного топлива в транспортный сектор разработано и испытано несколько технологий производства биодизельного топлива на различных видах сырья, чтобы обеспечить производство качественного топлива по разумным затратам [4]. Основным методом на сегодняшний день, является переэтерификация растительных масел и животных жиров. Использование мембранных технологий разделения веществ сокращает количество стадий промывки, которые требуются для удаления свободного глицерина, мыла, избытка спирта и остаточного катализатора после завершения реакции переэтерификации [5].

Целью данного исследования является разработка подхода к производству биотоплива из рапсового масла с использованием наномембранного реактора лабораторного масштаба.

Основными факторами, влияющими на выход и качество биотоплива, получаемого путем переэтерификации на основе катализатора, являются: исходное сырье, тип катализатора и его концентрация, молярное соотношение масла и спирта, температура реакции, время реакции, интенсивность перемешивания, содержания воды и скорость перемешивания [6].

В данной работе метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) получены из рапсового масла, смешиваемого с метанолом (химически чистым). В качестве катализатора используется гидроксид калия (химически чистый). Наномембраны для реактора изготовлены из формовочного раствора, представляющего смесь N, N-диметилформамида и ацетона в соотношении 15/85 мас. %, к которому добавлены поливинилдентфторид и сополимер винилидентфторида с тетрафторэтиленом в соотношении 50/50 мас. %. Средний размер пор составляет около 960 нм.

Для реакции переэтерификации смешивали 200 мл рапсового масла и 50 мл метанола с растворенным гидроксидом калия (2 г).

Экспериментальный стенд приведен на рис. 1. Смесь реагентов заливается в наномембранный реактор *5* цилиндрической формы. Внутрь наномембранного реактора помещается спиралевидный нагревательный элемент *8*, который необходим для поддержания постоянной температуры смеси внутри реактора. Наномембрана механически прикреплена к внешней части нагревателя. Внешний контур криостата *4* подключен к нагревательному элементу. С помощью электронного лабораторного термометра *9* выполняется дополнительный контроль температуры топливной смеси *6* в наномембранном реакторе. Перемешивание смеси реагентов осуществляется верхнеприводной мешалкой *1* со скоростью вращения 650 об/мин. Выход биотоплива с использованием наномембранного реактора периодического действия составляет примерно 70 %.

Реакция переэтерификации проводилась при температуре 50 °С в течение 65 минут. В течение этого времени прореагировавшие молекулы МЭЖК просачивались сквозь поры реактора. Молекулы рапсового масла и побочный продукт реакции, глицерин, имеющие больший размер, задерживались внутри реактора. После окончания реакции биотопливо промывали один раз водой в соотношении 1:3 для удаления нефильтрованных побочных продуктов.

Для измерения вязкости биотоплива использовались персональный компьютер с программным обеспечением Brookfield Rheocalc T, ротационный вискозиметр Brookfield DV3T-LV, шпиндель SC4-18 и термостат. Для измерения температуры вспышки в закрытом тигле – аппарат полуавтоматический ПЭ-ТВЗ. Плотность определялась пикнометрическим методом с помощью аналитических весов Vibra AF 225DRCE. Для определения цетанового числа использовался портативный калибровочный октанометр ОКТАН-ИМ. Для оценки среднего диаметра волокон и пористости поверхности мембран применялся метод сканирующей электронной микроскопии на базе микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH. Метод инфракрасной спектрометрии использован для качественного анализа компонентного состава МЭЖК.

Для оценки воспроизводимости процесса, а также долговечности и эффективности использования мембраны

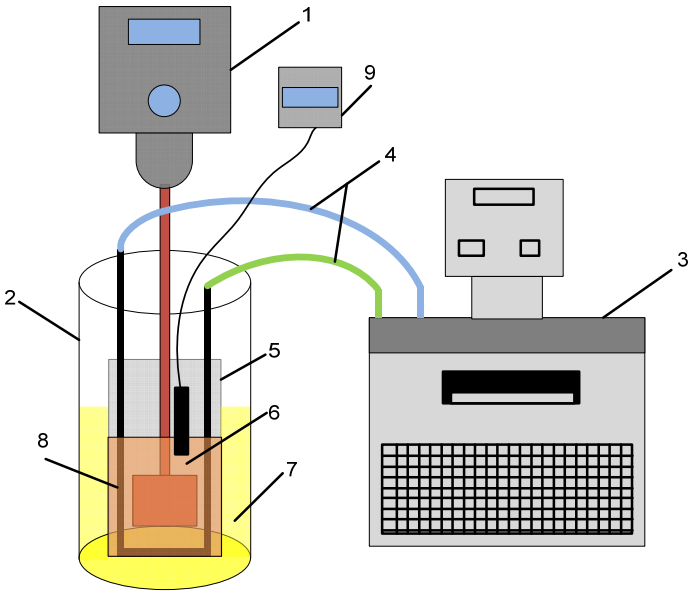


Рис. 1. Экспериментальный стенд:
1 – верхнеприводная мешалка;
2 – емкость для сбора биотоплива; 3 – криостат;
4 – внешний контур криостата;
5 – наномембранный реактор; 6 – топливная смесь;
7 – биотопливо; 8 – нагревательный элемент;
9 – лабораторный термометр

проведено четыре цикла приготовления биодизеля. После каждого цикла приготовления измеряли вязкость, плотность, цетановое число и температуру вспышки МЭЖК. Полученные результаты показывают, что в течение 4 циклов нет существенных различий между оцениваемыми параметрами. Это говорит о сохранении воспроизводимости и эксплуатационных характеристик мембраны, по крайней мере, после четырех последовательных приготовлений.

Применялось четыре способа очистки мембран: механическая очистка, обработка ультразвуком, обработка горячей водой и химическая очистка. Полученные результаты после промывки подтверждают влияние стратегий мембранной очистки на выход и свойства биодизельного топлива в течение 4 последовательных циклов приготовления. Все характеристики, которые рассматривались, связаны с методом очистки. Наиболее высокий выход биодизеля наблюдается после механической очистки, а самый низкий – после обработки ультразвуком и горячей водой. Различия в объеме полученного биотоплива можно объяснить изменением потока биодизельного топлива через мембрану, на который влияет пористость мембраны. Механическое удаление оставшихся на мембране компонентов оказалось наиболее эффективным для сохранения потока биотоплива через мембрану. При остальных способах очистки, таких как ультразвук, горячая вода и химическая промывка, большое количество компонентов остается в порах мембраны, что уменьшает поток биотоплива.

В табл. 1 приведены результаты измерений характеристик биотоплива после каждого цикла приготовления после механической очистки наномембраны от побочных продуктов приготовления.

Таблица 1. Результаты измерений характеристик биотоплива после каждого цикла приготовления после механической очистки наномембраны от побочных продуктов приготовления

Свойство	1	2	3	4	ГОСТ Р 53605-2009
Цетановое число	70	72	67	71	>51
Плотность (15 °C), кг/м^3	860	870	870	870	860–890
Кинематическая вязкость (40 °C), мм^2/с	5.25	5.64	5.25	5.65	3.5–5.0
Температура вспышки, °C	168	–	–	172	>120

Из полученных данных видно, что как минимум до четырех последовательных приготовлений можно обходиться без очистки мембраны, так как параметры практически не изменяются.

Значения цетанового числа после всех способов очистки хоть и колеблется, но соответствует стандарту [7]. Что касается вязкости, она немного превышает допустимое значение, установленное ГОСТ Р 53605-2009, в независимости от способа очистки. При сравнении характеристик, полученных путем переэтерификации на основе катализатора в наномембранном реакторе, с характеристиками в опубликованных работах с использованием аналогичного подхода [8–11], можно увидеть, что значения вязкости, плотности и температуры вспышки аналогичны, а цетановое число несколько выше в приготовленном биотопливе. Цетановое число характеризует степень воспламенения топлива, поэтому является его важной характеристикой. Чем выше цетановое число, тем легче топливо воспламеняется. Как правило, нефтедизельное топливо имеет цетановое число в диапазоне 40–50, в то время как для биодизельных топлив, в основном, характерны значения около 46–60. В некоторых случаях цетановое число биодизельного топлива превышает 100. Ожидается, что из-за повышенного цетанового числа в готовом биодизельном топливе запуск двигателя будет более легким.

Исследование выполнено при поддержке программы развития Томского политехнического университета «Приоритет 2030» (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-038-375-2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Georgogianni K.G. et al. Transesterification of rapeseed oil for the production of biodiesel using homogeneous and heterogeneous catalysis // Fuel Process. Technol. Elsevier. – 2009. – Vol. 90, № 7–8. – P. 1016–1022.
2. Nigam P.S., Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources // Prog. energy Combust. Sci. Elsevier. – 2011. – Vol. 37, № 1. – P. 52–68.
3. Singh A. et al. Key issues in life cycle assessment of ethanol production from lignocellulosic biomass: challenges and perspectives // Bioresour. Technol. Elsevier. – 2010. – Vol. 101, № 13. – P. 5003–5012.
4. Agarwal A.K., Gupta J.G., Dhar A. Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector // Prog. Energy Combust. Sci. Elsevier. – 2017. – Vol. 61. – P. 113–149.
5. Alsaiari M. et al. Efficient application of newly synthesized green Bi2O3 nanoparticles for sustainable biodiesel production via membrane reactor // Chemosphere. Elsevier. – 2023. – Vol. 310. – P. 136838.
6. Mathiyazhagan M., Ganapathi A. Factors affecting biodiesel production // Res. plant Biol. – 2011. – Vol. 1, № 2.
7. ГОСТ Р 53605-2009. Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Метиловые эфиры жирных кислот (FAME) для дизельных двигателей. Общие технические требования. – Введ. 2009-12-15.
8. Hoekman S.K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications // Renew. Sustain. energy Rev. Elsevier. – 2012. – Vol. 16, № 1. – P. 143–169.
9. Karaosmanoğlu F., Akdağ A., Cigizoğlu K.B. Biodiesel from rapeseed oil of Turkish origin as an alternative fuel // Appl. Biochem. Biotechnol. Springer. – 1997. – Vol. 61. – P. 251–265.
10. Rashid U., Anwar F. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil // Fuel. Elsevier. – 2008. – Vol. 87, № 3. – P. 265–273.
11. Mamat R. et al. Effect of fuel temperature on performance and emissions of a common rail diesel engine operating with rapeseed methyl ester (RME). SAE Technical Paper, 2009.

АНАЛИЗ ГОРЕНИЯ И СОСТАВА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ БИОТОПЛИВА, ПОЛУЧАЕМОГО НАНОМЕМБРАННЫМ СПОСОБОМ

А.А. Дюпин, А.Е. Ашихмин, Д.А. Верходанов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ТиТ, гр. 5Б01, А2-11, 5БМ23

Научный руководитель: М.В. Пискунов, доцент, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ

Биотопливо рассматривается как один из источников энергии для транспортного и энергетического секторов, так как в данный момент актуальна тема перехода на возобновляемые источники энергии и сокращение выбросов углерода [1, 2]. Ввиду невозобновляемости и истощения нефтяных ресурсов биотопливо стало неизбежным выбором в качестве альтернативного топлива. Учитывая, что производство топлива не должно конкурировать с продуктами питания, производство биотоплива ориентировано на увеличение доли альтернативных источников [3]. Преимуществами использования биотоплива являются: доступность (так как оно может быть изготовлено из широкого ряда ресурсов, таких как масла, жиры, сельскохозяйственные отходы и др.), нейтральность углерода, утилизация отходов, энергетическая и экономическая безопасность, меньшая зависимость от нефтяных ресурсов [4]. Значительный интерес к биодизельному топливу связан с возможностью сокращения парниковых газов. Кроме того, его использование уменьшает выбросыв углеводородов (HC), монооксида углерода (CO) и твердых частиц (PM) [5]. В сравнении с традиционным топливом, биодизель является более экологичным, однако не в отношении NO_x. Как правило, концентрация NO_x в продуктах сгорания выше при использовании биодизеля [6]. В данном исследовании с помощью анализа дымовых газов выполнено сравнение эмиссионных характеристик (CO, NO_x) образцов биодизелей и оценено влияние рециркуляции отработавших газов на изменение концентрации основных газообразных продуктов сгорания. Анализ концентраций химиче-

ских веществ, содержащихся в отработанных газах, при сжигании биотоплива является важным аспектом, позволяющим охарактеризовать целесообразность использования биотоплива, а также эффективность работы энергетической установки. Полученные результаты исследования на испытательном стенде с вихревой горелкой позволили выделить оптимальный состав смесевого биотоплива.

Исследуемое биотопливо произведено путем экологически устойчивого подхода – переэтерификации и нанофильтрации в наномембранном реакторе, произведенном методом электроспиннинга из поливинилиденфторида и сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом. В качестве исследуемых жидкостей используются метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) рапсового масла (B100), соответствующие смеси дизеля с МЭЖК (B6 и B12 т. е. примесь МЭЖК составляет 6 и 12 % от массы дизеля) и дизельное топливо. Для приготовления МЭЖК используется рафинированное рапсовое масло фирмы «Орелмасло», метиловый спирт (химически чистый) в качестве этерифицирующего агента и едкий калий (химически чистый) в качестве катализатора. Выбор веществ связан с тем, что метиловые эфиры, в отличие от этиловых, демонстрируют более высокую выходную мощность и вращающий момент в испытаниях на двигателях. Физические свойства данных жидкостей представлены в табл. 1. Они определялись следующим образом: цетановое число измерялось на портативном октанометре, значение температуры вспышки получены по методу Пенски-Мартенса, вязкость измерялась при 40 °C на вискозиметре Brookfield DV3T-LV, значения коэффициента поверхностного натяжения измерены с помощью тензиометра цифрового Kruss K20. Более подробно методика определения свойств жидкостей представлена в работах [7, 8].

Таблица 1. Свойства используемых жидкостей

Параметр	Топливо			
	Дизель	B6	B12	B100 (МЭЖК)
Цетановое число (ЦИ), ед.	53	55,7	57,6	141
Температура вспышки в закрытом тигле ($T_{вс}$), °C	66	62	63	>170*
Вязкость при 40 °C (ν), мм^2/с	3,07	2,53	2,54	3,81
Плотность (ρ), кг/м^3	841	830	834	869
Коэффициент поверхностного натяжения (σ), мН/м	28,1	27,4	27,5	30,5

**Верхний предел измерения термометра 170 °C. До этой температуры вспышки зафиксировано не было.*

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке с вихревой горелкой, оборудованной камерой сгорания с оптическим доступом и системой рециркуляции дымовых газов. Данный стенд позволяет определять характеристики распыления (количество, размеры, скорости и траектории движения капель жидкости), горения (температура и структура пламени) и эмиссионные характеристики (концентрации CO, NO, CO_2, O_2) жидких топлив. Испытания по сжиганию топлива и анализу продуктов сгорания топлив проводились с включенной системой рециркуляции отработавших газов (EGR) и без неё, давление на впрыске (P) составляло 0,6 и 1,2 МПа. Система EGR представляет собой устройство, которое позволяет вернуть часть отработанных газов в камеру сгорания для смешивания с воздухом и топливом, в результате чего снижается образование и выброс в атмосферу оксидов азота (NO_x). На лабораторном стенде роль системы EGR выполняет дроссель клапан и тракт рециркуляции, при открытии клапана часть отработанных газов по тракту подаётся в камеру сгорания для повторного сжигания. Для анализа газо-воздушной смеси используется газоанализатор «Тест 1» с диапазоном измерения компонентов: 0–16 % (CO), 0–20 % (CO_2), 0–2000 ppm (NO), 0–21 % (O_2). Зонд – щуп газоанализатор располагается в кожухе теплообменника. Выбор места расположения зонда определяется в зависимости от скорости потока отработавших газов, для наиболее достоверного измерения необходимо место расположения с наименьшей скоростью потока. При проведении опытов газоанализатор в реальном време-

ни строит кривую изменения компонентов дымовых газов. Коэффициент эквивалентности λ (определяется как отношение массового расхода топлива к массовому расходу воздуха, разделенное на такое же отношение при стехиометрии рассматриваемой реакции) во время исследования поддерживался на уровне 1.

При исследовании горения топливных композиций на лабораторном стенде с вихревой горелкой получены концентрации основных газообразных продуктов сгорания (CO, NO_x). Для оценки влияния таких факторов как *P*, массовой доли МЭЖК в составе топлива и EGR представлены рисунки осредненных значений концентраций компонентов при квазистационарном режиме горения при *P*, равном 0,6 и 1,2 МПа (рис. 1).

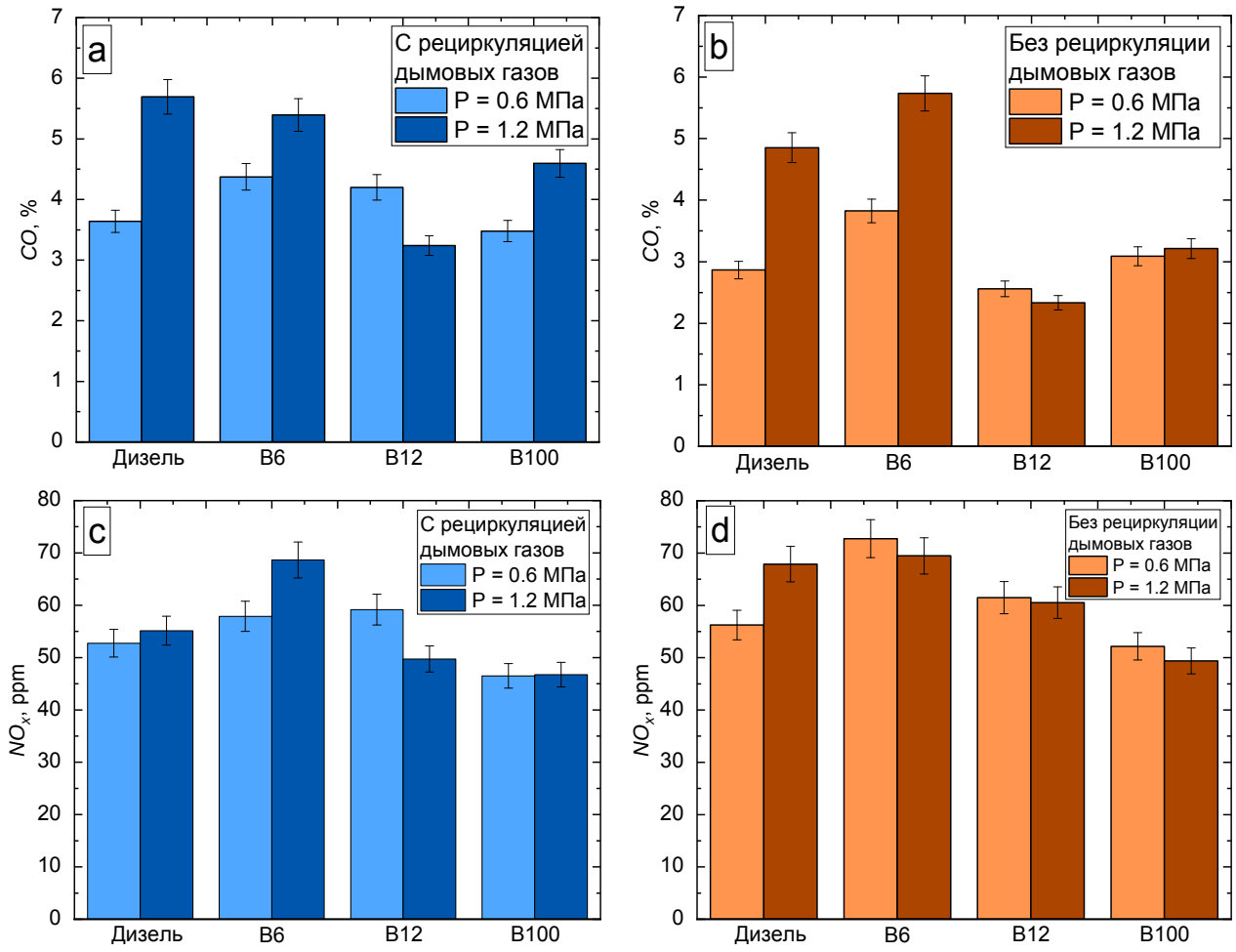


Рис. 1. Средние значения концентраций компонентов отработавших газов в условиях EGR и без нее при коэффициенте эквивалентности λ = 1: CO (a–b), NO_x (c–d)

Анализ изменения концентрации NO_x в отработанных газах позволил сформулировать заключение о снижении концентрации этих газов на 3–20 % при применении системы EGR (рис. 1, *c–d*). Однако, заметно несущественное увеличение концентрации NO_x в составах с МЭЖК относительно дизельного топлива [5]. Проявляется “biodiesel NO_x effect”. Он заключается в высоком уровне ненасыщенных соединений при сжигании МЭЖК, вследствие чего образуется больше углеводородных радикалов, чем при сжигании дизельного топлива, приводя к более высокому образованию NO_x [6]. Также можно заметить, что при увеличении *P* растет концентрация CO (рис. 1, *a–b*), что говорит о недожоге топлива [9]. Применение EGR также повышает концентрацию CO в отработавших газах. Однако, при горении состава B12 происходит снижение концентрации CO как при увеличении *P*, так и при применении EGR.

Исходя из этого можно сделать вывод о положительном влиянии МЭЖК на полноту сгорания топлива. Это связано с углеродной нейтральностью МЭЖК и содержанием окислителя в самом составе МЭЖК. На основе анализа полученных результатов можно отметить положительное влияние EGR на концентрацию вредных выбросов, содержащихся в отработавших газах. Концентрация NO_x в отработавших газах снижается в среднем на 11 %. Однако, в отношении генерации CO EGR увеличивает его концентрацию на ~14 % из-за недостатка окислителя.

Биодизель демонстрирует близкие к дизельному топливу характеристики и при этом позволяет снизить количество вредных выбросов в отработавших газах. Приготовление биодобавки в дизельное топливо с использованием оптимизированной по трудовым и временным затратам наномебранной технологии показало эффективность в испытаниях по горению. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что биотопливо демонстрируют уверенный задел для простой и доступной технологии получения зеленой энергии для отдельных секторов малой энергетики при децентрализованном производстве энергии.

Работа выполнена при поддержке программы развития «Приоритет 2030» (Приоритет 2030-НИП/ЕБ-038-1308-2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonenkamp T.B., Middelburg L.M., Hosli M.O., Wolffenbuttel R.F. From bioethanol containing fuels towards a fuel economy that includes methanol derived from renewable sources and the impact on European Union decision-making on transition pathways // Renew Sustain Energy Rev. – 2020. – Vol. 120. – P. 109667. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109667.
2. Chen Y., Ma J., Han B., Zhang P., Hua H., Chen H. et al. Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review // J Traffic Transp Eng (English Ed). – 2018. – Vol. 5. – P. 318–334. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001.
3. Kuznetsov G., Antonov D., Piskunov M., Yanovskyi L., Vysokomornaya O. Alternative Liquid Fuels for Power Plants and Engines for Aviation, Marine, and Land Applications // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 1–21. https://doi.org/10.3390/en15249565.
4. Johnson T.V. Review of Vehicular Emissions Trends // SAE Int J Engines. – 2015. – Vol. 8. – P. 1152–1167. https://doi.org/10.4271/2015-01-0993.
5. Robbins C., Hoekman S.K., Ceniceros E., Natarajan M. Effects of biodiesel fuels upon criteria emissions // SAE Tech Pap. – 2011. https://doi.org/10.4271/2011-01-1943.
6. Hoekman S.K., Robbins C. Review of the effects of biodiesel on NOx emissions // Fuel Process Technol. – 2012. – Vol. 96. – P. 237–249. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036.
7. Ashikhmin A., Khomutov N., Piskunov M., Strizhak P., Yanovsky V. Synergistic effect of the fuel microemulsion characteristics on drop interaction with a hot wall // Energy and Fuels. – 2021.
8. Ashikhmin A., Andropov M., Piskunov M., Strizhak P., Yanovsky V. Effects of temperature on viscosity, stability, and microstructure of water-in-biodiesel microemulsions. – 2021. https://doi.org/10.1080/01932691.2021.1984939.
9. Liu H., Lee C.F.F., Huo M., Yao M. Combustion characteristics and soot distributions of neat butanol and neat soybean biodiesel // Energy and Fuels. – 2011. – Vol. 25. – P. 3192–3203. https://doi.org/10.1021/ef1017412.

СИНТЕЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ РЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

А.В. Власов[1], А.А. Лавренчук[2]

Томский политехнический университет,
[1]ИШЭ, ОЭЭ, А2-48,
[2]ИШЭ, ОЭЭ, З-А9-27

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Актуальность темы синтеза карбида кремния и исследования его свойств не снижается по причине высокого спроса на мировом рынке, а кризисы последних лет только его увеличивают [1, 2]. Востребованность и высокий спрос на карбид кремния прежде всего связан с высокими эксплуатационными свойствами материала и различным применением в области авиастроения, ядерной энергетики, наноматериаловедения, обширным количеством политипных модификаций [3, 4].

Основным и масштабируемым методом получения карбида кремния считается технология Ачесона, практически не претерпевшая изменения еще с конца 19, однако высокие затраты электроэнергии на получение карбида кремния и неоднородность получаемой продукции приводят к необходимости модернизации данной технологии [6]. Наличие примесей и неоднородности в конечном продукте связано с неравномерным распределением теплового поля при отдалении от источника выделения энергии, в результате чего невозможно достичь протекания реакции между исходными компонентами в полной мере. Также следует отметить высокую трудоемкость процесса разделения готового продукта от возвратной шихты и практически полное отсутствие возможности регулирование процесса.

Для проведения текущих исследований использовалась технологическая конструкция лабораторной установки собственной разработки (рис. 1), в основе которой лежит общепромышленный и ранее известная методика синтеза карбида кремния. Предложена конструктивная модернизация реакторной зоны, обеспечивающей контролируемое протекание реакции синтеза карбида кремния [7]. Основным преимуществом данного исполнения является более равномерное распределение теплового поля внутри реакционной зоны и снижение энергетических затрат для получения карбида кремния. Важным компонентом сборки является реализация теплоизолирующего слоя, состоящего из графитового войлока, муллитокремниземистой ваты, которые помещены в газобетонный блок.

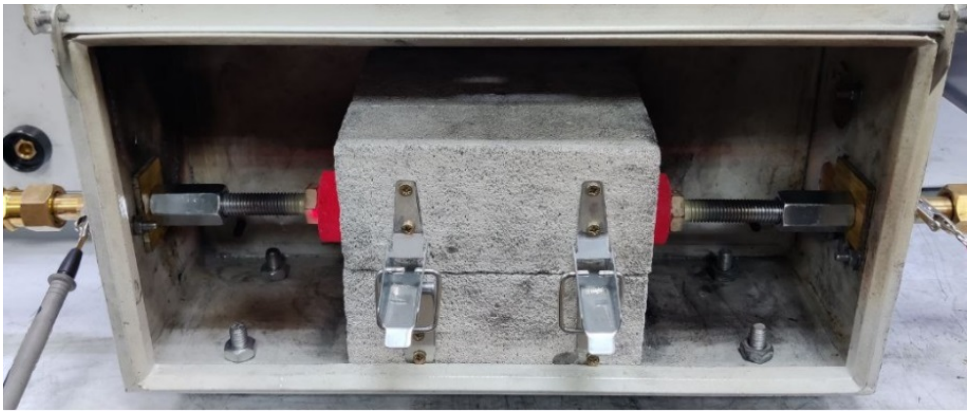


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки после синтеза

Установка предполагает использование горизонтально расположенных графитовых элементов сборки, через внутреннюю часть которой протекает электрический ток от источника постоянного тока. В ходе исследования был проведен ряд экспериментальных серий с целью определения режимов работы экспериментальной установки, обеспечивающей полную реакцию между исходными компонентами и снижение энергетических затрат. Используемое исходное сырье представляло смесь оксида кремния SiO_2 и технический углерод C без иных добавок, а также другую смесь чистого коммерческого кремния Si и углерода C. В результате серии экспериментов определено, что при силе тока 450 А, установленной на источнике постоянного тока (ИПТ), и времени теплового воздействия 180 с, обеспечивается полное протекание реакции между исходными компонентами с получением фазы карбида кремния SiC, потребление электроэнергии в таком случае составляло 0,31 кВт·ч (регистрация показаний осуществлялась электрическим счетчиком «Меркурий 234»). Дальнейшее увеличение длительности процесса или силы тока на ИПТ приводит к повышенному износу элементов конструкции.

Протекание реакции синтеза карбида кремния при использовании данной технологии происходит согласно уравнению реакции (1):

$$SiO_2 + 3C = SiC + 2CO; \quad (1)$$

Однако протекание реакции при больших размерах частиц, используемых в промышленном производстве SiC, сопровождается обширной диффузией. Таким образом, образование SiC происходит в результате четырех субреакций, каждая из которых обеспечивает массоперенос в паровой фазе [8]:

$$C + SiO_2 \rightarrow SiO(г) + CO(г); \quad (2)$$

$$SiO_2 + CO(г) \rightarrow SiO + CO2(г); \quad (3)$$

$$C + CO_2(г) \rightarrow 2CO(г); \quad (4)$$

$$2C + SiO \rightarrow SiC + CO(г). \quad (5)$$

Кроме этого, имеется возможность получения карбида кремния прямым нагревом чистых порошков кремния и графита согласно уравнению реакции (6):

$$Si + C = SiC. \quad (6)$$

Проведенная серия экспериментов выявила технологическую возможность получения карбида кремния при использовании лабораторной установки, основанной на общепромышленном методе синтеза, с измененной конфигурацией реакционной зоны, что позволило снизить энергопотребление и повысить качество продукта. Получены образцы порошкового карбида кремния (рис. 2), а в результате проведения рентгеноструктурного анализа получены картины рентгеновской дифракции (рис. 3), на которых отмечены основные максимумы кубического карбида кремния ∝-SiC, малоинтенсивные максимумы углерода и фазы α-SiC. Отсутствие оксидных соединений в составе конечного продукта свидетельствуют об отсутствии кислорода в реакционной зоне при протекании реакции.

Рис. 2. Порошок полученного карбида кремния SiC

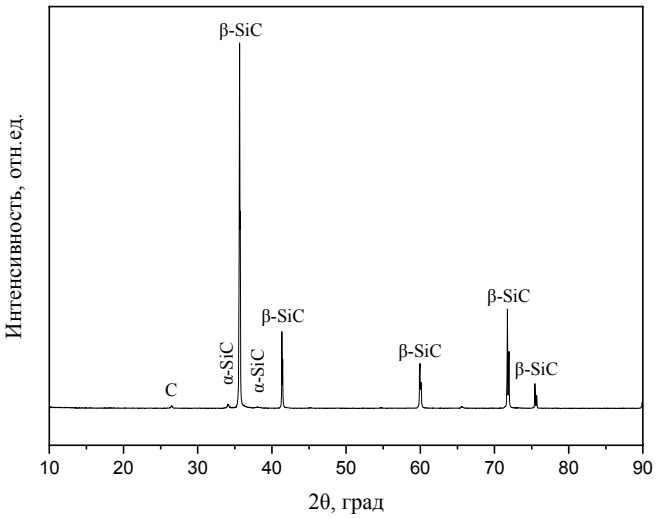


Рис. 3. Рентгеноструктурный анализ полученного порошка

Результаты и развитие данного исследования, а также анализ энергетических, структурных, качественных характеристических зависимостей по синтезу карбида кремния имеют большую практическую ценность для промышленности. Полученные результаты могут быть использованы для повышения технологической эффективности производства карбида кремния, в том числе снижения энергетических затрат за цикл изготовления и повышения качества готового продукта, путем оптимизации состава исходной шихты. Такая последовательность действий позволит снизить брак при синтезе материалов, что исключит необходимость в повторной переработке шихты, снижая длительность и трудоемкость технологического цикла, в свою очередь удастся достичь соответствие конечного продукта установленным требованиям.

Исследование выполнено за счет средств проекта Государственное задание высшим учебным заведениям РФ FSWW-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sweney M. Global shortage in computer chips «reaches crisis point» // Guard. March. – 2021. – Vol. 21. [Электронный ресурс]. URL: https://www.theguardian.com/business/2021/mar/21/global-shortage-in-computer-chips-reaches-crisis-point (дата обращения 01.11.2023).
2. Patrizio A. The chip shortage is real, but driven by more than COVID // Network World. July. – 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://www.networkworld.com/article/3623753/the-chip-shortage-is-real-but-driven-by-more-than-covid.html (дата обращения 02.11.2023).
3. Patnaik P. Handbook of Inorganic Chemicals. – McGraw-Hill, 2003.
4. Агалямова Э.Н., Беленков Е.А., Грешняков В.А. Структура полиморфных разновидностей карбида кремния // Вестник Челябинского государственного университета. – 2011. – № 15. – P. 15–24.
5. Закожурников С.С., Закожурникова Г.С. Оптимизация технологического процесса производства карбида кремния // Молодой ученый. – 2016. – № 9. – P. 147–150.
6. Production of artificial crystalline carbonaceous materials: US Pat. / Acheson E.G. // 1893. – Vol. 492. – P. 767.
7. Устройство для получения порошка карбида кремния: пат. Рос. Федерация / А.Я. Пак, П.С. Гринчук, А.В. Власов, П.В. Поваляев, А.А. Гумовская // Заявка. Входящий № W23040951. Регистрационный № 2023119027. Дата поступления (дата регистрации) 19.07.2023.
8. Weimer A.W. Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing. – Chapman & Hall, 1997.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИИ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ МХОВ-ТРАНСПЛАНТАТОВ

М.А. Татаринцева

Томский политехнический университет,
ИЯТШ, ОЯТЦ, гр. 0А03

Научный руководитель: Н.С. Рогова, к.т.н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ

Угольная промышленность является одной из основных отраслей в Кемеровской области, что приводит к значительному загрязнению природы тяжелыми металлами (ТМ) и другими химическими элементами. Перенос тяжелых частиц от источника загрязнения с воздушными массами на большие расстояния оказывает деструктивное воздействие на организм человека [1].

Повышенная опасность пылеватых частиц кузбасских углей обусловлена их геохимической спецификацией – частицы в больших количествах содержат ТМ, обладающие канцерогенным действием [2–4]. Отметим, что основным способом попадания вредных веществ в организм человека является ингаляционный путь. Это объясняет высокий уровень заболеваемости населения городов Кузбасса заболеваниями дыхательной системы [5]. Поэтому контроль и оценка уровней загрязнения от различных предприятий угольной промышленности необходим.

Одними из подходящих методов исследования для длительных экспозиций является метод с использованием биоиндикаторов. Мхи обладают рядом экологических особенностей, которые делают их подходящими для использования в биомониторинге.

В силу экологических особенностей, мхи являются подходящим материалом для биомониторинга [6]. Они обладают хорошей аккумуляционной способностью по отношению ко многим элементам, имеют большую площадь покрытия и распространены во многих климатических поясах. Мхи часто растут группами и могут выживать в сильно загрязненной окружающей среде, а их жизненный цикл достигает 15 лет, что необходимо при длительной экспозиции в исследованиях.

Целью данной работы является проведение оценки загрязнения атмосферного воздуха ТМ города Берёзовский (Кемеровская область), расположенном в зоне влияния предприятий угольной промышленности, посредством биомониторинга с помощью мхов. Учеными Томского политехнического университета был разработан метод для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха ТМ и другими токсичными элементами [7]. В качестве материала в этом методе используется мох Пилезия многоцветковая. (Pylaisia polyantha (Hedw.) B. S. G.). В настоящее время ведутся работы по апробации активного метода-биомониторинга.

Мхи-трансплантаты были отобраны вблизи поселка Киреевск (экологически чистый район Томской области, удаленный на 50 км от крупных населенных пунктов и оживленных автодорог). Образцы Pylaisia polyantha отбирали с коры тополей и осин. Отобранные мхи сразу же очищали от различных примесей (насекомых, семян, почечных чешуек и т. п.) и сушили при комнатной температуре, разложив на полиэтиленовой пленке. Далее каждый образец мха крепили к основе из сетки нитками из натурального волокна. Для сохранения жизнеспособности мха при трансплантации выбрана нейлоновая сетка, которая не оказывает на него никакого воздействия. Благодаря мелкой ячейке этой сетки создаются естественные условия для обитания мха, что способствует его выживанию. Из выбранного материала были созданы основы для планшетов размером 20×30 см. На каждую прямоугольную заготовку были вы-

ложены в один слой образцы мха (рис. 1, *а*). Для накопления загрязняющих веществ, подготовленные образцы мха в форме планшетов были размещены на стволах деревьев: тополей, осин, берез на высоте 1,5–2 м от земли (рис. 1, *б*), что соответствует росту среднестатистического человека.

Рис. 1. а) Планшет на нейлоновой сетке; б) образец на стволе дерева

Летом 2022 г. было размещено 99 образцов мха Pylaisia polyantha в 33 точках на территории г. Берёзовский (рис. 2) и 3 образца на фоновой территории (д. Медынино, Кемеровская область), схожей по климатическим условиям с исследуемой территорией. Выбор места для размещения проб основан на одном из преимущественных направлении ветра [8]. Сбор образцов был проведен 4–5 ноября 2022 г, время экспозиции составило 4 месяца. Образцы в т. 1 были утеряны. Для обеспечения сопоставимости и достоверности результатов, образцы были отобраны в период без осадков.

После сбора планшетов подготавливали пробы к проведению нейтронно-активационного анализа (НАА) согласно отработанной ранее методике для эпифитного мха [7]. Были изготовлены таблетки диаметром 1 см и массой 170–200 мг. Из каждого образца мха получили три параллельные пробы. Далее таблетки заворачивали в фольгу и нумеровали. Всего было изготовлено 85 проб.

Содержание 26 элементов (Ba, Br, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, La, Lu, Mo, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, U, Yb, Zn) в пробах мха было определено с помощью

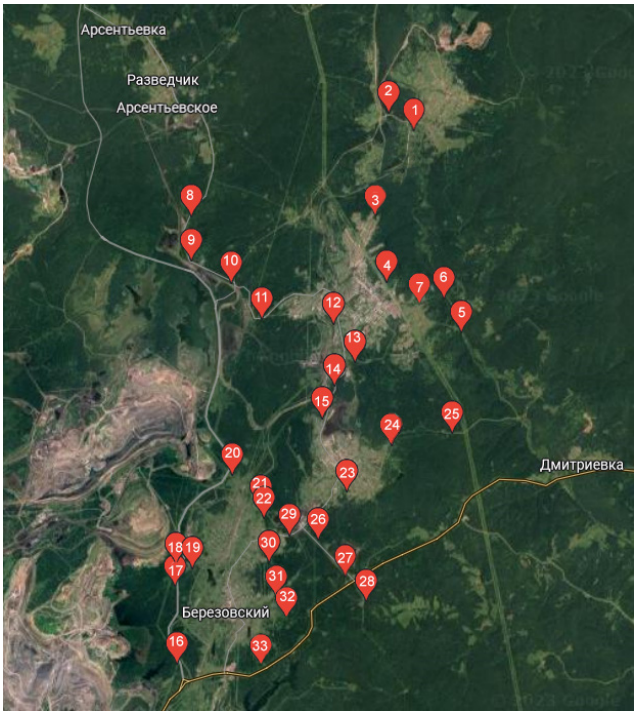


Рис. 2. Точки трансплантации мхов в г. Берёзовском

НАА. Для определения содержания элементов по долгоживущим изотопам образцы подвергались облучению потоком тепловых нейтронов на исследовательском реакторе ИРТ-Т ТПУ, г. Томск РФ. Затем активность каждой пробы измеряли с помощью гамма-спектрометра на базе особо чистого германия. Для обработки аппаратурных гамма-спектров была использована программа «Genia-2000», разработанная компанией CANBERRA. Погрешность измерений составила 10−15 %.

Путем измерения площади под пиком полного поглощения определяемого элемента в *i*-м образце и в образце сравнения (стандарты МАГАТЭ: лист березы (ЛБ-1) и ТАБАК-6 массой 170–200 мг), было определено содержание элементов относительным методом.

Расчетная формула для концентрации *i*-го элемента имеет вид (1):

$$C_{xi} = C_{x\text{эт}} \frac{S_{xi} \cdot m_{x\text{эт}}}{S_{x\text{эт}} \cdot M_i} \left[\frac{\text{мкг}}{\text{г}}\right] \quad (1)$$

где C_{xi} – концентрация химического элемента в *i*-й пробе мха; $C_{x\text{эт}}$ – концентрация химического элемента в эталоне; M_i – масса *i*-й пробы; $m_{x\text{эт}}$ – масса химического элемента в эталоне; S_{xi} – площадь под пиком полного поглощения элемента в *i*-й пробе мха; $S_{x\text{эт}}$ – площадь под пиком полного поглощения элемента в эталоне.

В табл. 1 представлены максимальные и минимальные концентрации для исследуемой и фоновой территории.

Таблица 1. Максимальные, минимальные и фоновые значения концентраций, мкг/г

Элемент	max/min	Фоновые	Элемент	max/min	Фоновые
Ba	955/230	193	Na	3179/94	116
Br	16,1/6,2	5,6	Nd	5,1/0,5	0,8
Ca	40000/14350	18120	Rb	42,9/9,1	9,5
Ce	11,8/3,3	3,1	Sb	3,3/0,3	0,2
Co	4,5/1,5	0,9	Sc	1,7/0,5	0,5
Cr	13,6/4,3	3,2	Sm	0,99/0,11	0,18
Cs	1,3/0,2	0,2	Sr	902/107	115
Eu	1,17/0,08	0,10	Ta	0,33/0,05	0,08
Fe	4905/1775	1518	Tb	0,16/0,04	0,04
Hf	1,50/0,11	0,16	Th	1,4/0,5	0,4
La	4,8/1,1	1,5	U	1,10/0,02	0,03
Lu	0,23/0,02	0,01	Yb	1,6/0,11	0,16
Mo	5,3/0,15	0,19	Zn	392/122	80

Содержание всех анализируемых элементов в атмосферном воздухе г. Берёзовский выше фоновых значений. Исключением является кальций, концентрации которого в образцах мха не превышают значимо фоновых значений.

Содержание Sm, Ce, Th, Cr, Hf, Sr, Br, Cs, Sc, Rb, Fe, Zn, Co в атмосферном воздухе г. Берёзовский превышает фоновые значения в несколько раз. Концентрации химических элементов Lu, U, Yb, Sb, Bs, Nd, Na, Mo и Eu в большинстве образцов выше фона в десятки раз. Наиболее загрязнённым является атмосферный воздух в южной части города, в которой преимущественно сосредоточены шахты, обогатительные фабрики и угольный разрез.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект 23-27-00186).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние угледобывающей промышленности Кузбасса на здоровье населения региона / Л.Г. Шутько, Л.Л. Самородова // Уголь. – 2021. – No. 9. – С. 46–50.
2. Geochemistry of coal: Occurrences and environmental impacts of trace elements / Y.E. Yudovich, M.P. Ketris // Coal Production and Processing Technology. – Boca Raton: CRC Press. – 2015. – P. 51–77.

3. Пространственное распределение химических элементов атмосферных выбросов угольной ТЭЦ / Н.К. Рыжакова, В.Ф. Рапута, Н.С. Рогова, А.Л. Борисенко, Е.А. Покровская // Экология и промышленность России. – 2013. – No. 1. – С. 52–55.
4. Микроэлементный состав снежного покрова в окрестностях угольных и газовых котельных как показатель экологичности используемого топлива / А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Е.А. Филимоненко, Н.А. Осипова, Т.С.Шахова // Безопасность в техносфере. – 2017. – No. 3. – С. 3–12.
5. О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2020 г. // URL: https://ako.ru/upload/medialibrary/a7b/doklad_2020.pdf (дата обращения: 02.12.2022).
6. Изучение влияния условий размещения эпифитных мхов на содержание химических элементов при активном мониторинге / Н. С. Рогова [и др.] // Естественные и технические науки. – 2018. – No. 5. – С. 58–66.
7. Способ оценки загрязнения атмосферного воздуха тяжелыми металлами и другими химическими элементами с помощью эпифитных мхов: пат. Рос. Федерация, No 2011117784/28; заявл. 03.05.11; опубл. 10.10.12; Бюл. No. 28. – 12 с.
8. Погода // Gismeteo. URL: https://www.gismeteo.ru/ (дата обращения: 03.11.2023).

АКТИАЦИИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ НИТРАТОМ ЖЕЛЕЗА И ОТХОДАМИ МЕТАЛЛОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.К. Шуатаев, А.Ж. Калтаев, К.Б. Ларионов, к.т.н.

Томский политехнический университет

Уголь играет важную роль в мировой экономике, поскольку является ключевым энергоносителем, обеспечивающим основные объёмы генерации электрической энергии [1]. Однако, его использование также остаётся одним их крупнейших источников эмиссии парниковых газов и других сопутствующих технологических проблем [2]. К настоящему времени в области каталитического сжигания угля существует множество исследований. В одном из исследовании [5–7] было установлено, что оксиды металлов (такие как Fe_2O_3, CeO_2, ZnO и CuO) положительно влияют на процесс термического преобразования угля, что проявлялось в увеличении скорости реакции окисления с повышением удельного выделения количества тепла. Также было обнаружено, что добавки Fe_2O_3, CaO и MnO_2 могут ускорять процесс окисления каменного угля и антрацита с эффективным преобразованием их горючей части до CO_2 [6, 8]. Механизм каталитической активации процесса горения органических топлив связан с циклом окисления и восстановления оксидов [7, 9]. Таким образом, катализатор (оксид металла) играет роль агента, обеспечивающий адсорбцию и десорбцию окислителя, что в свою очередь повышает перенос адсорбированного кислорода к углероду и способствует выгоранию выделяющихся летучих соединений и углеродного остатка.

В свою очередь рядом авторов [10–11] было установлено, что использование отходов металлопрокатных производств (металлической окалины) может способствовать к повышению реакционности способности углей, что выражается в увеличении максимальной скорости реакции процесса окисления. В т. ч. использование металлической окалины позволяет снизить концентрацию оксида азота, образующегося в процессе горения угля [10]. Также в качестве активирующих добавок также могут быть использованы прекурсоры оксидов металлов в виде нитратов, карбонатов, ацетатов и сульфатов металлов [12]. Основным эффектом использования прекурсоров оксидов металлов является усиление их активирующего действия за счет двухстадийного механизма горения угля [13], который связан с разложением соли и выделением соответствующих газофазных продуктов (стадия 1) и последующим образованием оксида металла (стадия 2). Таким образом, прекурсоры в случае их комбинирования с оксидами металлов (например, металлической окалиной) могут оказывать усиливающее воздей-

ствие на активирующие свойства добавки, как на стадии зажигания угля, так и для последующего процесса горения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния активирующих добавок, выполненных на основе отходов металлопрокатного производства (металлической окалины) и предшественников оксидов металлов (нитрат железа) на реакционную способность каменного угля.

Экспериментально установлено, что использование металлической окалины и нитрата железа приводит к повышению реакционной способности топлива, о чем свидетельствует снижение времени задержки зажигания. За счет интенсификации процесса горения были снижены топливный недожог и концентрация образующегося CO в составе газофазных продуктов горения. Помимо повышения реакционной способности твердых топлив, применение активирующих добавок способствует снижению образующегося топливного недожога и более глубокого окисления CO до CO_2. Аналогичная тенденция в части уменьшения эмиссии CO была установлена также при проведении исследования процесса активируемого горения каменного угля на твердотопливном котельном агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международное энергетическое агентство: официальный сайт. – Париж. – Обновляется в течение суток. – https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal (Дата обращения 09.10.2023). – Текст: Электронный.
2. Международное энергетическое агентство: официальный сайт. – Париж. – Обновляется в течение суток. – https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer (Дата обращения 09.10.2023). – Текст: Электронный.
3. Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A. Fluidized bed catalytic combustion // Catal. Today. – 1999. – Vol. 47(1–4). – P. 339–346.
4. Simonov A.D., Fedorov N.A., Dubinin Yu.V. et al. Catalytic heat-generating units for industrial heating // Catal. Ind. – 2013. – Vol. 5(1). – P. 42–49.
5. Gong X., Zhancheng G., Zhi W. Reactivity of Pulverized Coals during Combustion Catalyzed by CeO2 and Fe_2O_3 // Combustion and Flame. – 2010. – Vol. 157 (2). – P. 351–356. doi:10.1016/j.combustflame.2009.06.025.
6. Ma B.-G., Li X.-G., Xu L., Wang K., Wang X.-G. Investigation on catalyzed combustion of high ash coal by thermogravimetric an
7. Cheng J., Zhou F., Xuan X., Liu J., Zhou J., Cen K. Comparison of the catalytic effects of eight industrial wastes rich in Na, Fe, Ca and Al on anthracite coal combustion // Fuel. – 2017. – Vol. 187. – P. 398–402. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.083.
8. Zou C., Wen L., Zhang S., Bai C., Yin G. Evaluation of catalytic combustion of pulverized coal for use in pulverized coal injection (PCI) and its influence on properties of unburnt chars // Fuel Process Technol. – 2014. – Vol. 119. – P. 136–145. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.022.
9. Cheng J., Zhou F., Xuan X., Liu J., Zhou J., Cen K. Comparison of the catalytic effects of eight industrial wastes rich in Na, Fe, Ca and Al on anthracite coal combustion // Fuel. – 2017. – Vol. 87. – P. 398–402. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.083.
10. Zhang H., Dou B., Li J., Zhao L., Wu K. Thermogravimetric kinetics on catalytic combustion of bituminous coal // J Energy Inst. – 2020. – Vol. 93. – P. 2526–2535. https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.08.012.
11. Lei Z., Liu M., Yan J., Chun T., Fang J., Li Z., et al. Catalytic combustion of coke nuts and in-situ NO reduction under the action of steel scale // Fuel. – 2021. – Vol. 289. – P. 119779. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119779.
12. Zou C., Zhao J.. Investigation of iron-containing powder on coal combustion behavior // J Energy Inst. – 2017. – Vol. 90. – P. 797–805. https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.06.004.
13. Larionov K.B., Berezikov N.I., Kaltaev A.Zh. Gorshkov A.S. Using Metal Carbonates to Intensify Coal Ignition and Combustion // Coke Chem. – 2022. – Vol. 65. – P. 167–173.

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

И.А. Рогова

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А01

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

В данной работе приводится описание возможного уменьшения влияния на окружающую среду магнитных полей воздушных линий электропередачи. Ввиду растущего спроса на электроэнергию и расширению электроэнергетического строительства, в нашем обществе все чаще поднимаются вопросы о воздействии таких объектов на живые организмы и, в частности, на человека.

Электромагнитные поля высоковольтных ЛЭП представляют собой одну из наиболее вредоносных форм воздействия на окружающую среду [1]. Существует немало исследований, которые установили, что усиленное воздействие электромагнитных полей на человека может способствовать возникновению различных проблем со здоровьем.

В результатах отечественных и зарубежных исследований отмечаются жалобы людей на головную боль, нарушения сна, снижение работоспособности, частые простудные заболевания [2]. Другие исследования приводят данные о том, что под воздействием электромагнитного поля возникают так называемые устойчивые группировки эритроцитов в крови, возникновение которых нарушает нормальное движение крови [3].

Были также опубликованы данные, указывающие на то, что воздействие ЭМП может вызывать нарушения нервной и психической деятельности, а также приводить к ухудшению репродуктивной функции [4]. В ходе исследования воздействия ЭМП на органы пищеварительной системы было обнаружено, что данный фактор оказывает негативное воздействие на клетки печени. Однако наиболее опасным является воздействие ЭМП на органы иммунной системы, в результате чего нарушается ее нормальная работа. Вследствие этого случаи возникновения онкологических заболеваний становятся все более частыми в последние годы [5].

В результате исследований было обнаружено, что магнитная составляющая поля имеет большее влияние на клетки живых организмов, чем электрическая. Так происходит из-за того, что магнитная составляющая имеет способность более свободного проникновения в ткани. Это может привести к изменению пространственной конфигурации биологических частиц с магнитными свойствами и нанесению серьезного вреда здоровью [6].

Величина воздействия магнитных полей зависит от различных факторов. На ее величину влияют, к примеру, технические характеристики электрооборудования, класс напряжения и токовые нагрузки [2].

Из-за сложности получения экспериментальных данных о максимальных напряженностях ЭМП на реальных объектах электроэнергетики, рекомендуется проводить анализ ЭМП в электроэнергетических системах с использованием математического моделирования [1].

То, насколько велика степень воздействия ЭМП на живой организм, обычно определяется через количество электромагнитной энергии, которую он поглощает в этом поле [6].

В РФ установлены предельно допустимые уровни (ПДУ) напряженности ЭМП [7]. Нормативные документы определяют конкретные допустимые значения величины магнитного поля: максимальная возможная магнитная индукция на застроенной территории составляет 50 мкТл, для жилых помещений этот показатель не должен быть больше чем 10 мкТл [8].

Оценка и нормирование ЭМП осуществляется в зависимости от времени его воздействия на работника за смену (табл. 1) [9].

При проектировании ВЛ учитываются нормы и требования по выбору параметров линии и особенности их прокладки. Все это нужно для того, чтобы влияние ЛЭП на окружающую среду было минимальным [6].

Таблица 1. Профессиональные ПДУ ЭМП

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	Общее		Локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0–10	24	30	40	50
11–60	16	20	24	30
61–480	8	10	12	15

Наиболее распространенные пути снижения ЭМП, применимые при строительстве:

1) отдаленное расположение ЛЭП от мест скопления людей;

2) электромагнитное экранирование. Для изучения эффективности данного метода был проведен эксперимент, в котором использовались разные строительные материалы. На расстоянии от ЛЭП 500 кВ были проведены измерения напряженностей электрического и магнитного полей. Замеры совершались на высоте 1,8 м от уровня земли при использовании навесов из различных стройматериалов, которые устанавливались продольно (рис. 1) и поперечно (рис. 2) относительно проводов.

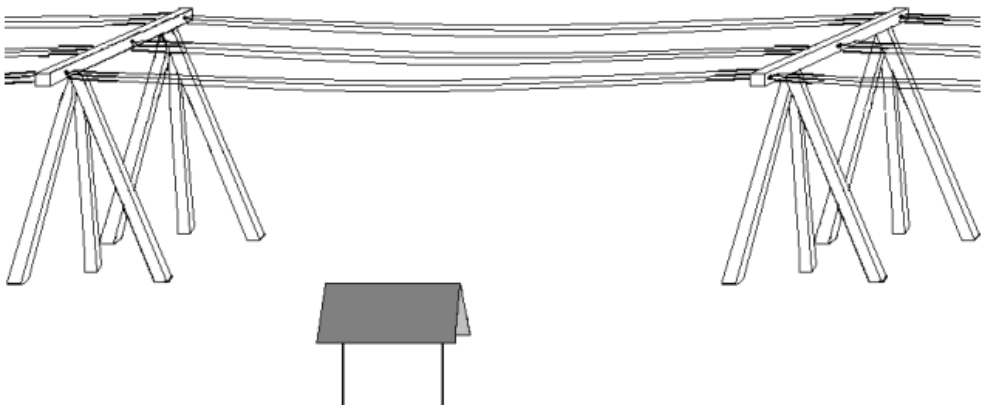


Рис. 1. Продольное расположение навеса

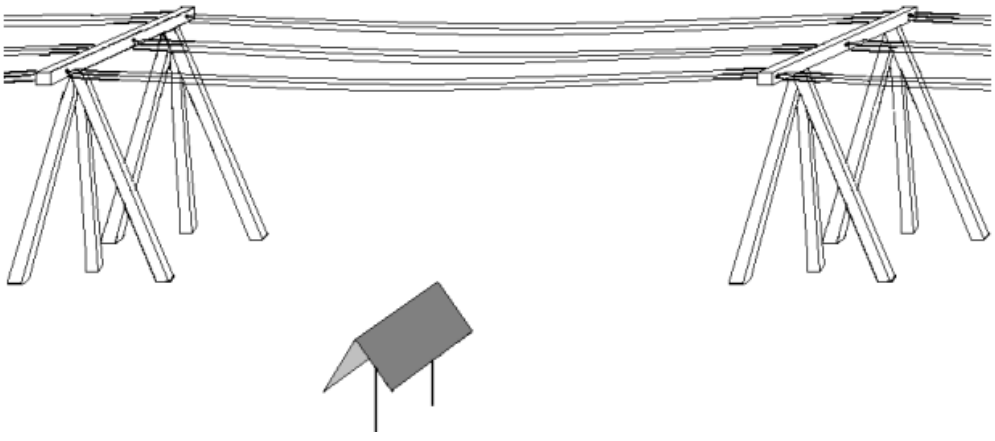


Рис. 2. Поперечное расположение навеса

Измеренные значения напряженностей полей, а также рассчитанные значения эффективностей экранирования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента

Строительный материал	При расположении навеса продольно по отношению к проводам ЛЭП				При расположении навеса поперечно по отношению к проводам ЛЭП			
	E_1, кВ/м	H_1, А/м	$Э_{E1}$, дБ	$Э_{H1}$, дБ	E_2, кВ/м	H_2, А/м	$Э_{E2}$, дБ	$Э_{H2}$, дБ
Шифер	5,60	3,31	0,13	0,07	5,62	3,32	0,10	0,05
Металлочерепица	4,47	3,01	2,09	0,90	4,50	3,03	2,03	0,84
Сталь	3,89	2,35	3,30	3,05	3,91	2,38	3,25	2,94

В результате данного эксперимента было установлено, что листовая сталь наилучшим образом соответствует требованиям по обеспечению электромагнитной безопасности. Кроме того, по результатам опытов можно видеть, что продольное расположение навеса относительно проводов ЛЭП является более эффективным, чем поперечное. Результаты данного эксперимента могут быть учтены при строительстве сооружений вблизи ЛЭП [10].

3) Транспозиция фазных проводов, которая также влияет на величину электромагнитных полей.

На рис. 3 показаны результаты моделирования транспозиции фазных проводов двухцепной линии электропередачи.

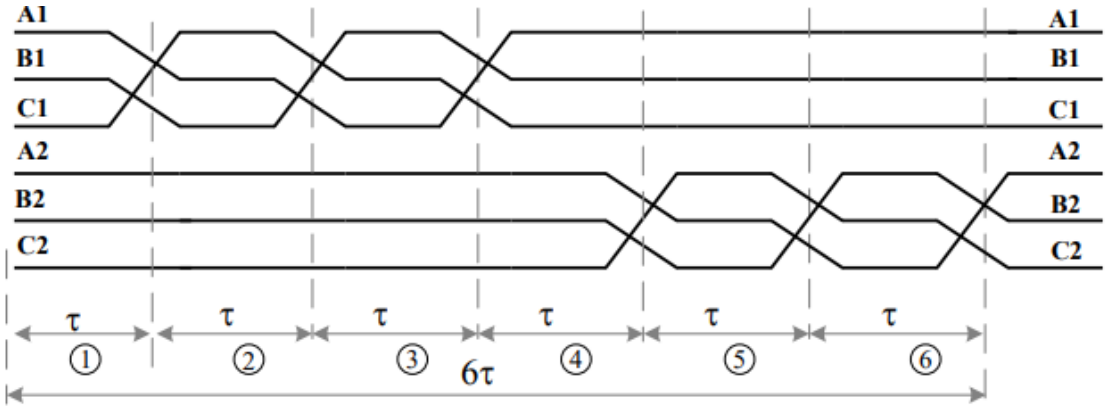


Рис. 3. Транспозиция двухцепной ЛЭП

Результаты опыта показывают, что участки ЛЭП при транспонировании характеризуются разными величинами напряженности ЭМП (табл. 3).

Таблица 3. Результаты моделирования

Поле	Тип ЛЭП	Участок ЛЭП						Сумма
		1	2	3	4	5	6	
Электрическое, кВ/м	Двухцепная	2,67	1,57	1,57	2,65	1,55	1,55	11,55
Магнитное, А/м		1,09	0,67	0,68	1,16	0,74	0,74	5,09

При помощи такого метода можно выполнять фазировку проводов для уменьшения влияния ЭМП от ЛЭП [1].

Таким образом, актуальным является вопрос по изучению влияния ЭМП ЛЭП. Вспомогательную роль здесь играет установление определенных экологических стандартов. Также стоит отметить, что использование описанных методов по снижению уровня магнитных полей играет важную роль в обеспечении безопасности жизни населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закарюкин В.П. Учет транспозиции проводов при моделировании электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 2. – С. 71–79.

2. Электромагнитные поля промышленной частоты электроустановок, размещенных в зданиях / Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г. [и др.] // Здоровье населения и среда обитания. – 2021. – Т. 29. – № 9. – С. 56–61.
3. Белов А.А. Влияние электромагитных полей на систему кровообращения человека / А.А. Белов, Е.Ю. Савченко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 255–265.
4. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона / О.А. Григорьев, В.Н. Никитина, В.Н. Носов и др. // ЗНиСО. – 2020. – № 10 (331). – С. 28–33.
5. Морфофункциональные изменения органов при воздействии искусственных электромагнитных полей / В.Л. Загребин, А.И. Краюшкин, Л.И. Александрова и др. // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2018. – № 3. – С. 19–24.
6. Никольский О.К. Экологическое влияние сельских электрических сетей 10–0,4 кВ на окружающую среду / О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 55–58.
7. Влияние промышленных электромагнитных полей на хаотическую динамику параметров сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли / А.В. Болтаев, Г.В. Газя, А.А. Хадарцев и др. // Экология человека. – 2017. – № 8. – С. 3–7.
8. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям» – М.: Минздрав России, 2001.
9. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» – М.: Минздрав России, 2003.
10. Свиридова Е.Ю. Методы снижения уровней электромагнитных полей линий электропередач при строительстве и реконструкции объектов / Е.Ю. Свиридова // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2010. – № 3. – С. 140–142.

ТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ СМЕСЕВЫХ ТОРФО-ДРЕВЕСНЫХ ТОПЛИВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ

А.К. Берикболов, А.Д. Мисюкова, С.А. Янковский

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А3-44

Научный руководитель: А.С. Заворин, профессор, д.т.н, НОЦ И.Н. Бутакова

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов термической конверсии смесевых твердых топлив на основе торфа и древесных отходов с учетом изменения их концентрации с целью получения полезных продуктов. В исследованиях применялась методика приготовления топливных смесей, включающая торф и отходы переработки деловой древесины, путем их смешивания для последующей термической конверсии. Эксперименты были проведены на экспериментальном стенде при температуре 600 °С. Получены три полезных энергетических продукта: синтез-газ, твердый углеродный остаток и жидкие углеводороды. Установлено, что при термическом разложении смеси торфа и древесных опилок в соотношении по массе 50 % торфа и 50 % древесных опилок был достигнут наивысший выход горючих газовых компонентов, качественный углеродный остаток и жидкие углеводороды.

Введение

Многие ученые и энергетики уже несколько десятилетий занимаются поиском альтернативных источников энергии и среди потенциальных вариантов выделяется торф и древесные отходы. Россия обладает огромными резервами торфа, которые, по данным Всероссийского научно-исследовательского института торфяной промышленности (ВНИИТП), оцениваются как 175,6 млрд т, что составляет более 35 % мировых запасов [1]. Увеличение использования местных видов топлива и источников энергии, а также повышение уровня утилизации и пе-

реработки отходов – это ключевые цели и приоритеты Экологической стратегии и энергетического плана Российской Федерации на период до 2030 года.

Кроме того, в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 20.01.2023 г. № 50, законодательно установлено, что древесина, оставшаяся после производственных процессов, не может быть утилизирована, а должна быть направлена на переработку. Согласно этому закону, все остатки древесины должны быть использованы для производства готовой продукции, компонентов для других товаров, производства тепловой энергии или мульчирования почвы. Одним из потенциальных решений этой задачи является формирование смесевых топлив на основе торфа и древесных отходов и их последующая глубокая переработка с получением энергетически полезных продуктов.

Цель настоящего исследования заключается в проведении анализа процессов термической конверсии комбинированных твердых топлив, используя торф и древесные отходы лесопиления, при изменении концентрации древесных отходов в смеси, с мониторингом одного из значимых продуктов этого процесса – синтез-газа.

Методика экспериментальных исследований

Смесевое топливо формировалось на основе торфа месторождения «Суховское», Россия, и отходов лесопиления от ООО «Дзержинский ЛПК». Процедура приготовления компонентов топливной смеси осуществлялась по методике, описанной ранее в работе [2].

Исследования проводились для смесей на основе торфа и древесных отходов в следующих пропорциях с добавлением последней от 10 до 50 %. С целью обеспечения равномерного распределения частиц в топливе и создания однородной смеси в различных массовых пропорциях, проводилась процедура перемешивания в течение 7 минут в шаровой барабанной мельнице. Полученная однородная смесь, подготовленная в разных пропорциях по массе, помещалась в тигель для перемещения в печь и проведения термической конверсии и непрерывной регистрации формируемой газовой составляющей.

Результаты экспериментальных исследований

Навески для экспериментальных исследований смеси торфа и древесных опилок были взвешены перед исследованиями с использованием аналитических весов. Проба массой 30±0,2 г. помещалась в специальный термостойкий тигель (1) и далее перемещалась в муфельную печь (2), которая нагревалась до температуры 600 °С со скоростью 10 °С/мин, и эта температура поддерживалась в течение 35–40 минут до завершения эксперимента.

На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда, разработанного для исследования процессов пиролиза топливных композиций.

В процессе совместного пиролиза древесных опилок и торфа, при постепенном увеличении доли последних в смеси, отмечается постепенное снижение выхода полукокса, но при этом существенное увеличение выхода газовых горючих компонент по сравнению с пиролизом однородного торфа. Установленный эффект является синергетическим взаимодействием газовых компонент двух видов низкосортных топлив. При температуре 560 °С наблюдается постепенное увеличение выхода газа, что обусловлено повышением температуры процесса термического разложения топливной смеси.

В температурном диапазоне 540–560 °С неорганические минералы и летучие компоненты в торфе разлагаются, а из древесных опилок выделяются также летучие компоненты, что приводит к образованию торфяно-древесного биоугля. Анализ остаточного углерода показал значительное изменение в массе 28–30 % от исходной топливной смеси. Результаты исследования газовых компонентов в процессе разложения топливных смесей приведены на рис. 2.

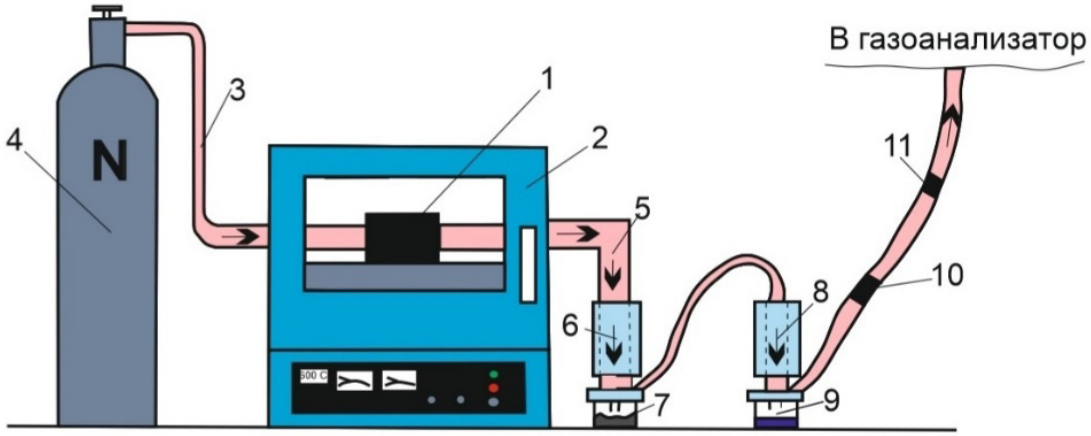
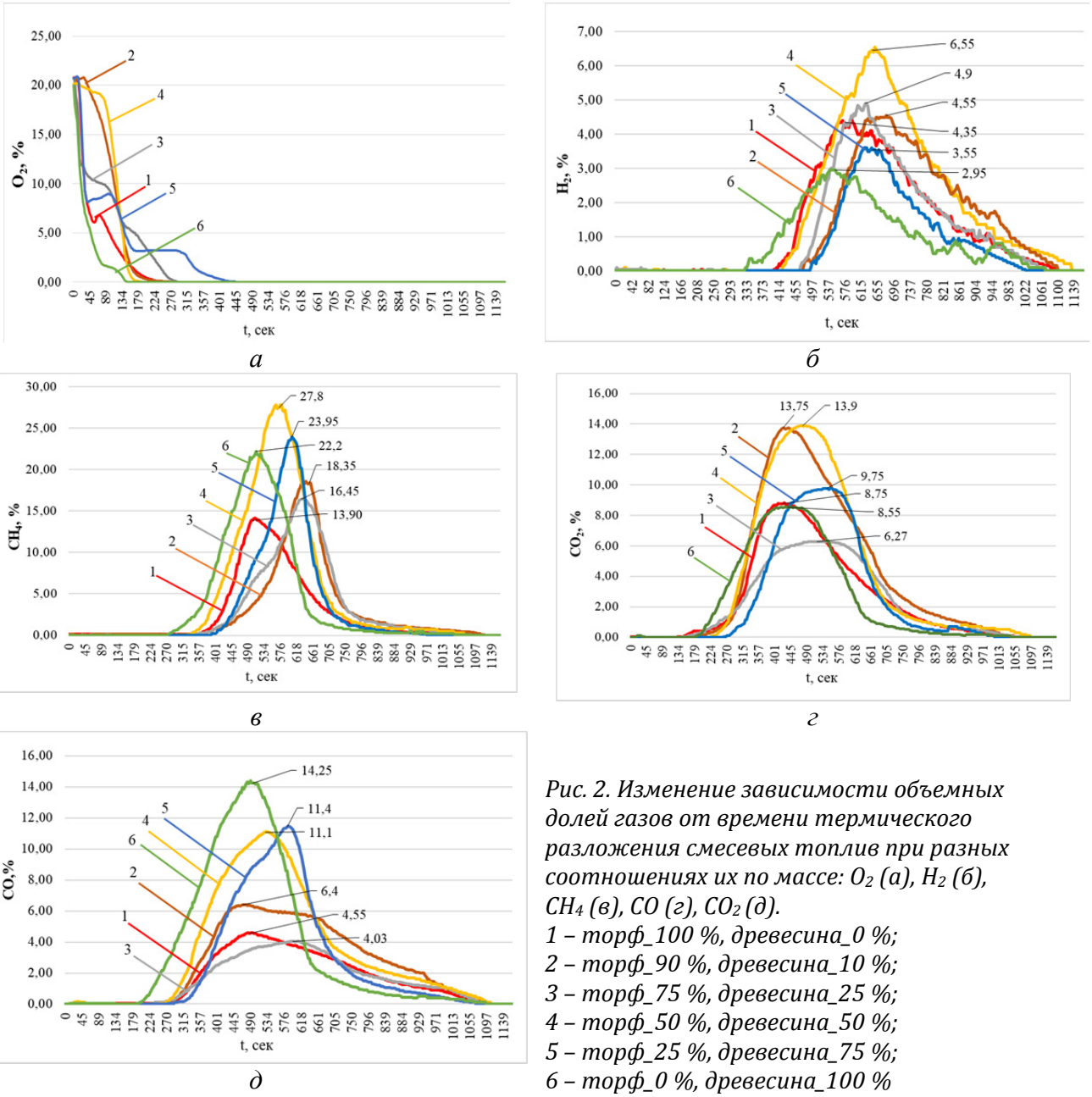


Рис. 1. Схема экспериментального стенда по глубокой переработке смесевых топлив с продувкой инертным газом для получения синтез-газа, жидких углеводородов и углерода:
1 – тигель с топливной композицией; 2 – муфельная печь; 3 – канал с подводом азота;
4 – баллон с азотом; 5 – продукто-отводящий канал; 6 – холодильный теплообменник;
7 – первый конденсатосборник (влагоотделитель); 8 – водяной охладитель газов;
9 – второй конденсатосборник (влагоотделитель);
10, 11 – фильтры очистки газа от пыли и смол

Пиролиз представляет собой один из множества химических процессов, которые происходят при повышенных температурах с недостаточным содержанием активного кислорода. Эти условия приводят к разложению сложных органических материалов на более простые соединения [3]. В ходе пиролиза уровень кислорода в газовой фазе продуктов снижается, так как он используется для окисления углерода и других элементов, входящих в состав органических материалов. Как показано на рис. 2, этот процесс естественным образом приводит к образованию газов, таких как диоксид углерода, водород, метан и монооксид углерода.

Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что повышение температуры в печи до 600 °С сопровождается увеличением интенсивности выделения водорода (см. рис. 2, *б*). Торф, в основном, состоит из гуминовой кислоты, асфальтена, частиц целлюлозы и гемицеллюлозы, в то время как древесные опилки, в основном, состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина [4]. С увеличением доли древесных опилок в исследуемых смесевых композициях наблюдается постепенное увеличение выхода водорода. Максимальная подынтегральная площадь определена для сформированных газовых компонент при разложении топливной смеси, где доля древесной компоненты составляла 50 % по массе. Дальнейшее увеличение доли древесных опилок не приводит к дополнительному увеличению синергетического эффекта. Например, образец ТО_50 % / ДО_50 % показал большую подынтегральную площадь 24,553 % при температуре пиролиза 600 °С, в то время как содержание водорода в образце ТО_100 % определено на уровне 5,44 %, при соотношении массовых компонент ТО_25 % / ДО_75 % содержание водорода составило 18,02 %, а для навески с топливом в соотношении по массе компонент ТО_75 % / ДО_25 % – 23,99 %.

На рис. 2, *г* и *д* наблюдается аналогичный синергетический эффект, приводящий к увеличению выхода монооксида углерода при равном по массе соотношении компонент в смеси с высоким выходом CO_2 и CO, составляющими 25,954 и 35,436 % объема соответственно. В процессе разложения карбоксильной и гуминовой кислот в макромолекулярной структуре торфа образуется большое количество диоксида углерода. Однако основными источниками CO являются различные процессы, такие как распад фенольных гидроксильных и карбонильных групп, а также распад эфирных связей, оксигенированных гетероциклов и разложение коротокоцепочечных алифатических углеводородов, которые также могут образовывать CO [4].



а *б* *в* *г* *д*

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), CH_4 (в), CO (г), CO_2 (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 %

При постепенном увеличении содержания древесных опилок в образцах, подвергаемых совместному пиролизу, наблюдается постепенное увеличение выхода метана (CH_4) при равной концентрации компонент в смеси, равно 22,99 % (см. рис. 2). Эти исследования подтверждают существенное влияние температуры процесса пиролиза на образование метана. При более высоких температурах пиролиза метиловая гр. и ароматические органические соединения, состоящие из сопряженных плоских кольцевых структур в макромолекулярных структурах торфа, более легко взаимодействуют с водородом, образуя метан. Кроме того, повышение температуры в печи способствует более эффективному связыванию каталитически активных участков и летучих веществ в полукоксе, что способствует катализаторному разложению смолы на маломолекулярные газообразные продукты, включая метан [4].

Заключение

На основе результатов выполненных экспериментальных исследований по термической конверсии смесевых твердых топлив с изменением пропорций компонент торф/древесина с целью увеличения формирования синтез-газа, можно сделать следующие выводы:

Увеличение содержания древесной биомассы в смесевом топливе до 50 % в сочетании с торфом существенно усиливает синергетический эффект и способствует повышенному образованию горючих газов, включая водород, метан и монооксид углерода. Однако дальнейшее увеличение доли древесной биомассы в смеси не усиливает этот эффект, а, наоборот, его ослабляет. Это позволяет сделать вывод о том, что оптимальное соотношение компонентов в смесевом топливе на основе торфа и биомассы (отходы лесопиления) достигается при равных по массе соотношениях компонент.

Результаты непрерывного анализа синтез-газа показали, что увеличение скорости нагревания положительно влияет на пиковую температуру, соответствующую максимальной скорости потери массы. Исходя из анализа экспериментов, можно сделать вывод, что температура пиролиза имеет значительное влияние на образование метана (CH_4). При более высоких температурах метиловые группы, связанные с ароматическими соединениями в макромолекулярных структурах торфа и биомассы, более активно взаимодействуют с водородом, что способствует образованию метана.

Полученные результаты исследований подтверждают потенциал формирования эффективных смесевых топлив равных по массе на основе торфа и отходов лесопиления, в результате их совместного пиролиза формируется постоянный состав синтез-газа с увеличением выхода горючих газовых компонент.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2021-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахманкулов, Д.Л. Мировые запасы угля и перспективы его использования / Д.Л. Рахманкулов, С.В. Николаева, Ф.Н. Латыпова Ф.Ш. Вильданов., С.Ю Шавшукова // Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16. – № 2. – С. 21–28.
2. Янковский С.А. Обоснование снижения выхода оксидов серы при пиролизе углей с добавкой отходов лесопиления / С.А. Янковский, Г.В. Кузнецов, А.Д. Мисюкова // Химия твердого топлива. – 2022. – № 1. – С. 57–65.
3. Demirbas A. An overview of biomass pyrolysis / A. Demirbas, G. Arin // Energy sources. – 2002. – Vol. 24. No. 5. – P. 471–482.
4. Li Y. et al. Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends // Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics. – 2022. – Vol. 310. – P. 14.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДАХ

К.А. Эльман

ИНТех (филиал) ФГБОУ ВО «ЮГУ», гр. 2ПНГ-01

Научный руководитель: М.А. Срыбник, преподаватель высшей категории,
ИНТех (филиал) ФГБОУ ВО «ЮГУ»

На сегодняшний день, актуальным является вопрос совершенствования пожарной безопасности в резервуарах, предназначенных для хранения нефти в аспекте экологии. Отметим, что приоритетное направление пожарных служб, актуально обдумывать о результатах их устранения. В момент тушения пожара применяют несметное количество огнетушащих веществ, действие которых на сами металлические, а также другие устройства может спровоцировать их разрушение, либо коррозии. Именно для предотвращения вышеизложенного следует создавать испытания по отбору проб сырья на достоинство, а также присутствие примесей.

Особая важность выделяется очистке, уходу за технологическими приборами, то есть, негорючими, неокрашивающими материалами, веществам с несменяемым смачиванием водой. Отметим, что действия электрических установок создаётся с соблюдением следующих задач, а именно:

- Разумное решение обеспечения безопасной работы электрооборудования от источника короткого замыкания.
- Вовремя осуществлять контроль заземления и защитных средств оборудования.
- Прочность канализации, а также нарушение правил пожарной безопасности.
- Дополнительное обеспечение исправности механизмов кабельного ввода.

Известно, что провода, а также кабельные ввода технологической техники резервуарного парка созданы с уплотнительными составляющими.

Также постоянный мониторинг герметичности элементов конструкции техники служит несомненным правилом, которое совершается каждой сменой технической службы предприятия. Помимо этого, визуальный осмотр, каждая проверка фиксируется в журналах (протоколах) по испытанию оборудования.

Спецоборудование, резервуары подлежат ежедневному освидетельствованию. Отметим, что не допускается осуществлять изоляцию в составе которых имеются полиэтиленовые включения. Сами же электросистемы резервуарного парка снабжены элементами защиты от короткого замыкания. Также режим процесса оборудования обладает соответствующей работой оборудования, а также сохраняет оптимальные параметры значений рабочей температуры, давления. И конечно, стоит отметить, что сами провода (кабели) соединяются между собой пайкой, опрессовкой, зажимом. Отметим, что персонал систематически производят замеры сопротивления изоляции, а в случае отклонения от правильных параметров эксплуатация кабелей строго запрещена.

Известно, что рабочая температура поверхности промышленного оборудования равна коэффициенту 0,8 от температуры воспламенения нефтепродуктов, именно поэтому в самой горючей среде рассчитаны приспособления, которые исключают присутствие, а также образование искр. Отметим, что трубопроводы всегда обеспечены герметичными комбинациями, а прокладка воздуховодов разрешается лишь вдалеке от прямого источника огня, а также повышенных рабочих температур. С целью предотвращения образования искр определяются искрогасители, и конечно же, дистанционно извлекаются неблагонадёжные источники.

По окончанию выполнения ремонтных работ на участке нефтебазы будет выполнен осмотр территории выполнения [2].

С точки зрения экологии – водоносные зоны (озера, реки и др.) с нефтепродуктами представляют собой неблагонадёжные объекты, которые ставят под угрозу жизнь и здоровья населения проживающего вблизи.

Главные основания присвоения резервуаров к неблагонадёжным аппаратам следующие:

- Горючие характеристики у нефтепродуктов.
- Огромный объём резервуаров – проблема выполнения отличной эксплуатации этих аппаратов.
- Проблема подходящего исследования присутствия сквозных объединений, не герметичность швов.
- Несовершенная геометрическая конфигурация.
- Коррозионная порча материала (оборудования).
- Устройство – усталости.

Вышеизложенное, безусловно, оказывает весомое внимание на охрану окружающей среды, экологию в целом. Из этого следует, что аварии, пожары на нефтеперерабатывающих предприятиях имеют место быть, и как следствие, это связано с износом оборудования, как по нормам эксплуатации, так и по технической документации.

Процент амортизации стального бака резервуара в среднем составляет 70 %. Именно поэтому, ежегодно возрастает вероятность возникновения, как самой опасности, так и несчастного случая.

В настоящее время известно, что аварийность за последние 30 лет составила около 0,00030 отказов резервуаров для хранения нефтепродуктов.

Вероятность наступления несчастного случая обусловлена ущербом, который зависит от конкретных обусловлена ущербом, который зависит от конкретных ситуации на производстве, а материальный ущерб превышает первоначальные затраты в среднем 300 раз. Из этого следует, что начало для гарантированной безопасности конструкций резервуаров служит современный осмотр и ремонт оборудования, с учётом увеличения надёжности самого оборудования [1].

Отметим, автоматические системы пожаротушения, применяемые на нефтеперерабатывающем предприятии:

- Подземная ликвидация воспламенения в резервуарах, предназначенных для хранения нефтепродуктов с несъёмной крышкой, или между резервуаров и защитной обшивкой разработанной для задержки жидкости при полном разрушении резервуара.
- Сокращение испарения нефтепродукта, при изливе из резервуара.
- Составные средства, гидроустановки, которые готовы представлять средства пожаротушения.
- Инъекционные секции с пеной возвышенной кратности.
- Плёнкообразующие пенообразователи.
- Специальными критериями защиты напольной коробки от причины возгорания может быть:
- Установка остывания резервуаров что-то вроде устойчивых приспособлений, которые находятся без жёсткого контакта с резервуаром.
- Оборудование дополнительного водосборного механизма между резервуарами, предназначенных для хранения нефтепродуктов.
- Оборудование составных гидромониторов подачи охлаждающей воды, поступления пены, которая необходима для оболочки горючей жидкости, а также роботизированной установки вспомогательной обваловке.

- Оценка действующих формальных нормативно-правовых актов, которые регламентируют правила техники безопасности нефтеперерабатывающих предприятий, способствует определить огромное количество разного рода условий, которые направлены на дополнительное обеспечение пожарной безопасности нефтеперерабатывающего предприятия.

Из вышеизложенного следует, что систематизация основных правил, событий направленных на соблюдение пожарной безопасности обследуемого объекта, а также устраняет появление пожароопасной обстановки [2].

Настоящее обстоятельство объекта демонстрирует, что база мероприятий как технических, так и организационных осуществляется на предприятии, на что указывают предписания МЧС, об обстоятельстве сооружений, декларация эксплуатационной сохранности.

Вышеизложенные ситуации способствуют дать оценку высокого стремления объекта к гарантированной пожарной безопасности.

Рассмотрим основные процедуры, направленные на рост противопожарной защиты резервуаров предназначенных для хранения нефтепродуктов, а именно:

- Подготовить проект координационных событий на календарный год.
- Создание проекта противопожарно-технических событий.
- Контроль за ведением локальных документов предприятия в области охраны труда и техники безопасности.
- Формирование, создание ежеквартальных проектов в области охраны труда и техники безопасности с фиксированием в документацию предприятия по основной деятельности.
- Формирование проекта работы технологического процесса в осенний период и зимний период.
- Формирование проекта действия направленного на обслуживание безопасного звена технологического порядка, благонадёжной работы оборудования.
- Связь с противопожарной службой.
- Оснастить резервуарный парк специальными линиями.
- Очистка ёмкостей от масел, бензина, топлива.
- Периодические исследования оборудования.
- Выполнение периодических промышленных исследований, ремонтные работы.
- Отказ ввода в эксплуатацию оборудования с неисправностями.

Из вышеизложенного следует вывод, что для совершенствования пожарной безопасности на нефтеперерабатывающих предприятиях в аспекте экологических проблем, а точнее резервуарного парка, смогут устранить попадание нефтепродуктов в товарную воду. Актуальным, является рассчитать схему аварийного слива, из-за которой нефтепродукт самотёком откачивается из резервуара, предназначенного для хранения нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халиуллина Ю.Ю. Влияние свойств наружной теплоизоляции нефтегазовых объектов на расходы организации // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2023. – № 1 (21). – С. 92–98.
2. Эльман К.А. Промышленная безопасность и вопросы охраны труда в нефтяной отрасли // В сборнике: Экология. Риск. Безопасность. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Курган, 2020. – С. 288–290.

СЕКВЕСТИРОВАНИЕ ОКСИДА АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ВЛАЖНЫХ УГЛЕЙ

Ж.А. Косторева, А.А. Омаров, А.Г. Елеусизов

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, 5БМ24

Научный руководитель: С.В. Сыродой, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Проблема энергетической безопасности стала основной проблемой мирового сообщества в последние годы вследствие неравномерного распределения энергоресурсов по территории Земли [1]. В последние десятилетия развитыми государствами всего мира проводилась «ошибочная» (как сейчас выясняется) политика по директивному широкомасштабному внедрению в общий баланс производства тепловой и электрической энергии возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Однако уже известно, что стабильность работы возобновляемых источников энергии существенно зависит от погодных условий и времени суток [2]. По этой причине уже сейчас правительствами многих государств поднимаются вопросы о принятии новых программ развития энергетического сектора экономики на основе масштабного строительства атомных и тепловых электрических станций [3]. Неожиданным является установленная в последние годы необходимость использования угля в качестве одного из основных энергоносителей не только настоящего, но и будущего (по крайней мере, до 2040–2050 гг. по оценкам экспертов различных фондов и энергетических компаний). Угольные ТЭС обеспечивают стабильное производство тепловой и электрической энергии, в отличие от ВИЭ. Но уголь является «грязным» топливом – при его сжигании образуются значительные объемы диоксида углерода, а также оксиды серы и азота, которые пагубно влияют на окружающую среду и здоровье человека.

Доказано [4], что влага, содержащаяся в водоугольных суспензиях и биомассе древесно-угольных топлив, приводит к существенному секвестированию антропогенных оксидов в продуктах сгорания. Альтернативной является технология сжигания не водоугольных топлив (ВУТ) или био-угольных смесей, а сжигание влажных углей с соотношением уголь/вода 90/10.

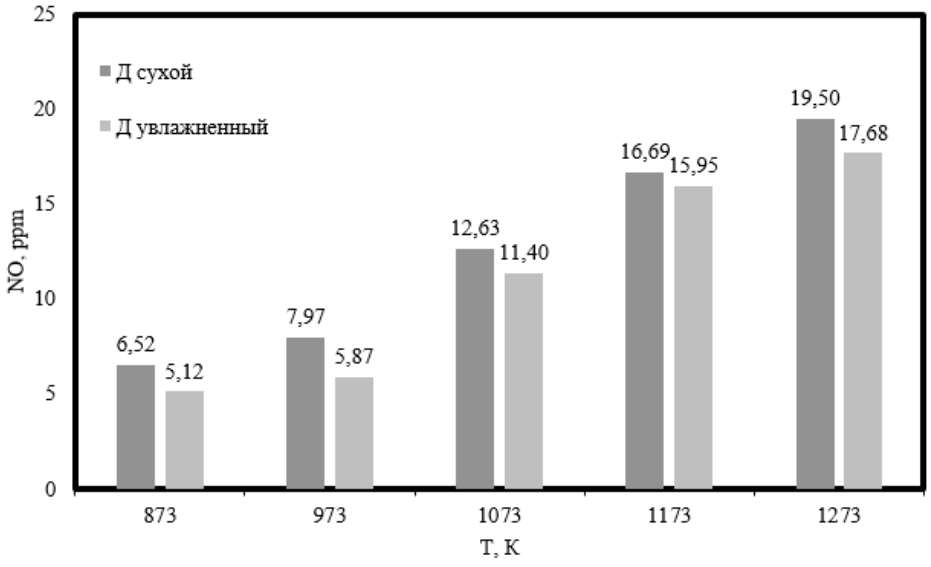


Рис. 1. Средние по времени горения концентрации оксида азота в продуктах горения одиночных частиц сухого и увлажнённого длиннопламенного угля

В экспериментах исследовались одиночные частицы достаточно распространенного и использующегося на многих ТЭС каменного угля марки Д (длиннопламенный) двух видов: сухой (в исходном состоянии) и влажный (увлажненный на 8–10 %). Масса сухих частиц составляла m=0,015±0,001 г. Температура внешней среды варьировалась в достаточно широком диапазоне от 873 до 1273 К. Для определения концентрации оксида азота в продуктах сгорания угольных частиц использовался газоанализатор ТЕСТ-1. Значение случайной погрешности составляло менее 8 %, систематическая погрешность не превышала 2 %.

На рис. 1 приведены результаты экспериментальных исследований средних по времени концентраций NO в продуктах горения частиц угля двух влажностей (в исходном состоянии и увлажнённая на 10 %). Можно заметить, что концентрация оксида азота меньше у увлажнённой частицы угля по сравнению с сухой угольной частицей для всего исследуемого диапазона температур.

Работа поддержана Российским Научным Фондом грант № 23-79-01067

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification / Liangliang J., Dan X., Zixiang W.et al. // Energy Reviews. – 2022. – P. 100004.
2. Instability risk analysis of distributed renewable energy caused by energy storage balance zone / Jianwei Cao, Yanxin Li, Wenduo Sun, Lei Zhang, Yixuan Yang // Energy Reports. – 2022. – V. 8. – P. 12958–12969.
3. A Petri net model-based resilience analysis of nuclear power plants under the threat of natural hazards / Ya. Rundong, S. Dunnett, J. Andrews // Reliability Engineering and System Safety. – 2023. – V. 230. – P. 108979.
4. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood / G.V. Kuznetsov, S.A Jankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov // Combustion Science and Technology. – 2019. – V. 191. – P. 2071–2081.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕЦИКЛИНГА И ПЕРЕРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.Н. Богданова

Казанский государственный энергетический университет,
ИЭЭ, ЭС им. В. К. Шибанова, гр. ВИЭ-1-20

Научный руководитель: А.Ю. Кубарев, к. т. н., доцент, КГЭУ

С развитием ветроэнергетики по всему миру возникает неотложная потребность в решении проблемы утилизации устаревших лопастей ветроэнергетических установок (ВЭУ). Все большее количество ВЭУ требует замены лопастей, создавая актуальную задачу по утилизации. Согласно отчету Международной ассоциации ветроэнергетики, только в 2021 году в мире было установлено более 93 гигаватт ветроэнергии, что увеличивает потребность в устойчивом обращении с отходами от данной индустрии [1].

Проблема утилизации лопастей ВЭУ становится особенно актуальной с увеличением срока службы ветроэнергетических установок. Исследование Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) показывает, что более 2 миллиона тонн лопастей планируется утилизировать к 2030 году [2]. Отсутствие эффективных методов утилизации создает потенциальные риски для окружающей среды.

Лопасти изготавливаются из различных композитных материалов, таких как стекловолокно, углеволокно и смолы. Эти материалы обладают прочностью и легкостью, что делает ло-

пасти эффективными с точки зрения производительности. Однако проблема возникает, когда лопасти становятся устаревшими или повреждаются, и требуют замены.

Утилизация лопастей ВЭУ представляет собой тяжелую задачу из-за их сложной структуры и состава. Конвенциональные методы утилизации, такие как сжигание или складирование на свалках, не являются оптимальными вариантами из-за негативного влияния на окружающую среду. Такая утилизация может привести к загрязнению почвы и воды, что в свою очередь создает серьезные экологические проблемы.

Существует несколько инновационных методов утилизации лопастей ветроэнергетических установок (рис. 1). Одним из подходов является механическая переработка. Этот метод включает в себя механическое измельчение лопастей ветроэнергетических установок на более мелкие части. Далее, эти части могут быть использованы в производстве строительных материалов, таких как дорожное покрытие, бетонные блоки и др. Применение механической переработки позволяет максимально использовать материалы лопастей, снижая при этом объем отходов.

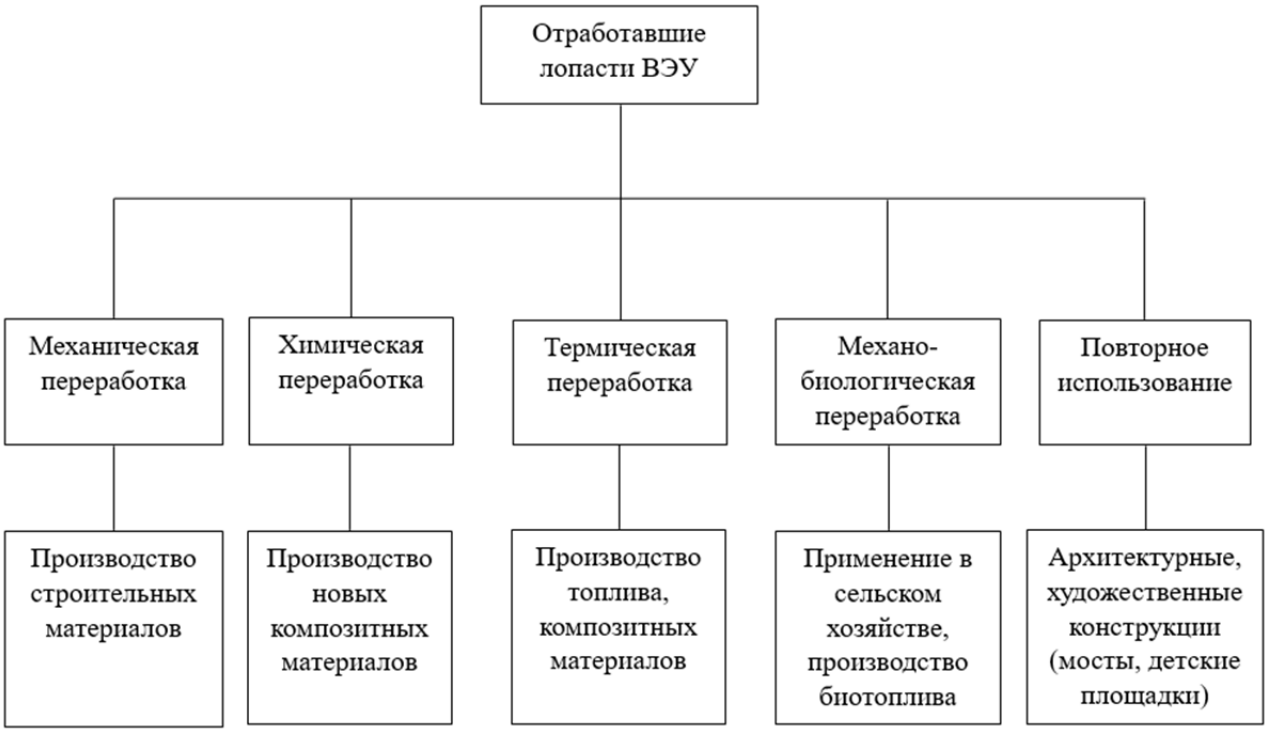


Рис. 1. Методы утилизации лопастей ВЭУ и возможности их рециклинга

Химическая переработка включает в себя процессы разложения композитных материалов на составные части под действием химических реактивов. Это позволяет извлекать отдельные компоненты, такие как стекловолокно или углеволокно, для последующего использования. Химическая переработка позволяет рециклировать материалы более эффективно и открывает путь для повторного использования в производстве новых композитных изделий. Исследования в Университете Колорадо показали, что более 80 % материалов лопастей могут быть извлечены и рециклированы через химические процессы [3].

Термическая переработка включает нагрев лопастей до высоких температур, в пределах 400–800 °С, в отсутствие кислорода, что приводит к разложению материалов на углерод и другие химические компоненты. Углерод может быть использован в качестве топлива, такого как угольный кокс, который является важным компонентом в промышленности или интегрирован в производство композитов. Кроме того, углерод из пиролиза лопастей ВЭУ может

быть включен в производство композитных материалов или использован в других химических процессах. Другие компоненты могут быть собраны и рециклированы.

Механобиологическая переработка включает в себя комбинацию механических и биологических методов. Сначала лопасти измельчаются механически, а затем происходит биологическое разложение полученных частиц при помощи микроорганизмов. Основными микроорганизмами, применяемыми в механобиологической переработке, являются грибы и бактерии. Эти организмы обладают способностью разлагать сложные органические соединения, включая композитные материалы, на более простые компоненты. Грибы, такие как грибы рода Aspergillus и Penicillium, а также бактерии рода Bacillus и Pseudomonas, являются часто используемыми микроорганизмами в процессах биологического разложения композитных материалов. Этот процесс позволяет более эффективно разложить композиты и превратить их в биомассу, которая может быть использована в сельском хозяйстве или для производства биотоплива.

Некоторые лопасти могут быть подвергнуты модификации и использованы повторно для других целей. Например, лопасти могут быть превращены в арт-объекты, мосты, детские площадки или другие архитектурные и художественные конструкции. Например, в Шотландии была запущена инициатива под названием «Re-Wind», направленная на вторичное использование лопастей ВЭУ [4]. Лопасти превращаются в облицовку для жилых домов и другие строительные материалы

Применение методов рециклинга и переработки лопастей ветроэнергетических установок имеет ряд важных преимуществ. Во-первых, это снижает необходимость использования природных ресурсов, так как вторичные материалы могут быть использованы в новых проектах. Во-вторых, это сокращает количество отходов, подлежащих утилизации на свалках, и, следовательно, снижает негативное воздействие на окружающую среду. Также эффективная утилизация лопастей ВЭУ имеет потенциал снизить выбросы углерода и содействовать целям по борьбе с изменением климата. Согласно отчету Европейской агентуры по окружающей среде (EEA), каждая тонна утилизированных лопастей может предотвратить выбросы CO_2 в атмосферу, эквивалентные выбросам от производства 1 тонны цемента [5]. В долгосрочной перспективе, переработка лопастей ВЭУ может также снизить общие затраты на материалы, что имеет экономическое значение для производителей и инвесторов в ветроэнергетику.

Утилизация лопастей ветроэнергетических установок представляет собой сложную проблему, но современные методы переработки и рециклинга позволяют смягчить негативное воздействие на окружающую среду и экономику. С учетом растущего количества устаревших лопастей ветроэнергетических установок, разработка и внедрение эффективных методов утилизации становятся ключевыми вопросами для устойчивости ветроэнергетической индустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Wind Report 2022 // Global Wind Energy Council (GWEC). 2022. URL: https://gwec.net/global-wind-report-2022/ (дата обращения: 01.11.2023).
2. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels and Wind Turbine Blades // IRENA Technical Report. – 2020. URL: https://www.iea.org/reports/renewables-2020 (дата обращения: 02.11.2023).
3. Johnson E.B. Chemical Recycling of Wind Turbine Blades // Environmental Science & Technology. – 2015. – V. 49, no. 2. – P. 8986–8997.
4. Repurposing Wind Blades. URL: https://www.re-wind.info/ (дата обращения: 02.11.2023).
5. Concrete Benefits: Recycling Old Wind Turbine Blades Could Help Cement Industry Cut CO_2 Emissions // General Electric. 2020. URL: https://www.ge.com/news/reports/concrete-benefits-recycling-old-wind-turbine-blades-could-help-cement-industry-cut-co2 (дата обращения: 02.11.2023).

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА СОБСТВЕННЫХ НУЖД ДЛЯ ЦИКЛА ALLAM-Z НА ОСНОВЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO_2

Е.М. Корепанова

Новосибирский государственный технический университет,
ФЭН, ТЭС, гр. ТЭ-01

Научный руководитель: П.А. Щинников, д.т.н., профессор, зав. каф. ТЭС НГТУ

Введение

Увеличение выбросов парниковых газов, одним из которых является углекислый газ (CO_2), и его влияние на планетарный климат – серьезная международная проблема. Мировая энергетика работает над сокращением выбросов засоряющих веществ и разработкой устойчивых решений для борьбы с этой проблемой, а также смягчения ее последствий. Так, одним из вариантов развития энергетики на органическом топливе, который способствует снижению углеродного следа в окружающей среде, является применение технологии на сверхкритических параметрах, основанной на CO_2-цикле [1].

Цели и задачи

Выяснить, каковы затраты электроэнергии на собственные нужды при использовании технологии на сверхкритических параметрах и сравнить полученные результаты с другими современными установками.

Метод исследования

В данной работе рассматривается четыре варианта энергоблоков, которые отличаются организацией рабочих процессов: энергоблоки сверхкритических (СКП) и суперсверхкритических параметров (ССКП), парогазовая установка (ПГУ) и технология на основе CO_2-цикла – с одноступенчатым повышением давления и конденсацией (Allam-Z).

Цикл Allam-Z – предложен коллективом под руководством А.С.Косого, ОИВТ РАН (Объединённый институт высоких температур РАН), Россия. В камере сгорания сжигают природное топливо (CH_4) в кислороде (O_2) при давлении 200 бар. В CO_2-турбину поступают продукты сгорания с температурой 1100 ºС в виде углекислого газа (CO_2) и водяных паров (H_2O), где они совершают работу, передаваемую по валу в электрогенератор. Содержание водяных паров в продуктах сгорания не превышает 2–5 %. Отработавшие газы направляют в регенеративные теплообменники, где за счет организации регенеративных подогревов различных рабочих контуров обеспечивают разделение и конденсацию углекислоты и водяного пара. Пар и CO_2 направляют на смесеобразование в камеру сгорания, а их избыток выводят из цикла на утилизацию. Повышение давления обеспечивают насосами.

Методика исследования заключается в определении затрат энергии на собственные нужды поагрегатно для каждой установки [2].

Обсуждение результатов

Проведен анализ различных типов энергоблоков. Можно видеть, что удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии ($b_{э.от}$) для цикла Allam-Z сопоставим с технологиями СКП и ССКП (300 гут/кВт·ч) и значительно превосходит показатель ПГУ (рис. 2, *б*).

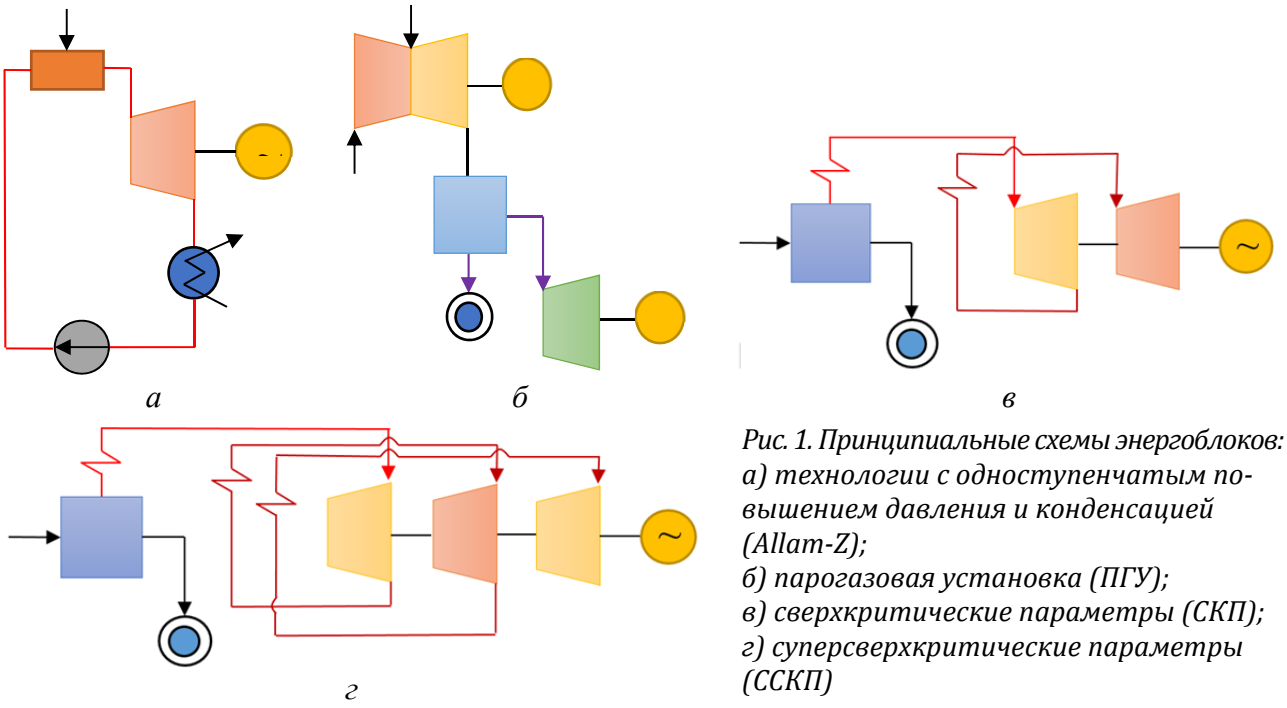


Рис. 1. Принципиальные схемы энергоблоков:
а) технологии с одноступенчатым повышением давления и конденсацией (Allam-Z);
б) парогазовая установка (ПГУ);
в) сверхкритические параметры (СКП);
г) суперсверхкритические параметры (ССКП)

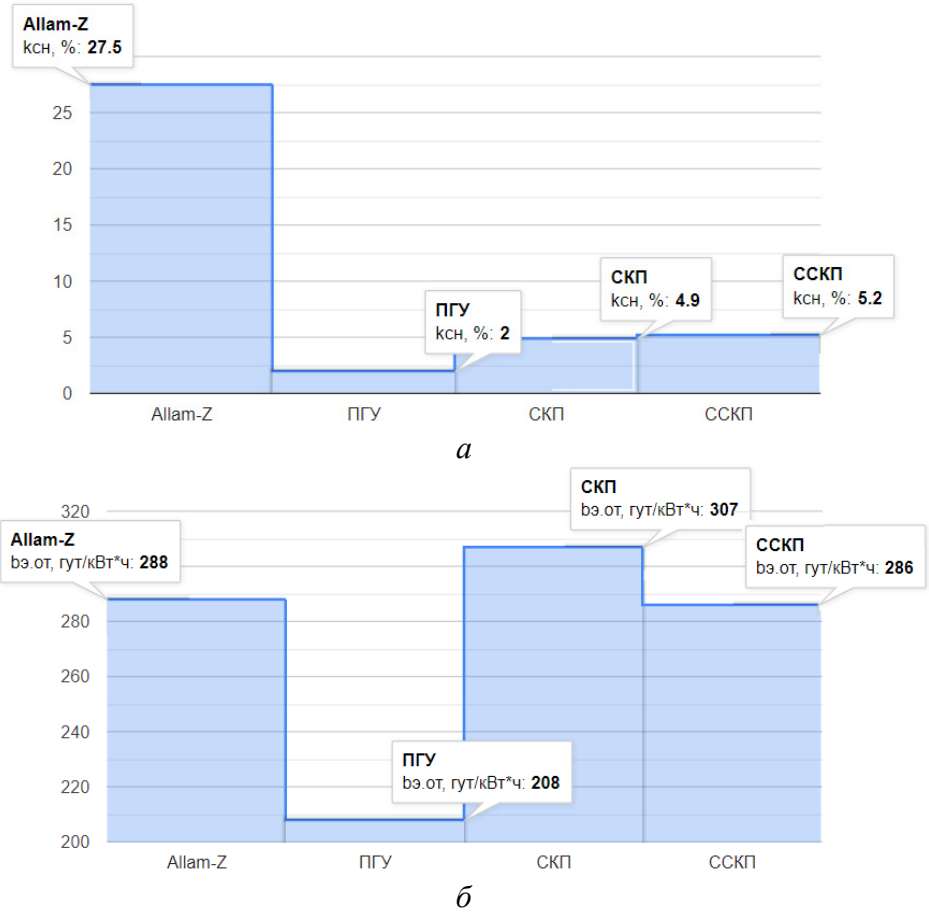


Рис. 2. Показатели эффективности для энергоблоков единичной мощностью 300 МВт: а – коэффициент собственных нужд ($k_{с.н}$); б – расход условного топлива на отпуск электроэнергии ($b_{э.от}$); Allam-Z, ПГУ, СКП, ССКП– энергоблоки технологии с одноступенчатым повышением давления и конденсацией, парогазовой установки, сверхкритических и суперсверхкритических параметров соответственно

Вместе с тем, высокий коэффициент собственных нужд ($k_{сн}$) технологии Allam-Z обусловлен генерацией кислорода высокой чистоты (99,5 %) [3] и равен 27,5 %, что заметно уступает технологиям ПГУ, СКП и ССКП (рис. 2, *а*).

На рис. 2, *б* показано, что удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии для цикла Allam-Z сопоставим с технологиями СКП и ССКП ($b_{э.от} \approx 300$ гут/кВт·ч). Можно видеть, что и значительно превосходит показатель ПГУ.

Заключение

Затраты энергии на собственные нужды ($k_{сн} = 27,5$ %) делают технологию Allam-Z энергетически неэффективной по сравнению с другими представленными вариантами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00035, https://rscf.ru/project/23-29-00035/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired CO2 power cycles with oxygen combustion of methane / I.S. Sadkin, P.A. Shchinnikov // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.
2. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO_2-циклов при кислородном сжигании метана / Алексеенко С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30. № 1. – С. 89–98.
3. Влияние термодинамических параметров на мощность воздухоразделительной установки в цикле Аллама = Effect of thermodynamic parameters on the capacity of an air separation unit in the Allam cycle / П.А. Щинников, Е.М. Корепанова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики = Power engineering: research, equipment, technology. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 74–81. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81

ПЕРЕРАБОТКА АСФАЛЬТЕНОВ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ В ПОЛЕЗНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В.В. Егорова[1], П.В. Поваляев[2]

[1] Сургутский государственный университет
[2] Томский политехнический университет

Научные руководители: Ю.Ю. Петрова, к.х.н., доцент, СГУ;
Е.В. Францина, к.т.н., старший научный сотрудник, ТПУ

Одним из перспективных способов переработки отходов нефтяной промышленности, в которых высока доля асфальтенов, является высокотемпературная обработка в открытой среде под действием дугового разряда постоянного тока. Структура асфальтена – поликонденсированная нафтеноароматическими система с включением гетероатомов, считается уникальным источником получения новых углеродных материалов: графены, фуллерены, наноразмерные материалы (нанотрубки, нанолуковицы) и др. [1–3].

Целью данной работы стала обработка асфальтенов, выделенных из тяжелых нефтей, в плазменном реакторе для решения рационального использования отходов нефтяной промышленности.

Асфальтены выделяли из тяжелых нефтей методом соосаждения. В качестве растворителя применяли гексан, отмывку асфальтенов проводили в аппарате Сокслета в течении 28 часов.

Обработку проводили в электродуговом реакторе открытого типа с горизонтальным расположением электродов при силе воздействия на образец 100 А в течении 30 с. Исходные асфальтены выделенные из нефтей ASH и АК месторождений, а также продукты их плазменной обработки CMASH и CMAK соответственно, исследовали методом рентгенофазового, термогравиметрического, рентгенофлуоресцентного анализов и ИК-Фурье-спектроскопией.

По результатам рентгеновской дифрактометрии образцы CMASH и CMAK имеют графитоподобную структуру без наличия аморфной фракции, что свидетельствует о полной переработке асфальтенов ASH и АК.

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводился в инертной среде (N_2) в диапазоне температур 30–1000 °С, скорость нагрева 10 °С/мин. Результаты термического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты термогравиметрического анализа в инертной среде (N_2)

Температурный интервал, ℃	Потеря массы образцов, мас. %	
	ASH	АК
30–400	10.82	6.53
400–515	37.80	36.11
515–1000	26.63	39.48
30–1000	75.28	82.11

Термическое разложение асфальтенов ASH и АК приходится на низкотемпературный интервал 400–515 ℃ с максимумом при 455 ℃ (рис. 1). При такой температуре происходит разрушение углерод-углеродных и углерод-гетероатом взаимодействий в нафтеноароматических ядрах молекул асфальтенов, что свидетельствует об их интенсивной деструкции [4, 5]. Потери массы асфальтенов ASH по результатам термогравиметрического анализа (табл. 1) составили 75,28 мас. %, а у асфальтенов АК 82,11 мас. %, из чего можно предположить, что асфальтены ASH более термически стабильны, что связано с их структурными особенностями.

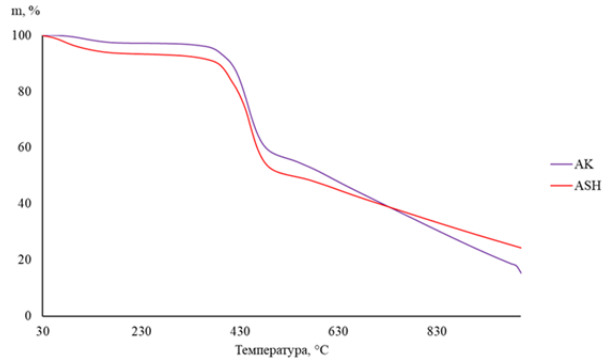


Рис. 1. ТГА кривые асфальтенов ASH и АК в инертной среде (N_2)

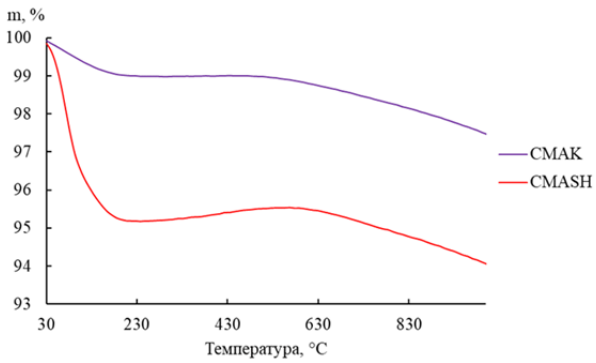


Рис. 2. ТГА кривые углеродного материала CMASH и CMAK в инертной среде (N_2)

Кривые ТГА углеродных материалов CMASH и CMAK представленные на рис. 2. Потери массы наблюдается на всем температурном интервале 30–1000 °С, при этом основная масса уходит до 230 °С, что вероятно связанно с удалением легкой аморфной фракции гидроксильной группы. Общие потери массы углеродного материала составили: CMASH – 5,89 мас. % и CMAK – 2,49 мас. %, из чего следует, что более термически устойчивым является углеродный материал CMAK.

Для оценки элементного состава исследуемых образцов был проведен рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) под вакуумом, с применением метода фундаментальных параметров, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа исследуемых образцов

Элемент	Элементный состав, мас. %			
	АК	ASH	CMAK	CMASH
C	97,8	98,3	98,5	99,0
S	1,9	1,6	1,4	0,9
Al	0,005	0,004	0,006	0,003
Si	0,0001	0,0001	0,008	0,0001
Ca	0,003	0,002	0,011	0,005
V	0,029	0,021	0,064	0,05
Cr	–	0,0001	–	0,0001
Fe	0,001	0,001	0,006	0,002
Ni	0,005	0,004	0,008	0,011

По результатам РФА (табл. 2) содержание углерода в образцах ASH и АК возрастает на 0,71 и 0,72 мас. % соответственно. Повышение содержания углерода происходит за счёт разрушения углерод-углеродных и углерод-гетероатом связей, а так же удаления водорода и водородсодержащих соединений. Содержание серы понижается на ASH – 43,8 мас. % и АК – 26,3 мас. % соответственно. Уменьшение содержания серы связано с разрушением серосодержащих связей в молекулах асфальтенов (S-O, S-H) и образованием соответствующих газов SO_2, H_2S. Наличие других элементов согласуется с литературными данными по элементному составу смолисто-асфальтеновых веществ в нефти [6].

Исследование образцов методом ИК-Фурье-спектроскопии проводили в режиме пропускания в таблетках KBr с массовой долей образца 0.6 мас. %. На рис. 3 представлены ИК-спектры исследуемых образцов.

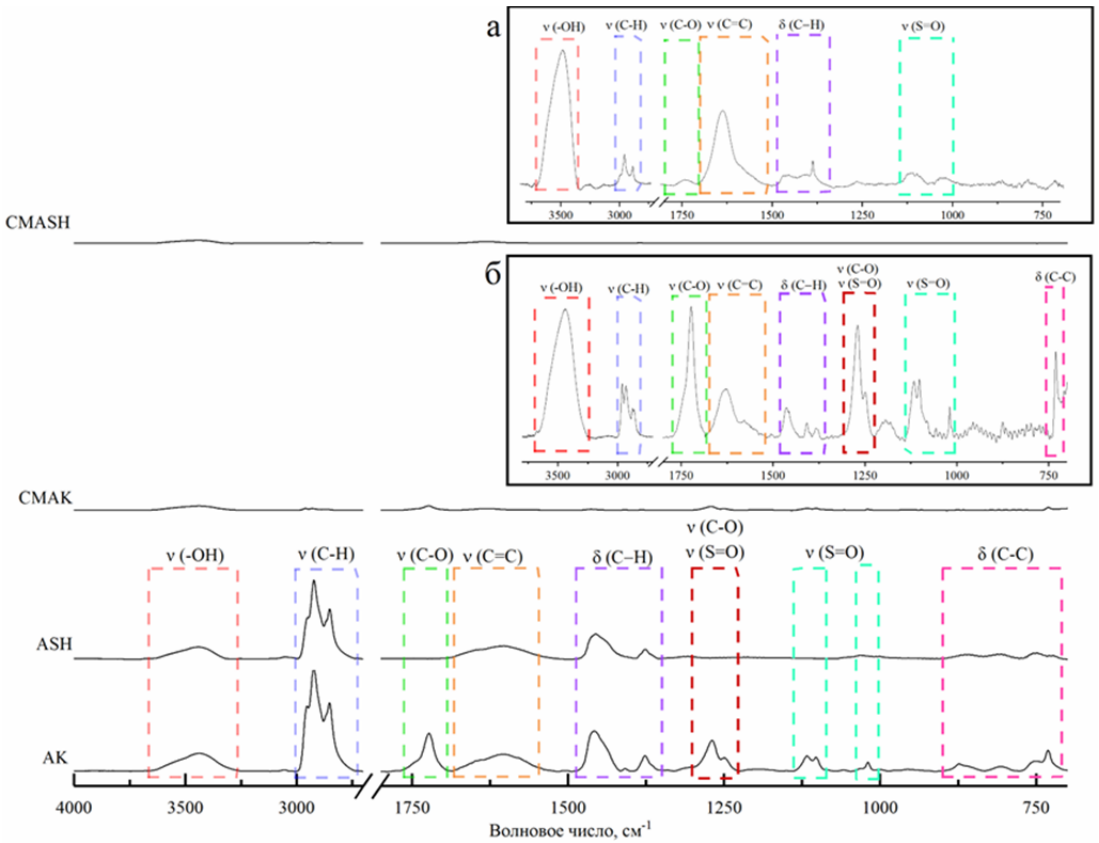


Рис. 3. ИК-спектры исследуемых образцов асфальтенов (АК, ASH) и продуктов их плазменной переработки (CMAK, CMASH); Врезка: а – ИК-спектр CMASH с увеличением интенсивности в 25 раз, б – ИК-спектр CMASK с увеличением интенсивности в 30 раз

В момент плазменной переработки асфальтенов, в структуре их молекул происходит деструкция, что подтверждается снижением интенсивности деформационных колебаний С–С (880–700 $см^{-1}$), валентных С–С в ароматических структурах (1690–1550 $см^{-1}$) и валентных симметричных и ассиметричных колебаний С–Н (3000–2800 $см^{-1}$) [7, 8]. Валентные колебания карбоксильной группы С=О присутствуют только на ИК-спектре образца АК (рис. 3, спектр АК), находящиеся в диапазоне 1780–1700, 1280–1210 $см^{-1}$. Это обусловлено наличием кислородсодержащих мостиков в молекуле асфальтенов АК, что отличает данный образец от образца ASH и связанно с особенностями генезиса исходной нефти. По результатам ИК-спектроскопии стоит отметить, что при плазменной обработки асфальтенов происходит деструкция нафтеноароматического каркаса с последующей перестройкой в графитоподобную структуру, а также наблюдаются процессы окисления при плазменной обработки образца АК.

Установлено, что плазменная обработка образцов асфальтенов АК и ASH сопровождается одновременными процессами графитизации и деструкции, в случае с асфальтенами АК происходит окислительная деструкция. С асфальтенами ASH окислительной деструкции не наблюдается, что предположительно связано с отсутствием кислорода в структурных фрагментах молекулы асфальтенов. Такие результаты могут подтверждать теорию об образовании вакуума из газов вокруг инициирования разряда в момент переработки, что не дает участвовать кислороду вне инициирования в процессе горения плазменного разряда. Основными общими стадиями превращений асфальтенов в плазме являются: а) разрушение лабильных углерод-гетероатомных связей (C-O и C-S); б) разрушение более прочных углерод-углеродных и углерод-гетероатомных связей в нафтеноароматических блоках молекул асфальтенов и их перегруппировка и трансформация в) образование других аллотропных модификаций углерода – нанолуковицы, нанотрубки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-13-20016) в Сургутском государственном университете и Томском политехническом университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Получение углеродных графитоподобных наноматериалов при переработке отходов на основе асфальтенов / А.Я. Пак, П.В. Поваляев, Е.В. Франщина, А.А. Гринько, Ю.Ю. Петрова, В.В. Аркаченкова // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 19.
2. Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Кавыев А. Г. и др. Особенности электропроводности и свойств аморфных полупроводников на основе асфальтенов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 3. – С. 6.
3. Petrova Yu.Yu., Frantsina E.V., Grin'ko A.A.et al. Investigation of the process and products of plasma treatment of asphaltenes // Materials Today Communication. – 2022. – V. 33. – p. 25.
4. Grinko A.A. Thermolysis of petroleum asphaltenes and their fractions / A. A. Grinko, A. K. Golovko // Pet. Chem. – 2014. – V. 54. – P. 42–47.
5. Douda J. Pyrolysis applied to the study of a Maya asphaltene / J. Douda, E. Llanos, R. Alvarez, C. L. Franco et al. // J. Analytical and Applied Pyrolysis. – 2004. – 71. (2) – P. 601–612.
6. Ганиева Т.Ф. Высоковязкие нефти, природные битумы и битуминосные породы: учебное пособие / Т.Ф. Ганиева, В.К. Половняк. – Казань: Казанский нац. Исслед. технолог. унив., 2012. – С. 104.
7. Socrates G. Formerly of Brunel, The University of West London, Middlesex. UK / G. Socrates // New York. – Т. III. – 2004. – P.362.
8. Asemani M., Rabbani A. Oil-oil correlation by FTIR spectroscopy of asphaltene samples // Geosciences J. – 2015. – P. 1–12.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Р.И. Гильмутдинова

Казанский государственный энергетический университет,
Теплоэнергетика и теплотехника, ЭОП, ЭПТ-1-22

Научный руководитель: В.Э. Зинуров, к.т.н., и.о. зав. каф. «ИГ» ФГБОУ ВО КГЭУ

В реакторах с псевдоожиженным слоем актуальной задачей является снижение гидравлического сопротивления пылеуловительной системы. В свою очередь величина гидравлического сопротивления напрямую влияет на энергосбережение и энергоэффективность.

Реакторы с псевдоожиженным слоем используются для проведения химических процессов с использованием кипящего слоя. Реакторы играют важную роль в проведении процесса псевдоожижения, при котором учитываются не только свойства жидкости (вязкость, плотность), но и свойства твердых частиц (размер, форма). Реакторы с псевдоожиженным слоем применяются для обеспечения массообмена между фазами для улучшения смешания реагентов. При этом осуществляется непрерывная подача катализатора в реакционную смесь.

Реакторы с псевдоожиженным слоем обладают рядом преимуществ, таких как быстрое смешивание фаз (однородность качества продукта), отличные показатели тепло- и массообмена и относительно простые операции. Твердые катализаторы могут быть переработаны с использованием внутренних или внешних сепараторов (с регенерацией или без нее). Это дает возможность использовать быстро дезактивирующийся катализатор. К некоторым недостаткам относятся повышенное истирание катализатора, эрозия внутренних частей реактора и значительное обратное перемешивание [1].

Псевдоожижение в широком смысле можно разделить на два режима: гомогенное псевдоожижение и гетерогенное псевдоожижение. При гомогенном псевдоожижении или псевдоожижении в виде частиц частицы псевдоожижаются равномерно, без каких-либо отчетливых пустот. При гетерогенном или барботажном псевдоожижении отчетливо видны пузырьки газа без твердых частиц. Эти пустоты ведут себя подобно пузырькам в газожидкостных потоках. Они обмениваются газом с окружающей однородной средой с изменением размера и формы при подъеме в среде [2].

Процесс псевдоожижения представляет собой гидродинамическое взаимодействие псевдоожижающего потока со слоем твердых частиц, при котором твердые частицы обретают способность передвигаться относительно друг друга благодаря обмену энергией с псевдоожижающим потоком. При этом процессе возникает псевдоожиженый слой, который имеет ряд преимуществ как выравнивание полей температур и концентраций в объеме технологических аппаратов, увеличение поверхности взаимодействия газа и зернистого материала, способность перемешать зернистые материалы в псевдоожиженном состоянии, наличие постоянного гидравлического сопротивления слоя во всем диапазоне скоростей псевдоожижения, возможность автоматизации работ аппаратов с псевдоожиженым слоем и их конструктивная простота. Псевдоожиженный слой получил свое название благодаря сходству с жидкостями, как обычная жидкость ему свойственно текучесть, вязкость. Псевдоожижение применяют в химических, гидромеханических, тепловых, механических процессах. Также псевдоожиженный слой имеет большое значение в реакторах. Они характеризуются высокой эффективностью при проведении химических реакций с высокой интенсивностью контакта фаз.

В качестве системы улавливания частиц катализатора в реакторах с псевдоожиженным слоем используются циклонные сепараторы. Одним из ключевых их недостатков является повы-

шенное гидравлическое сопротивление и быстрый эрозионный износ их стенок. Ввиду этого актуальной задачей является разработка новых энергоэффективных пылеуловителей [3].

Для решения проблемы предлагается конструкция пылеуловителя с дугообразными сепарационными элементами (рис. 1). Работа этого пылеуловителя основана на подаче газового потока в устройство через отверстие для подачи запыленной среды *2*, при котором газовый поток движется к дугообразным элементам *3*, которые расположены сепарационном устройстве в шахматном порядке. При этом на газовый поток действуют центробежные силы, которые способствуют выбиванию частиц из структуры потока. Частицы, которые выбились из газового потока попадают в дно устройства *5*. После чего эти частицы очищаются и выводятся из сепаратора. [4–6].

Важной задачей является разработка инженерной методике, которая позволит конструктивно расположить пылеуловительные устройства в реакторе с псевдоожиженным слоем таким образом, чтобы входная скорость составляла менее 2 м/с, т. к. при больших скоростях эффективность снижается [7].

В докладе показаны расчетные формулы, позволяющие рассчитать конструктивные и технологические параметры. Так, скорость на входе определяется по следующей формуле:

$$w_{\text{in}} = \frac{0,5Q}{2h\sum_{i=1}^{n_3}\sqrt{R^2 - i\left(0,0669d + 1,5h + \sqrt{0,75}dk\right)^2} - b_{5.i}}, \quad (1)$$

где Q – расход, м^3/с; h – высота входа, м; R – радиус реактора, м; d – диаметр элементов, м; i – порядковый номер пылеуловителя; k – количество элементов в каждом ряду; $b_{5.i}$ – расстояние от пылеуловителя до реактора, м.

При диаметре дугообразных элементов d от 20 до 60 мм скорость на входе в сепарационные устройства составляет 0,12–0,31, 0,09–0,18 и 0,08–0,16 м/с при высоте входного отверстия h_{in} равной 100, 200 и 300 мм соответственно. При увеличении h_{in} от 100 до 200 мм скорость w_{in} в среднем уменьшается на 33,1 %, увеличение h_{in} от 200 до 300 мм приводит к снижению скорости w_{in} в среднем на 14,5 % (рис. 2).

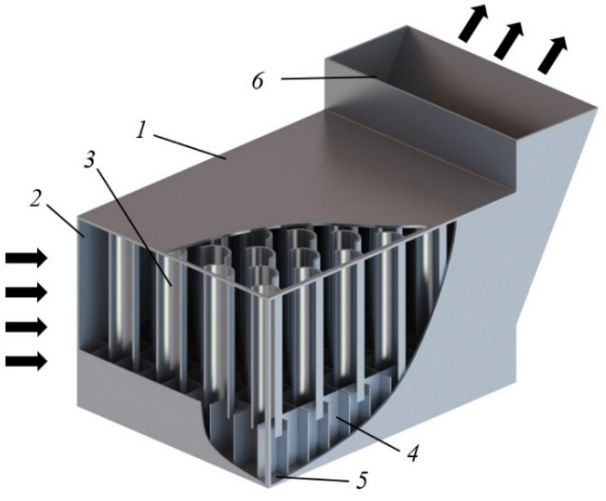


Рис. 1. Пылеуловитель с дугообразными сепарационными элементами:
1 – обечайка устройства; 2 – отверстие для подачи запыленной среды; 3 – дугообразные элементы; 4 – сепарационная решетка; 5 – дно устройства; 6 – отверстие выхода очищенного газа от частиц

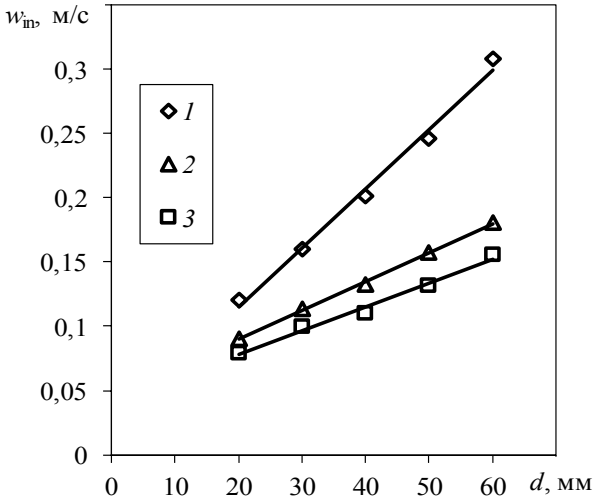


Рис. 2. Зависимость скорости на входе в сепарационные устройства в реакторе с псевдоожиженным слоем от диаметра дугообразных элементов при различной высоте входного отверстия h_{in}, мм:
1 – 100; 2 – 200; 3 – 300.
Количество рядов n_1 = 12

В докладе показано влияние конструктивных параметров пылеуловительного устройства с дугообразными элементами на скорость газа на входе в него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kopyscinski J., Schildhauer T.J., Biollaz S.M. A. Methanation in a fluidized bed reactor with high initial CO partial pressure: Part I–Experimental investigation of hydrodynamics, mass transfer effects, and carbon deposition // Chemical Engineering Science. – 2011. – Т. 66. – №. 5. – С. 924–934.
2. Sette E. Measuring fuel mixing under industrial fluidized-bed conditions–A camera-probe based fuel tracking system // Applied energy. – 2016. – Т. 163. – С. 304–312.
3. Зинуров В.Э. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 3. – С. 117–127.
4. Салахова Э.И. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41–46. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_8_41.
5. Салахова Э.И. Численное моделирование очистки газа от твердых взвешенных частиц в сепарационном устройстве с вогнутыми отражающими элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, В.В. Харьков, П.Е. Глухова, В.А. Лавриков, А.Н. Николаев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 8. – С. 10–14.
6. Салахова Э.И. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализатора / Э И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Р. Набиуллин, И.И. Салахов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 57–64. – DOI 10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.
7. Зинуров В.Э. Сепарационное устройство для улавливания мелкодисперсных частиц, образующихся при работе реактора с псевдоожиженным слоем / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, А.А. Абдуллина, Э.И. Салахова, О.С. Дмитриева // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2023. – № 4. – С. 12–16.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РАЗРЕЗЕ МОЩНОСТИ, ЭКОНОМИКИ И ЭКОЛОГИИ

Н.В. Эйстрах

Юргинский технологический институт (филиал) НИ ТПУ,
ТБ, кафедра защиты в чрезвычайных ситуациях, гр. 17Г11

Научный руководитель: Л.Г. Деменкова, к.т.н., старший преподаватель ЮТИ ТПУ

В «современных условиях энергетика стала ключевым фактором в развитии основных промышленных отраслей, которые определяют прогресс производства и благополучия общества. Следовательно, уровень экономического развития страны напрямую зависит от объема потребляемых энергетических ресурсов. В развитых странах энергетика развивается с невиданной скоростью, опережая остальные секторы промышленности. Поэтому процесс производства и обновления всевозможных источников энергии становится ключевым фактором для каждой страны. Традиционно энергетика разделяется на несколько типов – тепловую, гидроэнергетику и альтернативную. Альтернативные источники энергии сегодня используются в больших масштабах, чем когда-либо раньше, поэтому в данной статье мы подробно рассмотрим альтернативную энергетику [1].

Обратимся к определению, альтернативные источники энергии – это своего рода экологически чистый и безопасный возобновляемый ресурс, с помощью которого людям удается получать электрическую и тепловую энергию и этот вид энергии становится все более популярным и широко используемым во многих странах. Возобновляемые источники энергии, или сокращенно ВИЭ, рассматриваются современным мировым сообществом как основа со-

временных систем энергоснабжения. Недавно принятый документ под названием «Европейское зеленое соглашение» содержит полную информацию о реструктуризации европейской экономики с целью свести к нулю выбросы парниковых газов и загрязнение окружающей среды в странах Европейского Союза к 2050 году.

Документ «Европейское зеленое соглашение» содержит полную информацию о переходе стран Европейского союза на возобновляемые источники энергии – на солнечную и ветроэнергетику [2]. Переход к возобновляемым источникам энергии в экономике и экологии является очень важным шагом в развитии энергетики. Но следует помнить, что использование альтернативных источников обходится государству очень дорого.

Большое количество ученых и исследователей в данной области говорят о довольно высоких затратах на данный вид энергетики и низкой окупаемости продукта. Они утверждают что затраты на традиционные источники энергии обходятся намного дешевле в несколько раз [3].

На данный момент в России, государство оказывает каждый год финансовую поддержку традиционному энергетическому сектору экономики, но низкие тарифы на электроэнергию создают определенные препятствия для развития энергетического сектора. В России необходимо активно поддерживать использование альтернативных источников энергии, ориентируясь на опыт зарубежных стран мира и внедрять такие работающие инструменты, как налоговые льготы, пониженные тарифы на электроэнергию, что в результате окажет положительное влияние.

Для того чтобы достичь заметных показателей эффективности применения альтернативных источников энергии необходимо бережно относится и сохранять имеющиеся ресурсы природы – это нефть, уголь, природный газ, заботиться о снижении вредных веществ в атмосферу, ограничить количество отходов.

Также необходимо акцентировать внимание не только на составляющих показателях экономической и экологической эффективности, но и использовать социальные рычаги – повышать уровень жизни населения в российских регионах [4].

Согласно отчету о функционировании российской энергосистемы в 2022 году, объем электроэнергии, выработанной электростанциями российской энергосистемы в 2022 году, достиг 1121,6 млрд кВт·ч. В том же году потребление электроэнергии достигло 1110,63 млрд кВт·ч. На рис. 1 показана фактическая и регулируемая по температуре динамика энергопотребления в энергосистеме ЕЭС России [6].

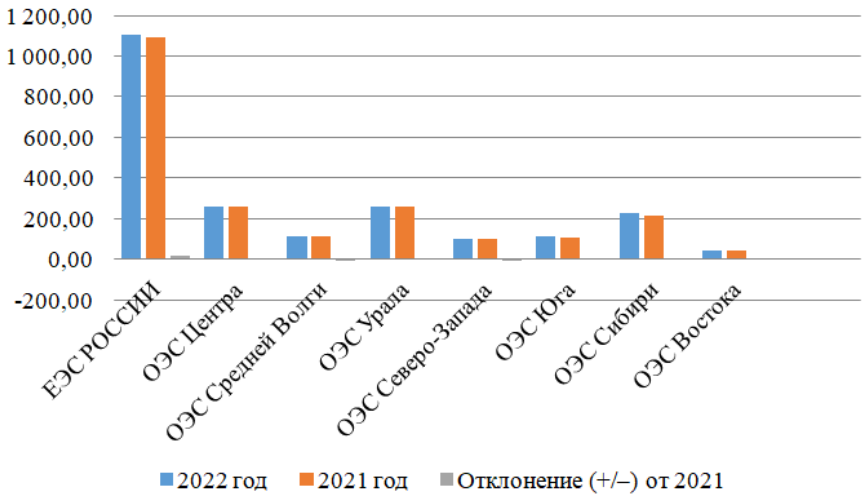


Рис. 1. Динамика потребления электроэнергии в объединенных энергосистемах и ЕЭС России[1]

[1] Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году (на основе оперативных данных)

Максимальное годовое потребление электроэнергии ЕЭС России было зафиксировано в 2022 году в 10:00 часов утра по московскому времени при текущей частоте 49,99 Гц и достигло 158 864 МВт. Как мы видим из предоставленных данных в отчете на 01.01.2023 года – мощность электрических станций Единой Энергетической Системы России возросла и стала составлять 247 601,8 МВт.

Эти масштабные достижения говорят о том, что энергетическая система России успешно развивается и уверенно масштабируется, обеспечивая рост потребления и эффективное функционирование на протяжении всего периода наблюдения.

На рис. 2 показаны данные об изменении мощности электрических станций в объединенных энергосистемах и Единой Энергетической Системы России на 2022–2023 гг. [6].

Можно сделать вывод, что Российская Федерация активно применяет и постепенно использует альтернативные источники энергии. Но, несмотря на положительные результаты применения возобновляемых источников энергии в России до сих пор доминируют традиционные источники энергии. Главная причина заключается в отсутствии возможности полного перехода на производство электроэнергии с использованием альтернативных источников. В результате проведенного нашего анализа можно сделать вывод, что значение альтернативных источников энергии значительно возросло за последние годы и стало неотъемлемой частью современной энергетики. Это привело к тому, что вопрос экономической эффективности использования возобновляемых источников энергии стал особенно важным. Таким образом, выбор темы данного исследования был обусловлен необходимостью изучения данного вопроса.

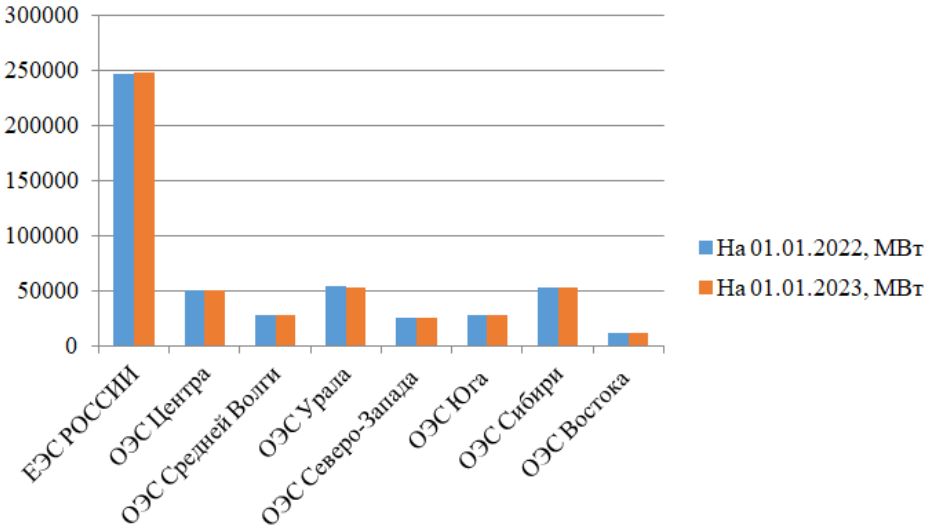


Рис. 2. Данные об изменении мощности электрических станций в объединенных энергосистемах и Единой Энергетической Системы России[2]

В завершении стоит указать на то, что вопрос использования альтернативных источников энергии является актуальным для всех государств мирового сообщества, вне зависимости от их богатства запасами полезных ископаемых. Альтернативные источники энергии придают высшее значение экологической составляющей, так как использование традиционных энергоресурсов приводит к выбросу загрязняющих веществ в атмосферу, которые серьезно влияют на окружающую среду [5]. Важными становятся вопросы энергоэффективности и энергосбережения в условиях необходимости эффективного и рационального использования природных ресурсов. Альтернативные источники энергии становятся по-настоящему конкурентоспособными только после достижения положительных экономических показателей и

[2] Там же.

реальной экономии по сравнению с традиционными источниками энергии. Таким образом, альтернативные источники энергии могут стать реальной альтернативой традиционным источникам энергии только при определенных условиях, когда они могут предложить значительные экономические преимущества и обеспечить надежное энергоснабжение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии. – М.: МЭИ, 2012. – 384 с.
2. Гашо Е.Г., Кондрахов В.А. Повышение эффективности и безопасности энергосистемы Калининградской области за счёт возобновляемых источников энергии // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 224–230.
3. Кравченко Е.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 214 с.
4. Сибикин Ю.Д. Альтернативные источники энергии / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: РадиоСофт, 2014. – 248 с.
5. Свалова В.Б. Альтернативная энергетика: проблемы и перспективы // Мониторинг. Наука и технологии. – 2019. – № 3. – С. 82–97.
6. Отчет о функционировании ЕЭС в России в 2022 году. [Электронный ресурс]. URL: https://www.so-ups.ru/functioning/ tech-disc/tech-disc2022/tech-disc2022ups/ (дата обращения: 08.10.23)

УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛ ТЭЦ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Пасечников

Томский политехнический университет,
ИШНПТ, гр. 4ГМ22

Научный руководитель: В.В. Тихонов, к.т.н., доцент ИШНПТ ТПУ

Правительство РФ в июне 2020 года утвердило Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года. Одной из задач, предусмотренных этим документом, является улучшение экологической ситуации в целом за счёт снижения негативного воздействия на окружающую среду действующих объектов генерации, в частности объем полезного использования золошлаков ТЭЦ должен к 2035 году составить не менее 50 % от годового уровня образования [1].

Количество золошлаковых материалов (далее – ЗШМ), производимых на тепловых электростанциях угольной генерации в настоящее кремя оценивается в 22 млн т в год, а накопленные запасы – в 1,8 млрд т [2] при имеющемся уровне утилизации данного техногенного материала в России в пределах 4–10 % [2–4]. В настоящее время они используются, в качестве заполнителя при мелиорации и рекультивации земель, в ландшафтном строительстве, для устройства обваловок и насыпей и т. п.

Крупнотоннажным потребителем ЗШМ могла бы стать промышленность строительных материалов. Известны два основных метода ввода ЗШМ в твердеющие системы:

- в качестве активной минеральной добавки в цемент при совместном помоле компонентов портландцемента;
- и при непосредственном вводе ЗШМ в твердеющую систему на основе портландцемента. В данном случае использование золошлаковых материалов вместо традиционных песчано-гравийных смесей может снизить себестоимость продукции на 10–20 % [4].

Однако ГОСТ Р 25592–2019 не разрешает использование золошлаков, имеющих в составе несгоревшие частицы в количестве более 3–7 % (в зависимости от назначение получаемого бетона) [5].

Задачей данного исследования стал поиск способа вовлечения данного крупнотоннажного техногенного материала в хозяйственный оборот, на примере пробы текущего сброса Северской ТЭЦ.

Было сделано предположение о том, что угольный недожог неравномерно распределяется в различных фракциях золошлаковой пульпы. Проба из текущего сброса ЗШМ были разделена на 3 фракции, а именно: шлаковый щебень с размером частиц более 5 мм, шлаковый песок с размером частиц от 0,315 до 5 мм и зольная фракция (менее 0,315 мм), Был проанализирован как оксидный состав каждой из трёх фракций, так и состав текущего сброса.

Таблица 1. Распределение основных оксидов по фракциям золошлакового материала ТЭЦ г. Северск

	Зольная фракция, (–0.315 мм), мас. %	Шлаковый щебень (+5 мм), мас. %	Шлаковый песок (–5+0,315 мм), мас. %	Текущий сброс ЗШМ, мас. %
SiO_2	58.11	56.40	49.89	49.30
TiO_2	0.69	0.86	0.75	0.80
Al_2O_3	25.26	23.64	20.48	19.34
Fe_2O_3	2.57	10.18	9.08	9.46
MnO	0.04	0.19	0.15	0.17
MgO	1.04	1.21	1.07	1.67
CaO	3.72	3.65	3.18	3.54
Na_2O	1.19	0.95	0.84	0.83
K_2O	3.77	1.91	1.72	1.75
P_2O_5	0.12	0.43	0.41	0.47
п.п.п.	2.97	0.36	11.99	11.45
SO_3	0.08	0.03	0.10	0.86

Проведённые исследования показали, что потери при прокаливании почти исключительно приходятся на фракцию шлакового песка (см. табл. 1).

Таким образом, для вовлечения ЗШМ в производство строительных материалов с лимитированным содержанием потерь при прокаливании, необходимо физико-механическим путём удалить из массива мелкую фракцию с размером частиц от 0,315 до 5 мм и в дальнейшем применять данный модифицированный техногенный материал для полной или частичной замены мелкого и крупного заполнителей при производстве бетонов и строительных растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р URL: http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4I gsApssm6mZRb7wx.pdf (дата обращения 07.11.2023)
2. Аникеев В.В., Силка Д.Н. От отходов угольных электростанций к производству строительных материалов. Общественно-деловой политический журнал «Энергетическая политика» 28.01.2021 г. URL: https://energypolicy.ru/ot-othodov-ugolnyh-elektrostanczij-k-proizvodstvu-stroitelnyh-materialov/ugol/2021/14/28/?ysclid=lomopz7kug451597446 (дата обращения 07.11.2023)
3. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 16–21.
4. Сниккарс П.Н., Золотова И.Ю., Осокин Н.А. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кроссотраслевая задача. Общественно-деловой политический журнал «Энергетическая политика» 21.07.2020 г. URL: https://energypolicy.ru/utilizacziya-zoloshlakov-tes-kak-novaya-k/energetika/2020/13/21/ (дата обращения 07.11.2023)
5. ГОСТ Р 25592–2019. Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИСТИРОЛА В СРЕДЕ СУБ- И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Т.М. Каримов, И.И. Гильмутдинов

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ИХНМ, ТОТ, гр. 13.06.01

Научный руководитель: А.Н. Сабирзянов, д.т.н., профессор ИХНМ, ТОТ

Отходы полистирола являются серьезной экологической проблемой из-за его больших объемов производства и небиоразлагаемого характера. При условии, что высокомолекулярный материал может быть разложен на полезные низкомолекулярные углеводороды, отходы полистирола можно рассматривать как высокоценное сырье. Однако на сегодняшний день в промышленности используют термическую переработку полистирола. К термической переработке полистирола относят пиролиз, данный метод является энергозатратным и отрицательно влияет на окружающую среду (при использовании растворителей). В данной работе рассмотрен гидротермальный метод переработка полистирола в среде суб- и сверхкритической воды. Это процесс термохимической деполимеризации в закрытом реакторе, где вода служит растворителем, катализатором и реагентом. При приближении к критической точке вода меняет свои свойства, такие как: диэлектрическая проницаемость, плотность, коэффициенты тепломассопереноса. Эти значительные изменения позволяют сверхкритической или субкритической воде вызывать быстрые, селективные реакции для преобразования полистирола в низкомолекулярные углеводороды [1–2].

Схема экспериментальной установки по переработки полистирола в среде суб- и сверхкритической воды представлена на рис. 1.

Описание экспериментальной установки представлено в работе [3].

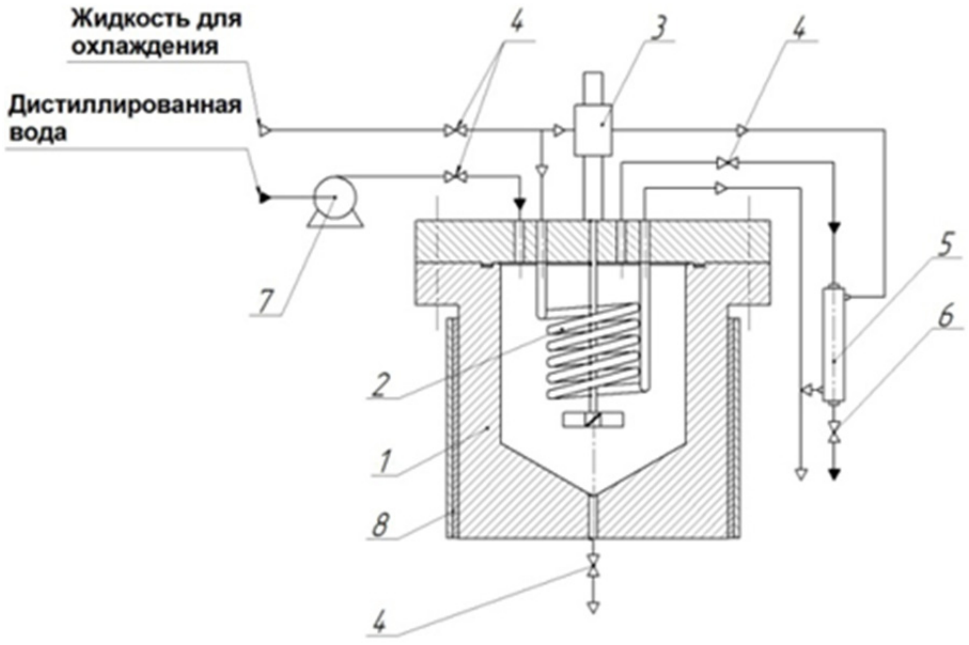


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – реактор; 2 – охлаждающий змеевик; 3 – магнитная мешалка; 4 – клапан; 5 – теплообменник для охлаждения; 6 – регулятор обратного давления; 7 – насос; 8 – нагревательная рубашка

Полистирол загружатся в реактор m=20 гр, предварительно заливается вода объемом V=200 мл. Далее происходит нагревания реактора до температуры T=375–425 °С. При достижении заданной температуры начинается отсчет времени в диапазоне τ=10–150 мин. Конечное давление зависит от количества залитой воды и от температуры реакции. Охлаждение происходит за счет охлаждающего змеевика. После охлаждения осуществляется разгерметизация реактора и отбор жидких продуктов реакции.

Далее образцы отправляются на рентгенофазный анализ (РФА) для определения фазового состава.

Экспериментальные исследования проводились при температуре T=375–425 °С, объеме воды V=200 мл, времени реакции τ=120 мин. Результаты фазового анализа жидких продуктов представлены на рис. 2.

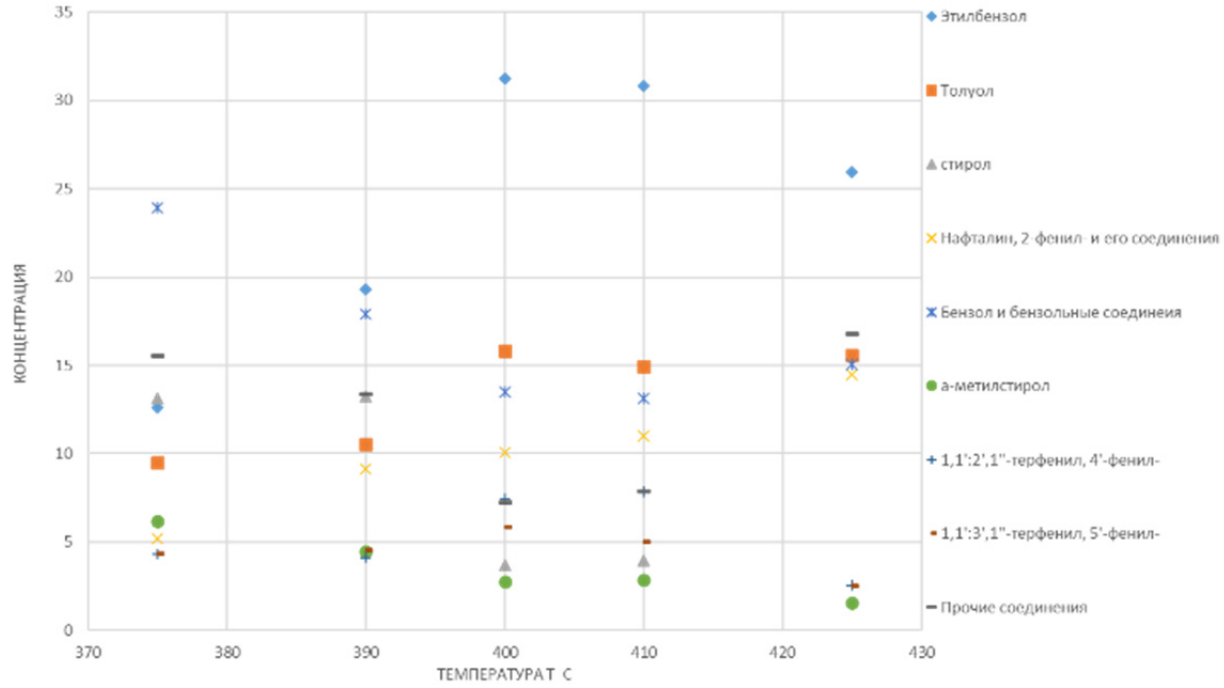


Рис. 2. Результаты фазового анализа жидких продуктов полистирола в сверхкритической воде при T=375–425 ℃, и времени реакции τ=120 мин

Также экспериментальные исследования проводились при температуре T=375 °С, объемах воды V=200 мл, и времени реакции τ=10–15 мин. Результаты фазового анализа жидких продуктов представлены в табл. 1–2.

Таблица 1. Результаты фазового анализа жидких продуктов полистирола в сверхкритической воде при T=375 ℃, и времени реакции τ=10 мин

№	Наименования вещества	Концентрация, % отн.
1	Стирол	54,81
2	Толуол	18,28
3	Этиловый эфир	8,66
4	Бензол и бензольные соединения	8,27
5	Прочие соединения	3,01
6	α-Метилстирол	2,26
7	Этилбензол	2,05
8	Нафталин, 1,2,3,4-тетрагидро-2-фенил-	1,65
9	1,2-Дифенилциклопропан	1,01

Таблица 2. Результаты фазового анализа жидких продуктов полистирола в сверхкритической воде при T=375 ℃, и времени реакции τ=15 мин

№	Наименования вещества	Концентрация, % отн.
1	Стирол	46,62
2	Толуол	20,23
3	Бензол и бензольные соединения	9,56
4	Этиловый эфир	7,64
5	Прочие соединения	4,07
6	Этилбензол	3,44
7	α-Метилстирол	3,16
8	Нафталин, 1,2,3,4-тетрагидро-2-фенил-	1,85
9	Циклопентен-1-карбоновая кислота,4-[2-(дифенилметил)-2пропен-1-ил]-,метиловый эфир	1,31
10	1,2-Дифенилциклопропан	1,11
11	1,1':3',1''-Терфенил, 5'-фенил-	1,01

Таблица 3. Результаты фазового анализа жидких продуктов полистирола в сверхкритической воде при T=375 ℃, и времени реакции τ=120 мин

№	Наименования вещества	Концентрация, % отн.
1	Стирол	13,15
2	Этилбензол	12,63
3	Толуол	9,5
4	Бензол и бензольные соединеия	23,9
5	α-метилстирол	6,18
6	Нафталин, 2-фенил-	5,22
7	1,1':3',1''-терфенил, 5'-фенил-	4,35
8	1,1':2',1''-терфенил, 4'-фенил-	4,3
9	1-Пропен, 3-(2-циклопентенил)-2-метил-1,1-дифенил-	1,39
10	1-Пропен, 3-(2-циклопентенил)-2-метил-1,1-дифенил-	0,78
11	1,2-дифенилциклопропан	3,01
12	Прочие соединения	15,59

В данной работе проводились экспериментальные исследования переработки полистирола в среде суб- и сверхкритической воды при температурах T=375–425 °С, объеме воды равным V=200 мл, в течении времени τ=10–150 мин. В результате экспериментального исследования полностью отсутствовала твердая фаза, жидкая фаза анализировалась хромато-масс-спектрометром Кристалл 9000 по результатам анализа были получены: стирол, этилбензол, бензол, толуол, нафталин, треметил фенил. Было выявлено, что при температуре T=375 °С, τ=10–15 мин, происходит значительное образование стирола. По мере увеличения времени T=375 °С, τ=120 мин образование стирола уменьшается, увеличивается образования толуола, бензола, этилбензола, это связано из-за трудности разложения бензельных колец. С увеличением температуры T=390–425 °С, τ=120 мин мы наблюдаем увеличения образования этилбензола, и как следствие уменьшения бензола и бензельных соединений.

Результаты экспериментального исследования показали, что деполимеризация полистирола, позволяет получить нефтехимическое сырье и жидкое топливо из отходов полистирола.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)) с использованием аналитического оборудования центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологи» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kinetics and mechanisms of styrene monomer recoveryfrom waste polystyrene by supercritical water partial oxidation / W. Douglas Lilac, S. Lee // Advances in Environmental Research 6. – 2001. – V. 9. – P. 9–16.
2. Depolymerization of Polyethyleneterephthalate in Supercritical Methanol / B.K. Kim, G.C, Hwmlg, S.Y. Bae // Jornal of Applied Polvmer Science. – 2012. – V. 81. – P. 641–645.
3. Экспериментальное исследование процесса окисления алюминия методом гидротермального синтеза / Т.М. Каримов, И.И. Гильмутдинов, Н.С. Сандугей, И.М. Гильмутдинов, И.В. Кузнецова, А.Н. Сабирзянов // Вестник технологического университета. – Т.22. – No. 9. – С. 75–77.

МЕХАНИЗМ РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИОСЕМИКАРБАЗОНОВОГО КОМПЛЕКСА В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА

Д.А. Логвинов, А.С. Баранникова

Южный Федеральный университет,
ХФ, КФиКХ, гр. 3

Научный руководитель: И.Н. Щербаков, д.х.н., зав. кафедрой ФиКХ ХФ ЮФУ

С наступлением научно-технической революции полезных ископаемых Земли с каждым годом становится существенно меньше, что повышает спрос на альтернативные источники энергии. Поэтому разработка водородного топливного элемента является важной и актуальной задачей, с которой связан ряд определенных сложностей. Молекулярный водород может быть получен с помощью реакции выделения водорода (Hydrogen Evolution Reactions – HER), основанной на двухэлектронном восстановлении протонов. Накопленная энергия впоследствии может быть высвобождена в результате реакции окисления водорода (Hydrogen Oxidation Reaction – HOR) [1]. В настоящее время наиболее эффективными катализаторами для таких процессов являются электрокатализаторы на основе платины и углеродных наноструктур. Тем не менее, редкость и высокая стоимость обуславливает их ограниченное применение в промышленных масштабах. Это привело к поиску устойчивых и недорогих электрокатализаторов.

В современных работах большое внимание уделяется металлорганическим комплексам на основе полидентатных лигандных систем, проявляющим каталитическую активность в реакции восстановления водорода. Наличие большого количества донорных центров и особенности электронного строения таких соединений позволяет одновременно принимают на себя как протон, так и электрон, что облегчает реакцию восстановления водорода.

В настоящем исследований в качестве электрокатализатора для восстановления молекулярного водорода был выбран комплекс Ni(II) типа 1, полученный взаимодействие перхлората никеля(II) с *бис*-тиосемикарбазоном – продуктом конденсации 4-*трет*-бутилтиосемикарбазида и диацетила. Строение комплекса установлено методами элементного анализа, ИК спектроскопии и РСА. Молекулярная структура комплекса показана на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что бис-тиосемикарбазон в комплексе Ni(II) выступает как тетрадентатный N_2S_2 – донорный лиганд в енольной дважды депротонированной форме. Координация к иону никеля происходит за счет атомов азота и серы диацетильного и тиосемикарбазонного фрагментов соответственно. Комплекс имеет плоско-квадратное строение.

Анализ литературных данных показал, что предполагаемый механизм реакции восстановления водорода с участием комплексов на основе *бис*-тиосемикарбазонов в общем случае

состоит из 4-х стадий, в которых процессы протонирования и восстановления чередуются в различных комбинациях (рис. 2).

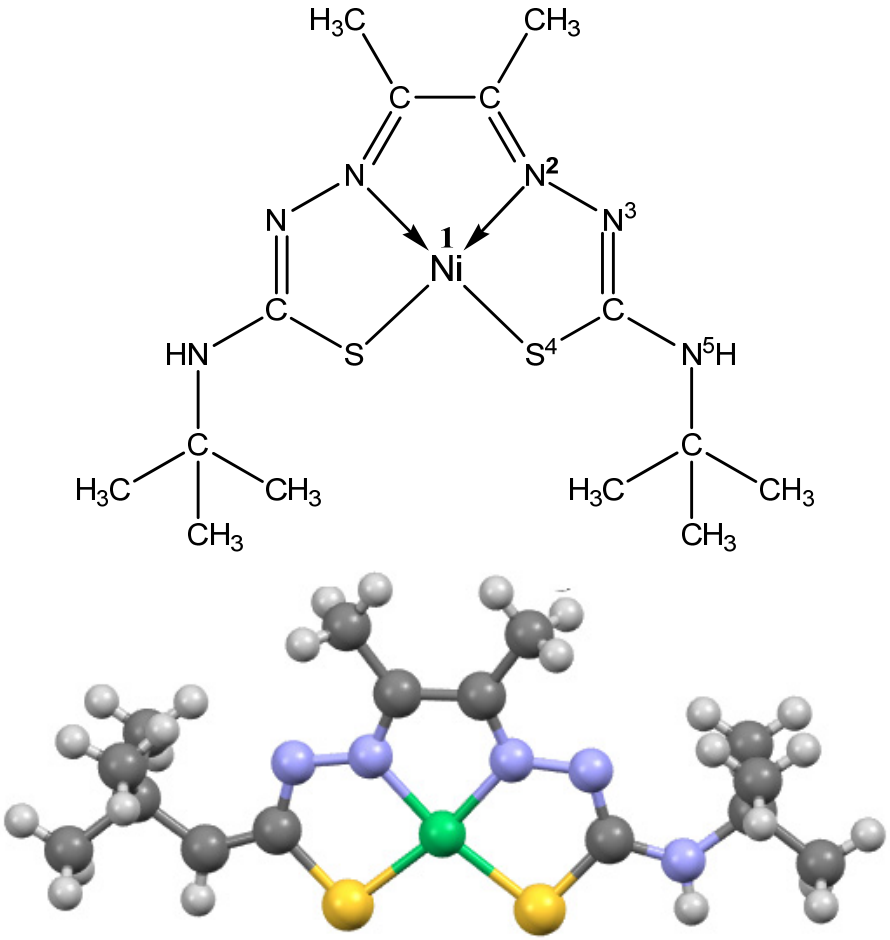


Рис. 1. Молекулярная структура комплекса Ni(II)

Присоединение протона происходит на атом, обладающий наибольшей электронной плотностью. Следовательно, в комплексе есть как минимум 5 донорных атомов, выступающих в роли потенциальных мест первичного протонирования:

1) металл-комплексообразователь;
2) атом азота диацетильного фрагмента;
3) атом азота гидразонной группы;
4) атом серы;
5) атом азота NH – группы тиосемикарбазидного фрагмента.

Присоединение первого электрона происходит на нижнюю незанятую МО лиганда или орбиталь иона металла, энергия которых может варьироваться для различных комплексов. На рис. 3 показана качественная энергетическая диаграмма МО, иллюстрирующая первичный процесс восстановления. Поскольку восстановление двухстадийное, разные этапы могут происходить на разных МО близких по энергии [2].

Кроме того, механизм реакции усложнен тем, что может включать стадии перескока протона, гидридного сдвига и изменения степеней окисления атомов лиганда и металла, сопровождающиеся изменением мультиплетности. Для получения полной модели необходимо использовать опытные и теоретические данные. После сопоставления ряда данных можно сделать вывод о характере протекания реакций и о последовательности стадий протонирования и восстановления.

Для установления предполагаемых интермедиатов Ni^{2+} комплекса с R=t-Bu была выполнена оптимизация структур с использованием DFT, функционал B3LYP и базисный набор 6-311G(d,p) в программе Gaussian09. После было проведено сравнение внутренней энергии исходного комплекса [Ni(II)-L] и интермедиата [Ni(II)-LH], а также внутренней энергии протонированных комплексов $[Ni(II)-LH]^+$ и [Ni(II)-LH], в которых протон был размещен поочередно на всех донорных атомах. На каждой из стадий была выбрана наиболее энергетически выгодная структура.

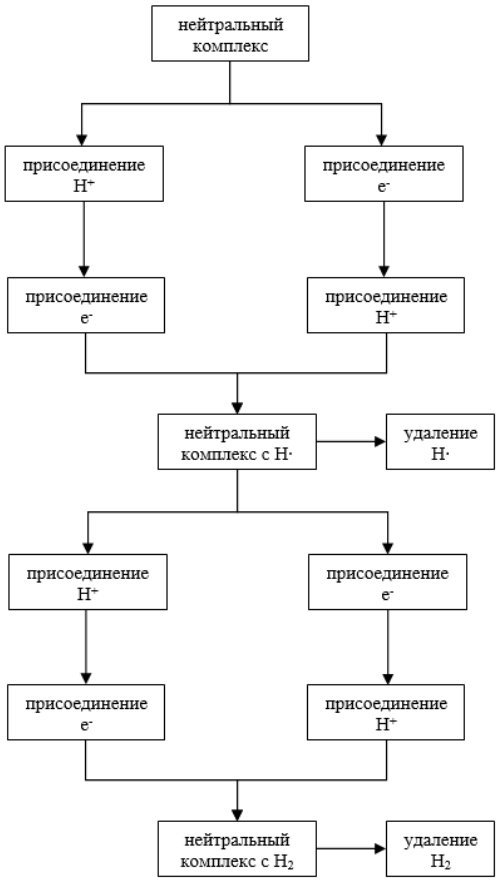


Рис. 2. Возможный порядок основных стадий процесса восстановления водорода на комплексном катализаторе

Экспериментальные данные и результаты расчетов показали, что для исходного комплекса [Ni(II)-L] характерна мультиплетность равная 1 (S=0, все электроны спарены). При рассмотрении первого этапа восстановления водорода с участием этого комплекса возможны два пути развития процесса:

а) Если на первом этапе происходит присоединения электрона, образуется интермедиат [Ni(II)-LH] ($S=^1/_2$). При этом последующее протонирование приводит к структуре [Ni(II)-LH], где водород локализуется на азоте диацетильного фрагмента (N2).

б) В случае, если первым этапом происходит протонирование молекулы комплекса с образованием $[Ni(II)-LH]^+$, то водород локализуется на атоме азота гидразонного фрагмента (N3), а последующее восстановление (присоединение электрона и образование [Ni(II)-LH]) приводит к миграции водорода на атом азота (N2).

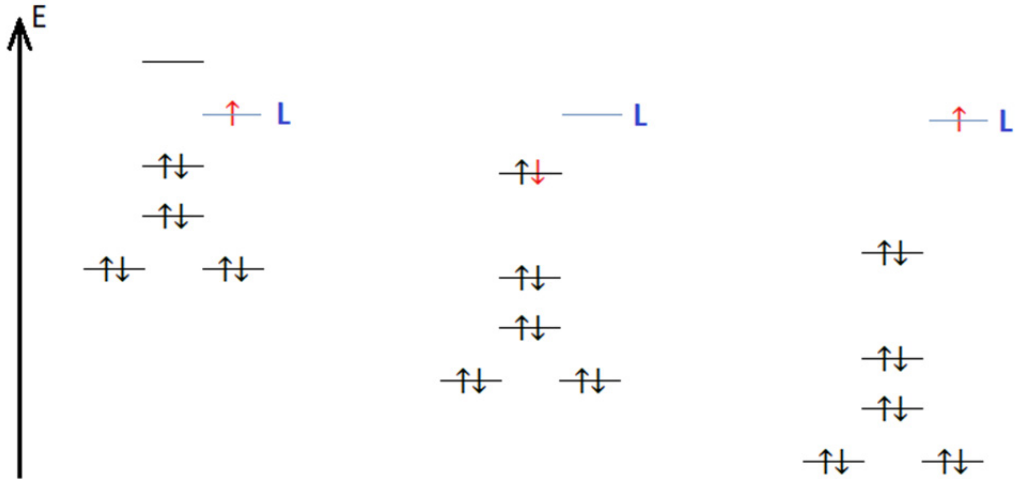


Рис. 3. Качественная энергетическая диаграмма МО, иллюстрирующая первичный процесс восстановления (Ni(II)-L→Ni(II)-L·, Cu(II)-L→Cu(I)-L, Zn(II)-L→Zn(II)-L·)

Оба варианта пути протекания процесса приводят к нейтральному комплексу [Ni(II)-LH], где водород находится на координированном атоме азота (N2). В дальнейшем мы планируем рассчитать свободные энергии для интермедиатов различного состава, что позволит более точно выявить нюансы механизма реакции. А также изучить порядок стадий на практической основе и проследить влияние различных заместителей тиосемикарбазидном фрагменте и природы металла-комплексообразователя на порядок стадий процесса восстановления водорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang S., Lu A., Zhong C. J. Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts // Nano Convergence. – 2021. – Т. 8. – С. 1–23.
2. Haddad A.Z. et al. Metal-assisted ligand-centered electrocatalytic hydrogen evolution upon reduction of a bis (thiosemicarbazonato) Cu (II) complex //Inorganic chemistry. – 2017. – Т. 56. – №. 18. – С. 11254–11265.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВВОДА ОЗОНИРОВАННОГО ВОЗДУХА В ТОПЛИВОСЖИГАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ТУРБОУСТАНОВКИ НА ЭМИССИЮ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА

С.Н. Маспанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ИЭ ВШЭМ

Научный руководитель: В. А. Суханов, к. т. н., доцент ВШЭМ ИЭ СПбПУ

Одной из приоритетных задач развития паро-газотурбостроения является сокращение выбросов в атмосферу токсичных веществ на объектах теплоэнергетики.

Известны методы, предназначенные для сокращения выброса токсичных веществ в топливосжигающих устройствах турбоустановок: использование альтернативных видов топлива, например, водорода; каталитическое сжигание топлива; кислородно-топливное сжигание (в замкнутых термодинамических циклах); микрофакельное сжигание топлива; организация зонного горения; организация «обеднённого» горения с прямым (или многоступенчатым) впрыском топлива; организация «обогащённого» горения; плазменное сжигание топлива; селективное некаталитическое восстановление; сжигание топлива, предварительно перемешанного с окислителем [1–4].

Для сокращения эмиссии токсичных веществ и интенсификации процесса горения топлива возможно применение инновационных и малоисследованных методов, что позволит расширить область применения этих технологий и увеличить потенциал для существенного улучшения экологической обстановки на мировом уровне. К таким инновационным и малоисследованным методам относится метод ввода озонированного воздуха в топливосжигающее устройство турбоустановки [5–11]. Поэтому анализ влияния ввода озонированного воздуха в топливосжигающее устройство турбоустановки на эмиссию монооксида углерода при различных режимных параметрах является актуальной задачей современного паро-газотурбостроения. Цель исследования состояла в подготовки рекомендаций по сокращению эмиссии токсичных веществ при варьировании режимных параметров в заданных пределах. Для достижения данной цели был разработан и реализован проект специализированного лабораторного стенда, предназначенного для исследования экологических характеристик натурных модулей топливосжигающих устройств типа – вихревой запально-

стабилизирующий модуль (ВЗСМ). Экспериментальные исследования были выполнены в пределах изменения режимных параметров, которые характерны для ВЗСМ.

На рис. 1 показана 3 D модель специализированного лабораторного стенда для исследования экологических характеристик натурных модулей топливосжигающих устройств типа ВЗСМ.

Электроозонирующее устройство *3* изготовлено с использованием алюминиевых электродов и включает в себя диэлектрический барьер, установленный между электродами для создания газоразрядных промежутков.

Тепловая мощность, выделяемая испытуемым ВЗСМ *2*, изменялась в диапазоне от 6 до 16 кВт.

ВЗСМ представляет собой горелочное устройство кинетического типа с предварительным смешением подводимых к нему горючего газа и озонированного воздуха в вихревой камере, где, в основном, завершается процесс смешения компонентов горения перед их поступлением в пламенную трубу [12–14].

С помощью запорно-регулирующих органов *14*, *17* устанавливались массовые расходы горючего газа и воздуха. Затем, используя свечу зажигания *1*, запускалось воспламенение полученной смеси, что приводило к формированию трубчатого фронта пламени. С помощью электроозонирующего устройства *3* изменялась концентрация озона в воздушно-озоновой смеси, подаваемой в ВЗСМ.

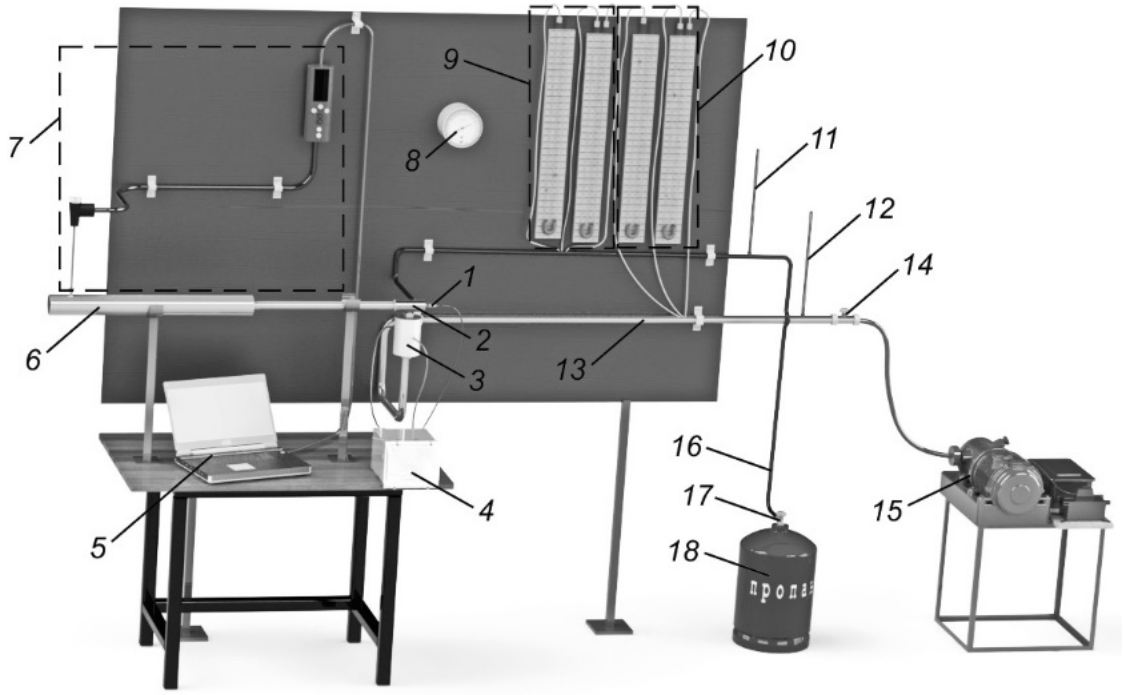


Рис. 1. 3D модель специализированного лабораторного стенда для исследования экологических характеристик натурных модулей топливосжигающих устройств типа ВЗСМ:
1 – электрическая свеча зажигания; 2 – ВЗСМ; 3 – электроозонирующее устройство;
4 – генератор высокого напряжения; 5 – ноутбук; 6 – выпускная труба;
7 – анализатор дымовых газов Testo 340; 8 – барометр;
9 – жидкостные манометры горючего газа; 10 – жидкостные манометры воздуха;
11 – термометр горючего газа; 12 – термометр воздуха; 13 – успокоительная труба воздуха;
14 – запорно-регулирующий орган воздуха; 15 – компрессор;
16 – успокоительная труба горючего газа; 17 – запорно-регулирующий орган горючего газа;
18 – источник горючего газа

Анализатором дымовых газов *7*, были установлены экспериментальные зависимости влияния ввода озонированного воздуха в ВЗСМ на эмиссию монооксида углерода.

На основании результатов обработки экспериментальных данных установлены зависимости концентрации монооксида углерода в продуктах сгорания от температуры уходящих газов. Из анализа следует, что при изменении температуры зоны горения, которое косвенно определяется изменением температуры уходящих газов, эмиссия монооксида углерода возрастает, как при наличии, так и при отсутствии ввода озонированного воздуха в ВЗСМ. При увеличении температуры в зоне горения без ввода озонированного воздуха в ВЗСМ, эмиссия монооксида углерода увеличивается от $0{,}01 \cdot 10^4$ до $0{,}125 \cdot 10^4$ мг/м^3, а при наличии ввода озонированного воздуха в ВЗСМ – от $0{,}005 \cdot 10^4$ до $0{,}083 \cdot 10^4$ мг/м^3. Таким образом, при $T = 740K$ ввод озонированного воздуха в ВЗСМ позволил уменьшить эмиссию монооксида углерода на $0{,}005 \cdot 10^4$ мг/м^3, то есть, на 50 %, а при $T = 860K$ – уменьшить на $0{,}042 \cdot 10^4$ мг/м^3, то есть на 33,6 %.

Проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- испытания ВЗСМ в лабораторных условиях подтверждают положительное влияние ввода озонированного воздуха на экологические показатели топливосжигающих устройств турбоустановок;
- влияние ввода озонированного воздуха в ВЗСМ при определённых режимных параметрах может обеспечить максимальное снижение эмиссии монооксида углерода на 50 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богов И.А., Куландин А.А., Суханов В.А., Толмачев В.В., Безухов А.П., Смирнов А.А., Бодров А.И., Корихин Н.В. Основы технической термодинамики, термохимии, теории горения и циклов газотурбинных и парогазовых установок. – Санкт-Петербург: Энергомашиностроение, 2007. – 192 с.
2. Lefebvre A., Ballal D. Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions. – FL, USA, CRC Press: Boca Raton, 2010. – 558 p.
3. Научные проблемы и достижения в разработке и исследовании камер сгорания ГТУ / Л.А. Булысова, В.Д. Васильев // Электрические станции – 2023. – No 2. – С. 2–6.
4. Экспериментальные исследования влияния озонирования воздуха на эмиссию загрязняющих веществ в вихревых запально-стабилизирующих модулях камер сгорания газотурбинных установок / С.Н. Маспанов, И.А. Богов, В.А. Суханов // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16. – No. 4.
5. Маспанов С.Н., Богов И.А., Суханов В.А. Озонирование окислителя как метод интенсификации горения топлива на объектах теплоэнергетики // XLVI Неделя науки СПБПУ: материалы научного форума с международным участием. – Санкт-Петербург: Институт энергетики и транспортных систем, 2017. – С. 114–116.
6. Маспанов С.Н., Богов И.А., Суханов В.А. Экспериментальное исследование влияния озона на эмиссию диоксида азота при сжигании газообразного топлива в вихревом запально-горелочном модуле // XLVI Неделя науки СПБПУ: материалы научного форума с международным участием. – Санкт-Петербург: Институт энергетики и транспортных систем, 2017. – С. 116–119.
7. The Effect of Ozone Addition on Combustion: Kinetics and Dynamics / W. Sun, X. Gao, B. Wu, T. Ombrello // Progress in Energy and Combustion Science. – 2019. – V 73. – P. 1–25.
8. Analysis of Gas-Turbine Type GT-009 M Low-Toxic Combustion Chamber with Impact Cooling of the Burner Pipe Based on Combustion of Preliminarily Prepared Depleted Air–Fuel Mixture / S. Maspanov, I. Bogov, A. Smirnov, S. Martynenko, V. Sukhanov // Energies. – 2022. – V. 15. – P. 707.
9. Combustion performance of low calorific gas enriched by oxygen and ozone / R. Paulauskas, R. Skvorčinskienė, K. Zakarauskas, N. Striugas // Fuel. – 2022. – V. 324. – P. 124761.
10. Comparison of Flame Response Characteristics Between Non-Premixed and Premixe Flames Under Acoustic Excitation / M. Ahn, T. Kim, Y. Yoon // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2022. – V. 139. – P. 110707.
11. A kinetic investigation on low-temperature ignition of propane with ozone addition in an RCM / W. Liao, Z. Chu, Y. Wang, B. Yang // Proceedings of the Combustion Institute. – 2023. – V. 39. – P. 395–403.
12. Analysis of the Exothermic Reaction of Flame Ignition in the Combustion Chamber of a Gas Turbine Unit / S. Maspanov, I. Bogov, S. Martynenko, V. Sukhanov // Energies. – 2023. – V. 16. – P. 7395.
13. Maspanov S.N., Bogov I.A., Sukhanov V.A. Experimental Research in Possibilities of Quality Improvement of Burning Processes in Burners of Turbines // Proceedings of the Scientific Conference with International Participation «Week of Science 2019». – St. Petersburg, 2019. – P. 289–291.
14. Стенд для исследования влияния озона на процессы в камере сгорания газотурбинной установки: Патент на полезную модель: пат. Рос. Федерация, No 175593, заявл. 10.03.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. No. 35. – 9 с.

ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ДРЕВЕСНОУГОЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИМИНИТЕЛЬНО К ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ

И.Д. Димитрюк[1], И.А. Жованик[2]

Томский политехнический университет, ИШЭ, ТПТ, гр. А3-44[1],
ТюмГУ, лаборант-исследователь[2]

Научный руководитель Р.Б. Табакаев, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова

Угольный штыб – это мелкая фракция угля (0-6 мм), образующаяся при его добыче и обогащении в большом количестве и считается отходом [1]. Энергетическое использование штыба в естественном виде ограничено камерными топками котлов, кроме того, существует проблема транспортировки на протяженные расстояния (потери могут составлять 30–40 %). Накопление и хранение штыба в отвалах приводит к негативным последствиям для окружающей среды. В связи с этим переработка угольной мелочи актуальна, как с точки зрения утилизации, так и с точки зрения получения энергетически ценного топлива с повышенной добавленной стоимостью.

Гранулирование может послужить одним из эффективных способов для использования угольного штыба [2]. При транспортировке и движении слоя в печи происходит механическое воздействие на гранулы, поэтому важной характеристикой топливных гранул является их механическая прочность, так для получения прочных гранул необходимо осуществить подбор доступного связующего вещества. Причины, тормозящие в настоящие время развитие гранулирования каменноугольной мелочи, является отсутствие экологически безопасных, доступных и технологических связующих. Для решения данных проблем рассмотрим использование экологически чистой и доступной биомассы, которая в период свой жизни поглотила такое количество CO_2, что и образуется при ее сжигании и является отходом биологического происхождения [3].

Повышение доли биомассы в топливной композиции позволяет облегчить воспламеняемость и увеличить скорость горения [1], но для получения прочных гранул необходимо произвести оптимальный подбор параметров (концентрация биомассы, давление, время и др.) гранулирования. Так высокое давление может снизить механическую прочность гранул.

В связи с этим актуальна переработка угольной мелочи с оптимальной доли биомассы на примере отходов деревообрабатывающей промышленности производства в гранулированное топливо.

Методика исследования

В качестве объектов исследования рассмотрены пробы каменноугольного штыба (Кузнецкий бассейн, Кузбасс) и древесные отходы (сосновые опилки).

Гранулирование штыба и опилок осуществлено на основе изученной и разработанной технологии [1]. На рис. 1 приведена схема гранулирования. Эксперименты осуществляли следующим образом, уголь смешивали с долей опилок (5 %, 7 %, 8 %, 10 %, 15 %, 20 % – опилки). Далее смесь прессовали при следующих параметрах: усилие пресса – 5 т, температура – 130–140 °С.

Для оценки качества получаемых гранул проводили испытания на истирание согласно ГОСТ 34090.1–2017 «Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов». Согласно данной методики (рис. 2), предварительно взвешенные гранулы *2* помещали во вращающийся короб *1*, который с помощь привода *3* вращали в течение 10 минут, достигая 500 оборотов. За время испытания происходило опрокидывание и сдвиг гранул с

истиранием. После окончания испытания содержимое высыпали и просеивали, при этом исключая частицы с размером менее 3,15 мм. На высокоточных весах с дискретность 0,1 мг (ГОСМЕТР, Россия) измеряли массу гранул до начала испытания и после.

Обработку результатов осуществляли следующим образом:

$$DU^r = \frac{m_a}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_a – масса образца после испытания и просеивания, г; m_0 – масса образца до испытания (начальная масса), %.

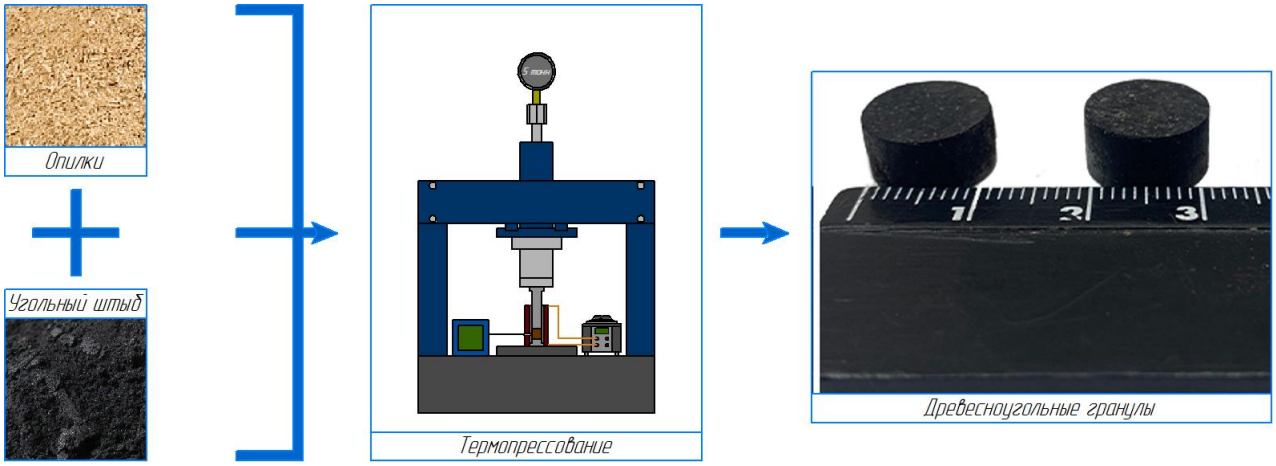


Рис. 1. Схема процесса гранулирования древесноугольных гранул

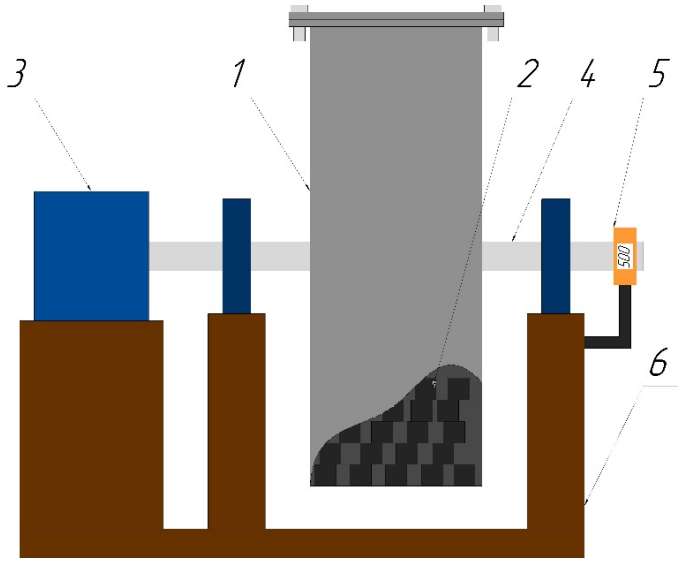


Рис. 2. Лабораторный стенд для проведений испытаний на механическую прочность гранул: 1 – вращающийся короб, 2 – гранулы, 3 – привод, 4 – вал, 5 – счетчик оборотов, 6 – рама

Результаты и их обсуждения

Характеристики исходного топлива приведены в табл. 1. Заметно, что зольность опилок (A^d = 0,90 %) ниже среднего значения зольности биомассы (8,00 %), приведенного в [4]. Высокий выход летучих в опилках (V^{daf} = 83,60 %) обеспечивает высокую реакционную способность и низкую температуру воспламенения, что благоприятно скажется при воспламенении топливных гранул. Также можно отметить, что каменный уголь обладает высокой теплотворной способностью (Q_i^r = 24,88 МДж/кг) и низкой зольностью (A^d = 8,30 %), что позволяет рассматривать его в качестве перспективного сырья для гранулирования.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав рассматриваемых твердых органических топлив

Образец	Влажность W^a, %	Зольность на сухую массу A^d, %	Выход летучих веществ V^{daf}, %	Низшая теплота сгорания Q_i^r, МДж/кг	Элементный состав на сухую массу, %				
					C^d	H^d	N^d	S^d	O^d
Опилки	7,2	0,9	83,6	17,12	51,42	6,03	0,05	0,00	41,60
Каменный уголь	10,6	8,3	37,7	24,88	74,00	4,11	2,25	0,45	10,93

В процессе гранулирования получены следующие результаты (рис. 3). Видно, что с увеличением доли опилок в древесноугольных гранулах возрастают их механические свойства. Также можно выделить диапазон доли опилок (8–15 %) на котором механическая прочность гранул соответствует требованиям (DU^r=80 %) к топливу для энергетических и коммунально-бытовых нужд [5].

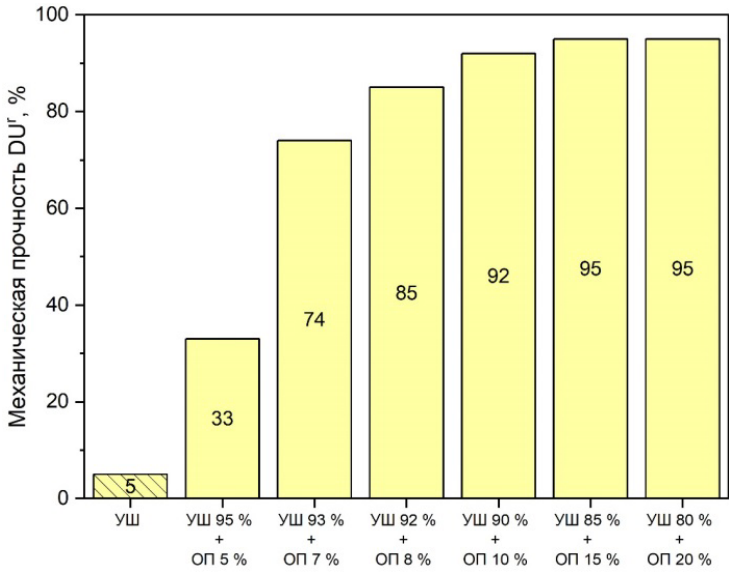


Рис. 3. Механические характеристики древесноугольных гранул (УШ – Угольный штыб, ОТ – опилки)

Заключение

Опилки могут быть использованы в качестве доступного и CO_2-нетрального связующего при производстве прочных и транспортабельных гранул из угольного штыба. Данные гранулы могут быть в дальнейшем использованы при термической переработке для получения углеродистого остатка или газогенерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-19-00410 (Разработка научно-технических основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tabakaev R. et al. High-strength fuel pellets made of flour milling and coal slack wastes // Energy. – 2022. – Т. 243. – С. 123071.
2. Sahan M. Usage of biomass in the production of briquettes. – 1999.
3. Астафьев А.В. Обоснование условий реализации автотермического пиролиза органической биомассы применительно к теплотехнологическому оборудованию / А.В. Астафьев.: дис. канд. техн. наук: 05.14.04. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 179 с.
4. Vassilev S. V. et al. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion // Fuel. – 2017. – Vol. 208. – P. 377–409.
5. ГОСТ 57016–2016. Брикеты каменноугольные для энергетических и коммунально-бытовых нужд. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.

АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ CO_2 НА ОБЪЕКТАХ ГЕНЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

М.А. Сильванович, М.Р. Пильковская, А.С. Мелькова

Белорусский национальный технический университет,
ЭФ, ЭОП, гр. 10607122

Научный руководитель: Е.П. Корсак, м.э.н., старший преподаватель
кафедры экономики и организации энергетики

Экологические проблемы нашей эпохи стали неотъемлемой частью нашей реальности. Среди текущих экологических проблем, с которыми мы сталкиваемся, особое внимание стоит обратить на загрязнение водных, почвенных и воздушных ресурсов. Истощение природных ресурсов также является серьезной проблемой, которая ставит под угрозу наше будущее. Массовое исчезновение видов растений и животных влечет за собой исчезновение биоразнообразия, нарушая естественные экосистемы и их устойчивость.

Одной из ключевых проблем, которая требует немедленного вмешательства, является выброс углерода в окружающую среду. Выброс углерода, особенно в виде парниковых газов, таких как двуокись углерода (CO_2), является одной из основных причин глобального потепления и изменения климата. Этот процесс происходит из-за неправильного использования и истощения природных ресурсов, особенно ископаемых топлив, таких как уголь, нефть и газ.

Многие страны вносят свой вклад в решение проблемы выброса углерода путем перехода к обновляемым источникам энергии, сокращения использования ископаемых топлив и улучшения энергоэффективности. Эти меры направлены на снижение выбросов углерода и создание устойчивой экономики, сбалансированной с природой.

В Республике Беларусь проблема выбросов парниковых газов является одной из наиболее актуальных и значимых, требующих незамедлительного решения. Выбросы парниковых газов происходят в основном в результате сжигания ископаемых топлив, таких как нефть, газ и уголь, для производства энергии и тепла, а также в результате промышленных процессов и транспорта. Беларусь, как многоотраслевая экономика, сталкивается с этой проблемой в различных секторах своей деятельности.

Энергетика, в сравнении с сельским хозяйством и промышленным производством, несомненно, является весомым источником загрязнения окружающей среды, занимая около 60 % от общих выбросов CO_2 в атмосферу.

Статистические данные по выбросам CO_2 в атмосферу за 2015–2020 гг., которые предоставил Национальный статистический комитет Республики Беларусь приведены на рис. 1 [1].

Рассмотрим данные по выбросам CO_2 в Белорусской энергетике за период с 2015 по 2020 г.

Из предоставленных данных видно, что в этот период произошло значительное колебание в объеме выбросов CO_2 из белорусской энергетики.

На первый взгляд, можно отметить, что в 2020 году выбросы диоксида углерода значительно возросли по сравнению с предыдущими годами. Это может быть связано с рядом факторов, таких как увеличение энергопотребления, изменение структуры энергетического сектора или сезонные колебания в использовании различных источников энергии.

Однако для полного понимания ситуации и анализа динамики выбросов CO_2 необходимо провести более подробное исследование. Для этого можно учитывать не только годовые данные, но и факторы, влияющие на производство энергии, например, изменение мощностей энергетических объектов или использование новых технологий и практик в секторе.

Также стоит отметить, что для общего снижения выбросов углекислого газа и достижения устойчивого развития, необходимо постоянное внимание к вопросам энергоэффективности,

развитию возобновляемых источников энергии, а также применению передовых экологически чистых технологий в энергетике. Это может способствовать снижению выбросов парниковых газов и улучшению экологической обстановки в Беларуси.

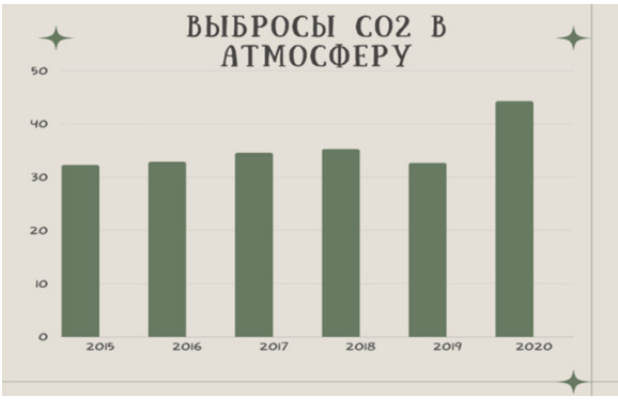


Рис. 1. Выбросы диоксида углерода в атмосферный воздух от сжигания топлива на производство тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь (тысяч тонн)

Республика Беларусь принимает меры по снижению выбросов CO_2 и обеспечению экологической устойчивости. Среди основных мероприятий можно выделить следующие:

1. Повышение энергоэффективности: Беларусь работает над совершенствованием энергетической эффективности в различных секторах экономики. Это включает модернизацию промышленных предприятий, повышение энергоэффективности в зданиях, использование энергосберегающих технологий и оборудования.

2. Развитие возобновляемых источников энергии: Беларусь активно развивает возобновляемые источники энергии, включая солнечную и ветровую энергию. В стране введены специальные меры поддержки для инвесторов в эту сферу, такие как льготы налогообложения и государственные программы по стимулированию использования возобновляемой энергии.

3. Модернизация транспортной системы: Беларусь стремится снизить выбросы CO_2 в сфере транспорта путем стимулирования использования экологически чистых видов транспорта, таких как электромобили, и развития общественного транспорта. В стране активно улучшаются инфраструктура для электромобилей, включая установку зарядных станций.

Кроме того, Беларусь активно взаимодействует с международными организациями и участвует в международных соглашениях и программе по снижению выбросов парниковых газов. Страна принимает участие в проведении международных переговоров и разрабатывает свои национальные стратегии и планы действий для достижения устойчивого развития и снижения выбросов CO_2.

Таким образом, проблема выбросов парниковых газов занимает важное место в списке приоритетов Республики Беларусь, а усилия по ее решению включают в себя разработку стратегий, участие в международных договоренностях и энергоэффективные меры в различных секторах экономики. Однако, необходимо отметить, что вопрос сокращения выбросов CO_2 является сложной задачей и требует системного и комплексного подхода. Беларусь продолжает работать над совершенствованием своих усилий в этой сфере и принимает меры для снижения своего углеродного следа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетический баланс Республики Беларусь / И.В. Медведева [и др.]. – Минск: Нац. Стат. Комитет Республики Беларусь, 2021. – 148 с.
2. О концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года // Белэнерго [Электронный ресурс]. – Минск, 2023. – Режим доступа: https://minenergo.gov.by/press/novosti/o-kontseptsii-razvitiya-elektrogeneriruyushchikh-moshchnostey-i-elektricheskikh-setey-na-period-do-2030-goda/ – Дата доступа: 20.11.2023.

Секция 5
Электротехнические комплексы и системы

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЕРЕВЕНЬ ЛИНДОЗЕРО И ЮСТОЗЕРО

М.Д. Чернышова

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ23

Научный руководитель: Б.В. Лукутин, доктор технических наук, профессор ОЭЭ ИШЭ

В данной работе рассматривается оптимизация систем электроснабжения деревень Линдозеро и Юстозеро. К северо-западу от деревни Юстозеро находится государственный гидрологический заказник «Озеро Талое» – особо охраняемая природная территория. Электроснабжение в деревнях осуществляется с помощью дизельных генераторов, которые в ходе эксплуатации выбрасывают в атмосферу загрязняющие вещества, влияющие на экологию озер. Существующий тариф в деревнях составляет 32,7 рублей, что достаточно дорого для жителей деревень и требует бюджетного субсидирования. Значительная доля в тарифе приходится на стоимость израсходованного топлива. Целью работы является снижение потребления топлива дизельными генераторами, а также уменьшение тарифа на электроэнергию в деревнях Линдозеро и Юстозеро путем внедрения возобновляемых источников энергии.

Электроснабжение осуществляется от автономных дизельных электростанций, объем реализации электроэнергии представлен в табл. 1. Данные предоставили АО «Прионежская сетевая компания» и Северная Экологическая Финансовая Корпорация в техническом задании.

Таблица 1. Ежемесячная реализация э/э потребителям по населенным пунктам, кВт·ч

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Юстозеро	335	248	371	250	223	695	347	396	587	324	284	543
Линдозеро	883	873	707	584	500	536	559	615	836	1062	905	693

Строительство дизельной электростанции с электроснабжением второй деревни по линии электропередач

Рассмотрим вариант строительства линии электропередач между деревнями. Воспользуемся картой для нахождения расстояния между деревнями. Расстояние между деревнями составляет $L = 40{,}109$ км. Найдем капиталовложения на строительство ЛЭП между деревнями по формуле:

$$K_{\text{ЛЭП}} = K_0 \cdot L \cdot K_{\text{ЗОН}} \cdot K_{\text{УСЛ}} \cdot n_{\text{Ц}} = 850 \cdot 40{,}109 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 34\ 092\ 650 \text{ руб.} \quad (1)$$

где K_0 – базовый показатель стоимости ЛЭП на сооружение 1 км линии; L – длина линии; $K_{\text{ЗОН}}$=1 – зональный коэффициент; $K_{\text{УСЛ}}$=1 – коэффициент усложнения; $n_{\text{ц}}$ – цепность линии.

На данном этапе расчетов уже можно заметить, что строительство ЛЭП между деревнями дорогостоящее и не имеет смысла.

Электроснабжение с помощью ветро-дизельной электростанции

Рассмотрим электроснабжение поселков с помощью ветроэлектростанции в деревнях. Для оценки энергетического потенциала ветра в деревнях Линдозеро и Юстозеро воспользуемся архивами погоды [1]. Ближайшим к данным деревням городом, для которого имеются архивы погоды, является Медвежьегорск. Для выбранного места – г. Медвежьегорск были найдены процентные соотношения градаций скорости ветра и их продолжительности. С помощью полученных данных найдем удельную месячную энергию ветра по формуле (2). Сведем расчеты по месяцам в табл. 2.

$$W_{\text{уд.мес}} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot \sum_{V_i=1}^{V_{i\max}} \left(T_i \times V_i^3\right), \quad (2)$$

где V_i – градации скорости ветра, м/с; T_i – продолжительность градаций, ч.

Таблица 2. Удельная месячная энергия ветра по месяцам, кВт·ч

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$W_{\text{уд.мес}}$	9,46	4,14	5,26	6,10	1,89	1,76	1,85	1,72	3,12	1,78	4,16	1,34

Для исследования преобразования механической энергии ветра в электрическую необходимо определить электроэнергию, вырабатываемую конкретной ветроустановкой за месяц. Выберем трёхлопастную ветроэнергетическую установку с горизонтальной осью вращения типа YASHEL WT 1500i [2]. Суммарную электроэнергию, генерируемую различным количеством ветроустановок, определим по удельной среднемесячной энергии ветра с учётом ометаемой площади ветроколеса и КПД ветрогенератора. Результаты расчетов сведем в табл. 3.

Таблица 3. Электроэнергия, вырабатываемая ветроустановками, кВт·ч

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$W_{\text{ВГ (1)}}$	19,05	7,95	9,48	11,64	1,65	2,25	2,07	1,95	6,15	2,25	7,53	1,65
$W_{\text{ВГ (17)}}$	324	135	161	198	28	38	35	33	104	38	128	28
$W_{\text{ВГ (46)}}$	876	365	436	535	75	103	95	89	282	103	346	75

Из таблицы видно, что для поселка Юстозеро в январе будет практически достаточно выработки 17 ветроустановок, для Линдозера – 46 в январе и апреле. В остальные месяцы энергии ветроустановок не достаточно для нужд потребителей. Найдем разницу между выработкой электроэнергии ветроустановками и нуждами потребителей по месяцам (табл. 4). Эту разницу будут обеспечивать дизельные генераторы.

Таблица 4. Разница между выработкой ветроустановок и нуждами потребителей, кВт·ч

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Юстозеро	11	113	210	52	195	657	312	363	482	286	156	515
Линдозеро	6,7	507	271	49	424	432	463	525	553	959	559	617

С учетом количества выбранных ветрогенераторов и расхода топлива дизельными генераторами найдем тариф в деревнях по формуле (3):

$$C_{ЭЛ} = \frac{P_Н \cdot K}{W_{год}} = \frac{\frac{1}{10} \cdot K_{ВГ} \cdot N_{ВГ} + m_{ДТ} \cdot C_{ДТ}}{W_{потребление}}, \quad (3)$$

где $C_{ЭЛ}$ – тариф; K – затраты на оборудование; $P_Н$ – нормативный коэффициент рентабельности; T – экономический срок службы оборудования, принимаем 10 лет; $W_{год}$ – полезно потребленная энергия за год, $m_{ДТ}$ – потребление топлива дизельными генераторами; $C_{ДТ}$ – стоимость дизельного топлива, $N_{ВГ}$ – количество ветроустановок, $K_{ВГ}$ – стоимость ветроустановки.

По результатам расчета получим, что для Юстозера при 17 ветрогенераторах тариф составит 100,5 рублей за кВт·ч, а для Линдозера – 84,7 рублей за кВт·ч. при 46 ветрогенераторах. Данный способ электрификации ветро-дизельными энергоустановками оказался более дорогостоящим, чем изначальный вариант – использование только дизельных генераторов.

Электроснабжение с помощью фото-дизельной электростанции

Рассмотрим систему электроснабжения поселков с помощью гибридной солнечно-дизельной электростанции. Для этого выберем фотопанели TPSM6U-300W-MONO [3]. С помощью программного комплекса On-line калькулятор солнечной, ветровой и тепловой энергии Helios House [4] найдем выработку электроэнергии в месяц в деревнях солнечными батареями.

Таблица 5. Выработка электроэнергии в месяц солнечными батареями, кВт·ч

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Юстозеро	6,2	14,84	31,62	39,6	41,85	43,8	42,47	35,96	26,7	16,43	8,4	3,1
Линдозеро	7,13	17,08	33,79	40,5	43,4	43,2	42,47	36,89	26,7	16,74	10,8	4,03

В качестве инвертора можно выбрать батарейный инвертор МАП DOMINATOR 6 кВт 25 В МикроАрт [5]. Выберем контроллер заряда КЭС DOMINATOR MPPT 250/60 [6], рассчитанный для работы в солнечных электростанциях средней мощности при токе заряда до 60 А и напряжении аккумуляторов от 12 до 96 В. Выберем аккумулятор LiFePO4 24V 210 Ah. [7]

С помощью ПО Excel рассчитаем несколько вариантов тарифа на электроэнергию, в зависимости от количества выбранных панелей и, соответственно, изменения потребления топлива дизельными генераторами из-за изменения выработки фотопанелей. Для этого воспользуемся формулой (4). Результаты расчетов сведем в табл. 6. Кроме того, приведем в таблице разницу между исходным тарифом и расчетным.

$$C_{ЭЛ} = \frac{P_Н \cdot K}{W_{год}} = \frac{\frac{1}{20} \cdot K_{СБ} \cdot N + \frac{1}{10} \cdot K_{инвертор} + \frac{1}{5} \cdot K_{аккумулятор} + \frac{1}{10} \cdot K_{контроллер} + C_{ДТ}}{W_{год}} \quad (4)$$

где $C_{ЭЛ}$ – тариф; K – затраты на оборудование; $P_Н$ – нормативный коэффициент рентабельности; T – экономический срок службы оборудования, принимаем для солнечных батарей 20 лет, инвертора – 10 лет, аккумулятора – 5 лет, контроллера заряда КЭС – 10 лет; $W_{год}$ – полезно потребленная энергия за год.

Таблица 6. Расчет тарифа

Деревня	Кол-во СБ, ед	Цена СБ, руб	Топливо, руб	Сэл (исходный), руб	Сэл (расчетный), руб	Разница Сэл.исх и Сэл.расч, руб
Юстозеро	7	84000	74134,1569	32,7	32,013	0,687
Линдозеро	4	48000	207063,9	32,7	31,816	0,884

Из табл. 6 можно сделать вывод о том, что экономически выгодными вариантами стали использование 4 солнечных батарей для деревни Линдозеро и 7 – для Юстозеро.

Вывод

В ходе исследования были рассмотрены 3 варианта оптимизации системы электроснабжения деревень Линдозеро и Юстозеро – строительство дизельной электростанции с электроснабжением второй деревни по линии электропередачи, электроснабжение с помощью ветро-дизельной электростанции и электроснабжение с помощью фото-дизельной электростанции. Из рассмотренных вариантов только последний удовлетворяет поставленным целям. Гибридная солнечно-дизельная электростанция позволит сэкономить как минимум 941 кг топлива в деревне Линдозеро, 1606 кг – в Юстозеро. Совместная работа фотопанелей и дизельных генераторов позволяет увеличить моторесурс генераторов, тем самым увеличив их срок службы. Кроме того, снижение потребления топлива дизельными генераторами уменьшает негативное влияние вредных выбросов на экологию озер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погода в Медвежьегорске // Погода и климат. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=22721
2. Ветрогенератор 1 кВт YASHEL WT1000i/48V // YASHEL SHOP. URL: https://yashel.shop/vetrogenerator-YASHEL%20-wt1000-naprjazhenie-48v
3. Солнечная батарея TPSM6U-300W-MONO // Helios House. URL: https://www.helios-house.ru/monokristallicheskie-solnechnye-batarei/delta_bst_300_24_duo/view-details.html
4. On-line калькулятор солнечной, ветровой и тепловой энергии // Helios House. URL: http://www.helios-house.ru
5. Инвертор МАП DOMINATOR 6 кВт 24 В МикроАрт // RealSolar. URL: https://realsolar.ru/invertory/invertory-map/map-dominator/map-dominator-6kw-24v/
6. Контроллер КЭС DOMINATOR MPPT 250/60 // Энергия 12/24/48 220. URL: http://www.invertor.ru/zzz/item/kes_dominator_mppt_250_60
7. Аккумулятор LiFePO4 24V 210Ah // LiFePO4 аккумуляторы и комплектующие. URL: https://lifepo4.ru/akkumulyator-lifepo4-24v-210ah

УВЕЛИЧЕНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ АКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.Ю. Шабуров[1], О.В. Никитенко[1], Л.А. Конькова[2]

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, [1]гр. 5А05, [2]гр. 5АМ28

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

Износ контактов высоковольтных вакуумных выключателей несет за собой критически опасные для энергетической сети последствия такие как повторные пробои самих выключателей и вывод из строя присоединенного к нему оборудования на подстанциях и в сетях. Эта проблема возникает в связи с воздействием дуги, возникающей при коммутации выключателей, за счет прожигания анода. В классическом исполнении выключателей это приводит к ухудшению электромеханических свойств контактов, а также после коммутации на поверхности контактов остается небольшое количество электронов, что способствует повторному зажиганию дуги. Решить эту проблему можно несколькими способами: путем изменения формы контактов вакуумных выключателей и созданием внешнего магнитного поля.

Экспериментов с наложением аксиального магнитного поля (АМП) независимого от отключаемого тока практически нет. В связи с этим мы считаем, что исследование влияние независимого от отключаемого тока АМП на характер поведения вакуумной дуги является актуальной задачей.

Работа проводилась на испытательном стенде, собранном по схеме Вейль-Добке, которая имитирует воздействие на выключатель со стороны реальной электрической сети, что позволяет формировать ток короткого замыкания и переходное восстанавливающееся напряжение [1]. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Силовая часть содержит два контура: сильноточный контур (СК) и высоковольтный контур (ВК) переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН). Сильноточная часть стенда собрана из конденсаторов с суммарной емкостью Cт=75 мФ и Lт=136 мкГн. Емкостный накопитель заряжается от постоянного источника питания. Максимальная амплитуда тока может достигать I=40 кА при зарядном напряжении конденсаторной батареи U=2,0 кВ. коммутация СК происходит с помощью включающего аппарата (ВА). Контур ПВН, относительно более слаботочная цепь, образован элементами Lв=3,7 мГн и Cв=48 мкФ с коммутатором (Р) на основе воздушного разрядника. Данная цепь генерирует гармонический импульс тока длительностью по основанию 1 мс амплитудой около 5 кА. Форма импульсов тока каждого из контуров соответствует формуле $i=i_0\sin(2\pi\nu t)$, где f= 50Гц для СК и f=500 Гц для ВК. Испытуемый аппарат (ИА) – испытуемый выключатель (ИВ) – соединен последовательно с СК и ВК.

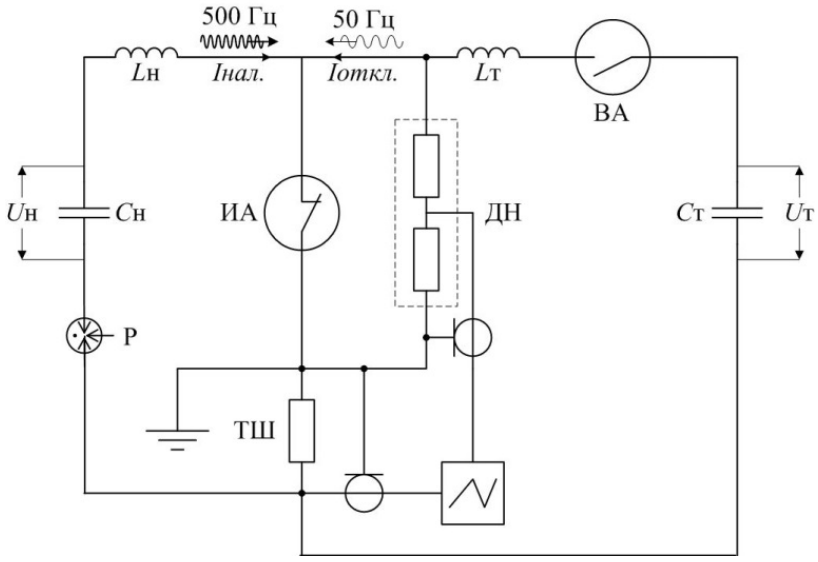


Рис. 1. Электрическая схема экспериментального стенда по Вейль-Добке

В процессе экспериментов регистрируются напряжения заряда конденсаторов СГ и ВГ, контролируется вакуум в камере, производится осциллографирование напряжения и тока при отключении выключателя, а также видеосъемка процесса горения дуги.

По осциллограммам определяются: результат успешного или неуспешного отключения, численные значения токов дуги и тока наложения, время горения дуги, параметры импульса ПВН.

В начале работы были проведены эксперименты по определению отключающей способности контактов без наложения магнитного поля. Опыты проводились при разных амплитудах тока, пропускаемого через контакты. Осциллограммы показали, что отказы выключателя происходит при токе 12,5 кА. Осциллограммы при отключении тока представлены на рис. 2 (ток отключения – луч 1).

Из рис. 2, видно, что после первой полуволны тока происходит повторное зажигание разряда и это квалифицируется как отказ выключателя [2].

На рис. 3 продемонстрированы снимки дуги 12,5 кА со скоростной камеры Photron FASTCAM SA1.1.

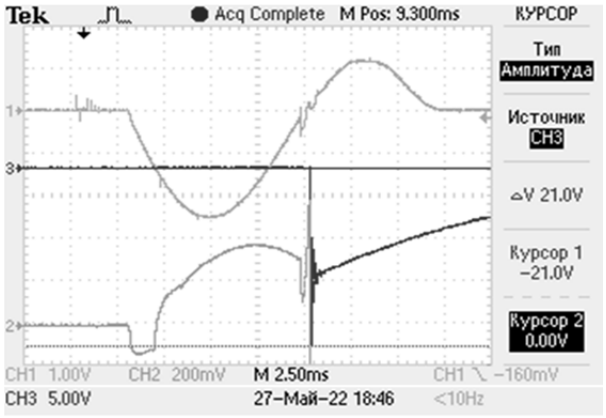
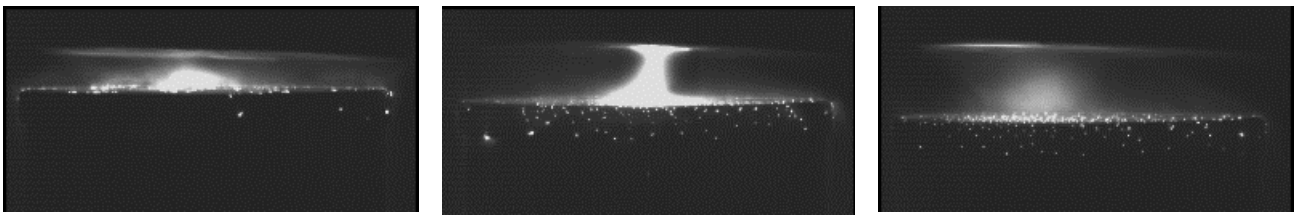


Рис. 2. Осциллограммы при отключении предельного тока 12,5 кА



2 мс 5 мс 8 мс

Рис. 3. Характер дуги во время отключения тока 12,5 кА

Видеосъемка дуги показала, что при амплитуде тока от 5 до 10 кА дуга носит диффузный характер, при значении равном 10 кА и выше характер дуги становится контрагированным [3]. В данных условиях ИВ способен отключить ток амплитудой до 12,5 кА.

Далее были проведены эксперименты с наложение аксиального магнитного поля с помощью катушек Гельмгольца. Амплитуда магнитного поля составила 30 мТл, Время горения дуги 8–9 мс.

На рис. 4 приведена типичная отключаемого тока, при успешном отключении.

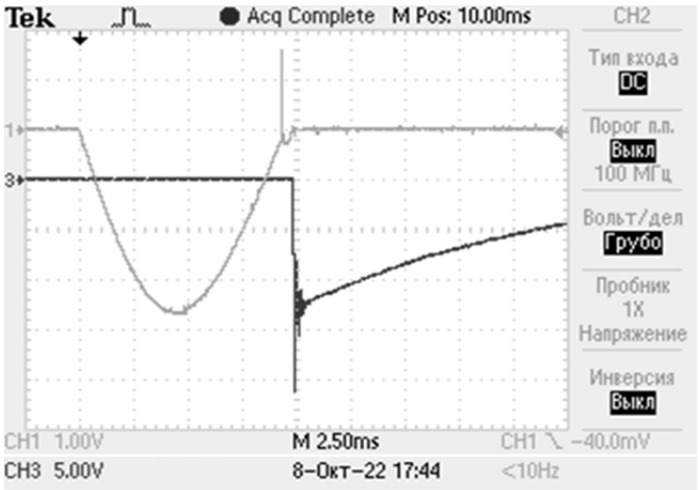
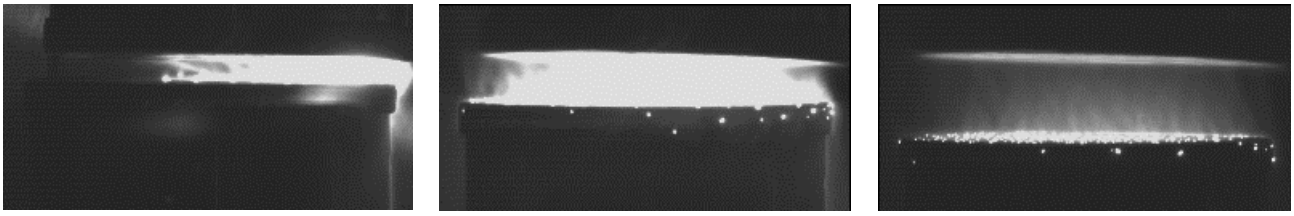


Рис. 4. Осциллограммы при отключении тока 17,5 кА

При амплитуде тока от 10 до 15 кА дуга носит диффузный характер, при значении близком к 15 кА и выше характер дуги становится контрагированным. Наложение АМП позволило отключить ток амплитудой до 17,5 кА.

На рис. 5 продемонстрированы снимки дуги амплитудой тока 15 кА.



2 мс 5 мс 8 мс

Рис. 5. Характер дуги во время отключения при амплитуде тока 15 кА

Снимки показывают, что наложение АМП значительно меняет форму дуги – она становится более объемной, распределенной по всей поверхности контактов.

Результат проведенных экспериментов демонстрирует, что наложение аксиального магнитного поля ведет к увеличению отключающей способности ИВ, а также повышает значение отключаемого тока, при котором дуга переходит в контрагированную форму. При диффузной форме дуги также снижается выделение энергии на контактах, что сокращает их эрозию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавринович В.А. Синтетические испытания вакуумных выключателей / В.А. Лавринович, В.В. Лопатин, С.Н. Перепелкин // Промышленная энергетика. – 2005. – № 2. – С. 19–22.
2. ГОСТ Р 52565-2006 «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ».
3. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. – М.: Наука, 1970. – 536 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

А.В. Борисов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ28

Научный руководитель: Т.М. Солдатенко, старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Кабельно-проводниковая продукция является неотъемлемой частью электротехнических комплексов и систем и играет важную роль в обеспечении передачи электрической энергии и сигналов между различными устройствами, компонентами и системами. Она является основным средством связи и энергоснабжения во многих отраслях промышленности, зданиях, транспортных сетях и других инфраструктурных объектах. Приведем несколько ключевых значений кабельно-проводниковой продукции:

- Передача энергии:
  Кабели и провода используются для передачи электрической энергии от источников питания к различным потребителям. Они обеспечивают электроснабжение зданий, производственных объектов, промышленных установок, оборудования и многих других систем.
- Передача данных и сигналов:
  Кабели и провода служат для передачи информации, данных и сигналов между различными устройствами и компонентами в электронных и телекоммуникационных системах. Они позволяют связывать компьютеры, телефоны, сети связи, системы безопасности, звуковое и видеооборудование и многое другое.

- Стабильность и надежность:
  Кабельно-проводниковая продукция играет важную роль в обеспечении стабильной и надежной работы электротехнических комплексов и систем. Качество и надежность кабельных систем влияют на безопасность, эффективность и непрерывность работы оборудования.
- Экономическая эффективность:
  Кабельно-проводниковая продукция имеет важное значение для экономической эффективности. Эффективный выбор, установка и эксплуатация кабелей и проводов позволяют сократить затраты на электроэнергию, минимизировать потери энергии, снизить издержки на обслуживание и ремонт, а также повысить общую эффективность системы. Подробнее остановимся на сокращении издержек в процессе заготовки кабельно-проводниковой продукции.

Оптимизация процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции сокращает время, стоимость монтажа и обслуживания электротехнических систем. Правильно заготовленные провода и кабели позволяют избежать необходимости перепроводки или капитального ремонта из-за некачественных соединений или несоответствия требованиям.

Оптимизация процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции достигается путем проведения анализа каждого этапа производственного процесса, чтобы определить возможности для оптимизации. Например, автоматизация определенных частей процесса может повысить производительность и снизить риск ошибок.

Сбор и постоянный анализ данных о производственной деятельности могут помочь выявить узкие места и возможные улучшения процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции. Например, мониторинг времени выполнения каждой операции и анализ данных помогут определить узкие места производственного процесса и принять меры по его оптимизации.

Оптимизация процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции имеет ряд причин и преимуществ, таких как:

- увеличение производительности в результате оптимизации процесса позволяет улучшить эффективность работы, что приводит к большему объему производства и улучшению общей производительности предприятия. Это может включать уменьшение времени цикла заготовки, улучшение качества продукции и снижение затрат на ее изготовление;
- сокращение затрат на выполнение работ по заготовке кабельно-проводниковой продукции. Это может быть достигнуто через сокращение излишних операций, оптимизацию использования материалов, сокращение времени простоя оборудования и сокращение расходов на трудовые ресурсы;
- улучшение качества продукции благодаря повышению точности размеров, снижению дефектов, улучшению стандартов качества. Корректная заготовка проводов и кабелей может уменьшить вероятность возникновения проблем во время монтажа на различных объектах и снизить риск возникновения издержек;

Оптимизация процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции способствует повышению эффективности и конкурентоспособности предприятия, сокращению затрат и улучшению качества продукции для удовлетворения внешних и внутренних заказчиков.

Далее будет приведен реальный пример реализации проекта производственной системы по оптимизации процесса заготовки кабельно-проводниковой продукции на одном из ведущих электромонтажных предприятий РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные материалы выставки «Электрофорум – 2023» Кабельно-проводниковая продукция. URL:https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/kabelnaya-produkciya/
2. Информация из внутренних документов предприятия. Отчетный материал по проекту производственной системы «Оптимизация заготовки кабельно-проводниковой продукции».

ИСКРОВОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ КОМПОЗИТОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

А. Кобесов, А. Насырбаев, А.И. Циммерман

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А14

Научный руководитель: Д.С. Никитин, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Металломатричные композиты, применяемые в автомобилестроении, авиакосмической и судостроительной промышленности, известны своей высокой прочностью, устойчивостью к износу и хорошей ударной вязкостью [1]. Главная цель разработки композитов – превзойти свойства обычных металлических материалов. Композиты с алюминиевой матрицей (AMCs – aluminum matrix composites) пользуются популярностью ввиду пластичности металлической матрицы (алюминия) и прочности керамических компонентов, в качестве которых могут выступать сверхтвердые соединения (карбиды, бориды и нитриды) [2–5].

Одним из наиболее перспективных подходов при работе с металломатричными композитами является использование нанопорошков в качестве основы для их изготовления [6–8]. Однако внедрение наноразмерных керамических частиц влечет за собой проблемы, такие как неравномерное распределение керамического компонента в матрице, агломерация наночастиц и слабая связь в металлической матрице, что вызывает негативные последствия для конечных композитов [9–10]. В отличие от традиционных металлических материалов, AMCs и их свойства мало изучены. Поэтому исследования, связанные с металломатричными материалами, поиском и совершенствованием методик их изготовления, подбором оптимального состава и измерением их механических характеристик, имеют научную новизну [11].

Настоящая работа направлена на разработку новых композитных материалов с улучшенными механическими свойствами. В качестве металлической матрицы предлагается использовать алюминий. Частицы карбида вольфрама используются как армирующий компонент [12].

Был использован метод искрового плазменного спекания на установке SPS 10-4 (Thermal Technology, США). Особенностью метода является одновременное применение импульсного тока и внешнего давления для уплотнения образцов. Компактирование проводилось при давлении 50 МПа, времени выдержки 10 минут, скорости нагрева 100 °С/мин и естественном охлаждении. Температура спекания составляла 600 °С. Полученные композитные изделия подвергались стандартной металлографической обработке, включая шлифовку и полировку с использованием различных абразивных материалов. Микроструктура и элементный состав анализировались сканирующей электронной микроскопией. Фазовый состав изучался рентгеновской дифракцией. В качестве исходных материалов для спекания использовались нанопорошки в силу уникальности их потенциальных свойств в сравнении с макроразмерными дисперсными продуктами. Массовое содержание карбида вольфрама в исходной смеси составляло 10 %.

В табл. 1 представлены результаты проведенной серии экспериментов по искровому плазменному спеканию. Помимо получения композитного изделия с металлической матрицей (Al+10%WC) необходимо было получить образец из чистого алюминия (Al) для определения влияния армирующей керамической составляющий на свойства и структуру конечного изделия. Итоговые данные по спеканию включают массу полученных изделий (m), их высоту (h), диаметр (d) и плотность (абсолютную ρ и относительную $\rho_{отн}$). Их полученных данных видно, что композитный материал имеет несколько большую плотность в абсолютных еди-

ницах, однако в относительных единицах меньшую, в сравнении с чисто алюминиевым образцом. Это связано с тем, что в состав композитного изделия входит высокоплотная армирующая составляющая в виде карбида вольфрама.

Таблица 1. Результаты серии экспериментов по искровому плазменному спеканию

	m, г	h, мм	d, мм	ρ, г/см^3	$\rho_{отн}$, %
Al	1,204	3,684	12,576	2,63107	97,45
Al+10%WC	1,027	2,930	12,502	2,85531	71,45

На рис. 1 представлены микроснимки исходной композитной порошковой смеси в форме совокупности агломератов, которые включают в себя частицы как алюминия, так и карбида вольфрама, который в силу высокой молекулярной массы выглядит более контрастным на микроснимках. Далее представлены микроснимки чисто алюминиевого образца (рис. 2) и алюмоматричного композита (рис. 3). Очевидны существенные изменения в материале в процессе спекания. В обоих случаях достигается достаточно высокая степень уплотнения изделий при формировании алюминиевых зерен размерами до десятков микрометров. Отличием композитных изделий является присутствие контрастных частиц в границах раздела зерен, которые ассоциируются с карбидом вольфрама. Несмотря на наличие тугоплавких частиц карбида, в композитном образце присутствует малое количество пор и трещин.

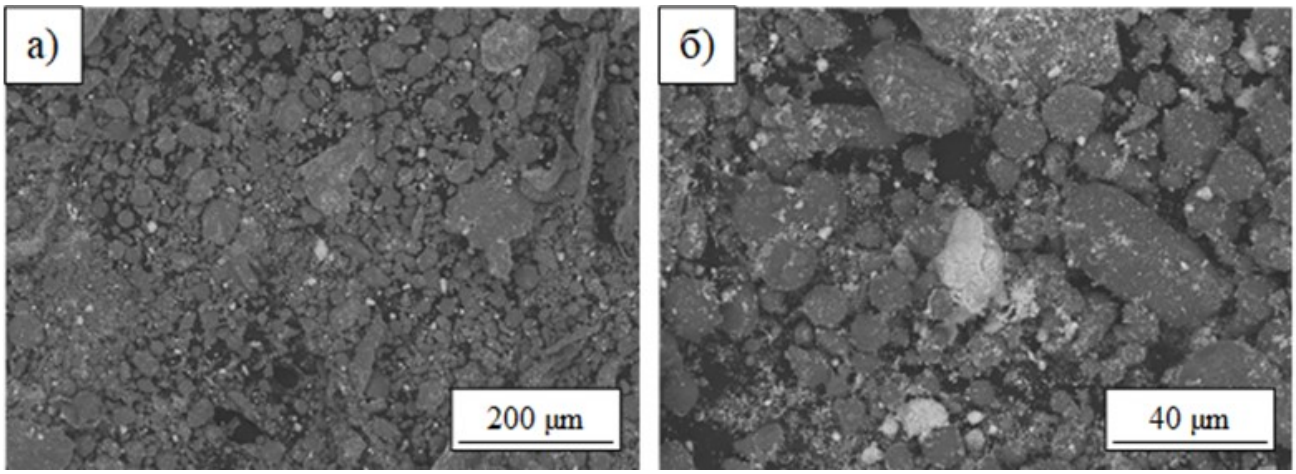


Рис. 1. Микроснимки исходной порошковой смеси

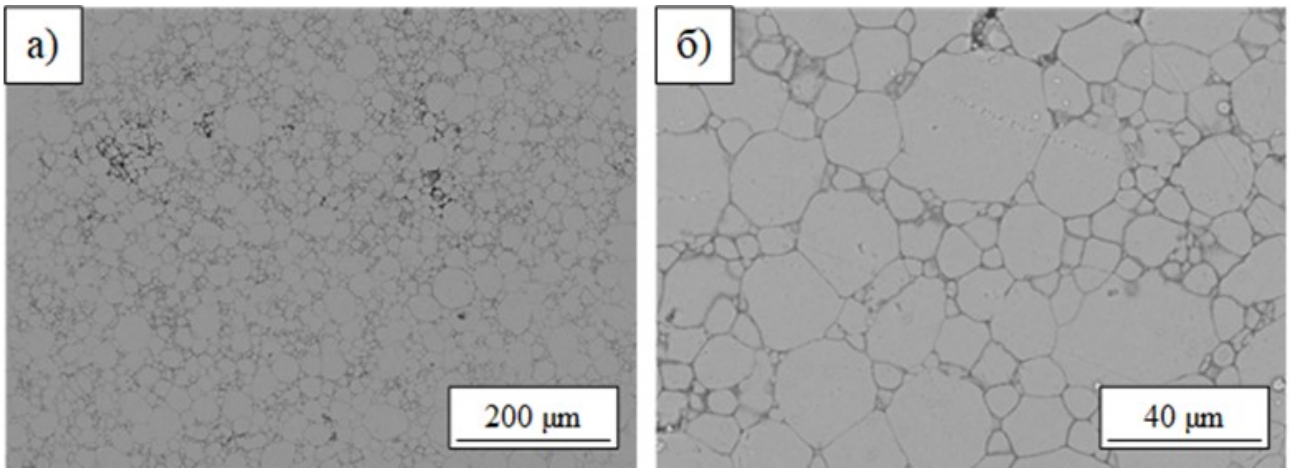


Рис. 2. Микроснимки конечного алюминиевого образца

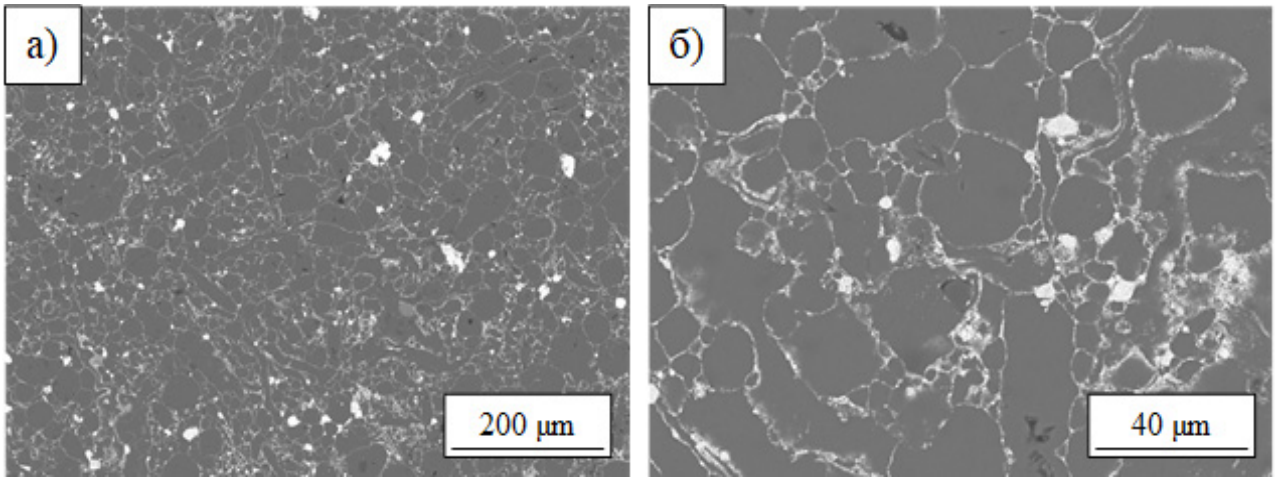


Рис. 3. Микроснимки конечного композитного изделия

Таким образом, в результате серии экспериментальных образцов были получены методом искрового плазменного спекания объемные изделия в виде чисто металлического образца и металломатричного композита с алюминиевой матрицей, армированного частицами сверхтвердого карбида вольфрама. Несмотря на наличие тугоплавких частиц в композитном изделии, оно характеризуется достаточно высокой степенью уплотнения. Полученные композиты могут применяться в качестве конструкционных материалов для автомобильной и аэрокосмической сферы.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-73-01203, https://rscf.ru/project/23-73-01203/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fabrication of aluminum metal matrix composite through continuous casting route: A review and future directions / D.K. Saini, P.K. Jha // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – V. 96. – P. 138–160.
2. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties / P. Samal et al. // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – V. 59. – P. 131–152.
3. SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review / K.K. Sadhu, N. Mandal, R.R. Sahoo // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. –V. 91. – P. 10–43.
4. Structural modelling and mechanical behaviors of graphene/carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via atomic-scale simulations: A review / C. Qiu et al. // Composites Part C: Open Access. – 2021. – V. 4. – P. 100120.
5. An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications / Z. Zhao et al. // Carbon. – 2020. – V. 170. – P. 302–326.
6. Advanced Metal Matrix Nanocomposites / M. Malaki et al. // Metals – 2019. – V. 9, Page 330. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. – 2019. – V. 9, no. 3. – P. 330.
7. Processing and properties of magnesium containing a dense uniform dispersion of nanoparticles / L.Y. Chen et al // Nature. – 2015. – V. 528, no. 7583. – P. 539–543.
8. Magnesium-based nanocomposites: Lightweight materials of the future / M. Gupta, W.L.E. Wong // Materials Characterization. – 2015. – V. 105. – P. 30–46.
9. Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite / S.B. Prabu et al. // Journal of materials processing technology. – 2006. – V. 171, no. 2. – P. 268–273.
10. Mechanically alloyed nanocomposites / C. Suryanarayana, N. Al-Aqeeli // Progress in Materials Science. – 2013. – V. 58, no. 4. – P. 383–502.
11. Study on aluminium metal matrix composites reinforced with SiC and granite powder / L. Bhanuprakash et al. // Materials Today: Proceedings. – 2023.
12. Effect of ceramic reinforcements on the mechanical and tribological properties of aluminium metal matrix composites – A review / G. Mathew, V.K.N. Kottur // Materials Today: Proceedings. – 2023.

СНИЖЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА БДПТ

Д.И. Ульянов

Томский политехнический университет,
аспирант

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н, профессор ТПУ

Бесколлекторный электродвигатель с постоянными магнитами (далее БДПМ), благодаря своим эксплуатационным характеристикам, является наиболее перспективной машиной в диапазоне малых и средних мощностей. Такой электродвигатель не имеет потерь на возбуждение, обладает большой перегрузочной способностью, хорошими регулировочными характеристиками, более высоким КПД по сравнению с электродвигателями другого вида. К тому же, на сегодняшний день известно множество конструктивных и технологических решений по изготовлению электродвигателей такого типа, начиная от решений, обеспечивающих максимальную простоту и экономичность электродвигателя, и заканчивая решениями, обеспечивающими его максимальную энергоэффективность и компактность [1].

Направления развития принципов управления БДПМ менялись по ходу усовершенствования элементной базы, вычислительной мощности контроллеров, точности используемых датчиков, а также по ходу появления всё новых технологических процессов, в которых стало возможно применение электропривода. Практическая реализация и применение тех или иных принципов управления позволяет судить об эффективности используемых алгоритмов.

Первым этапом в развитии БДПМ стало создание в 1949 году бесколлекторного электродвигателя постоянного тока (далее БДПТ) с коммутирующим устройством на полупроводниках, управляемых индуктивными датчиками положения ротора. Освоение космического пространства послужило мощным толчком в развитии БДПТ. Примером может служить создание электроприводов на базе БДПТ для перемещения лунохода по поверхности Луны. Также в восьмидесятых годах прошлого столетия началось применение БДПТ в самолётостроении на таких самолётах как ИЛ-96, ТУ-204, МИГ-31.

В 1971 году немецкий учёный Феликс Блашке предложил новую систему управления электрическими машинами: векторную систему управления, также известную как «полеориентированная система управления» [2]. Вернер Леонхард продолжил разработку технологий полеориентированного управления и сыграл важную роль в создании возможностей для того, чтобы приводы переменного тока стали конкурентоспособными относительно приводов постоянного тока. Однако, в то время такой способ управления БДПМ имел много недостатков, которые ограничивали общепромышленное применение электроприводов на таком принципе. Для такой системы управления требовалось много электронных компонентов в виде датчиков, усилителей, интегральных микросхем, что в совокупности отражалось на габаритах блока управления, стоимости, сложности изготовления и ремонтопригодности.

В начале 1980-х годов после коммерциализации микропроцессоров появились БДПМ с векторной системой управления общего назначения. С развитием микропроцессоров стала возможна обработка сигналов с более точных датчиков положения и скорости, множество усилителей и микросхем заменялись одним контроллером, имеющим как аналоговые, так и цифровые входы и выходы.

Несмотря на большое развитие и распространение БДПМ с векторной системой управления, БДПТ не утратил своей актуальности. Появление программируемых микроконтроллеров позволило решить основную проблему, существующую у такого способа управления: пуль-

сации электромагнитного момента при коммутации фаз. Особенно остро этот недостаток ощущается на высоких скоростях и при малом моменте инерции системы, что ограничивало применение таких приводов во многих системах.

Пульсация электромагнитного момента в момент коммутаций фаз возникает вследствие пульсации тока в некоммутируемой фазе. Естественная скорость спадания тока в отключаемой фазе и скорость нарастания тока в подключаемой фазе не одинакова. Разность этих скоростей зависит от индуктивности обмоток, токовой нагрузки, скорости вращения ротора и величины прикладываемого напряжения к фазам. Если контролировать скорость изменения величины тока в коммутируемых фазах, можно добиться постоянства тока в некоммутируемой фазе, что уберёт пульсации электромагнитного момента в период коммутации.

Плавность коммутации можно соблюдать ограничением спадания тока в отключаемой фазе, ускорением или ограничением нарастания тока в подключаемой фазе, или же комбинированием этих методов. Для устранения пульсаций электромагнитного момента на всём диапазоне возможных частот вращения ротора более совершенным будет комбинированный подход. На рис. 1 представлены фазные токи БДПТ в период коммутации и возможные варианты снижения пульсаций электромагнитного момента [3].

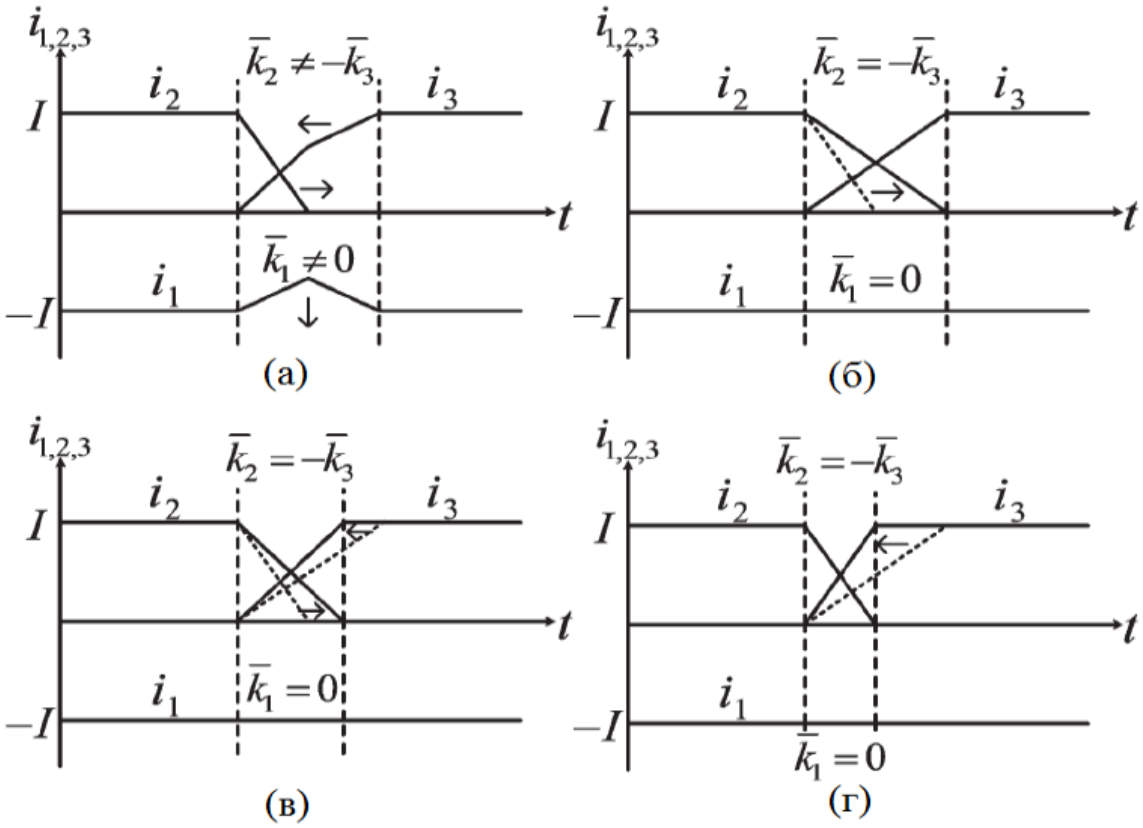


Рис. 1. Фазные токи БДПТ в период коммутации и возможные варианты снижения пульсаций электромагнитного момента: а – коммутация, вызывающая пульсации момента, б – уменьшение скорости спада тока отключаемой фазы; в – уменьшение скорости спада тока отключаемой фазы вместе с ускорением нарастания тока в подключаемой фазе; г – ускорение нарастания тока подключаемой фазы

На рис. 2 и 3 представлены пульсации тока и электромагнитного момента БДПТ при коммутации фаз с ограничением скорости спада тока отключаемой фазы (рис. 2) без ограничения (рис. 3).

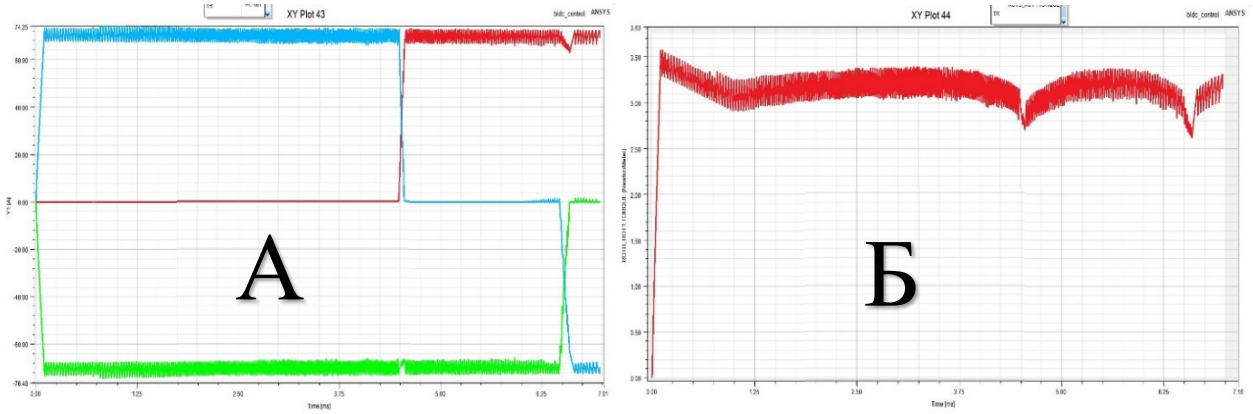


Рис. 2. А – пульсации тока в некоммутируемой фазе с ограничением скорости спада тока отключаемой фазы; Б – пульсации электромагнитного момента с ограничением скорости спада тока отключаемой фазы

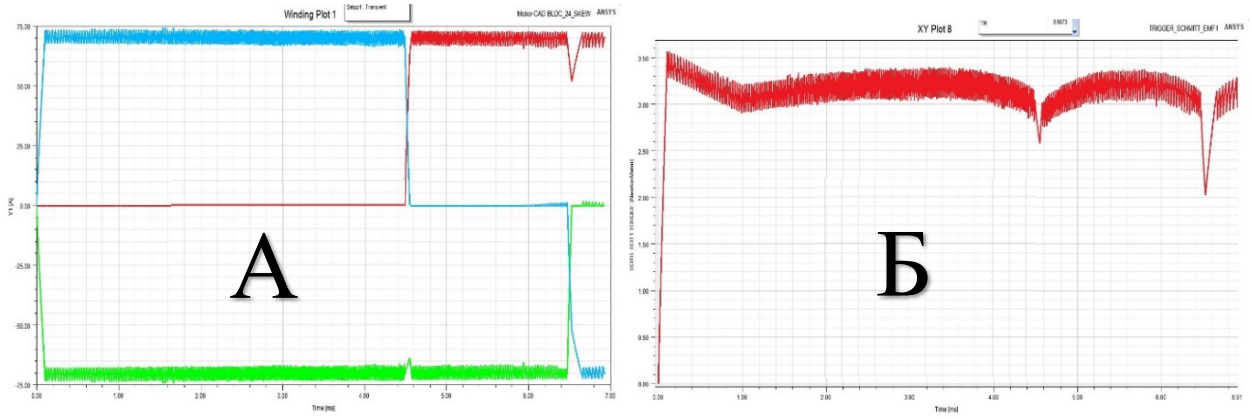


Рис. 3. А – пульсации тока в некоммутируемой фазе без ограничения скорости спада тока отключаемой фазы; Б – пульсации электромагнитного момента без ограничения скорости спада тока отключаемой фазы

Обилие публикаций, разнообразие применяемых методик, их новизна с качественным отличием друг от друга свидетельствуют об интенсивности исследований в области БДПМ, что подтверждает перспективность данного вида электрических машин, которые совместили в себе технологическую простоту двигателей переменного тока, и превзошли регулировочные способности двигателей постоянного тока. В свою очередь, БДПТ, как один из видов БДПМ, несмотря на довольно устаревший метод управления, благодаря развитию аппаратных и программных средств не теряет своей актуальности, и за счёт устранения присущих ему недостатков, может использоваться в ещё большем количестве технологических процессов, конкурируя с электроприводами переменного тока на полеориентированном принципе управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // «Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2001. – С. 155–159.
2. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmashinen // Siemens Zeitschift. – 1971.
3. Kim I., Nakazawa N., Kim S., Park C., Yu C. Compensation of torque ripple in high performance BLDC motor drives // Control Engineering Practice. – 2010. – Vol. 18(10). – P. 1166–1172. doi:10.1016/j.conengprac.2010.06.003

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Р.И. Гильмутдинова

Казанский государственный энергетический университет,
Теплоэнергетика и теплотехника, ЭОП, гр. ЭПТ-1-22

Научный руководитель: Б.А. Гильфанов, асс. кафедры ХВ КГЭУ

Во все времена перед людьми стояла проблема нахождения альтернативных источников энергии, которые отличаются экологичностью и возобновляемостью. Возобновляемые источники в виде водорода являются перспективным направлением в создании экологически чистого запаса энергии. Водород является неотъемлемой частью во многих разных отраслях. В энергетике водород может использоваться в качестве углеродного топлива, также может служить средством накопления энергии и найти свое применение в качестве вторичного энергоносителя.

В современном мире водород нашел большой диапазон применений. Его используют во многих областях, но свою большую значимость он нашел в энергетике. Преимущества использования водорода как топлива заключается в отсутствии выбросов углекислого газа. Также водород находит свое применение в топливных элементах. Топливные элементы на основе водорода имеют высокий КПД, тем самым получается меньше выбросов. Таким образом появляется заинтересованность для автомобильной и стационарной энергетики. Кроме этого, для улучшения экологических характеристик сжигания газа водород можно использовать наряду с природным газом.

Водород имеет свое большое значение при использовании его в топливных элементах, которые в одну стадию преобразовывают химическую энергию в электрическую. Преобразования химической энергии в энергетическую имеет несколько стадий. В начальной стадии химическая энергия переходит в тепловую энергию рабочего тела, после чего тепловая энергия преобразовывается в механическую, которая впоследствии и переходит в энергетическую. Рассмотрим ряд преимуществ топливных элементов:

- высокая энергетическая эффективность
- надежность
- бесшумность
- минимальные выбросы вредных веществ
- нет особых ограничений размещения

Топливные элементы классифицируются на щелочные, на протонообменной мембране, топливные элементы на фосфорной кислоте, на расплаве карбоната, а также на твердых оксидах [1]. Среди выделенных типов топливных элементов большую значимость имеют топливные элементы на протонообменной мембране, в которой используется твердая полимерная мембрана, проводящая ионы с анода на катод. Популярность применения таких топливных элементов основано на уменьшении коррозии и долгим сроком службы. Также особенность заключается в облегчении процесса производства и удобной транспортировке. Щелочные топливные элементы используются чаще и более подробно изучены. Их недостаток заключается в недопустимости наличия углекислого газа в топливе и в окислителе. Топливные элементы на фосфорной кислоте имеют КПД от 40 до 95 %, применяются для производства тепла и электричества. Использование расплавленной смеси лития либо калия характерно для элементов на расплаве карбоната, при этом ионы лития переходят от катода к аноду. При использовании никеля как катализатора и использование рабочей температуры 920 К требуется большое количество времени, что более усложняет конструкцию этого типа топ-

ливного элемента. Для его хорошего функционирования требуется подводить большое количество электроэнергии. Более высокая рабочая температура около 1300 К используется в топливных элементах на основе твердых оксидов, при котором кислород переходит от катода к аноду. Использование твердых электролитов и разных видов топлива обуславливается их относительно простой конструкцией. В то время требуемое значительное количество времени на разогрев топливного элемента предполагает возможность использования в электростанциях и больших электрогенераторных установках.

Водород как топливо имеет следующий ряд преимуществ: при сгорании водорода образуется вода, что делает использование топлива на основе водорода более экологичным; также тут следует отметить его энергетические свойства –- это низкая теплота сгорания водорода, которая составляет 120 МДж/кг, что более чем в 4 раза выше по сравнению с бензином (около 25 МДж/кг), т. е. 1 кг водорода эквивалентен почти 4,5 кг бензина; что более важно неограниченность ресурсов при получении водорода методом электролиза.

Так как водород в природе не встречается в чистом виде, для его нахождения используются разные методы такие как пиролиз, газификация угля, частичное окисление и другие. Электролиз является наиболее актуальным методом получения водорода, который используется во многих отраслях [2]. Суть электролиза заключается в пропускании тока через воду, при этом наблюдается разложение воды на кислород и водород. Процесс электролиза включает в себя несколько этапов. Для начала воду обогащают электролитами калия и натрия, которые используются для увеличения теплопроводности, затем следует этап подготовка электролизера. На этом этапе подготавливается два электрода с хорошей теплопроводностью, один из которых служит анодом, другой- катодом. Обычно анод и катод изготавливаются из платины и карбоната никеля. После этого происходит сам этап электролиза: электроды помещаются в воду и на электроды подается напряжение, тем самым мы наблюдаем выделение кислорода на аноде и водорода на катоде.

- на катоде: $2H_2O+ 2e= H_2\uparrow+2OH^-$
- на аноде: $4OH^-=O_2\uparrow+2H_2O+ 4e$

  Общая реакция: $2H_2O=O_2\uparrow+2H_2\uparrow$

Далее проходит сбор и сепарация газов. Последующее использование определяется сферой применения. Электролиз, применяемый для получения водорода, может зависеть от типа используемого электролита и условиями проведения этого процесса. Тем самым они подразделяются на щелочной электролиз, высокотемпературный электролиз и электролиз воды под высоким давлением.

С экономической стороны получение водорода методом электролиза затратно, так как для этого процесса требуется огромное количество электричества. Водород сам по себе более взрывоопасен в отличие от природного газа или дизельного топлива. Тем самым возникает проблема дополнительных затрат для его хранения и транспортировки. Также среди факторов, влияющих на экономический аспект использования водорода, можно выделить трудоемкий процесс хранения водорода в жидкой фазе, при температуре равной –235 градусам и плотности 77 кг/м^3 [3].

Хранение водорода требует особого внимания, в связи с тем, что он является легким и высокоэнергетическим газом, имеющим отличительные физические и химические свойства. Для хранения водорода используют такие методы как сжижение, сжатие, адсорбция, химическое связывание и др. [4]. Наиболее предпочтительным является метод химического связывание, имеющий особенности: применение низких давлений и температур в процессе эксплуатации, накопление водорода в составе гибридов, что способствует использование его в виде промежуточного продукта при транспортировке и хранении.

Применение водорода в энергетике может помочь избавится от зависимости использования исчерпаемых ресурсов. В целом, использование водорода в энергетике имеет большой потенциал для устойчивого развития, уменьшения загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов С.П., Голодницкий А.Э., Кашин А.М. топливные элементы и водородная энергетика // ЭП. – 2020. – № 11 (153). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/toplivnye-elementy-i-vodorodnaya-energetika (дата обращения: 17.10.2023).
2. Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.Н., Самсонов Р.О., Козлов С.И. Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспек // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3(3). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-vodoroda-elektrolizom-vody-sovremennoe-sostoyanie-problemy-i-perspek (дата обращения: 04.10.2023).
1. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ / Д.Р. Шафиев, А.Н. Трапезников, А.А. Хохонов и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 12(235). – С. 53–57. – EDN KTZOMS.
2. Солодова Н.Л., Минигулов Р.Р., Емельянычева Е.А. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 3. URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/vodorod-kak-perspektivnyy-energonositel-sovremennye-metody-polucheniya-vodoroda (дата обращения: 17.10.2023).

СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СООБЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Е.Д. Малаева

Казанский государственный энергетический университет,
ПЭ, гр. ПЭ-2-20

Научный руководитель: Д.А. Иванов, д.т.н., доцент каф. ПЭ, КГЭУ

Наиболее значимым с точки зрения научно-технологического развития Российской Федерации вызовом является цифровизация различных сфер жизни и производства. Однако внедрение современных цифровых технологий невозможно без разработки и внедрения новых систем сбора, обработки информации и управления технологическими процессами.

В современном информационном обществе передача данных является неотъемлемой частью жизни людей. С развитием технологий и ростом количества устройств, способных генерировать и обрабатывать информацию, возникает необходимость в эффективной системе транспортировки информационных сообщений. Одним из перспективных и инновационных решений в данной области является использование протяженных сенсорных сетей.

Протяженная сенсорная сеть (ПСС) представляет собой сеть из большого количества устройств, называемых узлами или сенсорами, которые подключены друг к другу и способны собирать данные из окружающей среды. Например, такая сеть может состоять из сенсоров мониторинга окружающей среды, таких как температура, влажность, давление, а также из устройств, способных собирать данные о движении транспортных средств или передавать информацию о состоянии различных объектов.

Система транспортировки информационных сообщений на основе ПСС имеет ряд преимуществ. Во-первых, протяженные сенсорные сети позволяют собирать данные в режиме реального времени. Это обеспечивает оперативную передачу информации и позволяет принимать быстрые решения на основе актуальных данных. Во-вторых, такая система является масштабируемой, то есть ее можно легко расширять и добавлять новые узлы по мере необходимости. Это позволяет обеспечивать широкий охват территории и получать данные из различных источников. В-третьих, протяженные сенсорные сети обладают высокой степенью надежности. Благодаря наличию множества узлов, в случае отказа одного из них, система остается работоспособной и способна продолжать собирать и передавать данные.

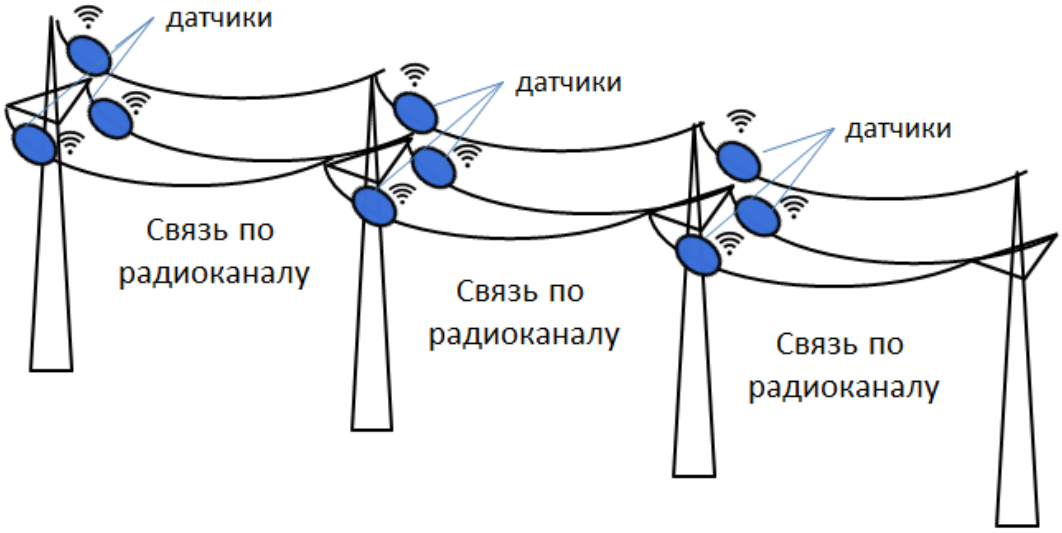


Рис. 1. Автоматическая система транспортировки информационных сообщений на основе протяженных сенсорных сетей

Задача системы транспортировки информационных сообщений на основе ПСС состоит в обеспечении эффективного и безопасного потока данных. Для этого необходимо разработать алгоритмы и протоколы передачи данных, а также обеспечить конфиденциальность и защиту передаваемой информации. Важным аспектом является также энергетическая эффективность системы, поскольку узлы протяженных сенсорных сетей часто питаются от аккумуляторов или других ограниченных источников энергии.

Система транспортировки информационных сообщений на основе протяженных сенсорных сетей имеет широкий спектр применений. Она может использоваться для мониторинга окружающей среды, управления транспортом, умных городов, а также в таких областях, как медицина, промышленность и сельское хозяйство.

В основе наших систем заложена беспроводная сенсорная сеть. Эта сеть состоит из множества датчиков, объединенных посредством радиоканала. Система является распределенной и самоорганизующейся, причем область покрытия может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет способности ретрансляции сообщений от одного элемента к другому [1].

На основе описанных выше беспроводных сенсорных сетей проводилась интеллектуализация воздушных линий электропередачи (ВЛ) и систем освещения.

Российская Федерация обладает одной из самых протяжённых электроэнергетических транспортных систем в мире. Однако, сложность и масштаб возникающих на них проблем таковы, что они не могут быть решены исключительно за счет увеличения объёмов применения существующих способов обследования и диагностики объектов энергосистемы. Необходим качественный скачок в системе мониторинга состояния ВЛ. Ответом на данный вызов может стать повышение информативности ВЛ благодаря построению на них сенсорных сетей. Это позволит: предупреждать и предотвращать аварийные ситуации; оптимизировать загрузку ВЛ; создавать более точных цифровых двойников распределительных сетей. Каждый сенсор в данном случае представляет собой печатную плату, на которую может быть установлен определённый набор датчиков в зависимости от решаемых задач мониторинга состояния ВЛ [2].

Для реализации беспроводной связи между сенсорами используется частота 2,4 ГГц. Максимальная скорость передачи данных у наших сенсоров составляет 250 кбит/с. В реальных условиях при передаче данных на расстояние 500 метров скорость передачи составила 50 кбит/с. Однако на одном участке мы можем использовать несколько информационных ка-

налов. Следовательно, максимальная скорость передачи данных при использовании сенсоров в качестве приемо-передатчиков увеличивается прямо пропорционально количеству информационных каналов. Это позволяет использовать сенсорные сети не только в качестве умных сетей, но и как систему транспортировки информационных сообщений [3].

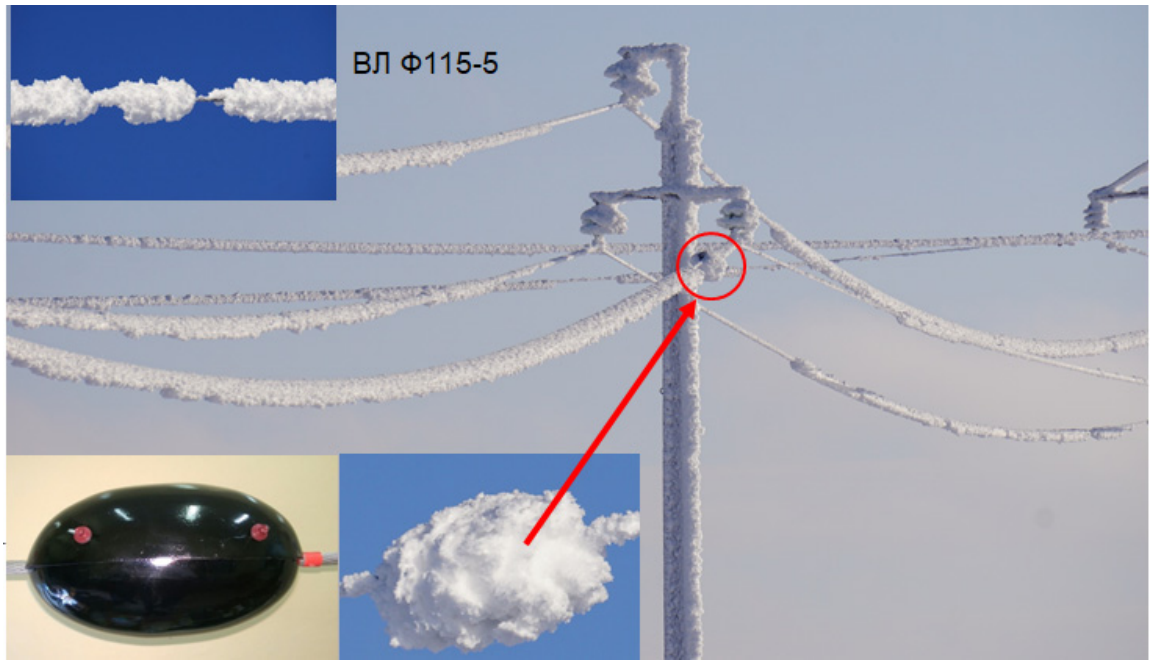


Рис. 2. Устройства установлены на ВЛ и организованы в сенсорную сеть

Таким образом, система транспортировки информационных сообщений на основе протяженных сенсорных сетей является перспективным и инновационным решением, которое обеспечивает оперативную и надежную передачу данных при использовании большого количества узлов. Это позволяет эффективно использовать информацию и принимать обоснованные решения на основе актуальных данных. Внедрение новых систем транспортировки информационных сообщений на основе протяженных сенсорных сетей (интеллектуальные ВЛ и системы освещения) положительно скажется на энергоэффективности и ресурсосбережении, а также позволит обеспечить дополнительный канал приема-передачи данных.

Исследования выполнены в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет2030»: соглашение № 075–15-2021-1087 от 30.09.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Д.А., Ярославский Д.А., Садыков М.Ф., Григорьева Н.А. Создание платформы для «умных сетей» с использованием беспроводных технологий // VIII Международная научно-техническая конференция Электроэнергетика глазами молодежи. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 359–360.
2. Система мониторинга технического состояния воздушных линий электропередачи, учитывающая период колебаний провода / М.Ф. Садыков, Д.А. Ярославский, Д.А. Иванов и др. // XIV Всероссийская научно-техническая конференция Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 275–276.
3. Development of test site on the basis of LED lamps for debugging software of wireless network for processes automation modules / D.A. Ivanov, D.A. Yaroslavsky, M.F. Sadykov et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – V. 13. – No. 5. – P. 1864–1870.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАСКАДА ГЭС ТРАДИЦИОННЫМИ И ВЫСОКОУРОВНЕВЫМИ СРЕДАМИ

А.В. Сидорова

Новосибирский государственный технический университет, Межкафедральная научно-исследовательская лаборатория обработки, анализа и представления данных в электроэнергетических системах, научный сотрудник

Научный руководитель: А.Г. Русина, д.т.н., доцент, декан ФЭН НГТУ

Резюме. В статье рассматривается моделирование динамических процессов каскада ГЭС. Алгоритм основан на использовании логических схем булевой алгебры, блоков ее логики и реализован в традиционной среде Eurostag и высокоуровневой среде Python. Верификация алгоритма проведена при варьировании значений расхода, подходящего к створу верхней ГЭС от 15 до 50 м^3/с. Базовым расчетом принята эмпирическая выкладка. Полученные результаты показали высокую точность в определении режимных параметров. Максимальные отклонения в традиционной среде Eurostag при определении мощностей верхней и контррегулирующей ГЭС составили 0,03 и 0,048 МВт. Отклонения в высокоуровневой среде Python оказались немного выше, но также сопоставимы с заданной точностью расчета. Разработанные алгоритмы динамических процессов каскада ГЭС позволяют поэтапно отслеживать прохождение режимных параметров через связи и ограничения, тем самым фиксируя возможные отклонения от допустимого режима работы энергосистемы с каскадом ГЭС.

Введение

Режим работы каскада ГЭС в энергосистеме может укрупненно находиться в двух функциональных состояниях: стационарном и динамическом. За относительно стационарное состояние отвечают процессы, протекающие в расчетах нормальных электрических режимов, где производится определение электрических параметров (перетоки мощностей, токовая загрузка оборудования, уровни напряжений и т. д.). К динамическому же состоянию относятся все процессы, которые связаны с прохождением режимных параметров каскада ГЭС через водно-энергетические связи и технологические ограничения.

Наиболее эффективным способом исследования динамических процессов каскадов ГЭС, определения его вероятностных характеристик и задающих параметрах является программное моделирование. Точность и достоверность результатов работы программы зависит, зачастую, от алгоритмов, заложенных в ее основу. В силу того, что математическое и операторное обоснование является наиболее фундаментальным подходом, разработку основного алгоритма необходимо начинать с составления логических схем, функциональных блоков, начала/конца, ввода исходных данных/вывода результатов, задания функций математический действий и операций, проверки прохождения условий, вызова и преобразования требуемых функций [1]. Именно такой подход позволяет воспроизвести сложный динамический процесс между двумя ГЭС в каскаде к простой и понятной алгебре логики.

Создание математического базиса динамических процессов режима каскада ГЭС

Построение математического базиса (основы) динамических процессов режима каскада ГЭС осуществляется на основании эмпирических формул, последовательность которых описывает функционирование каскада ГЭС. Схема математического базиса с учетом внутристанционных и системных ограничений приведена на рис. 1.

Математический базис контррегулирующей ГЭС составляется аналогичным образом, за исключением формирования притока к створу, который зависит от расхода верхней станции и времени добегания расхода между ними.

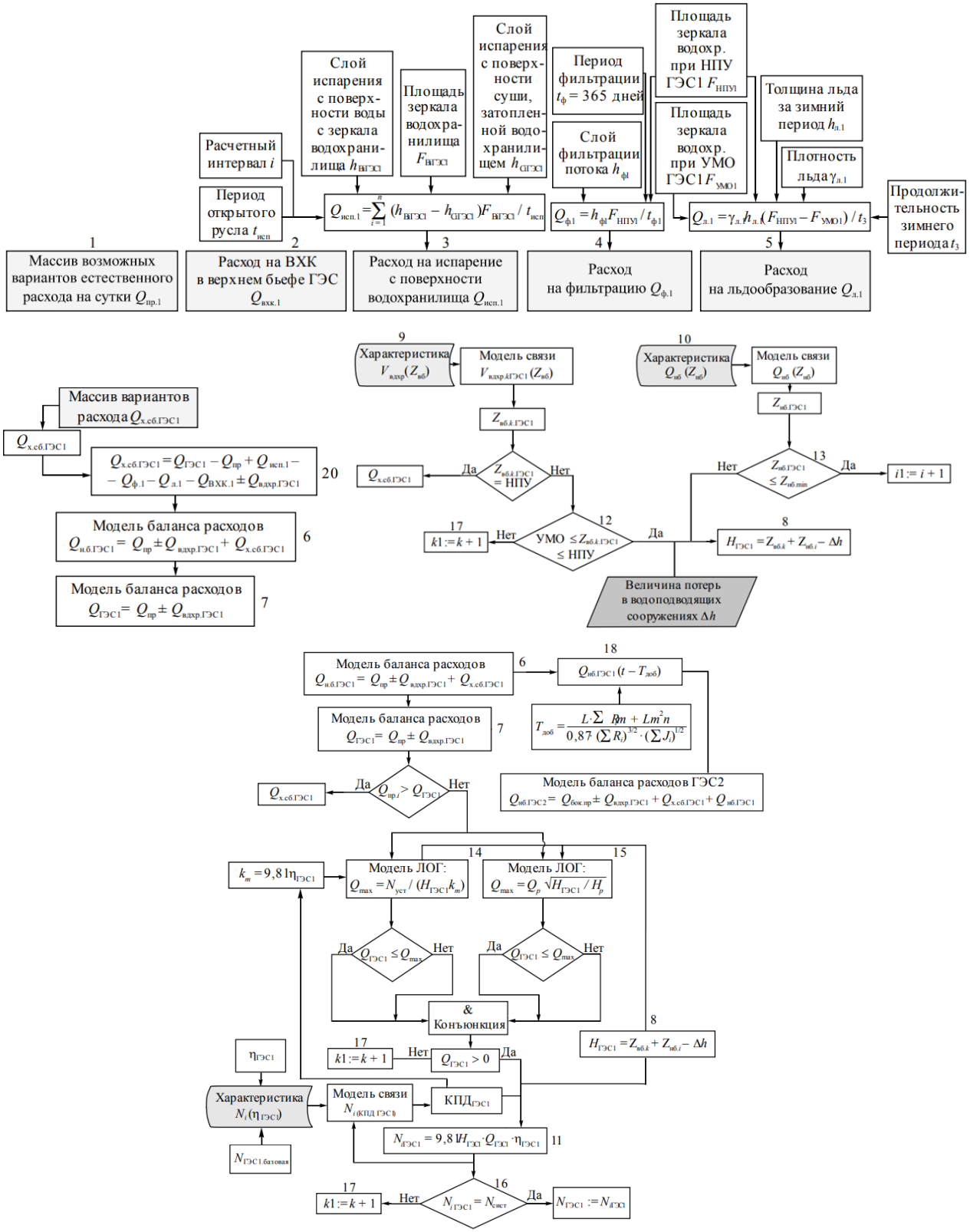


Рис. 1. Математический базис динамических процессов режима каскада ГЭС

Реализация динамических процессов режима каскада ГЭС

Воспроизведение математического базиса динамических процессов режима работы каскада ГЭС проведено в традиционной среде Eurostag и высокоуровневой среде Python. В обоих

средах результатом расчета является выход на механический момент гидроагрегата ГЭС и определение величины его генерации.

Eurostag. Алгоритм расчета динамического процесса режима каскада ГЭС приведена на рис. 2.

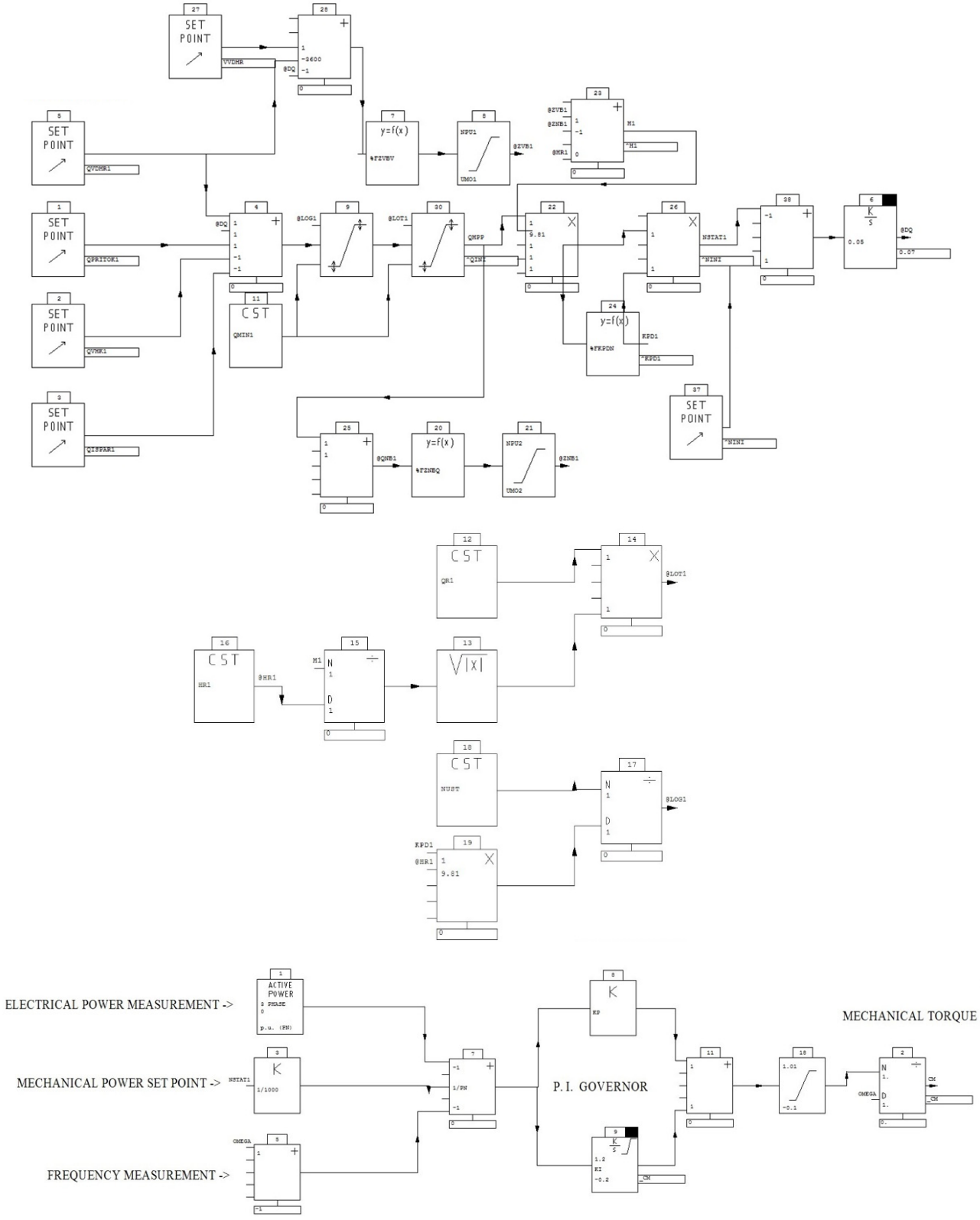


Рис. 2. Алгоритм расчета динамического процесса режима каскада ГЭС

Python. Реализация алгоритма расчета динамических процессов каскада ГЭС осуществлена путем написания построчного кода и использования библиотек Numpy и Pandas. Расчет производится методом последовательных интервалов с итеративным контролем выполнения режимных ограничений по пропускной способности турбины и установленной мощности генератора. В качестве исходных данных для расчета используются временные ряды притока в верхний бьеф каждой из ГЭС. Для старта алгоритма используются точки, соответствующие номинальным мощностям и расчетным напорам верхней и контррегулирующей ГЭС. Расчет прекращается при завершении обработки временного ряда, либо при превышении числа итераций в алгоритме расчета требуемого расхода.

Результаты

Валидация реализованных моделей проведена путем варьирования расхода к створу ГЭС от 15 до 50 м^3/с и приведена в табл. 1. В качестве эталона принят эмпирический расчет [2].

Таблица 1. Результаты валидации разработанных моделей

Параметр	Мат. расчет	Eurostag	Python	Мат. расчет	Eurostag	Python	Мат. расчет	Eurostag	Python
$Q_{ПР\ ГЭС-1}$, м^3/с	15			25			50		
$Q_{Х.СБ\ ГЭС-1}$, м^3/с	0	0	0	0	0	0	9,6	9,6	9,649
$Q_{ТУРБ.\ ГЭС-1}$, м^3/с	15	15	15	25	25	25	40,4	40,4	40,4
$P_{ГЭС-1}$, МВт	10,7	10,67	10,64	17,5	17,5	17,49	28	28	28,21
$P_{1\ ГА\ ГЭС-1}$, о.е.	0,381	0,38	0,379	0,625	0,625	0,627	1	1	1
$Q_{ПР\ ГЭС-2}$, м^3/с	6,2	6,201	6,27	10,334	10,335	10,279	20,668	20,67	20,74
$Q_{Х.СБ\ ГЭС-2}$, м^3/с	0	0	0	0	0	0	3,968	3,97	3,874
$Q_{ТУРБ.\ ГЭС-2}$, м^3/с	6,2	6,201	6,1	10,334	10,335	10,294	16,7	16,7	16,69
$P_{ГЭС-2}$, МВт	2,9	2,948	2,951	5,26	5,266	5,242	9	9	9,06
$P_{1\ ГА\ ГЭС-2}$, о.е.	0,327	0,327	0,32	0,584	0,585	0,584	1	1	1

Максимальные отклонения в традиционной среде Eurostag при определении мощностей верхней и контррегулирующей ГЭС составили 0,03 и 0,048 МВт. Отклонения в высокоуровневой среде Python оказались немного выше, но также сопоставимы с заданной точностью расчета, что подтверждает корректность составленного как алгоритма, так и моделей, реализованных на его принципе.

Заключение

Разработанный алгоритм математического базиса и составленные модели динамических процессов каскада ГЭС позволяют определять и поэтапно отслеживать режимные параметры ГЭС, фиксировать отклонения от допустимого режима работы. Модели могут быть использованы в многовариантных расчетах энергосистем с каскадом ГЭС, при анализе множества ее состояний, а также коррекции планирования на период краткосрочной и долгосрочной перспектив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simulation modeling of the hydroecological regime of the Nizhnekamsk reservoir / Yu.S. Datsenko, V.V. Puklakov // Journal of Water resources. – 2020. – V. 47(5). – P. 515–522.
2. Худжасаидов Д.Х. Анализ и планирование режимов электроэнергетической системы с каскадом гидроэлектростанций (на примере электроэнергетической системы Памира): дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2018. – 183 с.

РАССМОТРЕНИЕ АКТУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЦИКЛА БРАЙТОНА СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

Н.С. Избяков, Бовэнь Гун, В.В. Барсков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ВШЭМ, ИЭ, гр. 3231303/01201

Научный руководитель: В.В. Барсков, д.т.н., доцент ВШЭМ ИЭ СПбПУ

Спрос на электроэнергию по всему миру растет с каждым годом. Повышение спроса объясняется следующими факторами: рост населения планеты, экономический прогресс, развитие технологий, поддержание комфортного образа жизни.

Продолжительное время решающими факторами при производстве электроэнергии были экономический и энергетический факторы: стремление к наименьшим затратам при наибольшей эффективности энергосистемы. Экологический фактор учитывался, но не был не таким весомым, как в нынешнее время. Вследствие чего выбросы вредных веществ и парниковых газов в атмосферу увеличивались. Более 70 % выбросов парниковых газов приходится на диоксид углерода [1].

С целью снижения негативного воздействия и сохранения климата планеты в 2015 году было подписано Парижское соглашение, которое направлено на уменьшение выбросов парниковых газов и препятствие повышению глобальной температуры планеты [2]. В настоящий момент к соглашению присоединились 186 стран, среди которых Россия.

Углеродная нейтральность является одной из ключевых задач по снижению экологического воздействия, однако достижение нулевых выбросов возможно либо с помощью снижения выбросов и перехода на зеленую энергетику, либо путем компенсации выбросов, например, высадкой деревьев [3].

Перспективной технологией с экономической, энергетической и экологической точек зрения является цикл Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Углекислый газ, негативно воздействующий на планету, можно использовать в качестве рабочего тела и получать полезную энергию.

Цикл Брайтона является замкнутым циклом, следовательно, при подводе теплоты в изобарном процессе могут использоваться различные источники. Например:

Ядерная энергия. Теплота, выделяющаяся при ядерном распаде, может применяться в качестве источника теплоты для цикла Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Ядерные реакторы различных типов, в том числе с натриевым теплоносителем, позволяют безопасно использовать энергию. Ядерная энергия позволяет нагревать сверхкритический диоксид углерода до высоких температур – до 1000 °С и выше. При использовании данного источника теплоты следует тщательно соблюдать нормы безопасности, чтобы предостеречь аварийную ситуацию и разрушение ядерного реактора.

Солнечная энергия. Данный источник теплоты обеспечивает нагревание рабочего тела до 750 °С [4]. Он является экологически чистым, так как используется энергия солнца. Преимуществом использования солнечной энергии в цикле Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода является почти полная независимость установки от водного ресурса [5]. Однако, существенным недостатком данного источника теплоты является его сезонность и периодичность. В безоблачную погоду тепловая мощность будет максимальной, но нарушение этих условий приведет к существенному снижению тепловой мощности. Также, поле гелиостатов, расположенных вокруг башни приемника, в диаметре может достигать нескольких километров, что делает комплекс энергетической установки крупногабаритным.

Утилизационная энергия. Температура утилизационной теплоты варьируется в широком диапазоне – от 100 до 600 °С – в зависимости от области тепловых выбросов. Использование теплоты отходящих газов позволяет снижать тепловое воздействие на планету и получать дополнительную полезную работу от выбрасываемой энергии. Несмотря на небольшой температурный диапазон утилизационной энергии, эффективность цикла Брайтона может достигать значительных значений.

Геотермальная энергия. В среднем температура тепловой энергии, получаемой из подземных источников, достигает 150 °С, что является минимальной среди рассматриваемых. Добыча рассола из скважин, глубины которых достигают нескольких километров, требует значительных затрат энергии. Также, перед поступлением рассола в теплообменник необходимо произвести очистку теплоносителя. Пренебрежение этим фактором может негативно сказать на работоспособности теплообменника.

Ученые по всему миру изучают различные конфигурации цикла Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Оценивается не только коэффициент полезного действия, но и экономический фактор. Также, в некоторых работах учитывается тепловая мощность, передаваемая от источника теплоты к сверхкритическому диоксиду углерода. Производилось варьирование рабочих параметров циклов и их анализ. Наиболее распространенными вариантами исполнения цикла Брайтона являются:

Простой цикл с рекуперацией. В нем присутствуют следующие элементы: компрессор, промежуточного теплообменника (рекуператора), теплообменника для внешнего подвода теплоты, турбины, охладителя [6]. Данная конфигурация является самой простой и служит основой для составления более сложных циклов.

Цикл рекомпрессии. Данный цикл является оптимальным решением в выборе между эффективностью, экономичностью и сложностью энергетической установки. Цикл отличается от прошлой тем, что процесс рекуперации был разделен на 2 теплообменника, а также был добавлен еще 1 компрессор. Разница в теплоемкостях рабочего тела высокого и низкого давления может привести к «точке защемления» [7].

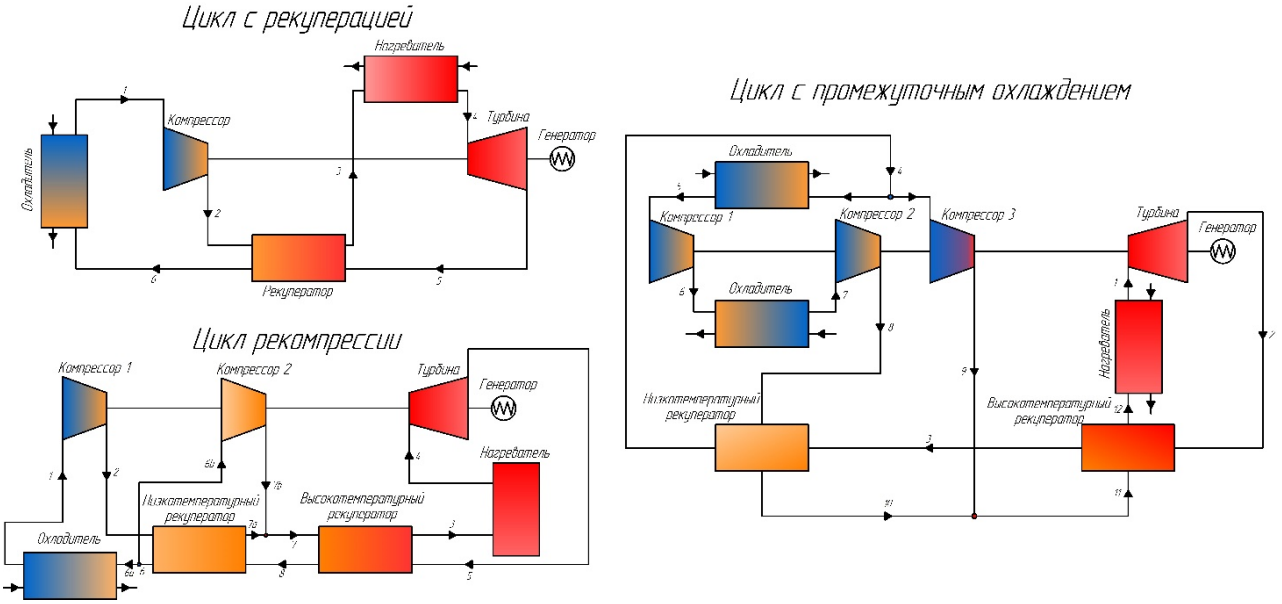


Рис. 1. Варианты исполнения цикла Брайтона с температурным градиентом

Цикл промежуточного охлаждения. Благодаря добавлению в цикл рекомпрессии еще 1 компрессора и 1 охладителя после компрессора получится цикл промежуточного охлаждения. Такая конфигурация позволяет дополнительно сжимать рабочее тело с помощью ком-

прессора, а чтобы затрачиваемая работа снижалась сверхкритический диоксид углерода перед повторным сжатием охлаждают. Схема подразумевает повышение КПД цикла за счет еще одного компрессора [8].

Сравнение циклов с определенными рабочими параметрами позволяет понять энергетическую целесообразность использования установок.

Работа исследователей проводилась над циклами рекомпрессии и промежуточного охлаждения [9]. График зависимости КПД от температуры проводился в диапазоне от 250 до 850 °С. На протяжение всего диапазона эффективность цикла промежуточного охлаждения превышает эффективность цикла рекомпрессии не более чем на 2 % и достигает 56 %. Эффективность циклов оценивалась по следующей формуле:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{W_{\text{турб}} - W_{\text{компр1}} - W_{\text{компр2}}}{Q_{\text{подв}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{турб}} -$ работа, вырабатываемая турбинами; $W_{\text{компр1,2}} -$ работа, потребляемая компрессорами; $Q_{\text{подв}} -$ подведенная теплота к циклу в процессе изобарного нагревания.

Также, была проведена работа по сравнению КПД 3 рассмотренных циклов по формуле (1) [10]. График зависимости эффективности от температуры на входе в турбину построен в диапазоне 350–700 °С. Цикл с рекуперацией обладает наихудшей эффективностью, а цикл с промежуточным охлаждением – наилучшей. Цикл рекомпрессии дает значительный прирост КПД по сравнению с циклом с рекуперацией – 5 % и более, а в сравнении с циклом с промежуточным охлаждением до 500 °С разница составляет не более 1 %.

Проводилось сравнение рассмотренных циклов с учетом внутренних КПД устройств: турбин и компрессоров [11]. Диапазон исследуемых температур варьировался от 177 до 577 °С. Наихудшую эффективность показал цикл с рекуперацией от 36 до 49 % пропорционально увеличению температуры. Наилучшую – цикл с частичным охлаждением, эффективность данной конфигурации изменяется от 42 до 57 %, пропорционально росту температуры. КПД рассчитывался с учетом внутренних эффективностей турбин и компрессоров:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{W_{\text{турб}} \cdot \eta_{\text{турб}} - \frac{W_{\text{компр1}} - W_{\text{компр2}}}{\eta_{\text{компр}}}}{Q_{\text{подв}}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{турб}} = 0{,}9 -$ внутренний КПД турбины; $\eta_{\text{компр}} = 0{,}85 -$ внутренний КПД компрессора.

Вывод

Снижение негативного влияния парниковых газов и достижение углеродной нейтральности возможно благодаря уменьшению выбросов или компенсации этих выбросов. Развивающаяся технология со сверхкритическим диоксидом углерода в цикле Брайтона позволяет использовать углекислый газ в качестве рабочего тела. Подвод теплоты к данной установке возможен различными способами: ядерная, утилизационная, солнечная и геотермальная энергии. Однако геотермальная энергия является наихудшим источником теплоты из-за невысокой температуры. Также, были рассмотрены различные тепловые схемы цикла Брайтона, среди которых цикл с рекуперацией, цикл рекомпрессии и цикл с промежуточным охлаждением. Последний показывает наибольшую эффективность, по сравнению с остальными, однако его применение и реализация требует дополнительных исследований, в том числе проведение технико-экономического анализа, который не был проведен в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парниковые газы: что нагревает нашу Землю. // ClimateScience. URL: https://climatescience.org/ru/advanced-greenhouse-gases (дата обращения: 06.11.2023).
2. Меры по борьбе с изменением климата. // ООН. URL: https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement (дата обращения: 06.11.2023).

3. Что такое углеродная нейтральность. // РБК. Тренды. URL: https://trends.rbc.ru/trends/green/5ffd5a099a7947594de716ce (дата обращения: 06.11.2023).
4. Optimization of a recompression supercritical carbon dioxide cycle for an innovative central receiver solar power plant / M.A. Reyes-Belmonte, A. Sebastián, M. Romero, J. González-Aguilar // Energy. – 2016. – V. 112. – P. 17–27.
5. Гун Б. Применение диоксида углерода в сверхкритическом цикле Брайтона в гелиотермальной энергетике // Возобновляемая энергия планеты: II Всероссийский конкурс студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Москва : Сборник материалов, 2022. – С. 49–54.
6. Techno-economic assessment of Joule-Brayton cycle architectures for heat to power conversion from high-grade heat sources using CO_2 in the supercritical state / Marchionni Matteo, Bianchi Giuseppe, A. T. Savvas // Energy. – 2018. – V. 148. – P. 1140–1152.
7. Design, optimization and thermodynamic analysis of SCO_2 Brayton cycle system for FHR / Y. Shichang, Z. Dalin, L. Xinyu et al. // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – V. 157. – № 104593.
8. Thermodynamics analysis of the supercritical CO_2 binary mixtures for Brayton power cycles / P. Tafur-Escanta, I. López-Paniagua, J. Muñoz-Antón / Energy. – 2023. – V. 270. – № 126838.
9. Mapping of the thermodynamic performance of the supercritical CO2 cycle and optimisation for a small modular reactor and a sodium-cooled fast reactor / H. S. Pham, N. Alpy, J. H. Ferrasse et al. // Energy. – 2015. – V. 87. – P. 412–424.
10. Thermodynamic and exergoeconomic investigation of various SCO_2 Brayton cycles for next generation nuclear reactors / L. Dan, H. Diangui // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 209. – № 112649.
11. A newly proposed supercritical carbon dioxide Brayton cycle configuration to enhance energy sources integration capability / S. Muhammad, K. Man-Hoe // Energy. – 2022. – V. 239A. – № 121868.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Д.А. Хнычев

Национальный исследовательский университет «МЭИ», ИЭТЭ, ЭМЭЭА, гр. ЭЛ-11м-23

Научный руководитель: А.А. Кирякин, к.т.н., доцент ЭМЭЭА НИУ «МЭИ»

В настоящее время для подъема грунтовых вод широко применяются скважинные центробежные электрические насосы, приводом которых являются водозаполненные погружные электродвигатели (ПЭДВ).

Аддитивные технологии (АТ) эффективно внедряются в различные отрасли техники, включая и электромашиностроение [1]. АТ позволяют изготовить детали сложной формы из полимеров, меди и ферромагнитных материалов. Появляется возможность для разработки новых конструкций отдельных деталей электрических машин. Поэтому задача рассмотрения перспектив применения аддитивных технологий при создании погружных электродвигателей (ПЭД) является актуальной.

При классической штамповке листов магнитопровода около 50 % электротехнической стали попадает в отходы. Изготовление порошковых магнитопроводов реализуется по безотходной технологии. Также по сравнению с традиционным способом изготовления снижается трудоемкость получения деталей.

В данной работе рассматривается применение аддитивных технологий для создания короткозамкнутого ротора ПЭД. Магнитопровод изготавливается из магнитно-мягкого композиционного материала на основе порошка железа [2]. Магнитопровод ротора, медная обмотка и короткозамыкающие кольца выполняются на 3D-принтере с использованием технологии SLM. Применение аддитивных технологий позволяет создавать все компоненты ротора од-

новременно, объединяя несколько технологических операций в одну, тем самым упрощая технологию производства ротора.

В электродвигателе выполненном на основе 3D-технологии для снижения уровня насыщения зубцов ротора пазы круглой формы заменены на трапецеидальные пазы, что позволило уменьшить длину магнитопровода. В результате снижается вероятность повреждения изоляции обмотки статора при укладке её в пазы, ускоряется технологический процесс укладки обмотки и уменьшается расход материалов.

Поверочный расчет проводился на основе применения методик [3] и [4], с помощью программы, разработанной в ПО Mathcad 15.

Исходные данные для расчета параметров и характеристик ПЭД представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для поверочного расчета

Мощность на валу P_2, кВт	Номинальное напряжение U, В	Частота напряжения сети f, Гц	Число пар полюсов	Число фаз	Диаметр обсадной трубы, дюйм
2,8	220	50	1	3	6

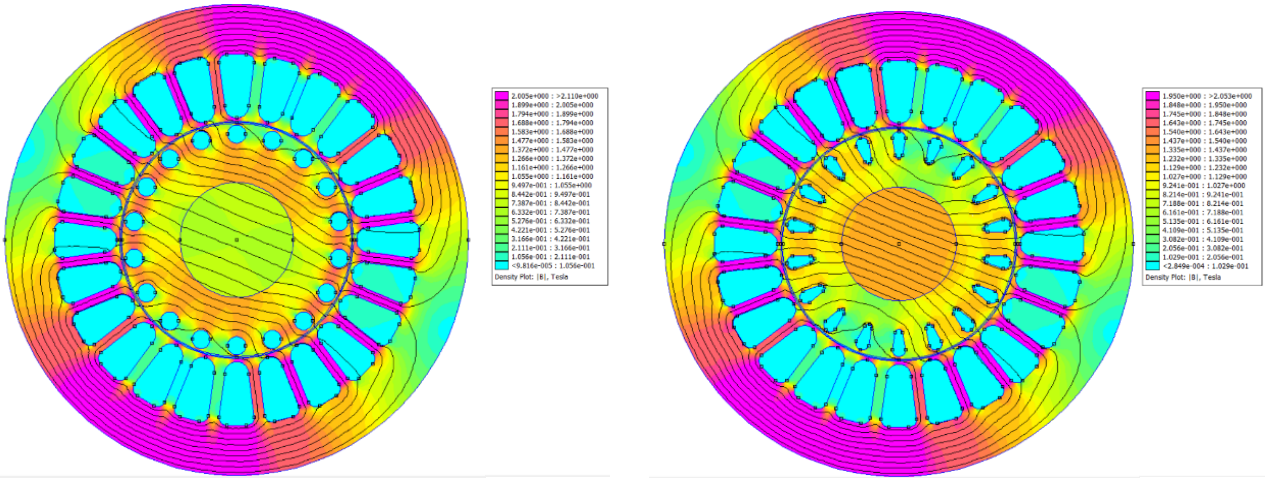
Результаты поверочных расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты поверочных расчетов

Параметры	ПЭДВ базовой конструкции	ПЭДВ с 3D технологиями
Длина пакета статора, мм	300	250
КПД η, %	81,5	81,5
Коэффициент мощности cos φ	0,84	0,85
Номинальное скольжение $s_{ном}$	0,028	0,035
Номинальный ток I_1, А	6,17	6,12
Отношение пускового момента к номинальному	1,95	1,75
Отношение пускового тока к номинальному	6,66	5,76

В работе проведено моделирование распределения магнитного и теплового полей рассматриваемых ПЭД в программной среде FEMM.

На рис. 1 показаны рассчитанные картины распределения магнитных полей рассматриваемых двигателей для режима ХХ.



а *б*

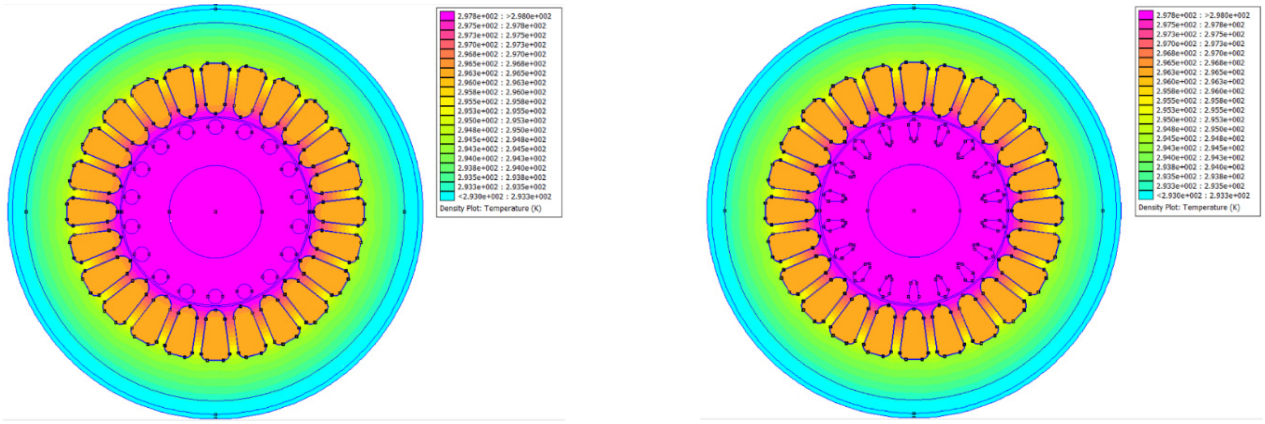
Рис. 1. Магнитное поле ПЭДВ базовой конструкции (а) и выполненного с использованием 3D-технологий (б) при ХХ

На рис. 2 показаны рассчитанные картины распределения тепловых полей рассматриваемых двигателей для режима ХХ.

Получены следующие результаты моделирования теплового поля:

- температура обмотки статора при ХХ равна Θ = 23,51 °С, обмотки ротора – Θ = 25,04 °С (ПЭДВ базовой конструкции);
- температура обмотки статора при ХХ равна Θ = 23,48 °С, а обмотки ротора – Θ = 25,01 °С (ПЭДВ с 3D-технологиями).

В работе приведено технико-экономическое обоснование применения 3D-технологий и выработаны рекомендации по использованию аддитивных технологий при создании погружных электродвигателей.



а *б*

Рис. 2. Тепловое поле ПЭДВ базовой конструкции (а) и выполненного с использованием 3D-технологий (б) при ХХ

Исходя из результатов, полученных в ходе выполнения работы, можно сделать вывод, что переход от ПЭДВ базовой конструкции к конструкции с короткозамкнутым ротором, изготовленным с помощью аддитивных технологий, позволяет получить электродвигатель с практически такими же энергетическими показателями. За счет уменьшения длины магнитопровода происходит ускорение технологического процесса изготовления погружного двигателя и уменьшение его габаритов. Это в свою очередь приводит к уменьшению расхода материалов и, следовательно, к снижению стоимости ПЭДВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков А.В., Гапонова Д.А., Слива А.П. и др. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник; под ред. А.Г. Григорьянца, В.К. Драгунова. – М.: МЭИ, 2022. – 676 с.
2. Дорофеев Ю.Г., Михайлов В.В., Кривощеков В.О. Магнитно-мягкий композиционный материал на основе железа для работы в переменных полях // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 6 – С. 107–109.
3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с.
4. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ С ФУНКЦИЕЙ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Р.Г. Галеев, Н.О. Поскачин

Новосибирский государственный технический университет,
ФЭН, гр. ЭН1-25

Научный руководитель: В.З. Манусов, д.т.н. профессор кафедры СЭСП

Силовые трансформаторы являются основными элементами электрических сетей и систем, которые определяют неотъемлемую часть эксплуатационной надежности и экономичности срока службы трансформатора. Отключения при авариях, дефекты и повреждения приводят к затратам, убыткам и моральному износу оборудования. Поэтому одной из актуальных задач повышения надежности и качества функционирования электрических систем является применение высокотемпературных сверхпроводящих проводников.

Силовые трансформаторы при аварийных режимах работы испытывает электромагнитные силы и динамические деформации внутренней части обмоток. Деформация может быть вызвана пусковой силой и силой короткого замыкания. Высокий переходной ток в момент КЗ создает динамические электромагнитные силы и деформации в обмотках. На рис. 1 показаны составляющие переходного тока короткого замыкания.

$$i(t) = \sqrt{2}I\left[\cos\alpha e^{\frac{r}{l}t} - \cos(\omega t + \alpha)\right], \quad (1)$$

где $i(t)$ – кратковременный ток короткого замыкания; I – среднеквадратичное значение установившегося тока; a – начальный фазовый угол; r и L – сопротивление и индуктивность соответственно.

Ток короткого замыкания, текущий в обмотках трансформатора, является функцией суммы импеданса трансформатора и сопротивления системы.

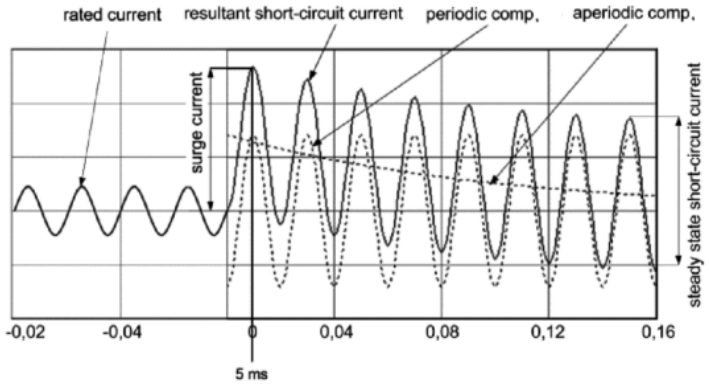


Рис. 1. Переходной ток короткого замыкания

На рис. 2 показано распределение потока утечки при токах короткого замыкания, при которых обмотка низкого напряжения закорочена, MV – обмотка питания, а HV – обмотка с разомкнутым контуром.

$$f_i(t) = \frac{1}{4} f_{im}(e^{-2at} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos 2\omega t - 2e^{-at}\cos\omega t) \quad (2)$$

где f_i – динамическая электромагнитная сила короткого замыкания; f_{im} –пиковое значение; a равно отношению сопротивления и индуктивности.

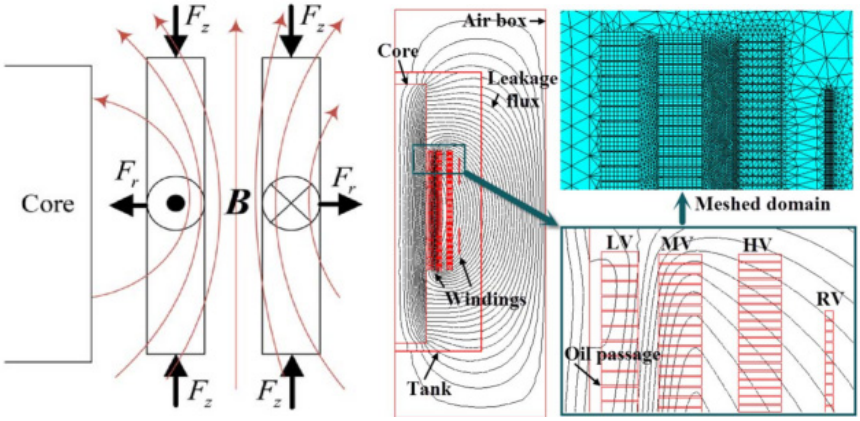


Рис. 2. Поток утечки и электромагнитные силы короткого замыкания

Осевая и радиальная составляющие плотностей усилия вычисляются с использованием соответствующих составляющих плотностей потока и плотностей тока элементов.

$$F = B \cdot J \,, \tag{3}$$

где B являются радиальной и осевой составляющими плотности потока утечки с возрастом.

Механическое напряжение, возникающее в проводнике и прокладке, является растягивающим, когда вызвано внешними силами, и сжимающим, когда вызвано внутренними силами, как показано на рис. 3.

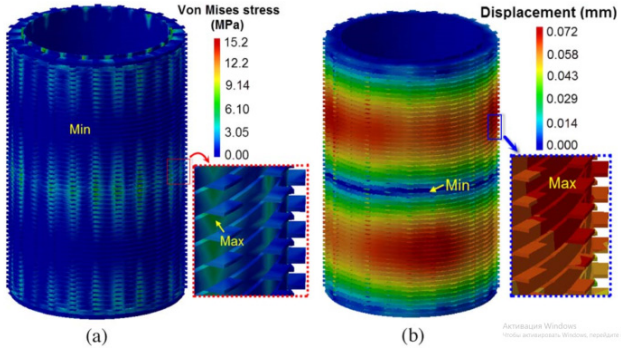


Рис. 3. Реакция обмоток низкого напряжения: a – напряжения; b – деформации

Методы исследования

Применение ВТСП трансформаторов, в которых при температуре кипения жидкого азота 77 К (–198 ºС) активное сопротивление равно нулю, что исключает тепловые потери на активное сопротивление при любых коэффициентах нагрузки, как видно из рис. 2. Плотность тока в сверхпроводящем проводе может достигать 500 А/мм^2, по сравнению с медью расчетное для трансформатора принимают 1,8 А/мм^2, разница в 250 раз оказывает существенное влияние на уменьшение объема и массы обмоток трансформатора и следовательно на уменьшение массы магнитопровода.

ВТСП имеет ряд отличительных параметров от трансформаторов с классическими обмотками. Принято считать, что медные и алюминиевые проводники имеют постоянное сопротивление не зависимо от температуры окружающей среды или от протекающего тока, то есть температурный коэффициент не учитывается. ВТСП проводник имеет зависимость по трем точка: критический ток, критическая температура и критическое магнитное поле. Это сказы-

вается на математической модели трансформатора, как в номинальном режиме так и в режиме короткого замыкания [2].

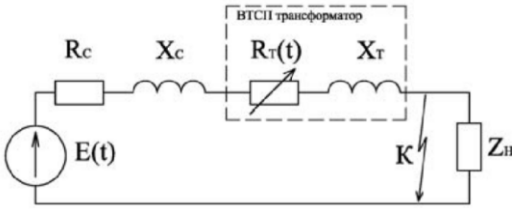


Рис. 4. Схема замещения для расчета переходного процесса

Параметры схемы замещения ВТСП трансформатора имеет отличительные значения от параметров схемы замещения (рис. 4) обычного трансформатора, что оказывает на электромагнитные переходные процессы. Вместе с тем, при возникновении КЗ, т. е. при превышении тока критического значения, сверхпроводник переходит из СП состояния в нормальное [5].

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_c + L_T)\frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_c + R_T(T)), \qquad (4)$$

где R_C и L_C – сопротивление и индуктивность системы; R_T и L_T – сопротивление и индуктивность трансформатора.

Наряду с этим ВТСП трансформаторы при коротких замыканиях в сети временно теряет свойство сверхпроводимости обмоток (рис. 5), существенно ограничивают токи короткого замыкания (т.к.з.) в электрической сети, тем самым они являются ограничителями тока короткого замыкания, что позволяет отказаться от дополнительного применения последовательно включенных реакторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой. Эксперименты показывают, что в 2–2,5 раза ограничивается однофазное кроткое замыкание (рис. 5). Такое решение является одним из новых системных инновационных мероприятий, поскольку основная коммутационная аппаратура электрических сетей и электропотребителей выбиралось несколько десятилетий назад и последующее увеличение электрических нагрузок потребителей существенно увеличило т.к.з. по сравнению с теми, для которых коммутационная аппаратура выбиралась [6].

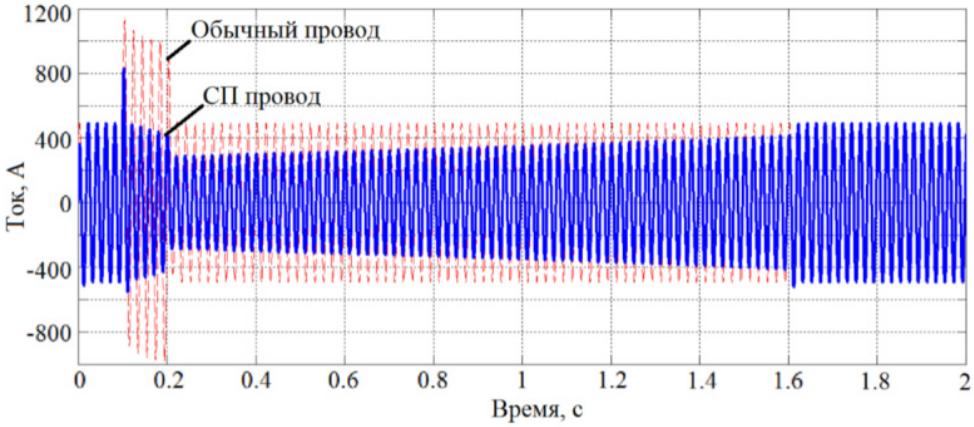


Рис. 5. Кривые токов КЗ для обычного и ВТСП провода [7]

Таким образом, ток КЗ ограничивается при использовании ВТСП проводов. В начальный момент КЗ, ударный ток КЗ ограничивается эквивалентным активным сопротивлением обмотки (рис. 6), соответствующем начальной температуре (77 К), затем сопротивление вследствие возрастания температуры возрастает. Как следствие апериодическая составляющая тока КЗ в случае со сверхпроводящим проводом затухает быстрее по сравнению со случаем обычного провода, кроме этого, периодическая составляющая тока КЗ ограничивается возрастающим сопротивлением. Однако после устранения КЗ оставшееся сопротивление ограничивает ток нагрузки, но наличие жидкого азота в криостате в короткие сроки вернет ВТСП трансформатор в номинальное сверхпроводящее состояние [8–10].

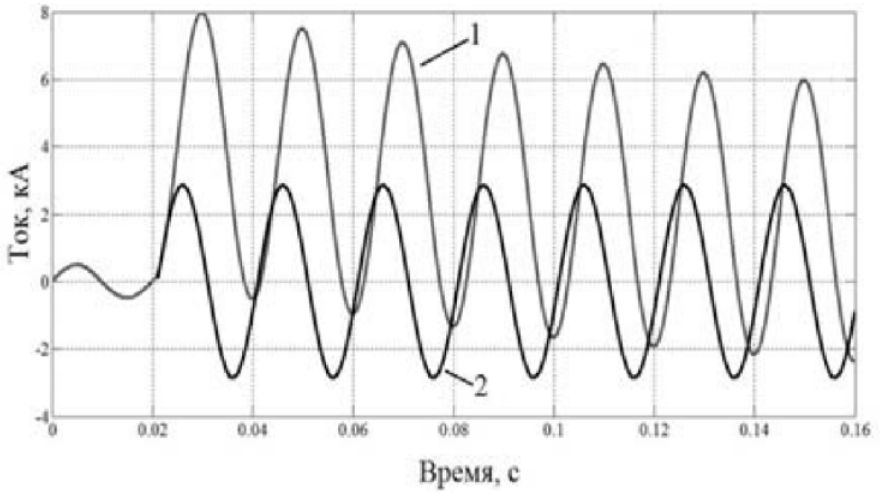


Рис. 6. Кривые изменения тока КЗ без ограничения (1) и с ограничением (2) [11]

Обсуждение результатов

Проведенные исследования, представленные в этой работе подтверждают целесообразность применение ВТСП проводников в трансформаторном электрооборудовании по многим факторам. Положительное влияние на массогабаритные характеристики трансформатора. Особенно это важно для мобильных и автономных система электроснабжения с частотой электрической сети 50 Гц. Появляется больше свободной нагрузки при транспортировки трансформатора и меньше материальных затрат при подготовки установочного места трансформатора. Показана энергоэффективность ВТСП трансформатора при повышенных коэффициентах нагрузки, что является значимым показателем для предприятий с высоким энергопотреблением и двух или трех сменным режимом работы.

Положительное влияние на энергосистему благодаря возможности ограничения токов короткого замыкания.

Вывод

Показано, что существует возможность ограничения тока короткого замыкания в электрической сети с помощью трансформатора с ВТСП обмотками. При этом в первый полупериод ограничение тока короткого замыкания не так существенно, как в последующие полупериоды за ним. Это обусловлено более быстрым затуханием апериодической составляющей тока короткого замыкания, чем в традиционных трансформаторах с обмоткой из медного провода, а также увеличением температуры сверхпроводящей обмотки ВТСП трансформатора.

Возможность ограничения токов короткого замыкания с помощью ВТСП трансформаторов за счет увеличения сопротивления проводника при превышении критического тока. Увеличение сопротивление в аварийном режиме работы позволяет отказаться от последовательно включенных реакторов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: МЦНМО, 2000. – XIV + 402 с.: ил. Библиогр.: 379 с.
2. СуперОкс. – 2023.– URL: http://www.superox.ru/ (дата обращения: 01.05.2023).– Текст: электронный.
3. Манусов В.З. Электротепловые переходные процессы в сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором с функцией токоограничения / В.З. Манусов, Д.М.Иванов // Электричество.– 2022, № 1. – С. 9–17.

4. Marchionini B.G. HighTemperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications 2015–2030 / B.G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, H. Ohsaki // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – doi:10.1109/TACK.2017.2671680.
5. Глускин И.З. Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем / И.З. Глускин, Г.А. Дмитриева, М.Ш. Мисриханов, В.Г. Наровлянский, И.В. Якимец. – М.: Энергоатомиздат.– 2002. – 373 с.
6. Sissimatos E. Technik und Einsatz von hochtemperatur-supraleitenden Leistungstransformatoren. Dissertation. – Universität Hannover, 2005.
7. Chu C.W. High–Temperature Superconducting Materials: A Decade of Impressive Advancement / C.W. Chu // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1997. – Vol. 7, No. 2.
8. Angeli G. Status of Superconducting Fault Current Limiter in Italy: Final Results from the In–Field Testing Activity and Design of the 9kV/15.6MVA Device / G. Angeli // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Vol. 26. – P. 9.
9. Манусов В.З. Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В.З. Манусов, Д.А. Павлюченко, Дж.С. Ахьёев // Проблемы региональной энергетики.– 2017.– №1 (33).– С. 1–7. – doi.org/10.5281/zenodo.1193551.

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЯМИ В СЕТИ

А.Е. Чичков

Научный исследовательский университет «МЭИ», ИЭТЭ, ЭММЭА, гр. ЭЛ-12м-22

Научный руководитель: М.Г. Киселев, к.т.н., зав. кафедрой ЭММЭА ИЭТЭ НИУ «МЭИ»

Одной из главных проблем электроснабжения потребителей является искажения качества сети за счет неактивных нагрузок потребителей, что ведет к снижению эффективности использования энергии и повышению энергопотребления. Искажения качества сети, вызванные неактивными нагрузками, проявляются в виде повышенного уровня гармоник и реактивной мощности. Гармоники являются высокочастотными составляющими электрического сигнала, которые могут приводить к перегрузке и повреждению оборудования, а также к нежелательным помехам на радиочастотах. Реактивная мощность, в свою очередь, вызывает перегрузку сети, нарушает принципы работы энергоустановок и повышает затраты на энергию. Поэтому для исключения искажения сети необходимо устройство, повышающее качества электроэнергии, для этого могут быть применены пассивные и активные фильтры.

Для повышения качества сети с возможностью регулирования активной и реактивной мощности отдаваемой или получаемой из сети используют четырехквадрантный регулятор на основе инвертора. Для генерации активной мощности в сеть и компенсации реактивной инвертор должен иметь питание на стороне постоянного тока, при этом для четырехквадрантного регулирования в трехфазных сетях напряжение питания должно быть не менее 650 В. За счет этого существует проблема в выборе источника постоянного напряжения для питания инвертора. На рис. 1 представлена общая схема четырехквадрантного регулирования мощности сети.

Для решения обозначенной проблемы, наиболее эффективным и наименее энергозатрачиваемым и загрязняющем окружающую среду, является использование энергии солнца – фотоэлектрические преобразователи (ФЭП).

Преимущества использования ФЭП включают:

1. Бесплатное и неограниченное солнечное энергоснабжение.

2. Отсутствие выбросов вредных веществ и сокращение зависимости от ископаемых топлив, что уменьшает негативное влияние на окружающую среду и климат.

3. Долговечность и низкое обслуживание – современные ФЭП имеют жизненный цикл от 20 до 30 лет и требуют минимального обслуживания.

4. Возможность сгенерировать энергию даже в удаленных или недоступных районах без доступа к сетям электроснабжения.

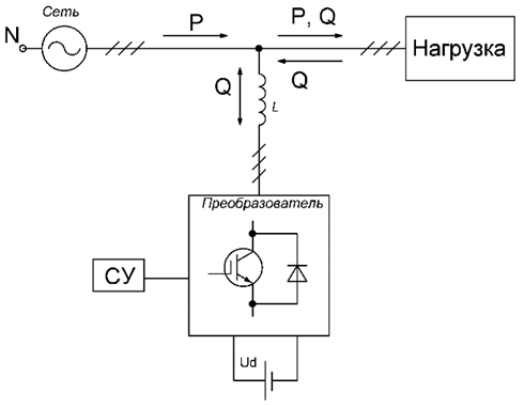


Рис. 1. Общая схема сети с четырехквадрантном регулированием мощности

Однако есть важные недостатки и особенности использования ФЭП:

1. Сезонные, погодные условия – не всегда и не во всех районах будет хватать солнечной энергии.

2. Время активности солнца – в темное время суток, вырабатываемой энергии будет недостаточно для питания инвертора.

3. Требование пространства для установки – для получения большой мощности необходимы значительные размеры установок.

4. Стоимость начальных вложений – стоимость ФЭП по сравнению с большинством других видов энергии выше.

Для осуществления бесперебойного питания инвертора в темное время суток необходимо использовать совместно с ФЭП аккумуляторную батарею (АБ), для накопления энергии в светлое времени суток и отдачей электроэнергии в темное время суток. Существует большое разнообразие типов АБ, но наиболее эффективные по циклам разряд-заряд, времени заряда, стоимости и безопасности для рассматриваемой системы являются литий-титанатовые АБ. Их рабочий диапазон напряжений 1,8–2,7 В, с номинальным 2,3 В. Для увеличения срока службы АБ каждый аккумулятор подключается к устройству балансировки уровня заряда.

В соответствии с вольтамперной характеристикой ФЭП для получения максимальной мощности от ФЭП необходимы определенные соотношения напряжения и тока. Если учесть, что напряжение у нас задано, то для максимального КПД ФЭП, необходимо потреблять определенный ток, для этого к ФЭП подключается устройство поиска точки максимальной мощности (ПТММ). Устройство ПТММ основано на регуляторе постоянного напряжения с обратной связью по входному напряжению и току.

Исходя из всего вышесказанного есть две наиболее эффективные реализации питания преобразователя сетевого регулятора:

Первая – это использование, в качестве преобразователя, многоуровневого инвертора на базе Н-мостов, тогда, исходя из того, что уровень напряжения набирается из модулей таких Н-мостов, напряжение питания одного модуля можно значительно снизить. Также преимущество использования многоуровневого инвертора заключается в том, что для генерации высокого качества выходного напряжения, для него нет необходимости использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), достаточно лишь подобрать необходимое кол-во Н-мостовых модулей. Что позволяет подобрать такое количество модулей Н-мостового инвертора, которого будет достаточно для высокого качества выходного напряжения и питания от ФЭП. Главном недостатком такого решения является большое кол-во модулей, что удорожает конструкцию и усложняет расчет системы управления. Такая система преобразователя представлена на рис. 2.

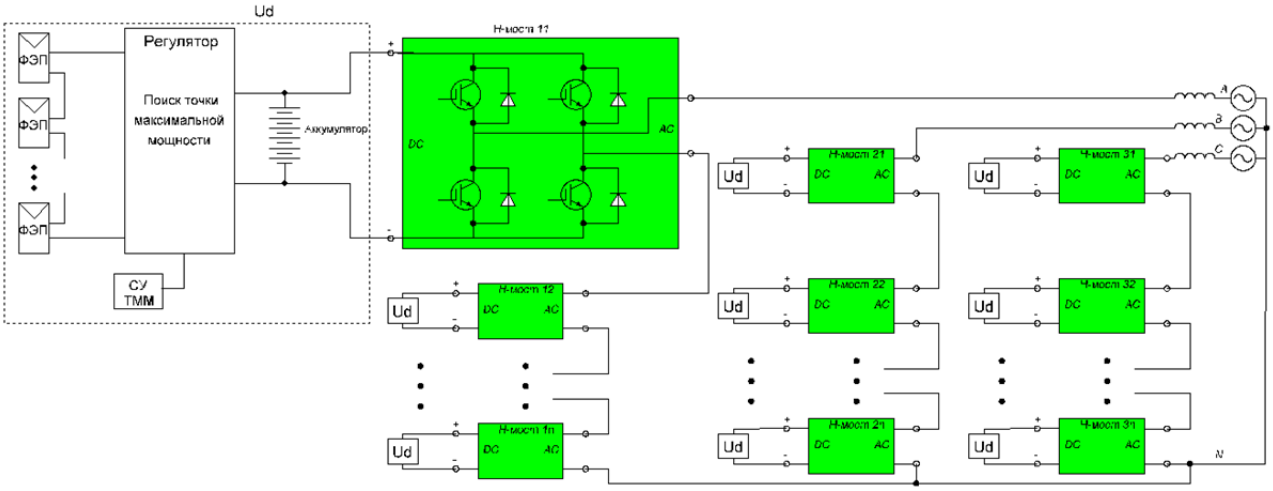


Рис. 2. Система регулирования мощности с раздельным питанием

Вторая реализация – это использование обычного трехфазного инвертора с управлением по методу ШИМ и общим питанием. Для такой системы модули ФЭП соединяются последовательно, обеспечивая необходимое высокое напряжение и к ним подключается устройство ПТММ. Преимущество такого способа заключается в использовании значительно меньше различных элементов схемы, что с одной стороны делает дешевле и проще конструкцию, но с другой стороны удорожает за счет того, что приходится использовать мощные силовые полупроводниковые приборы и реализовывать высокую частоту несущего сигнала ШИМ. Еще немаловажным недостатком такой схемы является ПТММ для всех ячеек ФЭП, что снижает эффективность за счет возможного неравномерного распределения точки максимальной мощности на каждом ФЭП.

Экономический анализ рассмотренных двух реализаций показал, что при одинаковом выходном качестве напряжения преобразователя наиболее выгодно использовать реализацию с раздельным питанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таранов М.А., Корчагин П.Т., Гуляев П.В. Анализ работы Н-мостового каскадного инвертора.
2. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка // Преобразование электрической энергии. – 2012.

СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ ЭЛАСТОМЕРЫ ДЛЯ СУДОВЫХ КАБЕЛЕЙ

М.Д. Жульмина

Томский политехнический университет,
ОЭЭ, ИШЭ, гр. А2-27

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

Судовые кабели – неотъемлемая составляющая системы передачи электрической энергии и сигналов на кораблях и относятся к специальным кабельным изделиям, которые эксплуатируются в жестких условиях. Таким образом, к судовым кабелям предъявляются ряд жестких требований: соответствие требованиям пожарной безопасности в соответствии с [1], не-

распространение горения в условиях прокладки в пучках по категории «А» по [2]; повышенную устойчивость к изгибам (для кабелей нестационарной прокладки); стойкость к воздействию разогретых масел или паров масел и дизельного топлива; стойкость к воздействию агрессивных сред; срок службы не менее 40 лет (равен межремонтному сроку службы корабля); повышенную стойкость к продольному гидростатическому давлению до 15 МПа и радиальному гидростатическому давлению до 120 МПа с сохранением работоспособности для специальных герметизированных кабелей.

Обеспечение вышеизложенных требований реализуются разработкой конструкторско-технологических решений и выбором соответствующих материалов. Основными неметаллическими элементами современных судовых кабелей являются изоляция и оболочка из полимерных безгалогенных материалов в основном зарубежного производства. На сегодняшний момент существует потребность в замене импортных материалов на отечественные с аналогичными характеристиками.

В [3] в ходе работы было апробировано более 20 рецептур безгалогенных материалов, в том числе для изоляции, внутреннего заполнения и оболочки кабелей. Однако, подобрать рецептуру материала, которая обеспечивала бы аналогично импортному соответствие всем современным требованиям до недавнего времени не удавалось.

В качестве эталона материала для оболочки кабеля был выбран импортный полимерный безгалогенный термопластичный компаунд с самыми высокими характеристиками из всей линейки несшиваемых безгалогенных термопластичных материалов. Материал имеет широкий диапазон рабочих температур (от – 70 до 105 ºС), оптимальные значения физико-механических характеристик, соответствует всем требованиям по пожарной безопасности [1], а также стойкий к маслам и дизельному топливу. Данный компаунд является улучшенным вариантом импортного безгалогенного негорючего компаунда, который успешно прошел все испытания на соответствие современным техническим требованиям в качестве оболочки судовых кабелей.

Для определения химического состава полимерного термопластичного компаунда методом инфракрасной спектроскопии (инфракрасный Фурье-спектрометр ФТ-801 с приставкой НПВО для исследования малых образцов, со встроенной библиотекой спектров) был получен спектр гранул образца импортного термопластичного компаунда (рис. 1). Установлено, что импортный термопластичный компаунд представляет собой композицию на основе сополимера этилена и винилацетата с различными добавками. После доработки рецептур новые материалы также подверглись исследованию методом инфракрасной спектроскопии. Инфракрасные спектры доработанных материалов представлены на рис. 2 образец 1 и на рис. 3 образец 2. Оба спектра оказались близки к спектру импортного образца. Материалы отличаются друг от друга содержанием винилацетата, типом и количеством различных добавок. Линия на 1104 $см^{-1}$ обусловлена наличием в композиции полидиметилсилоксана [4] и присутствует как в импортном образце – так и в образце 2, но отсутствует в образце 1. Результаты оценки полученных спектров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Волновые числа характерных линий поглощения исследуемых материалов

Образец	Материал основы	Волновые числа характерных линий поглощения, $см^{-1}$					
		3688	3616…3200	3000…2800	1600	1460	1104
Импортный образец	Поли(этилен-винилацетат)	+++	+	+++	-+	+	+++
Образец 1	Поли(этилен-винилацетат)	+++	-	+++	--	++	--
Образец 2	Поли(этилен-винилацетат)	+++	+	+++	++	+	+++

Примечание: -- линия отсутствует; + слабая; ++ средняя; +++ сильная.

Как видно из табл. 1, образцы представляют собой материал на основе сополимера этилена и винилацетата. Отличие заключается в количественном содержании винилацетата, типом и количеством добавок [4]. Инфракрасный спектр образца 2 наиболее близок к спектру импортного образца.

Помимо исследования физическими методами необходимо было оценить соответствие компаундов требованиям, предъявляемым к материалам оболочки. В связи с этим была проведена оценка физико-механических характеристик материалов в исходном состоянии, после воздействия, масел МВП, СЖР-2, СЖР-3, И-40А, дизельного топлива. Испытания проводили на лопатках из экструдированных лент. Результаты представлены в табл. 2–3.

Таблица 2. Результаты измерений физико-механических характеристик в исходном состоянии

Образец	Прочность при разрыве $\sigma_{pp,}$ МПА	Относительное удлинение при разрыве $\varepsilon_{pp,}$ %
Импортный образец	15,0	220
Образец 1	9,1	244
Образец 2	8,4	130

Таблица 3. Результаты измерений физико-механических характеристик после воздействия масел и дизельного топлива

Образец	Марка масла	Изменение прочности при разрыве $\sigma_{pp,,,}$ %	Изменение относительного удлинение при разрыве $\varepsilon_{pp,}$ %	Примечание
Импортный образец	IRM 902	–3,3	–16,8	после выдержки при температуре 100 °С в течении 24 часов (по данным data sheet)
	IRM 903	–10,0	–23,6	
	МВП	не нормируется	не нормируется	
	И-40А	не нормируется	не нормируется	
	Дизельное топливо	–31,3	– 15,5	
Образец 1	*СЖР-2	0	0	после выдержки при температуре 100 °С в течении 24 часов
	**СЖР-3	0	0	
	МВП	–67,0	–57,3	
	И-40А	0	0	
	Дизельное топливо	0	0	
Образец 2	СЖР-2	–13,0	–7,6	после выдержки при температуре 100 °С в течении 24 часов
	СЖР-3	–34,5	+17,6	
	МВП	–27,3	+7,6	
	И-40А	–25,0	+5,3	
	Дизельное топливо	–46,4	+43,8	

** – отечественный аналог IRM 902; ** – отечественный аналог IRM 903*

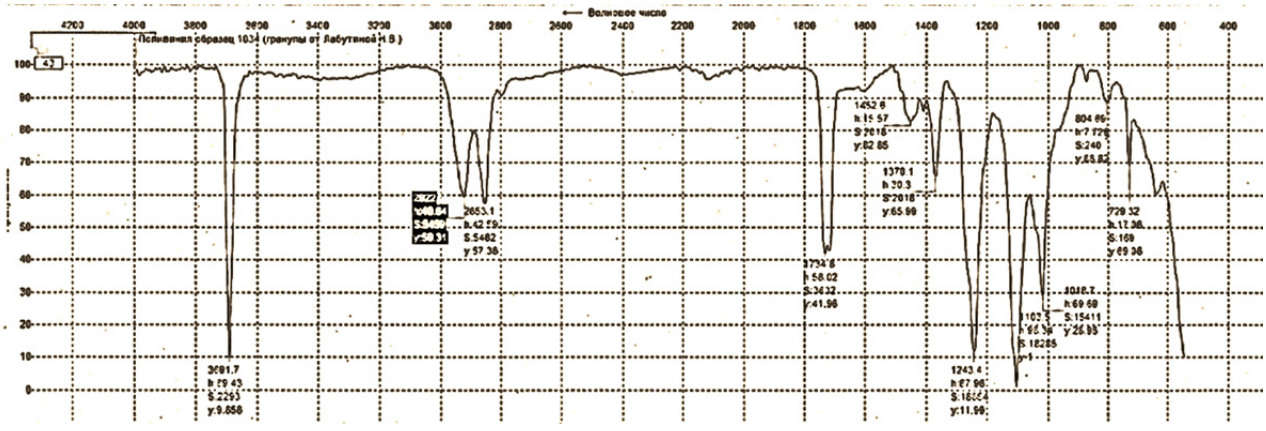


Рис. 1. Инфракрасный спектр импортного термопластичного компаунда (импортный образец)

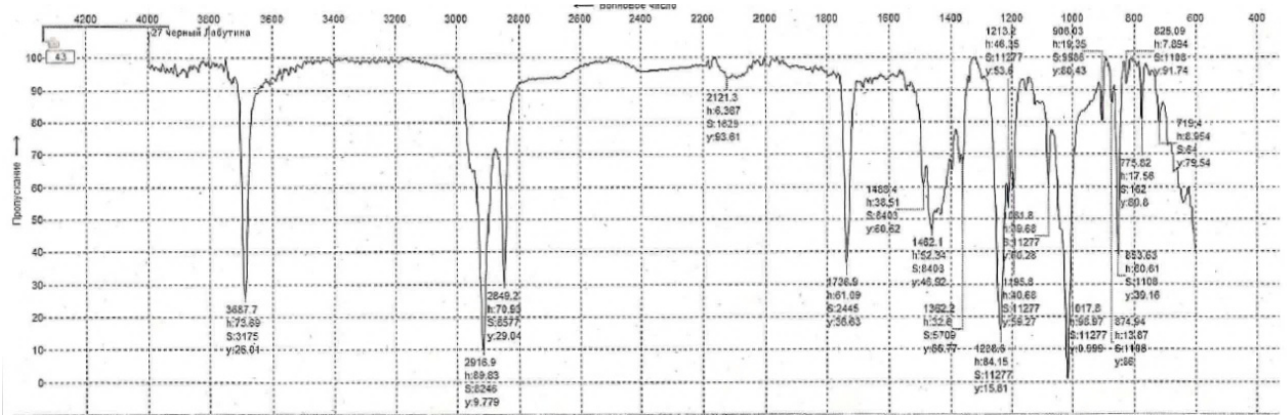


Рис. 2. Инфракрасный спектр отечественного термопластичного компаунда (Образец 1)

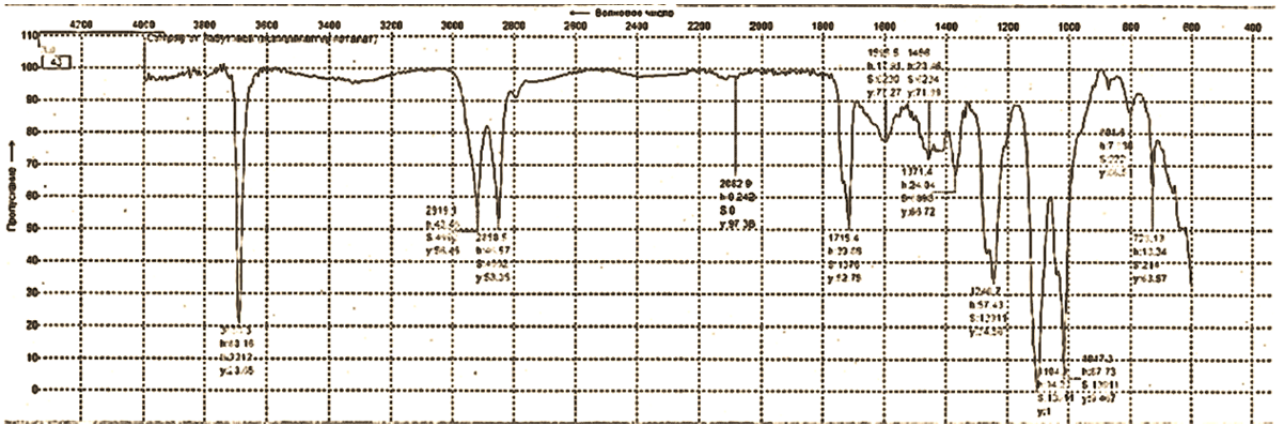


Рис. 3. Инфракрасный спектр отечественного термопластичного компаунда (Образец 2)

Материалы исследованных образцов оболочек в основном соответствует требованиям, предъявляемым к материалу оболочки для изготовления судовых кабелей. Образец 2 имеет наиболее близкий инфракрасный спектр к образцу импортного компаунда и хорошие показатели стойкости к маслам и дизельному топливу. В свою очередь, в исходном состоянии значения относительного удлинения при разрыве образца 1 значительно превышают значения относительного удлинения при разрыве образца 2, что говорит о способности материала выдерживать большое число изгибов при эксплуатации и прокладке кабеля, что важно в условиях ограниченного пространства кораблей.

Уровень и разброс полученных значений физико-механических характеристик отечественных термопластичных компаундов по сравнению с импортным свидетельствовал о необходимости проведения дальнейших работ по окончательной доработке рецептуры полимерных материалов.

В результате получены следующие итерации материалов, направленные на корректировку рецептуры для получения оптимальных физико-механических характеристик, стойкости к воздействию масел и дизельного топлива, негорючести материала. Испытания продолжаются.

Результаты проведенного специального анализа импортного безгалогенного термопластичного компаунда методом инфракрасной спектроскопии позволили наиболее достоверно определить рецептуру материала. Это дало возможность проводить работы для получения безгалогенного термопластичного компаунда на базе отечественного производства для дальнейшего применения материала в качестве оболочки судовых кабелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
2. ГОСТ IEC 60332-3-22–2011. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Часть 3–22. Распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей. Категория А. – М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.
3. Жульмина М.Д. Душкин Ю.В., Невмывака А.Н. О возможности применения безгалогенных полимерных материалов отечественного производства для судовых герметизированных кабелей // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. – 2023. – № 5(9).
4. Купцов А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – Москва: Техносфера, 2013. – 696 с. ISBN 978-5-94836-360-8.
5. Руководство и инструкция по эксплуатации инфракракрасного Фурье-спектрометра ФТ-801 с приставкой НПВО-для исследования малых образцов, со встроенной библиотекой спектров).

СВЯЗЬ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ В МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

К.С. Боронова, С.В. Шутемов

Забайкальский государственный университет,
Энергетический факультет, гр. ЭПм-22

Научный руководитель: И.Ф. Суворов, доктор технических наук,
профессор энергетического факультета ЗГУ

В любой машине переменного тока её нагрузка в процессе преобразования энергии характеризуется напряжением $\dot{U}$ основной электрической цепи и током $\dot{I}$ этой цепи. Чаще всего машины работают в режиме $\dot{U} = \text{const}$. В этом случае при изменениях нагрузки машины меняются только действующее значение тока $\dot{I}$ и его фаза по отношению к напряжению $\dot{U}$. Если этот процесс рассматривать графически в комплексной плоскости, то при $\dot{U} = \text{const}$ конец вектора тока $\dot{I}$ при изменениях нагрузки машины будет передвигаться по некоторой кривой *k*, причем каждой точке этой кривой будет соответствовать вполне определенная нагрузка машины. В зависимости от типа машины ее нагрузка может характеризоваться различно. В асинхронных машинах нагрузку связывают со скольжением *s* ротора, в некоторых типах коллекторных машин – со скоростью вращения *n*, в синхронных машинах – с углом ϑ между осью ротора и осью вращения магнитного поля и т. п. В общем случае будем считать, что нагрузка машины характеризуется величиной *p*.

При этих условиях для $\dot{U} = \text{const}$

$$\dot{I} = \psi(p) \qquad (1)$$

В комплексной плоскости этому равенству соответствует некоторая кривая *k*, которая обычно бывает замкнутой. В простейшем случае такой кривой может быть окружность.

Допустим, что сопротивление основной цепи машины равно $Z(p) = A + Bp$, где p – вещественная величина, а A и B – постоянные комплексные величины.

Ток в цепи машины будет равен

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{A+Bp}. \qquad (2)$$

Как известно из истории электрических цепей [1], уравнение (2) в комплексной плоскости представляет собой окружность, проходящую через начало координат. На рис. 2 показана прямая $Z(p)$ и окружность $\dot{I}(p)$. Когда модуль сопротивления становится минимальным ($0b_1$),

модуль тока $I = 0a_1$ имеет максимальное значение, чем определяется расположение на комплексной плоскости центра окружности O_1. Такая связь между точками а прямой и точками b окружности имеет место только в том случае, если мнимые оси для сопротивлений и токов имеют разные знаки [2]. В противном случае кривые $Z(p)$ и $\dot{I}(p)$ будут располагаться в сопряженных квадратах.

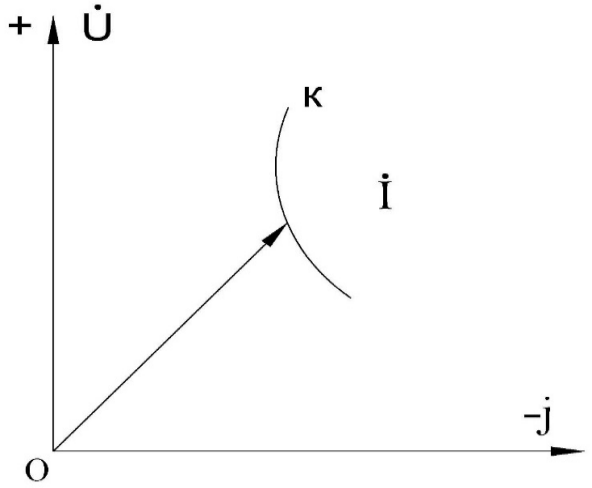


Рис. 1. Напряжения и ток основной цепи машины переменного тока

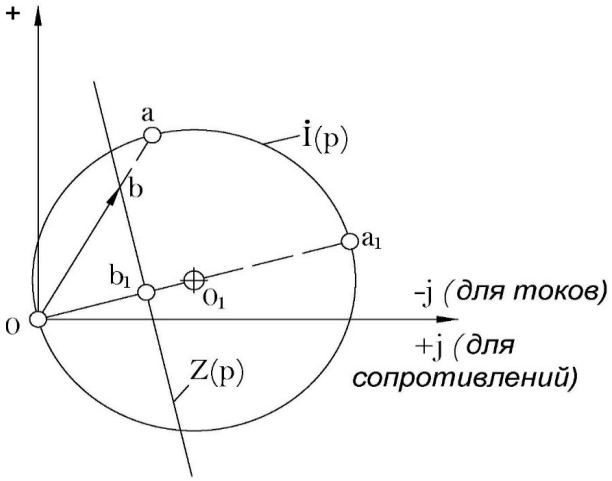


Рис. 2. Кривые $Z(p)$ и $\dot{I}(p)$ в комплексной плоскости

Если у току $\dot{I}(p)$ добавить ток $\dot{I}_0$, не зависящий от нагрузки, то

$$\dot{I}(p) = \dot{I}_0 + \frac{\dot{U}}{A+Bp} = \frac{C+Dp}{A+Bp}, \quad (3)$$

где $C = \dot{U} + A\dot{I}_0$; $D = B\dot{I}_0$.

Уравнение (3) представляет собой уравнение окружности в общем случае при любом ее расположении относительно начала комплексных координат (рис. 3).

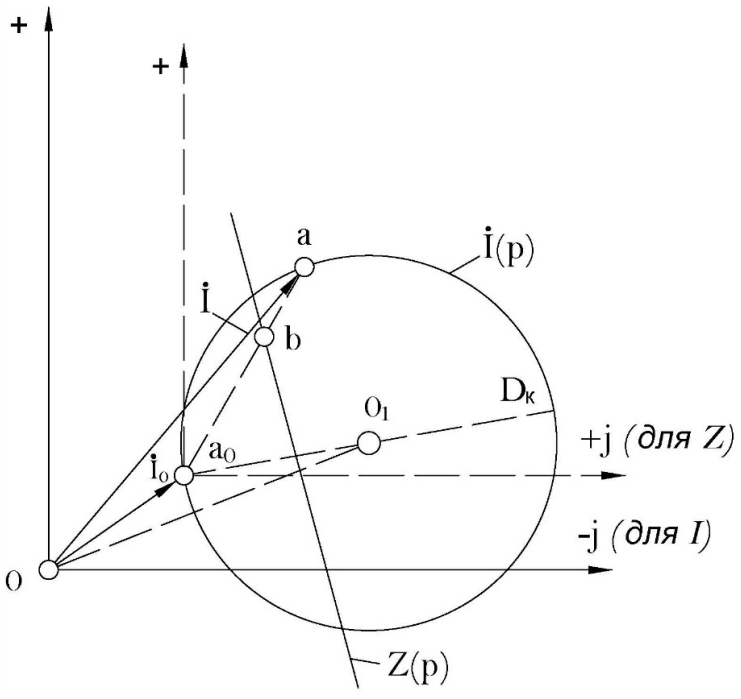


Рис. 3. Окружность $\dot{I}(p) = \frac{C+Dp}{A+Bp}$.

Если в правой части уравнения (3) числитель и знаменатель разделить на D, то получим:

$$\dot{I}(p) = \frac{C_1 + p}{A_1 + B_1 p}. \quad (4)$$

Из этого уравнения следует, что в общем случае окружность $\dot{I}(p)$ определяется тремя комплексными постоянными: A_1, B_1 и C_1, что подтверждается известным положением об однозначном проведении окружности через три точки.

Уравнения для тока асинхронных бесколлекторных и коллекторных машин определяются равенством (3). Поэтому проанализируем это уравнение более подробно.

Рассмотрим, как связаны диаметр окружности $D_к$ (рис. 3) и положение центра окружности O_1 с постоянными величинами *A* и *B* в уравнении (3).

Диаметр $D_к$ соответствует максимальному значению тока $a_0 a = \left|\frac{\dot{U}}{A + Bp}\right|$, то есть минимальному значению сопротивления $|A + Bp| = \sqrt{(A' + B'p)^2 + (A'' + B''p)^2}$, где $A = A' + jA''$ и $B = B' + jB''$. Приравнивая первую производную по p этой функции нулю, найдем, что ток $a_0 a$ максимален при:

$$p = p_к = -\frac{A'B' + A''B''}{B^2}; \quad (5)$$

поэтому

$$D_к = \frac{U}{(A' + B' p_к)^2 (A'' + B'' p_к)^2}. \quad (6)$$

Положение центра O_1 окружности определяется из равенства (3) вектором:

$$O_1 = \dot{I}_0 + \frac{\dot{U}}{2(A + B p_к)}. \quad (7)$$

Часто в машинах при широком изменении параметров нагрузки *p* величины A, B, C и D в уравнении (3) не остаются постоянными вследствие изменения насыщения отдельных частей магнитной системы. В этом случае конец вектора тока $\dot{I}$ передвигается по замкнутой кривой, несколько отличной от окружности. Однако в определенных интервалах кривую $\dot{I}(p)$ все же можно рассматривать как дугу соответствующей окружности [3].

В некоторых машинах, например в асинхронных машинах с двумя обмотками на роторе или в синхронных явнополюсных, функция тока $\dot{I}(p)$ представляет собой более сложную замкнутую кривую, являющуюся сочетанием двух окружностей:

$$\dot{I}(p) = \frac{C_1 + D_1 p}{A_1 + B_1 p} + \frac{C_2 + D_2 p}{A_2 + B_2 p}. \quad (8)$$

Приведя правую часть к общему знаменателю, получим:

$$\dot{I}(p) = \frac{D + Ep + Fp^2}{A + Bp + Cp^2}, \quad (9)$$

где A, B, C, D, E и F – постоянные комплексные величины.

Кривую, по которой в этом случае передвигается конец вектора тока $\dot{I}$ в комплексной плоскости, называют иногда бициркулярным квартиком, подчеркивая этим названием, что кривая замкнута, представляет собой сочетание двух окружностей и может рассматриваться в общем случае как кривая 4-го порядка в противоположность уравнению (3), представляющему собой кривую 2-го порядка.

На рис. 4 показано образование кривой 4-го порядка в результате суммирования двух векторов: $\dot{I}(p) = \dot{I}_1(p) + \dot{I}_2(p)$, каждый из которых передвигается по окружности.

Уравнениями (3) и (9) охватывается подавляющее большинство случаев, с которыми приходится иметь дело при анализе работы машин переменного тока. Таким образом взаимосвязь зависимостей, которые характеризуются напряжением $\dot{U}$ основной электрической цепи и током $\dot{I}$ этой цепи при изменении нагрузки выявлена и исследована.

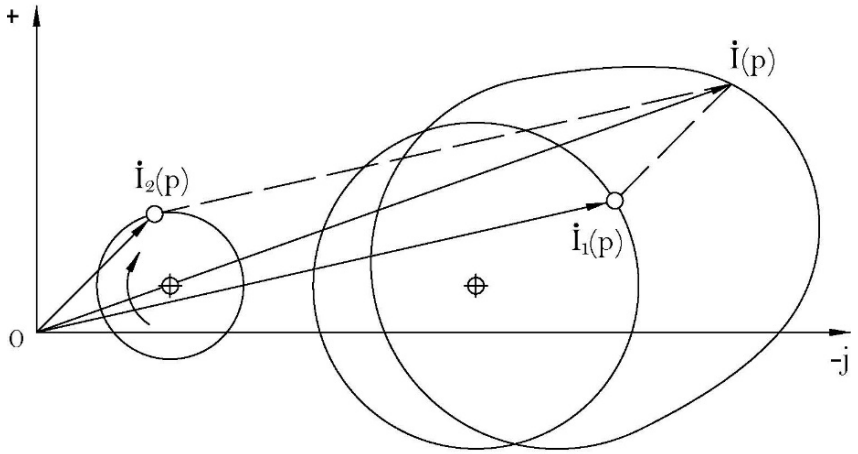


Рис. 4. Образование кривой 4-го порядка в результате суммирования двух векторов, передвигающихся по окружности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзин А.М., Коротаев. А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637
2. Klyuchnikov A., Korotaev A., Shutemov S. Modeling of a cylindrical linear AC electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2013. – No. 11. – P. 606–609.
3. Shulakov N., Shutemov S. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2014. – No. 11. – P. 18–22.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ И КОНТАКТНЫХ ГРУПП СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Ю.Г. Абрамова

Казанский государственный энергетический университет

Научный руководитель: А.М. Гатауллин, к.т.н., доцент КГЭУ

В статье рассмотрены основные методы диагностики межвитковой изоляции силовых трансформаторов. Предложен программно-аппаратный комплекс для диагностики межвитковой изоляции изоляции и контактных групп силовых трансформаторов цифровых подстанций.

Ключевые слова: мониторинг изоляции силовых трансформаторов, метод частичных разрядов, диагностика оборудования станций и подстанций.

Как известно, мониторинг работоспособности оборудования современных станций и подстанций, особенно цифровых посдстанций нового поколения, в том числе силовых трансформаторов, является актуальной проблемой [1]. Работоспособность и срок службы силового трансформатора обусловлена состоянием всех его узлов, в первую очередь состоянием жидкостной изоляции (трансформаторного масла, элегаза), состоянием вводов трансформатора, магнитопровода, состоянием контактных групп, сопротивления межвитковой изоляции. На традиционных подстанциях старого поколения состояние трансформаторного масла проверяют по ряду параметров, самый важный из них – пробивное повышенное напряжение.

Для этого проводят периодические испытания трансформаторного масла в лабораторных условиях. На цифровых подстанциях, которые обычно являются элегазовыми, важно диагностировать функциональное состояние изоляции в режиме мониторинга. На цифровых подстанциях нового поколения метод регистрации и анализа характеристик частичных разрядов в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне [2] электромагнитного излучения [3] является основным для диагностики изоляции узлов силового трансформатора. Для оценки состояния бака и вводов трансформатора также применяется тепловизионный контроль по инфракрасному спектру электромагнитного излучения, которое может быть связано с дефектами в наружных контактных группах и частичными разрядами в масле трансформатора. Для оценки омического сопротивления вводов трансформатора применяется метод мегаомметра, который возможно применить только при отключенном приложенном напряжении, если оно превышает 10 кВ. Сопротивление опорных изоляторов на которые устанавливаются силовые трансформаторы, также определется мегаомметром. В связи с тем, что сопротивление силовых трансформаторов большой мощности можно определить только отключив приложенное напряжение, в последнее время опорные изоляторы диагностируют комбинируя несколько методов, например, совместно применяют метод частичных разрядов [4] и виброконтроль. Самые новые исследования показали, что по характеристикам частичных разрядов можно оценить пробивное напряжение изоляции [5]. Тепловизионный контроль силовых трансформаторов применяется как вспомогательный метод диагностики, который наряду с традиционными методами (измерение омического сопротивления изоляции, тока холостого хода, хроматографический анализ газового состава в масле и др.) дает дополнительную информацию о состоянии силовых трансформаторов. Тепловизионный контроль силовых трансформаторов показал, что с его помощью можно выявить нарушения изоляции отдельных элементов трубопровода, например, консолей, шпилек, нарушение работы систем охлаждения (масляных насосов, фильтров, вентиляторов и т. п.), изменение циркуляции масла в баке трансформатора в результате шлакообразования, конструктивных нарушений, вздутия или смещения изоляции обмоток (особенно для трансформаторов с длительным сроком службы), нагрев внутренних контактных групп трансформатора, замыкания межвитковой изоляции. Отметим, что тепловизионный метод имеет ограничения по чувствительности, поэтому при нарушении, например, межвитковой изоляции этот метод не работает.

Современные оптоволоконные датчики температуры Neoptix на базе GaAs, внедряемые внутрь трансформатора на этапе размещения заказа на заводе, или на этапе капитального ремонта, способны определять нагрев во внутренних контактных группах с точностью до 0,1°. Эти же оптоволоконные датчики чувствительны к частичным разрядам величиной менее 1 пКл. В работе предлагается применить метод частичных разрядов с регистрацией в УВЧ диапазоне электромагнитного излучения для определения наиболее нагретой точки в баке трансформатора в режиме мониторинга с одновременной регистрацией температуры и частичных разрядов оптоволоконными датчиками. Вокруг трансформатора предполагается расположить несколько датчиков УВЧ диапазона электромагнитного излучения и вычислять место повреждения внутри трансформатора по смещению спектра электромагнитного излучения в УВЧ область. Для мониторинга силового трансформатора разработан программно-аппаратный комплекс на основе восьми приемников УВЧ диапазона электромагнитного излучения, восьми оптоволоконных датчиков Neoptix и компактного микропроцессорного устройства. Мониторинг характеристик частичных разрядов позволит определять повреждения внутри трансформатора на ранних этапах их возникновения, что важно для цифровых подстанций нового поколения. В будущем такую систему можно будет устанавливать без оптоволоконных датчиков, что актуально для цифровых подстанций нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems // В сб.: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – 2019. – P. 1–4.
2. Gataullin A.M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in UHF range of electromagnetic radiation // В сб.: Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2020. – P. 1–5.
3. Gataullin A.M. Recording and processing of partial discharge signals // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – V. 57, no. 4. – P. 426–430.
4. Gataullin A.M. High voltage electrical insulators diagnostics by partial discharges characteristics // В сб.: Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – 2020. – P. 426–430.
5. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage // В сб.: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – 2019. – P. 35–39.

РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И РЕМОНТА ЛЭП ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Е.Д. Малаева[1], Р.Р. Давлетшин[2]

Казанский государственный энергетический университет,
ПЭ, гр. ПЭ-2-20[1], аспирант КГЭУ[2]

Научный руководитель: М.Ф. Садыков, д.т.н., профессор каф. ТОЭ КГЭУ

Роботизированные комплексы для мониторинга и ремонта линий электропередач (ЛЭП) под напряжением играют важную роль в современной энергетике. В данной статье мы рассмотрим различные устройства этого типа, их функции и преимущества.

Роботизированные комплексы представляют собой специализированные механизмы, способные осуществлять работу на ЛЭП без отключения электропитания. Такие устройства позволяют существенно увеличить эффективность процессов обслуживания и ремонта линий электропередач, а также повысить безопасность работников [1–3].

Одним из наиболее распространенных роботизированных комплексов для мониторинга ЛЭП является робот-инспектор. Его основная задача заключается в обнаружении повреждений на опорах, проводах и других элементах ЛЭП. Робот-инспектор оборудован видеокамерами, тепловизорами, ультрафиолетовыми камерами, лазерными сканерами и другими датчиками, позволяющими проводить детальную диагностику и контроль состояния линий.

Для ремонта ЛЭП под напряжением применяются специальные роботы-манипуляторы. Они обладают гибкими механическими конструкциями и могут выполнять различные операции, такие как замена изолирующих элементов, ремонт проводов и опор, установка и снятие разделителей и т. д. Роботы-манипуляторы оснащены специальной изоляционной оболочкой и электрическими датчиками, которые обеспечивают безопасность оператора и надежность работы устройства.

Важным преимуществом робототизированных комплексов является возможность выполнения работ на ЛЭП без отключения электропитания. Это позволяет существенно сократить время процесса и избежать перерывов в энергоснабжении, что особенно важно для крупных городов и промышленных предприятий. Благодаря использованию робототехники, работы по обслуживанию и ремонту ЛЭП становятся более эффективными и экономически выгодными.

а *б*

Рис. 1. Прототип роботизированного комплекса, разработанного в КГЭУ: а – внешний вид прототипа, б – фото с камеры прототипа

В лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ» мы разработали прототип роботизированного комплекса, который представляет собой каретку, питаемую от аккумуляторных батарей и перемещающуюся по проводу с помощью роликов (рис. 1). На прототип была установлена видеокамера для съемки провода. Прототип успешно прошел 50 метров по испытательному проводу АС-120. Управление осуществлялось по радиоканалу. Устройство планируется оснастить режущими устройствами из металла высокой прочности, либо специальным роликовым приспособлением, взламывающими за счет толкающих усилий каретки гололедную муфту, освобождая провод от гололедно-изморозевых отложений.

Таким образом, роботизированные комплексы для мониторинга и ремонта ЛЭП под напряжением являются важным инновационным средством в энергетике. Они позволяют проводить работу на ЛЭП без отключения электропитания, повышая эффективность и безопасность процесса. Развитие и применение таких устройств вносит существенный вклад в развитие современной энергетики и обеспечение энергетической безопасности.

Исследования выполнены в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет2030»: соглашение №075–15-2021-1087 от 30.09.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1278203 A1 СССР, МПК B25J 13/00. Устройство для управления робототизированным комплексом : № 3951781 : заявл. 23.07.1985 : опубл. 23.12.1986 / Е.М. Карпов, А.Л. Цибер, С.И. Чаплыгин [и др.] ; заявитель Куйбышевский ордена трудового красного знамени политехнический институт им. В.В.Куйбышева.
2. Кропотова Н.А., Теньковский П.А. Использование робототехнических управляемых комплексов для предупреждения опасной обстановки // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2020. – С. 348–352.
3. Платформа для обслуживания // Copyright 2021. URL: https://cablewalker.com/tech/spider (дата обращения: 20.10.2023)

ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.Ю. Жегалин

Ульяновский государственный технический университет,
ЭФ, кафедра ЭиАПУ, гр. ЭАмв-31

Научный руководитель: Я.К. Старостина к.т.н., доцент кафедры ЭиАПУ

Одним из основополагающих факторов, обеспечивающих устойчивое действие общей электроэнергетической системы каждого предприятия, представляется стабильная работа системы электроснабжения. На качество и бесперебойность такой работы непосредственным образом воздействует множество факторов, среди которых важнейшим является функционирование устройств плавного пуска асинхронных электродвигателей. В частности, на данный момент является крайне актуальной проблема пуска асинхронных электродвигателей (далее – АД) с короткозамкнутым ротором при помощи прямого включения его в сеть. Устранить данную проблему могут устройства плавного пуска [1].

Влияние рассматриваемых устройств на общую структуру работы системы электроснабжения трудно переоценить, поскольку устройства плавного пуска предотвращают быстрый выход из строя асинхронных электродвигателей. Основополагающими признаками, воздействующими на срок эксплуатации прибора, являются частота пусков, паспортные данные, тип нагрузки электродвигателя.

Сейчас все чаще и чаще промышленные предприятия используют их. Это крайне актуально с учетом того, что в настоящее время любое предприятие хочет быть успешным на своем конкурентном рынке. Следовательно, каждый день руководству надо задумываться о том, как упрочить свои конкурентные преимущества и устранять соответствующие недостатки.

С учетом рассматриваемой ситуации обязательным условием является реализация процесса моделирования. Стоит отметить, что в настоящем исследовании была сформирована имитационная модель традиционной схемы электрического снабжения. Данная модель будет включать активных потребителей энергии. Все это требуется для эффективного прогнозирования и анализа структуры динамического моделирования в Матлаб. Все АД, задействованные в проводимом эксперименте, будет равны между собой (АД ВРП160М4 – 30 кВт). Актуальные участки сети принимает равной длины, соответственно, все присутствующие сопротивления будут также эквивалентны друг другу. Сеть здесь является ветвляющейся, а сама модель отражена на рис. 1.

Что касается рассматриваемой модели системы, представленной на рис. 1, то здесь необходимо отметить, что все существующие там модули довольно близко по своему визуальному компоненту к принципиальной электрической схеме традиционной системы электроснабжения. Ввиду непрерывной работы устройства плавного пуска двигатель AD_1 может питаться от сети. Остальные AD в любом случае питаются от обычных пусковых устройств.

В данном случае нужно кое-что пояснить по рис. 2. Прежде всего, необходимо сказать о том, что целью реализуемого эксперимента является поэтапное движение, связанное с запуском двигателей, в определенные временные вехи, которые далее описаны цикличным образом. AD_2 начинает работать через 0,05 с после того, как начался эксперимент. Соответственно, AD_3 начинает работать через 0,25 с; AD_1 – через 0,45 с (причем запускается он по технологии плавного пуска), AD_4 – через 0,6 с (причем запускается он по технологии DOL).

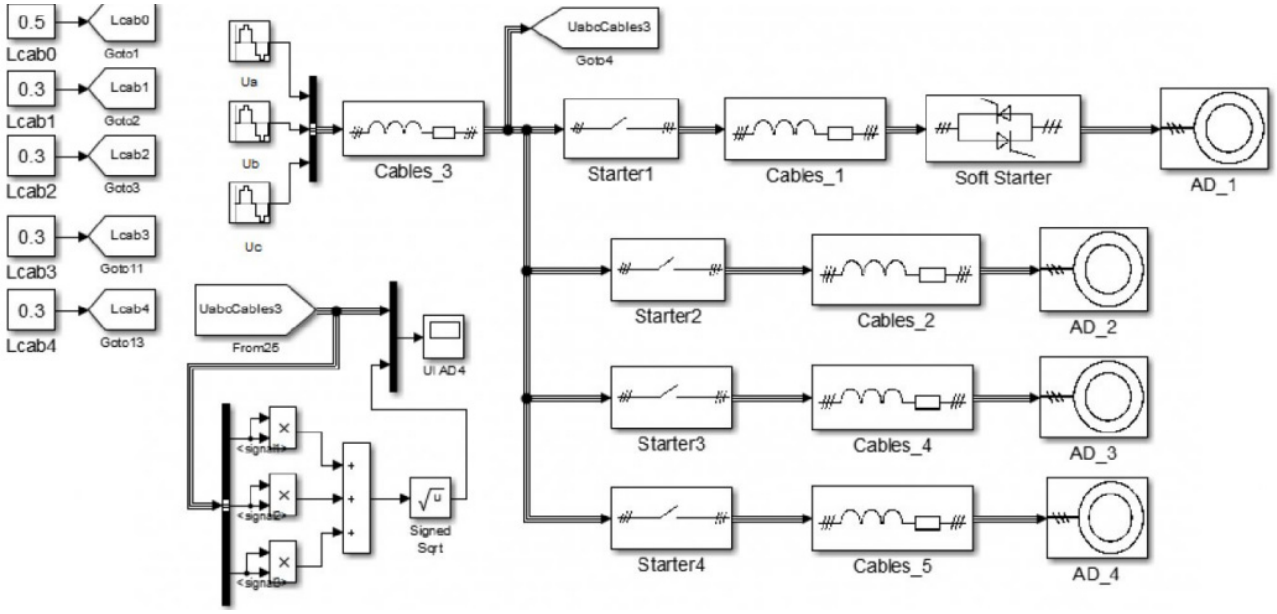


Рис. 1. Модель разветвленной системы электроснабжения

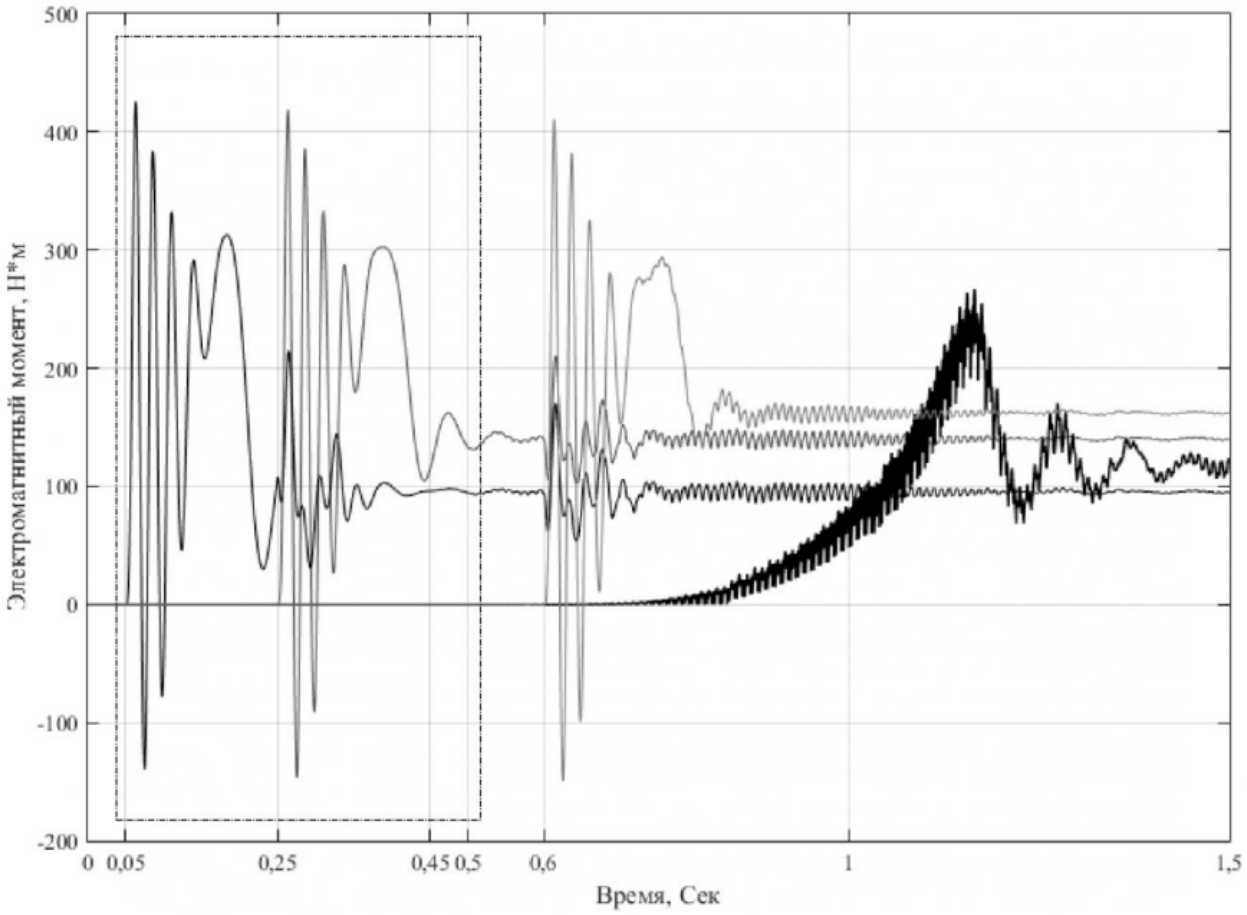


Рис. 2. Диаграммы электромагнитных моментов

В данном случае имеет место комплексная система функционирования, т. е. здесь каждый элемент может оказать прямое или косвенное воздействие на степень работы всей структуры в целом. По наличествующим взаимосвязям можно говорить об эффективности работы системы электроснабжения. Здесь налицо процесс формирования общего объекта кабельной

сети. Каждый двигатель схемы будет влиять на работу системы. Под такое же влияние попадают и рядом находящиеся АД, т. к. их мощности приблизительно эквивалентна.

На рис. 2 представлен график динамики электромагнитных моментов АД. Подобные моменты актуализируются в том эксперименте, который проводится в настоящем исследовании.

Здесь нужно четко установить, что механические приводные составляющие при начале работы по технологии DOL подвергаются разным влияниям, имеющим негативную природу. Так, знакопеременные колебания момента с амплитудой, значение которой по модулю является больше номинальной характеристикой электромагнитного момента как минимум в 3–4 раза, попадают под рассматриваемое воздействие.

Также двигатель, будучи в пусковой настройке, воздействует на вектор направления изменения электромагнитного момента двигателя, который не работает, будучи почти остановленным. В настоящем исследовании это влияние AD_3 на AD_2. AD_2 находится в состоянии ускорения, что показано штрихпунктирной линией на рис. 2 [3].

На рис. 3 в том же самом промежутке времени представлено изменение питающего напряжения (показаны мгновенные значения в любой фазе и соответствующее значение амплитуда напряжения, имеющего векторную величину).

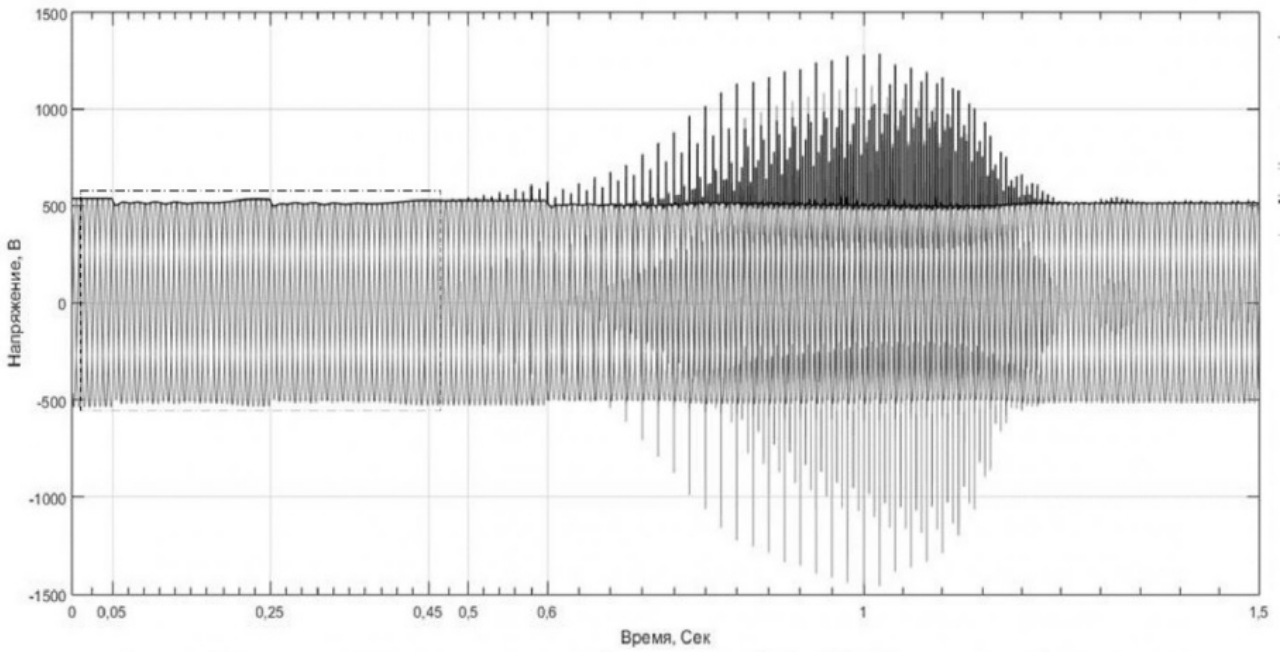


Рис. 3. Диаграммы мгновенных значений напряжений и амплитудное значение вектора напряжения

Важным фактором является то, что существующие совокупности рассматриваемых перенапряжений могут являться источником риск пробоя для изоляции. Причем такая изоляция будет касаться не только какого-либо участкам системы, а всей структуры электроснабжения в целом. Отмечается, что наиболее «узким» местом в существующей системе, подверженным риску пробоя изоляции, являются лобовые части статорных обмоток АД. Это продиктовано тем, что они, будучи интегрированными в систему, являются довольно подвижными. Риск пробоя однозначно растет, если в функционирующей системе электроснабжения последовательным образом запускаются сразу несколько АД. Тогда самый неблагоприятный режим запуска будет иметь место у AD_4, поскольку он, функционируя по прямой технологии в режиме пуска, подвержен всем отрицательным негативным воздействиями, имеющим удар-

ный характер. Подобное наслоение негативных воздействий может быть источником своеобразной «негативной синергии».

Несимметрия, которая вызывается разрывами питающей цепи в режиме плавного пуска АД, сопровождается возникновением разнообразных пульсаций величины электромагнитного момента электродвигателя, отрицательным образом влияющая на функционирование близлежащих потребителей [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – 180 с.
2. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением / В.А. Шубенко, И.Я. Браславский. – М.: Энергия, 2020. – 101 с.
3. Гизатуллин Р.М., Павлова Э.И., Мухаммадиев А.А. Помехоустойчивость вычислительной техники при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания // Вестник КГЭУ. – 2019. – № 3 (43). – С. 87–98.
4. Калинин А.Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Чебоксары 2011. – 220 с.

ОЦЕНКА РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ ПО ЧАСТОТЕ ПРИ РОСТЕ МОЩНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

М.Е. Блинников

Сибирский федеральный университет,
ФЭ, ЭЭ, аспирант

Научный руководитель: В.И. Пантелеев, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой электроэнергетики ПИ СФУ

Широкое внедрение частотного электропривода и распространение преобразовательной техники послужили основанием для актуальной оценки регулирующего эффекта нагрузки по частоте в энергосистеме.

Регулирующим эффектом нагрузки по частоте является отношение изменения мощности потребления к изменению частоты или удельное изменение мощности потребления при изменении частоты [1]:

$$\frac{\Delta P_{*\text{н}}}{\Delta f_*} = k_{\text{н}} . \qquad (1)$$

Условно потребителей выделяют в пять групп по зависимости их мощности потребления от отклонения частоты, начиная с нулевой группы n=0, при которой мощность потребления не зависит от частоты, до четвёртой n=4, при которой мощность потребления зависит от изменения частоты в четвёртой степени.

Для России регулирующий эффект лежит в пределах 1–3, для отдельных потребителей он равен номеру группы.

Приблизительно регулирующий эффект нагрузки может быть определён как

$$k_{\text{н}} \cong \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 4\alpha_4 , \qquad (2)$$

где α_i – доля эквивалентной мощности потребителей i-й группы в общей нагрузке потребителей энергосистемы.

Как видно из выражения, нулевая гр. участия в формировании $k_{\text{н}}$ не принимает, но это суждение ошибочно. Поскольку чем больше потребителей нулевой группы и больше доля α_0,

тем меньше долевого участия придётся на оставшиеся группы. Потребители нулевой группы представляют собой приёмники, мощность которых не зависит от частоты: осветительная нагрузка, электропечи, электрифицированный транспорт и другие приёмники, питаемые через преобразовательную технику.

Эквивалентная мощность приёмников, получающих питание через преобразовательную технику, резко увеличилась в начале XXI века. Почти вся бытовая техника питается через выпрямители, стабилизаторы напряжения и другие преобразовательные устройства. Несмотря на то, что класс энергоэффективности электроприборов повышается, резкое увеличение жилого фонда и квартир малой площади, приводит к росту бытовой нагрузки и нагрузки нулевой группы. Кроме того, в промышленности стал активно использоваться регулируемый электропривод на основе преобразовательной техники. Речь не только о станках, но и об электротранспорте и насосах подкачивающих насосных станций. Также стремительно возрастает число и совокупная мощность центров обработки данных, которые увеличивают нагрузку нулевой группы.

За последние пять лет совокупная установленная мощность электродвигателей подкачивающих насосных станций г. Красноярска увеличилась с 65 до почти 72 МВт, доля мощности электродвигателей, подключённых через частотные преобразователи возросла от 11,9 до 18 МВт. Тем самым, доля частотного электропривода увеличилась с 18 до 25 %. Считая, что все насосы относятся к третьей группе потребителей, при которой мощность потребления зависит от изменения частоты в третьей степени, оценка регулирующего эффекта нагрузки по частоте говорит, что для данной группы насосов он снизился с 2,45 до 2,25, то есть на 8,3 %.

Принято решение оценить регулирующий эффект нагрузки по частоте для Центрального энергорайона энергосистемы Красноярского края и республики Тыва. Данный энергорайон практически полностью соответствует системе электроснабжения г. Красноярска, г. Дивногорска, г. Сосновоборска и г. Железногорска, включает в себя крупных промышленных потребителей и такие объекты генерации как Красноярская ГЭС, Красноярская ТЭЦ-1, Красноярская ТЭЦ-2 и Красноярская ТЭЦ-3. Оценка регулирующего эффекта производилась для максимального режима на основании зарегистрированной максимальной мощности предприятий [2, 3] и анализе краевого годового энергопотребления [4] за последние пять лет.

Для определения максимальной мощности потребления населением рассчитана средняя годовая мощность потребления по краю. Затем сделано допущение о том, что потребление городов, входящих в рассматриваемый энергорайон, пропорционально численности их населения, и определена средняя годовая мощность потребления населением внутри энергорайона как доля от краевого среднего потребления в соответствии с соотношением населения края и рассматриваемых населённых пунктов. Для определения максимальной мощности определён средний коэффициент максимума нагрузки $K_{\text{М}}$=1,567 путём анализа суточных графиков нагрузки летних и зимних месяцев крупной подстанции 110 кВ г. Красноярска, питающей жилые массивы. Для остальных нагрузок, определяемых через энергопотребление, коэффициент максимума не использовался, расчёт вёлся по средним значениям. Однако было сокращено число часов использования: для сферы строительства с 8 ч утра до 22 ч вечера, для сферы торговли с 10 ч утра до 20 ч вечера, для городского электротранспорта с 6 ч утра до 23 ч вечера. Также принято, что краевое потребление городского электротранспорта полностью приходится на г. Красноярск, а при расчёте мощности потребления в сфере строительства рассмотрен только г. Красноярск путём сравнения общей сданной площади жилья в крае [5] и столице региона [6]. Оценка максимального потребления собственных нужд электростанций выполнена в соответствии с их однолинейными схемами, данными из открытых источников [7] и справочными данными из учебных материалов [8].

В табл. 1 приведена сводная информация по собранным нагрузкам и мощность двигательной нагрузки $P_{ДВ}$, подключённой без электропреобразовательных устройств. В результате расчёта по формуле (2) регулирующий эффект нагрузки оказался равен $k_Н$=0,28, что меньше средних типовых пределов 1–3 в учебных и методических материалах [1].

Снижение регулирующего эффекта нагрузки по частоте приводит к тому, что одно и то же отклонение частоты достигается при меньшем изменении мощности потребления:

$$\Delta P = k_{\text{н}} \Delta f \frac{P_{\text{баз}}}{f_{\text{баз}}}, \quad (3)$$

где ΔP и Δf – изменение потребления и частоты в МВт и Гц, соответственно, $P_{\text{баз}}$ и $f_{\text{баз}}$ – базисные параметры, за которые примем суммарную мощность потребления P_Σ (табл. 1) и номинальную частоту 50 Гц.

Для регулирующего эффекта равного 0,28 при допустимом отклонении частоты 0,2 Гц [9] соответствующее изменение потребления составило 4,87 МВт, а при регулирующем эффекте нагрузке 1,0 изменение потребление было бы равно 17,34 МВт, то есть в 3,56 раза больше.

Таким образом, широкое внедрение преобразовательной техники приводит к снижению регулирующего эффекта нагрузки по частоте, что отрицательно сказывается на демпфировании колебаний частоты самой энергосистемой. Данная ситуация усложняет регулирование частоты и требует большей чувствительности и совершенствования алгоритмов управления регулирующих устройств и систем.

Таблица 1. К расчёту регулирующего эффекта нагрузки по частоте

Название потребителя	P, МВт	$P_{дв}/P$, о.е.	$P_{дв}$, МВт	n	α, о.е.	$n\cdot\alpha$, о.е.	P/P_Σ, %
АО «РУСАЛ Красноярск»	2038	0,08	163,04	1	0,0376	0,0376	47,0
Красноярская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»	649	–	–	–	–	–	15,0
Электрокотельная «Левобережная»	91	0,1	9,1	3	0,0021	0,0063	2,1
Электрокотельная «Западная»	60	0,1	6	3	0,0014	0,0042	1,4
ООО «КраМЗ-ТЕЛЕКОМ»	56	0,3	16,8	1	0,0039	0,0039	1,3
Муниципальное унитарное предприятие электрических сетей, г. Дивногорск с прилегающими посёлками	60	–	–	–	–	–	1,4
АО «КрасЭКо»	55	–	–	–	–	–	1,3
Электрокотельная «ТПК»	30	0,1	3	3	0,0007	0,0021	0,7
АО «Красноярская теплотранспортная компания»	61,1	–	45,1	3	0,0104	0,0312	1,4
ООО «КрасКОМ»	22	0,8	17,6	3	0,0041	0,0122	0,5
ООО «Красноярский цемент»	21	0,5	10,5	1	0,0024	0,0024	0,5
ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова»	16	0,3	4,8	1	0,0011	0,0011	0,4
АО «Красноярский машиностроительный завод»	15	0,5	7,5	1	0,0017	0,0017	0,3
Собственные нужды Красноярской ТЭЦ-1	98	0,97	95	3	0,0153	0,0460	2,3
				4	0,0066	0,0263	
Собственные нужды Красноярской ТЭЦ-2	77	0,97	75	3	0,0121	0,0363	1,8
				4	0,0052	0,0208	
Собственные нужды Красноярской ТЭЦ-3	60	0,97	58	3	0,0107	0,0321	1,4
				4	0,0027	0,0107	
Собственные нужды Красноярской ГЭС	25	0,70	17,5	1	0,0040	0,0040	0,6
Потребление населением, г. Красноярск, г. Железногорск, г. Сосновоборск	285,6	–	–	–	–	–	6,6
Прочие виды экономической деятельности	52	–	–	–	–	–	1,2
Центры обработки данных	86	–	–	–	–	–	2,0
Строительство	92,5	0,1	9,3	1	0,0021	0,0021	2,1
Трамвай и троллейбус	3,82	–	–	–	–	–	0,1
Торговля	105,5	–	–	–	–	–	2,4
Потери электроэнергии	274,6	–	–	–	–	–	6,3
Итого P_Σ	4334,1	–	–	–	$k_н$	0,2811	–

Поскольку значение преобразовательной техники и частотного электропривода не подвергается сомнению, возможным решением проблемы представляется введение в силовые преобразователи алгоритмов синтетической инерции и использование накопителей энергии в составе обратимых накопителей энергии (ОНЭ). Вариантами реализации являются как замена преобразователей частоты на существующих электроприводах, так и внедрение преобразователей с синтетической инерцией в составе ОНЭ на трансформаторных подстанциях жилых и общественных зданий. Стабилизация частоты с помощью нагрузок жилых и общественных зданий актуальна для менее промышленных районов и не так эффективна для рассматриваемого случая, так как почти половина всего потребления энергорайона обусловлена нагрузкой алюминиевого завода, однако и в рассмотренном случае данное решение позволит увеличить регулирующий эффект до 0,48, а при вовлечении торгово-экономической сферы и электротранспорта возможно увеличение регулирующего эффекта до 0,85.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. – СПб. : Папирус, 2001. – 387, с. : ил.
2. Обосновывающие материалы. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2024–2029 годы. Энергосистема Красноярского края и республики Тыва. Книга 1 Красноярский край. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/support_materials/2023/23_Krasnojarskii_krai.pdf
3. Распоряжение Губернатора Красноярского края от 29.04.2022 № 246-рг «Об утверждении Схемы и программы перспективного развития электроэнергетики Красноярского края на период 2023-2027 годов». URL: http://www.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/22936_246_rg.pdf
4. Единая межведомственная информационно – статистическая система (ЕМИСС). URL: https://www.fedstat.ru/
5. В Красноярске выросло строительство жилья и высоток // Краевое общественно-деловое издательство ДЕЛА.ru. URL: https://dela.ru/news/250436/
6. Красноярск застроили сверх плана // Краевое общественно-деловое издательство ДЕЛА.ru. URL: https://dela.ru/articles/249321/
7. Сколько электричества нужно для работы ТЭЦ? // СГК Online. URL: https://sibgenco.online/news/element/skolko-elektrichestva-nuzhno-dlya-raboty-tets/
8. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций – 10-е изд., стер. – М.: Академия, 2013. – 448 с.
9. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

ПАССИВАЦИЯ И УДАЛЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ

Е.Р. Иванкив

Казанский государственный энергетический университет

Научный руководитель: Р.Р. Вилданов, к.т.н, доцент КГЭУ

Современная и технологичная система теплоснабжения обеспечивает теплом различных потребителей: от оживленных мегаполисов до уютных самобытных поселков. Снабжение от теплоэлектростанций и крупных источников тепла обходится дешевле, чем вырабатываемое в индивидуальных маломощных котельных. У систем теплоснабжения есть много преимуществ, включая повышенную энергоэффективность, снижение затрат на жизненный цикл и повышенный контроль за воздействием на окружающую среду [1, 2].

Система теплоснабжения имеет длительный период застоя в связи с строительством многочисленных жилых объектов и инфраструктуры, а также в связи с: сезонными колебаниями

спроса (чем выше температура на улице, тем ниже спрос на теплоснабжение), техническими проблемами, ремонтными работами и т. д. Кроме того, продолжаются работы по техническому обслуживанию и усовершенствованию. В течение этого периода трубопровод в системе отопления подвергается воздействию низкотемпературной воды с небольшим расходом или вообще без него. В условиях длительного застоя возникают проблемы, связанные с коррозией: отложение твердых частиц (песка, мусора и оксидов железа), ионная проводимость, ионы железа и растворенный кислород. Например, повышенное содержание металлов, таких как свинец или медь, может стать причиной отравления при пользовании водой. Отложения на внутренней поверхности трубопровода, в частности, вызывают серьезную локализованную коррозию, это как точечная коррозия (в виде небольших пятен на поверхности металла), так и щелевая коррозия (развивается в узких щелях между прилегающими кусочками металла), которая определяется как коррозия отложений [3–6].

Термин «обрастание» в системах теплопередачи относится к образованию отложений в трубопроводах, фитингах и, особенно, на поверхностях теплообменника. Такие отложения увеличивают общее тепловое сопротивление, что может привести к ухудшению тепловых характеристик оборудования, проблемам с коррозией, препятствиям для потока жидкости и т. д., а также привести к увеличению эксплуатационных расходов. Обрастание может стать избыточным развитием микроорганизмов и водорослей, что приводит к ухудшению качества жидкости, циркулирующей внутри трубопровода. Контакт с геотермальными водами, которые, как правило, богаты солями и газами, может привести к значительному загрязнению и коррозии элементов системы отопления, поэтому необходимо прогнозировать тип и интенсивность загрязнения, а также методы технического обслуживания, которые могут потребоваться [7].

Полное устранение загрязнений в теплообменном оборудовании редко достигается на практике, поэтому очистка загрязненных узлов является обычной задачей в перерабатывающей промышленности. Алгоритмы планирования очистки на сегодняшний день позволили свести к минимуму чистые потери вследствие загрязнения, сосредоточившись на том, когда и какие устройства следует чистить.

Мягкие отложения удаляются с помощью менее трудоемких и дорогостоящих методов, например, химическая очистка путем рециркуляции растворителей – переработка и повторное использование растворителей, чтобы минимизировать их потребление и уменьшить воздействие на окружающую среду и очистить загрязненные поверхности или материалы. Твердый осадок обычно состоит из более теплопроводного материала и, следовательно, при заданной толщине обладает меньшим термическим сопротивлением по сравнению с мягким осадком.

Однако отложения состоят не только из минералов (глина и песок), но и из продуктов коррозии (оксид железа, карбонат и т. д.); это объясняется тем, что продукты коррозии плавают в жидкости, соединяются друг с другом и осаждаются в условиях застоя, именно поэтому процесс коррозии при различных продуктах отложений является важным исследованием [8].

Необходимо регулярно очищать и обслуживать трубопроводы систем отопления для обеспечения оптимальной функциональности. В данной работе были рассмотрены и исследованы эффективные методы очистки от отложений в трубопроводах системы отопления.

1. Химическая очистка.

Химическая очистка – распространенный метод удаления отложений из трубопроводов системы отопления. Этот метод предполагает использование специальных чистящих средств, которые расщепляют и растворяют отложения. Эти агенты обычно разрабатываются так, чтобы быть безопасными для материалов трубопровода и при этом эффективно удалять скопившийся мусор. Химическая очистка может осуществляться либо посредством циркуляционного процесса, либо путем впрыскивания чистящего раствора непосредственно в трубопроводы. Примеры химической очистки трубопроводов: химическая дезинфекция (применение химических веществ для уничтожения микроорганизмов), протравливание (использование кислотных

и щелочных растворов для удаления коррозионных отложений), промывка (применение химических агентов для очистки трубопроводов) и т. д. Важно отметить, что выбор и применение определенного метода химической очистки зависит от типа загрязнений в трубопроводах.

2. Механическая очистка.

Механические методы очистки заключаются в физическом перемешивании для вытеснения и удаления отложений из трубопроводов системы отопления. Существует несколько методов механической очистки, включая применение гидроструйной очистки и механического удаления накипи. Гидроструйная очистка предполагает использование специализированных форсунок, которые выбрасывают струи воды под высоким давлением, эффективно удаляя отложения. Для механического удаления накипи используются проволочные щетки, вращающиеся цепи или снаряды для физического разрушения и удаления отложений. В некоторых случаях для более эффективного очищения трубопроводов может потребоваться комбинированный подход.

3. Магнитная фильтрация.

Магнитная фильтрация – инновационный метод, использующий магнитную технологию для удаления магнитного мусора из трубопроводов системы отопления. Магнитные фильтры устанавливаются внутри системы трубопроводов и улавливают частицы железа, такие как ржавчина, не позволяя им причинить дальнейший вред. Магнитный фильтры используются в системах центрального отопления для очистки теплоносителя от накипи и нежелательных примесей, в промышленности такие фильтры могут использоваться для очистки жидкостей, проходящих через трубопроводы. Например, в пищевой или фармацевтической промышленности магнитные фильтры могут улавливать металлические частицы или другие загрязнения, чтобы предотвратить их попадание в конечный продукт. Этот метод снижает вероятность образования отложений в будущем и повышает общую чистоту трубопроводов.

4. Ультразвуковая очистка.

Ультразвуковая очистка становится все более популярной в отрасли для очистки от отложений трубопроводов систем отопления. Этот метод предполагает использование высокочастотных звуковых волн, которые создают колеблющиеся пузырьки в чистящем растворе. Когда эти пузырьки «взрываются» вблизи поверхности, они создают мощные ударные волны, которые выбивают и удаляют отложения. Ультразвуковая очистка высокоэффективна при удалении стойких отложений и способна достичь даже самых труднодоступных участков трубопровода. В трубопроводах систем отопления ультразвуковая очистка используется для удаления нагара, накопившегося в системе, что позволят повысить эффективность и срок службы системы отопления в целом.

5. Очистка паром.

Очистка паром – еще один метод очистки от отложений в трубопроводах системы отопления. Он предполагает пропускание по трубопроводам высокотемпературного пара, который растворяет и вымывает отложения. Очистка паром особенно эффективна для удаления органических веществ, таких как масла и жиры. Кроме того, это помогает стерилизовать трубопроводы, уничтожая любые присутствующие бактерии и микроорганизмы [9–11].

Регулярная очистка от отложений трубопроводов систем отопления необходима для поддержания их работоспособности и предотвращения дорогостоящего ремонта. Химическая очистка, механическая очистка, магнитная фильтрация, ультразвуковая очистка и очистка паром – наиболее эффективные методы удаления накопившихся отложений. Каждый метод имеет свои преимущества и может быть выбран исходя из конкретных требований системы отопления. Используя эти методы очистки, владельцы систем отопления могут обеспечить бесперебойную работу и долговечность своих систем, в конечном итоге обеспечивая комфортные условия для жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wojdyga K. An influence of weather conditions on heat demand in district heating systems // Energy Build. – 2008. – Vol. 40. – P. 2009–2014.

2. Ghafghazi S., Sowlati T., Sokhansanji S., Melin S. A multi criteria approach to evaluate district heating system // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 1134–1140. [CrossRef]
3. Harvey L.D. A Handbook on Low Energy Buildings and District Energy Systems: Fundamentals, Techniques and Examples; Earthscan: London, UK, 2006.
4. Beckett M.A., Snoeyink V.L., Jim K., Sarin P., Kriven W.M., Lytle D.A., Clement J.A. A pipe loop system for evaluating iron uptake in distribution systems // In Proceedings of the AWWA Water Quality Technology, San Diego, CA, USA, 12–13 November 1998.
5. Schock M.R. Water quality and treatment. In Internal Corrosion and Deposition Control, 4th ed. – McGraw Hill: New York, NY, USA, 1990.
6. Rossum J.R. Dead ends, red water, and scrap piles // J. Am. Water Works Assoc. – 1987. – Vol. 79. – P. 113–115.
7. Milanovic P., Jacimovic B., Genic S. Experimental measurement of fouling resistance in the heat exchanger of a geothermal heating system //Geothermics. – 2006. – Т. 35. – №. 1. – С. 79–86.
8. Kim Y.S., Kim J.G. Corrosion behavior of pipeline carbon steel under different iron oxide deposits in the district heating system // Metals. – 2017. – Т. 7. – №. 5. – С. 182.
9. Ахмедов Г.Я. Очистка геотермальных систем отопления и горячего водоснабжения от карбонатных отложений // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – №. 1. – С. 59–63.
10. Тимошенко А.А., Хохлова Т.П. Способ очистки элементов и систем отопления и горячего водоснабжения от твердых отложений и устройство для его реализации. – 2007.
11. Ахмеров А.В., Ситнов В.В. Промывка систем отопления. способы промывки систем отопления // Поволжский научный вестник. – 2018. – №. 1. – С. 4–11.

ДАТЧИК ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КОНЦЕВЫХ МУФТ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В.Р. Сагиров

Казанский Государственный энергетический университет,
ИЭЭ, РЗА, АУС-1-20

Научный руководитель: А.М. Гатаулин, к.т.н., доцент кафедры РЗА

В статье рассмотрены основные методы диагностики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Предложен датчик для диагностики концевых муфт кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена на основе измерений температуры и характеристик частичных разрядов.

Как известно, диагностика состояния кабелей, особенно высокого напряжения (напряжением более 110 кВ), является актуальной проблемой. Работоспособность и срок службы силовых кабелей обусловлена в том числе состоянием концевых муфт, контактных групп, промежуточных муфт, полупроводящего слоя, защитной оболочки, изоляции проводящих жил.

До недавнего времени для диагностики состояния изоляции силовых кабелей были применялись методы мегаомметра и повышенного пробивного напряжения. В связи с появлением кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE-кабелей) для их диагностики примерно с 2013 года в основном применяют метод частичных разрядов (ЧР).

На этапе производства кабелей, в первую очередь, анализируют характеристики ЧР под воздействием коммутационных перенапряжений, которые создаются специальными высоковольтными импульсными трансформаторами Тесла. Два других метода диагностики по характеристикам ЧР (под воздействием приложенного синусоидального напряжения на кабель, находящийся в воде, и сверхнизкочастотного напряжения (СНЧ) импульсами прямоугольной формы, частотой следования менее 0,1 Гц) являются длительными, одно их них длится 40 дней, другое более года. Четвертый вид контроля состояния изоляции кабелей по характеристикам ЧР относится к концевым и промежуточным муфтам и проводится под воздействием так называемого осциллирующего возвратного напряжения. На основании анализа харак-

теристик ЧР (амплитуды и интенсивности), путем вычислений расположения источников ЧР, определяют расположение дефектных муфт и судят об их текущем состоянии.

Следует отметить, что наиболее длительные испытания на российских заводах-изготовителях не проводятся, что связано с их трудоемкостью и задачей экономии ресурсов, поэтому необходимо уделять большее внимание мониторингу концевых и промежуточных муфт кабелей, особенно высокого напряжения, а для этого необходимо разработать эффективный датчик.

Для мониторинга состояния силовых кабелей производят специальные датчики, в том числе комбинированные, предназначенные для одновременного измерения температуры и ЧР. Это связано с тем, что ЧР вызывают нагрев и разрушение муфт, с одной стороны, в то же время, по характеристикам ЧР можно определелить состояние изоляции [1].

В настоящее время известны датчики манжетного типа, производства, например, «Димрус», предназначенные для измерения температуры и ЧР концевых муфт кабелей среднего напряжения. Муфты манжетного типа имеют низкую чувствительность по измеряемой температуре. Что касается кабелей высокого напряжения, то для них подобные датчики температуры, изготавливаемые промышленным способом, отсутствуют.

Большая часть датчиков, предназначенные для мониторинга концевых муфт кабелей высокого напряжения, в том числе методом ЧР, в настоящее время находятся на стадии разработки,в том числе известны оптоволоконными датчика Neoptix на базе GaAs для измерения температуры в производственных условиях. Эти датчики чувствительны как к температуре, так и к ЧР. Причем чувствительность к ЧР порядка 1 пКл, что отвечает известным требованиям по отношению к ЧР в изоляции XLPE-кабелей. В работе предлагается измерять температуру концевых муфт кабелей высокого напряжения оптоволоконными датчиками Neoptix на базе GaAs. Однако эти датчики имеют ограничения ввиду того, что показывают среднюю температуру, поэтому их необходимо дополнить специальными датчиками ЧР.

Известно, что способ регистрации ЧР электромагнитным методом является наиболее чувствительным [3], поэтому в муфту кабеля предлагается монтировать дополнительно датчик ЧР ультравысокочастотного (УВЧ) диапазона [4] электромагнитного излучения (ЭМИ) для которого разработана компактная антенна с диапазоном приема ЧР порядка сотен мегагерц.

Автором сделаны исследования и выводы, что в отличие от силовых трансформаторов [5], для которых в первую очередь разработаны датчики Neoptix, в муфтах силовых кабелей геометрические размеры гораздо меньше, поэтому для преобразования электрических сигналов в оптические и оптических сигналов в электрические достаточно применить упрощенный интерфейс на базе недорогих модулей и контроллеров Arduino. Контроллер Arduino позволяет в том числе задать последовательность цифровых сигналов как диагностических так и для передачи информации о температуре и характеристиках ЧР (частота следования и интенсивность) что делает датчик перспективным для применения на цифровых подстанциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage // In: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – 2019. – P. 35–39.
2. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems // In: 2International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – 2019. – P. 1–4.
3. Gataullin A.M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in UHF range of electromagnetic radiation // In: Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing.– 2020. – P. 1–5.
4. Gataullin A.M. Recording and processing of partial discharge signals // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Vol. 57, no. 4. – P. 426–430.
5. Сабиров И.И., Гавриленко А.Н. Автоматизированные системы контроля состояния силовых трансформаторов / В сб.: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань, 2022. – С. 315–317.

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР СПОСОБА РОЗЖИГА КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ И ТОПОК КОТЛОВ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

С.Н. Маспанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ИЭ ВШЭМ

Научный руководитель: В. А. Суханов, к. т. н., доцент ВШЭМ ИЭ СПбПУ

Выбор рационального способа розжига камер сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) и топок котлов (ТК) паротурбинных установок (ПТУ) является важным аспектом эффективного функционирования энергетических комплексов. Целью исследования является разработка рекомендаций по выбору оптимального способа розжига, что позволит повысить энергетическую эффективность систем и снизить потребление ресурсов. Известны несколько способов розжига КС и ТК, к которым относятся: накальный; плазменный; электроискровой и факельно-искровой [1].

Процесс воспламенения горючих смесей с использованием накального способа характеризуется значительной задержкой воспламенения, вызванной тепловой инерцией. Проведя анализ характеристик накального способа розжига, можно выделить следующие преимущества: высокая удельная мощность; низкое энергопотребление сопротивлениями нагрева; отсутствие высокого уровня напряжения; возможность непрерывного контроля состояния свечи; а также другие характеристики. Однако, термическая эффективность данного метода в значительной мере зависит от температуры и геометрических параметров нагреваемого объекта, его каталитических свойств, параметров смеси и скорости её реакции. В процессе конверсии энергетических установок на использование остаточных топлив, применение накального способа розжига не обеспечивает надлежащее зажигание данных установок с необходимой надёжностью [1, 2].

Плазменный способ розжига предоставляет возможность создания области высоких температур в диапазоне от 2 000 до 10 000 К, повышает мощность разряда, снижает время задержки воспламенения, а также расширяет пределы зажигания горючих смесей с различными концентрациями и физико-химическими свойствами. Данный метод является эффективным при отсутствии газоснабжения на станции или в случаях, когда его использование невозможно из-за требований пожаро- и взрывобезопасности, например, при эксплуатации авиационных и судовых газотурбинных двигателей. В проведённых исследованиях было установлено, что при экспозиции высокотемпературной плазмы наблюдаются нежелательные явления. Первое из них заключается в диссоциации продуктов сгорания, что приводит к неполному выделению теплоты. Данное явление снижает эффективность процесса и может повлечь за собой неэкономичное использование энергетических ресурсов. Второе явление, обнаруженное при исследованиях, связано с высокой концентрацией оксидов азота в пределах высокотемпературной струи плазмы. Оксиды азота являются опасными загрязнителями окружающей среды и могут привести к возникновению проблем с качеством воздушного бассейна. На пути широкого внедрения данного метода возникают и другие технические проблемы, главной из которых является проблема высокотемпературной коррозии поверхности катодной вставки. Эта проблема существенно ограничивает срок службы воспламенителя в зависимости от силы тока дуги, условий эксплуатации, материала электродов и рабочего газа. Необходимы дальнейшие исследования и разработки, чтобы найти решение этой проблемы и обеспечить надёжное функционирование системы воспламенения [1, 3].

Способ электроискрового розжига объединяет три основные группы: транспортные свечи зажигания с энергией разряда около 0,05 Дж, электродуговые разрядники с энергией разряда до 2 Дж и свечи поверхностного разряда с энергией разряда от 2 до 4 Дж и выше, в зависимости от их конструктивных особенностей [1]. Функциональным достоинством способа

электроискрового розжига является прямое преобразование электрической энергии в тепловую энергию. Применение данного метода розжига упрощает прокладку небольших коммуникационных линий, включающих провода, которые связывают источник электроэнергии с зажигательной свечой в системе запуска. Такие системы обладают компактными габаритами и незначительной массой, что позволяет достичь точного контроля и регулирования уровня энергии и продолжительности разряда. Удобство эксплуатации обеспечивается благодаря простоте конструкции, обслуживания и управления системой розжига, которая интегрирована в автоматическую систему. Учитывая опыт использования свечей поверхностного разряда в КС ГТУ различного назначения, целесообразно их использование в комбинации с дежурными горелками. При монтаже свечи зажигания с горелочным устройством, часто возникают сложности, связанные с необходимостью обеспечения надёжности зажигания смеси, сохраняя при этом оптимальный тепловой режим свечи для повышения её долговечности. Способы решения данной проблемы варьировались в зависимости от конструкции КС. В некоторых КС НЗЛ, свеча размещалась неподвижно – либо в центре, либо смещена на несколько сантиметров вбок от оси горелки, находясь в потоке холодного воздуха. В КС конструкции ЛМЗ для повышения эффективности и надёжности зажигания свечей, использовались сервомоторы, осуществляющие ввод-вывод свечей при запуске ГТУ, что приводило к существенному усложнению системы зажигания. На основе анализа длительной эксплуатации свечей поверхностного разряда было выявлено, что низкая эффективность их работы обусловлена ограниченным сроком службы [4, 5]. В результате воздействия излучения факела горелки и окислительной среды происходит быстрое деградирование свечи из-за процессов коррозии и эрозии. Воздействие такого характера приводило к изменению координаты электрического разряда на поверхности свечи, образованию трещин и возгоранию полупроводникового слоя вместе с электродами, что в итоге вызывало повышенную частоту неполадок в работе ГТУ. Поэтому, например, в модели КС ГТ-700-5 свеча размещалась внутри отсека основной газовой горелки и была эффективно изолирована от воздействия излучения зоны горения с помощью лопаток регистра дежурной горелки. Введение этого механизма способствовало повышению долговечности системы розжига. Однако, наличие утечек до открытия запального крана приводило к избыточному обогащению смеси, что вызывало периодические сбои при запуске ГТУ. Для эффективного решения данной задачи были внедрены в схему автоматического управления ГТУ чувствительные и герметичные газорегулирующие краны, что позволило обеспечить плавное изменение концентрации смеси в окрестности свечи. В работах [5–7] представлены результаты экспериментов, критерии и условия возникновения воспламенения, а также результаты полуэмпирических исследований с целью определения зависимостей, позволяющих оптимально определить минимальную энергию разряда. Условие работы КС ГТУ на жидком топливе вызывает необходимость повышения тепловой мощности зажигания в связи с тем, что значительная её доля расходуется на процесс испарения. Возрастает значимость данного требования при эксплуатации ГТУ с использованием сложной тепловой схемы и применением промежуточного подвода теплоты. Это обусловлено тем, что в данном случае воздух, обогащённый побочными продуктами сгорания, поступает в КС низкого давления. При использовании электроискрового способа для розжига КС, наблюдается значительная взаимосвязь между надёжностью зажигания и ресурсом электрической свечи.

Розжиг по факельно-искровому способу представляет собой комплексное устройство, включающее интегрированные электрические свечи и источники топлива, совмещённые в одном корпусе. В зависимости от фазы топлива – жидкого или газообразного – системы зажигания подразделяются на пусковые форсунки и газовые инициаторы запальные устройства (ЗУ). Запуск КС ГТУ с использованием распыленного пускового топлива требует обеспечения высокой надёжности зажигания. Эта надёжность зависит от типа используемого топлива, качества процесса его распыления и условий эксплуатации пусковой форсунки.

В силу этих условий, на электродах свечи часто образуются нагар и отложения сажи, а также возникают частые перегревы, а форсунка может подвергаться засорению вследствие образования коксовых отложений. Для оптимальной работы пусковых форсунок необходимо провести точную калибровку положения свечи. Зажигание пускового топлива достигается с наилучшими параметрами в результате точного ориентирования электродов свечи, которые должны быть расположены в зоне, непосредственно у поверхности конуса распыливания. Ввиду выявленных недостатков, применение этого способа зажигания в турбомашинах ограничено. Применение в КС запальных устройств с использованием факельно-искрового способа зажигания позволило исключить недостатки, свойственные электроискровому способу зажигания. ЗУ, реализующие факельно-искровой способ зажигания, могут быть разработаны практически на любую требуемую тепловую мощность, что выгодно их отличает от ЗУ, выполненных с использованием электроискрового способа. Вспомогательный источник зажигания, как правило, представляет собой электрическую свечу низкой мощности. Её местоположение характеризуется относительно низкой температурой, что способствует увеличению её срока службы в современных тенденциях повышения тепловой нагрузки в КС ГТУ и ТК ПТУ. Одним из ключевых преимуществ ЗУ на основе факельно-искрового способа по сравнению с ЗУ на основе электроискрового способа является его высокая реакционная способность, обеспечиваемая высокой температурой факела и присутствием в нём активных центров. Факел способен осуществить более широкий охват топливовоздушной смеси внутри КС и обеспечить более интенсивное повышение её температуры благодаря высокой скорости передачи теплоты [8–10]. Практическая реализация указанных достоинств факельно-искрового способа розжига способствует сокращению времени задержки воспламенения, расширению границы возможного воспламенения смеси в КС и повышению надёжности процесса розжига.

Таким образом из выполненного анализа способов розжига КС ГТУ и ТК ПТУ следует, что факельно-искровой способ розжига КС превосходит электроискровой способ по скорости реакции горения, уровню турбулентности, фракционному составу и качеству диспергирования топлива, следовательно, может быть рекомендован для широкого практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачев В.В. Моделирование и исследование вихревого запально-стабилизирующего модуля камер сгорания газотурбинных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2012. – 18 с.
2. Богов И.А., Куландин А.А., Суханов В.А., Толмачев В.В., Безухов А.П., Смирнов А.А., Бодров А.И., Корихин Н.В. Основы технической термодинамики, термохимии, теории горения и циклов газотурбинных и парогазовых установок. – Санкт-Петербург: Энергомашиностроение, 2007. – 192 с.
3. Романовский Г.Ф. Плазменное воспламенение и сжигание топлив в судовых установках. – Ленинград: Судостроение, 1986. – 84 с.
4. Ольховский Г.Г. Авиапроизводные ГТУ для энергетики (Обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – No. 11. – С. 26–34.
5. Экспериментальные исследования влияния озонирования воздуха на эмиссию загрязняющих веществ в вихревых запально-стабилизирующих модулях камер сгорания газотурбинных установок / С.Н. Маспанов, И.А. Богов, В.А. Суханов // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16. – No. 4.
6. Разработка малоэмиссионных камер сгорания энергетических ГТУ / А.Г. Тумановский, Л.А. Булысова, В.Д. Васильев, М.Н. Гутник, М.М. Гутник // Теплоэнергетика. – 2021. – No. 6. – С. 68–76.
7. Analysis of the Exothermic Reaction of Flame Ignition in the Combustion Chamber of a Gas Turbine Unit / S. Maspanov, I. Bogov, S. Martynenko, V. Sukhanov // Energies. – 2023. – V. 16. – P. 7395.
8. Analysis of Gas-Turbine Type GT-009 M Low-Toxic Combustion Chamber with Impact Cooling of the Burner Pipe Based on Combustion of Preliminarily Prepared Depleted Air–Fuel Mixture / S. Maspanov, I. Bogov, A. Smirnov, S. Martynenko, V. Sukhanov // Energies. – 2022. – V. 15. – P. 707.
9. Maspanov S.N., Bogov I.A., Sukhanov V.A. Experimental Research in Possibilities of Quality Improvement of Burning Processes in Burners of Turbines // Proceedings of the Scientific Conference with International Participation «Week of Science 2019». – St. Petersburg, 2019. – P. 289–291.
10. Стенд для исследования влияния озона на процессы в камере сгорания газотурбинной установки: Патент на полезную модель: пат. Рос. Федерация, No 175593, заявл. 10.03.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. No 35. – 9 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЕЩЕСТВА В ОЧИСТКЕ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Ю.Г. Мингажева

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А3-45

Научный руководитель: О.Г. Волокитин, д.т.н., профессор ГАСУ

При повышенных содержаниях химических элементов в питьевой воде по нормам СанПиН 2.1.4.2580-10 необходимо использование дополнительных методов доведения качества питьевой воды до нормативных показателей. Для установления возможности применения относительно новой технологии обработки таких вод высоковольтными наносекундными импульсами (НЭМИ) нами был проведен ряд экспериментов. Технология воздействия НЭМИ на вещества была описана в работах [1–8].

При повышенных содержаниях химических элементов в питьевой воде по нормам СанПиН 2.1.4.2580-10 необходимо использование дополнительных методов доведения качества питьевой воды до нормативных показателей. Для установления возможности применения относительно новой технологии обработки таких вод высоковольтными наносекундными импульсами (НЭМИ) нами был проведен ряд экспериментов. Технология воздействия НЭМИ на вещества была описана в работах [1–8].

Для проведения испытаний по воздействию НЭМИ на питьевую воду, была собрана лабораторная установка, которая состоит из генератора импульсов и электродной системы (рис. 1). В данной работе использовали генератор предприятия ЗАО «НПАО ФИД – ТЕХНОЛОГИЯ» с параметрами: амплитуда напряжения – 7–15 кВ, длительность импульса – 0,6 нс, фронт – 0,01–1 нс, частота – 100–1000 Гц. Электродная система подключается к генератору с помощью коаксиального кабеля РК50-3-210. Центральная жила кабеля подключается к пусковому электроду, который помещается в стеклянную колбу. Колба оборачивается в медный экран, который служит заземленным электродом. Экран подключается к оплетке кабеля. После обработки проб, на анализ концентрации веществ в воде отправлялись пробы до обработки и после. Анализ проводился на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Спектр-5». Относительная погрешность измерения содержания металлов в растворах, не более 20 %. Измерения проводились в сертифицированной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Челябинский» (ФГБУ «Челябинскагрохимрадиология»).

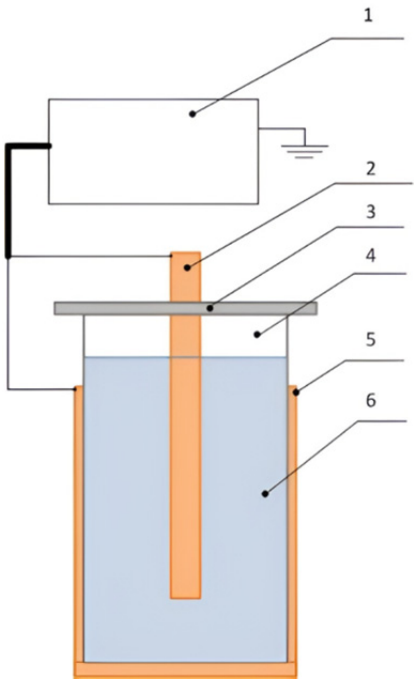


Рис. 1. Лабораторная установка НЭМИ:
1 – генератор НЭМИ;
2 – пусковой электрод;
3 – фиксатор; 4 – колба;
5 – экран из медной фольги – заземленный электрод;
6 – обрабатываемый раствор

Опыт 1. Проводилась обработка НЭМИ артезианской воды. Объём воды – 600 мл. В качестве электрода был выбран стержень с серебряным покрытием диаметром 18 мм, длиной 120 мм. Глубина погружения составляет 30 мм. Время эксперимента – 15 мин. Результаты анализов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание элементов в пробах

Образцы	Наименование показателей, мг/л		
	Cu	Fe	Mn
Исходная	0,012	0,091	0,036
Обработанная	0,011	0,047	0,032

По данным таблицы видим, что значительно уменьшилось содержание железа – на 41 %, а уменьшение меди и марганца – в пределах погрешности.

Опыт 2. Обработка питьевой воды из скважины Карамовского месторождения ЯНАО проводилась в условиях опыта 2. Значение *pH* до обработки – 2,2. В результате содержание железа снизилось на 30 %, значение pH осталось на том же уровне – 2,2.

Опыт 3. Проводилась обработка воды из рабочей скважины $78–64^{А}$ пос. Смолино (Челябинская обл.). Время эксперимента – 10 мин. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав воды в пробах

Элемент	Содержание элементов в пробах, мг/л	
	Исходная	Обработанная
Медь	0,2796	0,0044
Железо	0,0273	0,0055

Из данных таблицы следует, что при обработке НЭМИ воды из скважины наблюдается уменьшение содержания железа и меди.

Для сравнения того, насколько приближаемся к стандартам по допустимым значениям нормативных показателей питьевых вод, приведем показатели ПДК и после обработки НЭМИ питьевой волы (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение результатов обработки питьевой воды с показателями СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

Наименование вещества	Вели-личина ПДК	Обработка артезиан-ской воды	Обработка питьевой во-ды с из скважины Кара-мовского месторожден. ЯНАО	Обработка питьевой воды скважины 78–64А пос. Смолино (Челябинская обл.)
Медь (Cu, суммарно), мг/л	1,0	0,011	–	0,0044
Железо (Fe, суммарно), мг/л	0,3	0,047	19,35	0,0055
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	0,1	0,032	–	–

По данным таблицы видим, что воздействие НЭМИ на артезианскую и питьевую воду скважины 78–64А довело содержание меди, железа и марганца до значений ПДК, а для очистки воды из Карамовского месторождения ЯНАО необходимы дополнительные методы очистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ри Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразование и свойства литейных сплавов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 177 с.
2. Белкин В.С. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / под ред. В.В. Крымского. – Челябинск: Изд-во «Татьяна Лурье», 2001. – 119 с.
3. Расчет импульсного электромагнитного поля в проводящей среде / В.А. Бухарин, В.В. Крымский, А.Ю. Усков, Н.А. Шабурова // Вестник ЮУрГУ. – Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 26–28.
4. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, Ю.В. Гуляев, В.Д. Лунин, И.Ж. Бунин, В.А. Чепенин, В.А. Вдовин, А.В. Корженевский // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 366. – № 5. – С. 680–683.

5. Экспериментальное исследование нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов на упорное золотосодержащее сырье / И.Ж. Бунин, Н.С. Бунина, В.А. Вдовин и др. // Изв. АН. Сер. Физическая. – 2001. – Т. 65. – № 12. – С. 1788–1792.
6. Роль истечения газа из каналов наносекундного пробоя в процессе электроимпульсной дезинтеграции сульфидных минералов / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2010. – Т. 74. – № 5. – С. 714–717.
7. Чантурия, В.А. О процессах формирования микро- и нанофаз на поверхности сульфидных минералов при воздействии наносекундных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев, Е.В. Копорулина // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2012. – Т. 76. – № 7. – С. 846–850.
8. Мингажева Ю.Г. Исследование воздействия мощных наносекундных импульсов на водные растворы / Ю.Г. Мингажева // Сборник трудов XIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 2. – С.298-300.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ДИАГНОСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПО КОММУТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

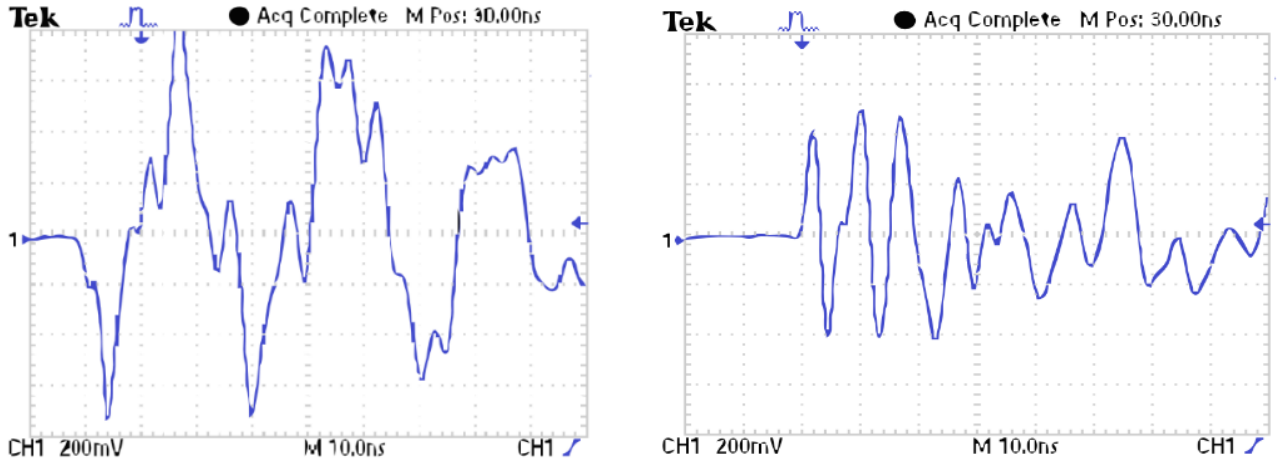
А.В. Кузякин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ3З

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

Изоляция является наиболее проблемным компонентом любого высоковольтного аппарата в силу ряда проблем, основной из которых является развитие частичных разрядов (ЧР). Несмотря на многообразие методов обнаружения ЧР не существует эффективного способа выявлять ЧР на ранних стадиях развития под рабочим напряжением. В ходе исследований, результаты которых представлены в статье, установлена принципиальная обнаруживать частичные разряды (ЧР) в высоковольтной изоляции путем анализа результата взаимодействия коммутационных импульсов с собственно ЧР. Критерием, по которому можно констатировать наличие частичного разряда, является уменьшение амплитуды токового сигнала в результате взаимодействия коммутационных импульсов с дефектами внутренней структуры изоляции. Коммутационный импульс меняет форму и интенсивность в зависимости от наличия или отсутствия ЧР на исследуемом участке изоляции. Потенциальная эффективность предлагаемой технологии контроля частичного разряда достаточно высока, так как позволяет использовать ее в режиме без снятия рабочего напряжения.

Своевременный контроль ЧР и определение характеристик ЧР во внутренней структуре высоковольтной изоляции является ключом к обеспечению стабильной работы энергетических систем [1–3]. Разработка технологии контроля ЧР в высоковольтной изоляции в режиме on-line является актуальной задачей [4–6]. А использование коммутационных импульсов для анализа ЧР, по определению является технологией on-line, не требующей сложной и дорогой аппаратуры контроля. Схема экспериментов была следующей. Импульсный высоковольтный конденсатор ИК-100-0,25 заряжается от источника постоянного тока. Затем, при достижении необходимого уровня заряда, заряженный конденсатор переключался на ячейку с ЧР. Ток в цепи разряда измерялся специально разработанным токовым шунтом. Сигнал с шунта измерялся электронным осциллографом Tektronix TDS 1012. Экспериментальная ситуация без ЧР соответствует форме сигнала на рис. 1, *а*. На рис. 1, *б* показана та же экспериментальная ситуация, но ячейка содержит пору с ЧР.



а *б*

Рис. 1. а – оОсциллограмма коммутационного импульса без частичного разряда; б – осциллограмма коммутационного импульса при наличии частичного разряда

Установлено, что уменьшение амплитуды колебаний сигнала, снимаемого с токового шунта пропорционально интенсивности частичного разряда при прочих равных параметрах системы. По мере развития и интенсификации ЧР амплитуда сигнала уменьшается, что объясняется результатом взаимодействия двух импульсов – коммутационного и собственно ЧР. Происходит релаксация ВЧ составляющих зондирующего импульса на участке с ЧР. Степень релаксации пропорциональна степени интенсивности ЧР.

Последовательное сравнение коммутационных импульсов дает информацию о наличии или отсутствии частичного разряда в обследуемой высоковольтной изоляции. В обоих случаях анализ импульсов позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии частичного разряда, а также оценить степень его развития. Предложенная идентификация может быть применена для контроля различных типов частичного разряда: стримерной короны, частичного разряда в порах в остаточной атмосфере, частичного разряда во включениях в бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинский М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 29–31.
2. Fuhr J., Aschwanden Th. Identification and Localization of PD-Sources in Power Transformers and Power-Generators // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Vol. 24. No. 1 – P. 17–30.
3. Zhaoa X., Yaoa C., Abu-Siadab A., Liaoa R. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – Vol. 111. – P. 351–368.
4. Florkowski M., Florkowska B., Kuniewski M., Zydron P. Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2018. – Vol. 25. – P. 2220–2228.
5. Guillen D., Olivares-Galvan J., Escarela-Perez R., Granados-Lieberman D., Barocio E. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. – 2019. – Vol. 141. – P. 24–36.
6. Akrama S., Wanga P., Tariq M., Zhoua K., Shoaib M., Hussaine H. Impact of impulse voltage frequency on the partial discharge characteristic of electric vehicles motor insulation // Engineering Failure Analysis. – 2020. – Vol. 116. – P. 104–112.

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

И.А. Грачев

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, ЭМФ, ЭМ, гр. 2-36М

Научный руководитель: Н.А. Морозов, к.т.н., доцент ЭМ ЭМФ ИГЭУ им. В.И. Ленина

Своевременное обнаружение неисправности в синхронных генераторах позволяет сократить огромные расходы. Существуют различные методы выявления неисправностей обмоток якоря и возбуждения, состояния изоляции, возникновение вибраций. В настоящее время перспективным методом диагностики электрических машин является анализ картины распределения внешнего магнитного поля (ВМП). Главное достоинство метода в том, что нет необходимости внедрять внутрь машины различные устройства. Суть метода заключается в фиксации с помощью датчика Холла картины распределения ВМП, её анализе и определении повреждений обмотки по коэффициенту несимметрии поля. [2–5].

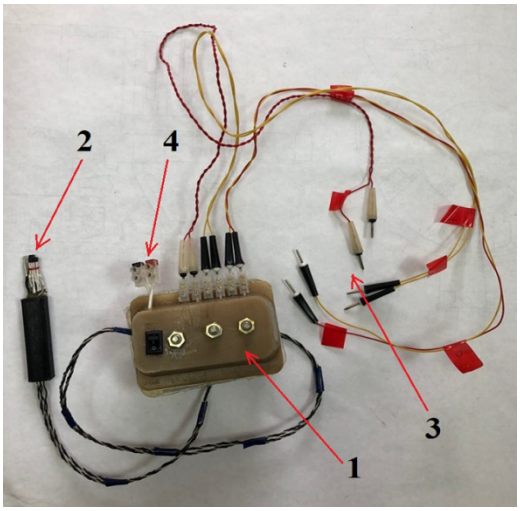


Рис. 1. Трёхкоординатный датчик измерения ВМП

Для получения полной картины распределения внешнего магнитного поля нами разработан трёхкоординатный датчик (рис. 1), который позволяет записывать значения, составляющих внешнего магнитного поля в трёх координатах: радиальной, тангенциальной и осевой. Датчик состоит из корпуса *1*, измерительного щупа *2*, выводов *3* подключения к компьютеру и выводов *4* контроля питания батареи. Его главное преимущество над однокоординатным в том, что данные в трёх координатах записываются в один момент времени и нет риска пропустить какие-либо изменения в ВМП. Это повышает надежность полученных результатов.

Использование метода эффективно только тогда, когда известно проявление контролируемого повреждения в ВМП машины. На кафедре Электромеханики ИГЭУ проводится работа по определению взаимосвязи внутренних повреждений синхронного генератора и проявлением их во внешнем магнитном поле. Полученные сигналы заводились в расчётную среду Excel, где было проведено сравнение графиков индукции, создаваемой обмоткой возбуждения без повреждений и с наличием повреждения катушек. Они отличаются друг от друга смещением относительно нулевой линии. После чего высчитывался коэффициент несимметрии поля, который равен отношению значения средней линии кривой к амплитуде её пульсации, которые показаны на рис. 2 [1, 6].

Во время проведения эксперимента было замечено, что в случае, когда все обмотки работали исправно, поле все равно пульсировало, что может быть объяснено наличием эксцентриситета. Таким образом, по внешнему магнитному полю можно определить возникновение эксцентриситета и использовать тот же самый коэффициент несимметрии поля (КНП) для его выявления, что и для контроля повреждения обмоток возбуждения.

В настоящее время ведется работа по проведению экспериментального исследования ВМП синхронного турбогенератора при контролируемом эксцентриситете ротора, так как для использования этого метода необходима чёткая корреляция между значениями эксцентриситета, положения его оси при разных режимах работы генератора и проявлением его во внешнем поле.

Методика проведения эксперимента может быть представлена следующим алгоритмом. Были разработаны и напечатаны на 3D-принтере, специальные фиксаторы ротора, в которых устанавливаются концы вала. С помощью них мы задаём значение эксцентриситета, сначала его отсутствие, а потом, с установкой прокладок под фиксаторы, его нарастание. Контроль значений эксцентриситета осуществляется с помощью измерительных щупов. Данные с измерительного датчика снимаются в нескольких точках, в четырёх по координатным осям. Сигналы с коннектора передаются на компьютер, где в программе LabView иллюстрируются графики индукции от времени. В программе происходит преобразование реального сигнала в обрабатываемый. Записывается промежуток времени в 0,2 с, этот временной диапазон делится на две тысячи точек и в каждой из этих точек берётся среднее значение. В итоге получается выровненный сигнал без внешних шумов. По полученным данным проводиться анализ связи повреждения машины и проявлением в ВМП.

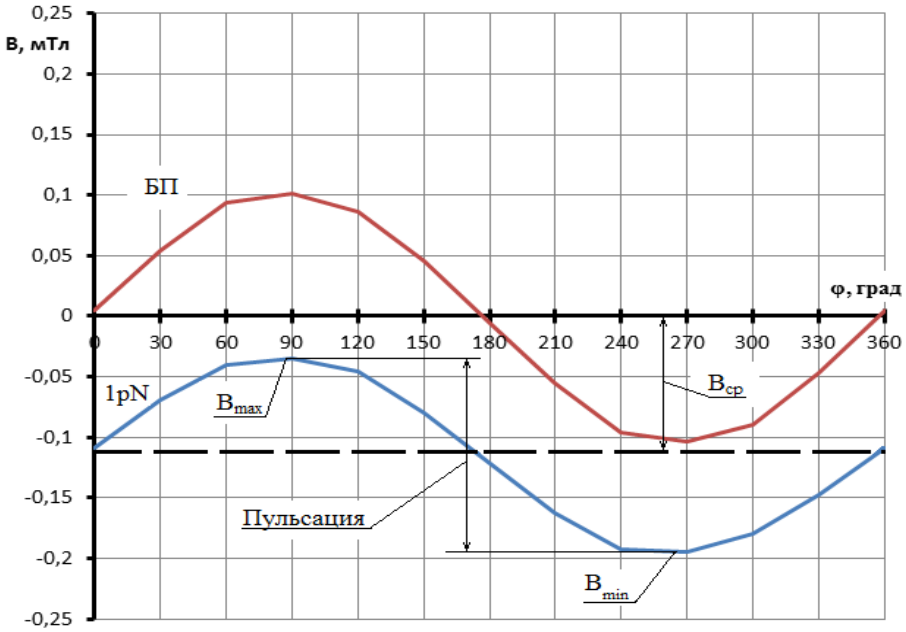


Рис. 2. Определение коэффициента несимметрии поля (КНП)

Для обнаружения повреждения обмотки возбуждения достаточно одного датчика, т. к. при повреждении катушек поле сразу становится грушевидным, что сильно проявляется в ВМП. При статическом эксцентриситете смещения поля не будет, так как при одном значении эксцентриситета, северный и южный полюс будут давать одинаковые отклики, и КНП будет равен нулю. Поэтому предполагается, что лучше всего использовать как минимум два датчика расположенных на одной оси и тогда в них в один момент времени можно уловить увеличение поля на одном полюсе и уменьшения на другом.

Надёжное и точное определение наличия эксцентриситета и направления его смещения понадобятся четыре датчика, подключенные согласно или встречно попарно. Датчики следует располагать на горизонтальной и вертикальной оси. В этом случае о положении ротора относительно статора можно судить по радиальным и тангенциальным составляющим поля. Сложным случаем является смещение ротора не в плоскостях расположения датчиков.

Ранее проведённые опыты показали, что наиболее яркими проявлениями ВМП могут быть зафиксированы по поперечным сечениям машины по её центру и в плоскости соответствующей торцу сердечника статора с обеих сторон от центрального сечения машины. Повреждение обмотки возбуждения турбомашины хорошо выявлялось по радиальной и осевой составляющим ВМП. При исследовании статического эксцентриситета следует ожидать хорошего проявления разницы тангенциальных составляющих поля по оси эксцентриситета.

Наиболее сложной задачей явится выявление динамического эксцентриситета и при нарушении параллельности осей ротора и расточки статора, что возможно в машинах не очень большой мощности. Наклон оси ротора возможен при неравномерной выработке опор в ходе длительной эксплуатации агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новосёлов Е.М. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02 / Е.М. Новосёлов – Иваново, 2018. – 234 с.
2. Новоселов Е.М. Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, А.С. Страхов, И.Н. Сулыненков // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 3. – С. 38–46.
3. Океанский А.П. Диагностика электромагнитных несимметрий синхронных машин на основе анализа внешнего электромагнитного поля / А.П. Океанский, А.Н. Морозов, Ю.Б. Казаков // XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов: тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг Радуга», 2018. – С. 359.
4. Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Океанский А.П. Диагностика электромагнитных несимметрий по внешнему полю электрических машин // «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологий» (ПЭЭЭ-2017): V Всеросс. научн.-техн. конф. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – С. 376–80.
5. Морозов А.Н. Коэффициент несимметрии поля при повреждениях обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины / А.Н. Морозов // Матер. междун. н.-т. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения). Иваново, 2021. – Т. 3. Электротехника. – С. 196–198.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АНТЕННОЙ УСТАНОВКИ

Н.С. Иванов

ООО «ДЖЭТ ЛАБ»,
специалист, проектный офис Томск

Научный руководитель: С.В. Букреев, директор ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

Данный доклад посвящен разработке математической позиционного следящего электропривода (ЭП), который используется для поворота антенны при изменении входного сигнала. Средой моделирования выбрана платформа REPEAT. Установка приводится в движение через понижающий редуктор (Р) двигателем (Д). Для создания требуемого напряжения двигателя используется усилитель и сравнивающее устройство, в которых сравнивается сигнал задания U_{Σ} и сигнал с тахогенератора (ТГ).

Сигнал U_{Σ} вырабатывается измерительной схемой на сельсинах СД-СП, работающих в трансформаторном режиме. Сельсин-приемник связан с выходной осью Р. А ось СД является задающей (рис. 1) [1]. В табл. 1 представлены технические данные двигателя.

По представленным техническим данным двигателя согласно формулам (1)–(4) определяются его динамические параметры, а именно: коэффициент противо-ЭДС, коэффициент момента, постоянные времени электромагнитной и электромеханической части ДПТ.

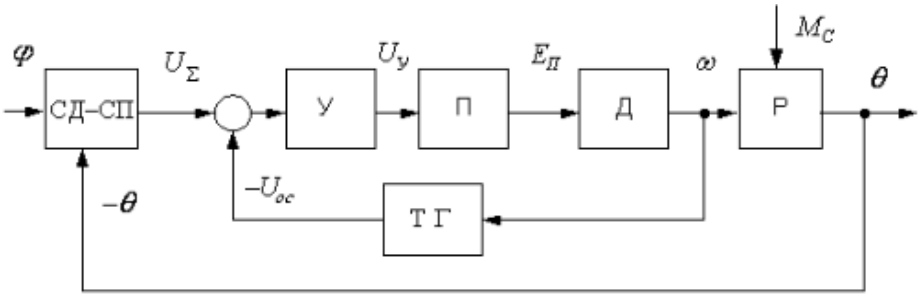


Рис. 1. Принципиальная схема позиционной системы

Таблица 1. Параметры двигателя

Ном. мощность $P_{ном}$, кВт	Ном. $U_{ном}$, кВ	Ном. ток якоря $I_{ном}$, А	Ном. частота вращения $n_{ном}$	Момент инерции вала J, кг·м^2	Индуктивность обмотки якоря $L_я$, Гн	Сопротивление обмотки якоря $R_я$
2,5	220	12	1500	0,5	0,018	1,36

Коэффициент противо-ЭДС:

$$K_e = \frac{U_{ном} - R_я I_{ном}}{\omega_{ном}} = 1{,}3 \ \frac{В \cdot с}{рад}. \quad (1)$$

Коэффициент момента:

$$K_м = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном} \cdot I_{ном}} = 1{,}3 \ \frac{Н \cdot м}{А}. \quad (2)$$

Постоянная времени электромагнитной части ДПТ:

$$T_{эм} = \frac{L_я}{R_я} = 0{,}013 \text{ с}. \quad (3)$$

Постоянная времени электромеханической части ДПТ.

$$T_м = \frac{J \cdot R_я}{C_м C_e} = 0{,}402 \text{ с}. \quad (4)$$

Разработка позиционной системы состоит из следующих этапов:

- разработка динамической модели ДПТ;
- разработка системы регулирования по скорости, настройка контура по скорости;
- разработка систем регулирования положения, настройка контура положения.

На рис. 2 представлена схема динамической модели рассматриваемой ДПТ.

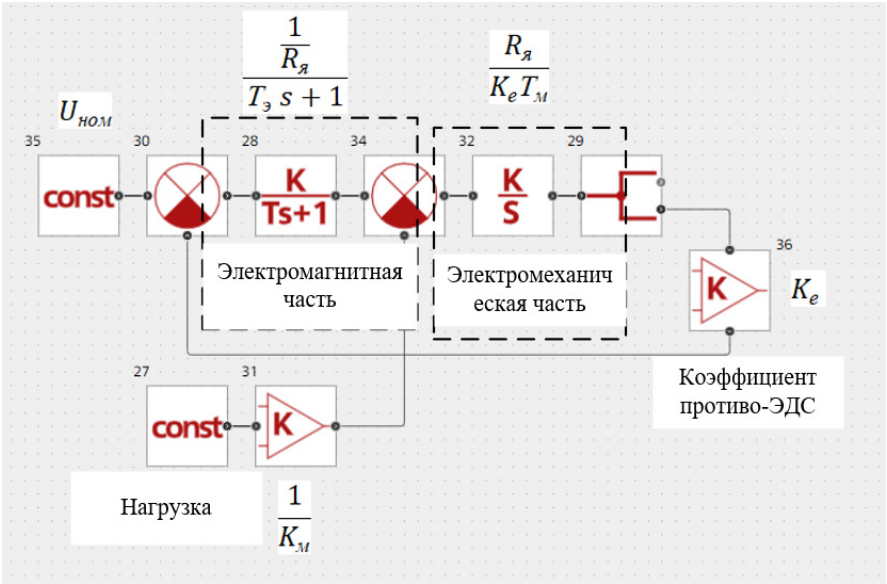


Рис. 2. Схема динамической модель ДПТ

После разработки модели ДПТ был произведен расчет холостого режима работы ДПТ, результаты приведены на рис. 3.

При разработке систем управления электроприводом используются различные способы управления. Рассматриваемая позиционная система выполняется по принципу подчиненного регулирования. Данная система состоит из двух контуров: контур скорости и положения, синтез регуляторов проводится по стандартным настройкам.

Контур скорости настраивается на технический оптимум, так как является внутренним контуром управления [2]. ПИ-регулятор контура скорости имеет передаточную функцию:

$$W_{\text{РС}}(p)=\frac{K_{\text{РС}}(T_{\text{РС}}p+1)}{T_{\text{РС}}p}, \quad (5)$$

где $K_{\text{РС}}=\frac{K_{\text{е}}\cdot T_{\text{РС}}}{2T_{\mu}K_{\text{тг}}K_{\text{преоб}}}=42{,}171$; $T_{\text{РС}}=T_{\text{м}}=0{,}402$ с. Значения параметров системы регулирования принимаются следующими: $T_{\mu}^{\text{КС}}=T_{\text{эм}}+T_{\text{преоб}}+T_{\text{тг}}=0{,}013+0{,}002+0{,}001=0{,}016$ с; $K_{\text{преоб}}=10$; $K_{\text{тг}}=\frac{6}{\omega_{\text{ном}}}=0{,}038$.

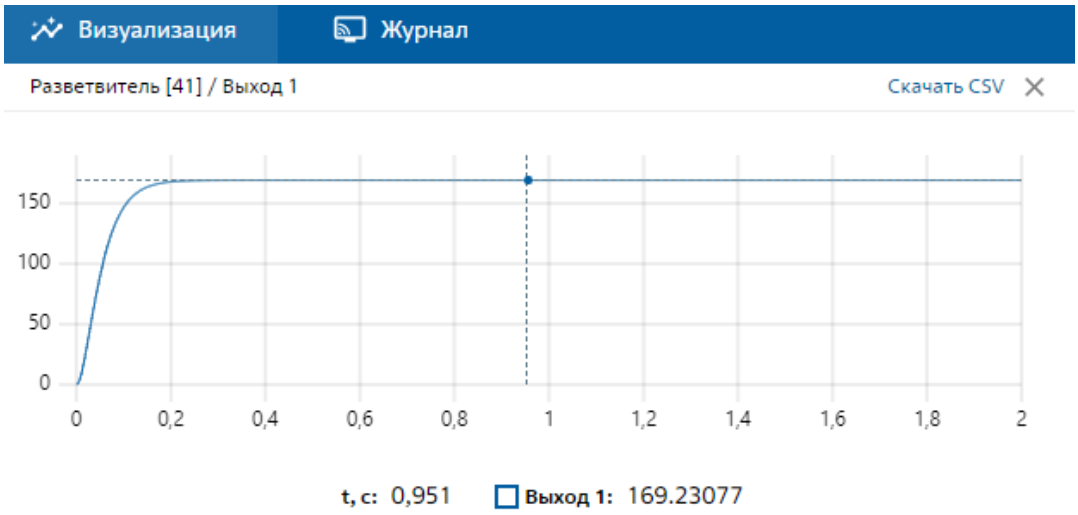


Рис. 3. Результаты расчета работы ДПТ на холостом ходу

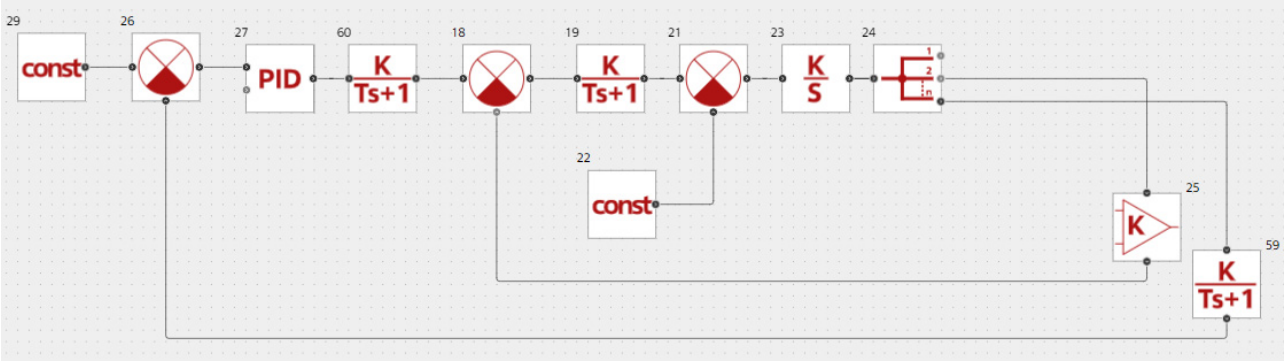


Рис. 4. Схема модели контура скорости

Далее разрабатывается основной контур позиционного электропривода – контур положения. Структурная схема системы позиционирования, основанная на выше синтезированной структурной схеме системы стабилизации скорости, представлена на рис. 5. Дополнительно в контур положения устанавливается: звено интегрирования, так как угловая скорость ω является производной угла θ, датчик положения ($K_{\text{дп}}=\frac{6}{3{,}14}=1{,}909, T_{\text{дп}}=0{,}001$ с), редуктор с $i=100$.

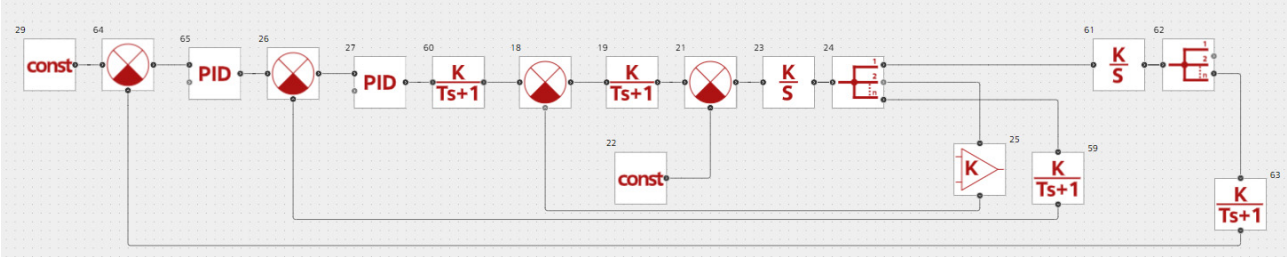


Рис. 5. Схема модели позиционной ЭП (контура положения)

Контур скорости возможно представить в виде звеном первого порядка с постоянной времени $2T_{\mu}^{КС}$.

$$\Phi_{КС}(p)=\frac{1/K_{тг}}{2T_{\mu}^{КС}p+1}=\frac{26{,}316}{0{,}032p+1}. \quad (6)$$

Разомкнутая система управления примет вид:

$$W_{кп}(p)=W_{РП}(p)\cdot\frac{1/K_{тг}}{2T_{\mu}^{КС}p+1}\cdot\frac{1}{i\cdot p}\cdot\frac{K_{дп}}{T_{дп}p+1}=\frac{(4T_{\mu}^{КС}+1)}{8T_{\mu}^{КС\,2}p^2\,(T_{\mu}^{КС}p+1)}. \quad (7)$$

ПИ-регулятор контура скорости имеет передаточную функцию:

$$W_{РП}(p)=\frac{K_{РП}(T_{РП}p+1)}{T_{РП}p} \quad (8)$$

где $K_{РП}=\frac{K_{тг}\cdot i}{2T_{\mu}^{КС}R_{я}K_{дт}}=24{,}81$, $T_{\mu}^{КП}=2T_{\mu}^{КС}+T_{дп}=0{,}033$ с, постоянная времени РП $T_{РП}=4T_{\mu}^{КП}=0{,}086$ с.

При 6 В на пульте управления (задание) выходной угол получается 3,139 радиан (≈ 180°). Далее проводится расчет разработанной модели и анализ переходной характеристики.

Время нарастания $t_{н}$. Измеренное значение составляет $t_{н/изм}=0{,}095$ с. А расчетное при настройке на СО $t_{н}=3{,}1\cdot T_{\mu}^{КП}=0{,}104$ с. Отклонение незначительное и составило $\Delta t_{н}=0{,}009$ с.

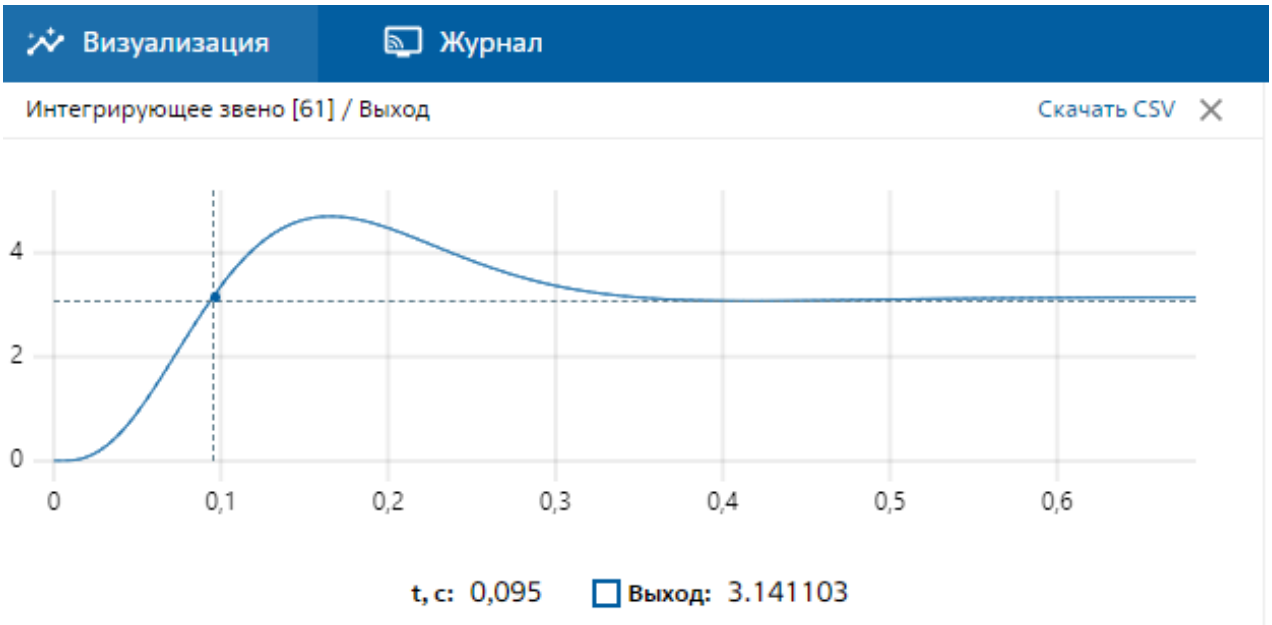


Рис. 6. Время нарастания $t_{н}$

Время регулирования $t_{р}$. Измеренное значение составляет $t_{р/изм}=0{,}311$ с. А расчетное при настройке на СО $t_{р}=12\cdot T_{\mu}^{КП}=0{,}39$. Отклонение составило $\Delta t_{р}=0{,}07$ с.

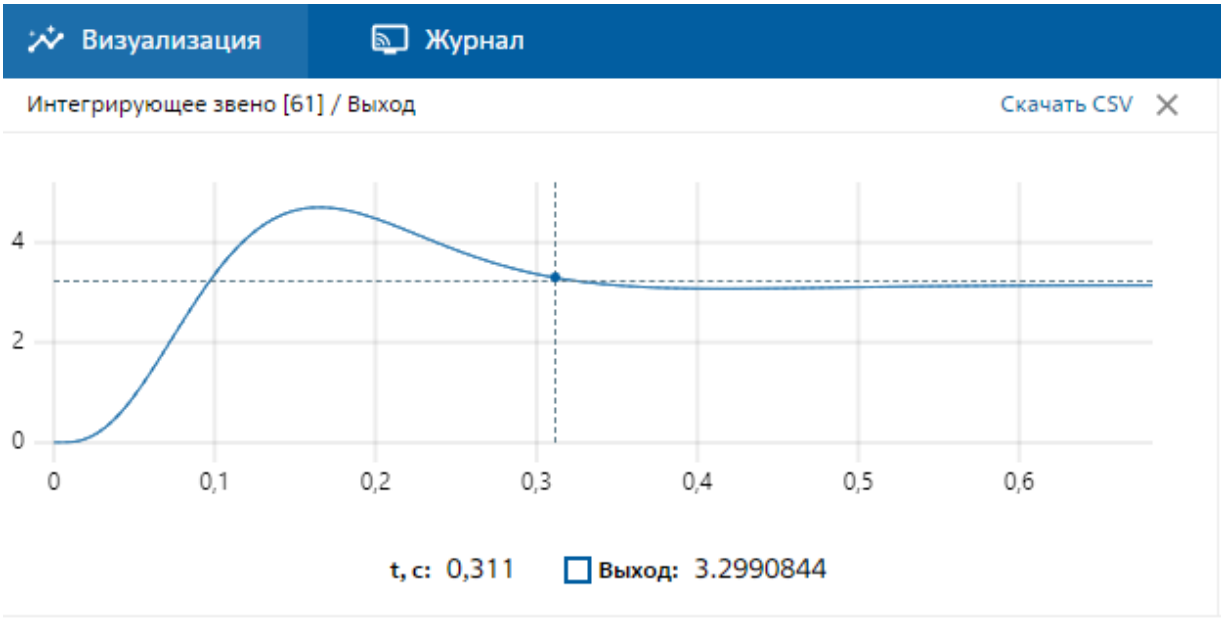


Рис. 7. Время регулирования t_p

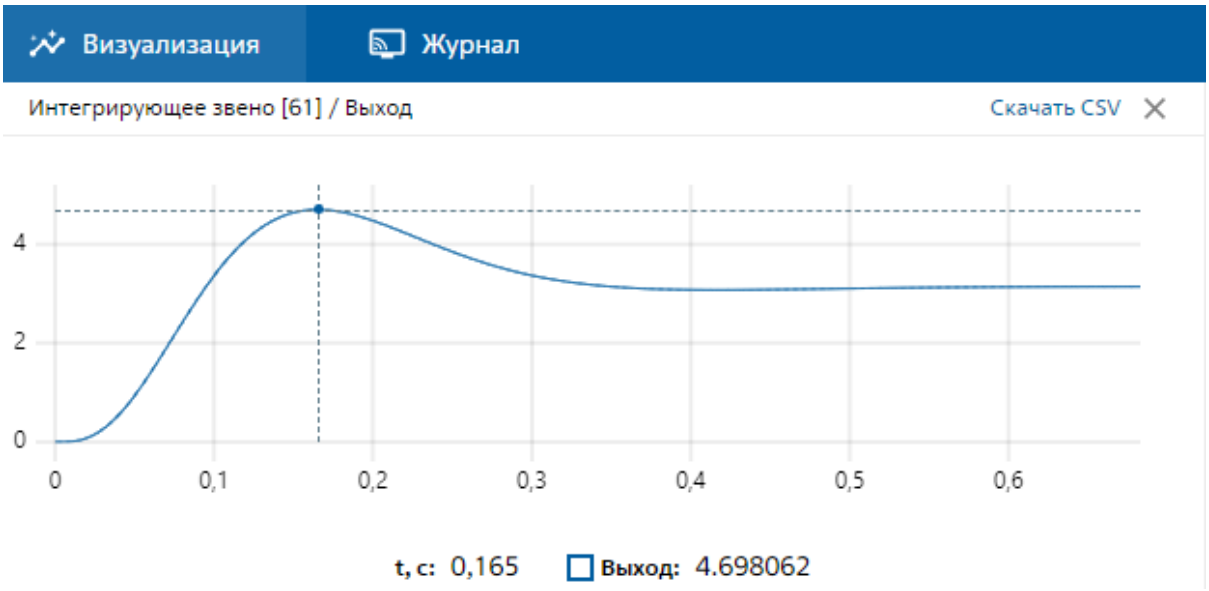


Рис. 8. Перерегулирование σ

Перерегулирование σ:

$$\sigma = \frac{\delta_{max} - \delta_{уст}}{\delta_{уст}} = \frac{4{,}7 - 3{,}14}{3{,}14} \cdot 100\% = 49{,}68\ \%. \quad (9)$$

Заметное небольшое перерегулирование, однако оно незначительно и приблизительно соответствует стандартному значению при настройке на СО (43 %). Разработка позиционной системы и настройка ее регуляторов проведена успешно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов В.А. Синтез систем автоматического управления: учебно-методическое пособие. – Тольятти: ТГУ, 2014. – 47 с.
2. Васильев Б.Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 1. Основы электропривода и преобразовательной техники: учебник для вузов – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 356 с.

ПЛАН И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

В.Д. Бакланов

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, ЭМФ, ЭМ, гр. 1-36М

Научный руководитель: С.А. Нестеров, к.т.н., заведующий кафедрой ЭМ ЭМФ ИГЭУ

Уникальным в своем роде, а в некоторых задачах не имеющий конкурентов в области герметизации подвижных валов магнитожидкостный герметизатор (МЖГ) является одним из главных представителей устройств на основе магнитной жидкости (МЖ) [1–3]. Несмотря на вытекающие от использования для герметизации МЖ преимущества, а именно: нулевую утечку уплотняемой среды и отсутствие истирания уплотняемого вала, повсеместному внедрению МЖГ, помимо относительной дороговизны, препятствуют: увеличение линейной скорости, и центробежных усилий на поверхности вала с увеличением диаметра, а также процессы, нарушающие ламинарность течения МЖ в рабочем зазоре, и приводящие к дестабилизации МЖ пробки. Учет специфических для МЖГ гидродинамических процессов при проектировании позволит расширить область внедрения МЖГ. Для достижения чего логичным решением будет проведение методичных исследований с последующим моделированием и анализом взаимовлияющих процессов, протекающих в МЖГ, что является актуальной и перспективной научной задачей.

Для проведения исследований взаимовлияющих факторов был разработан и изготовлен опытный стенд. Конструкция стенда предусматривает изменение магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ, линейной скорости на поверхности уплотняемого вала от 0 до 25 м/с, также изготовлено несколько комплектов профилей полюсов магнитной системы, формирующих наиболее распространённые и потенциально интересные конфигурации рабочих зазоров МЖГ [4] (рис. 1).

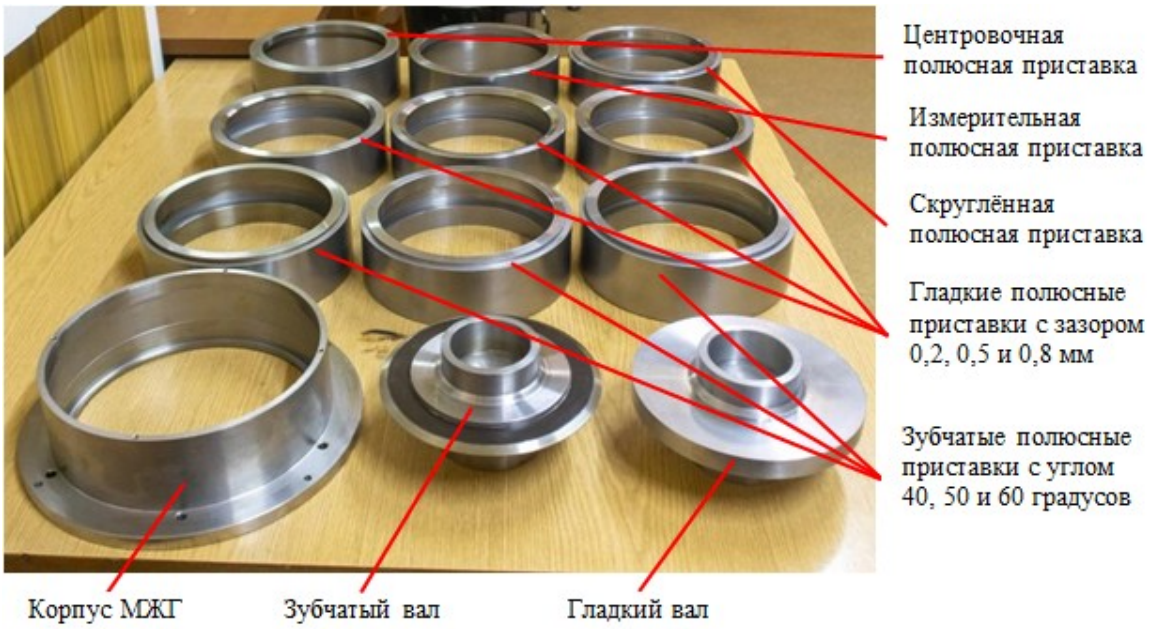


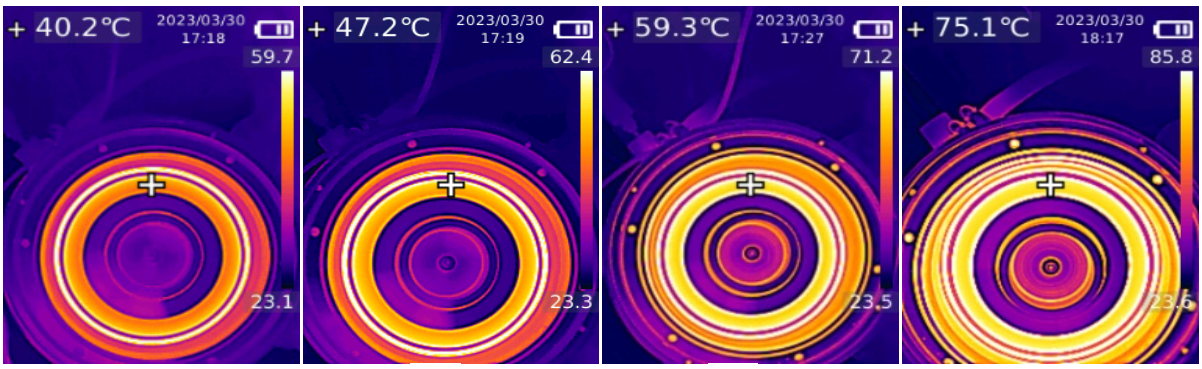
Рис. 1. Набор изготовленных полюсных приставок и валов

Для проведения исследования были изготовлены различные образцы МЖ:

- четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе синтетического масла объёмом по 50 мл;
- четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе полиэтилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл;
- четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 30, 40, 50, 57 кА/м на основе полиметилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл;
- четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе минерального масла объёмом по 50 мл.

Проведено исследование изменения величины критического давления МЖГ от профиля полюсов рабочего зазора и линейной скорости на поверхности уплотняемого вала, плотности МЖ при индукции магнитного поля 0,8, 1,2 и 1,6 Тл и объёма заправляемой МЖ.

Серия опытов повторяется для всех комплектов профилей полюсов и каждого образца МЖ. Также проведено исследование вязкостного разогрева МЖ для этого экспериментально исследовались влияние вязкости заправляемой МЖ на её разогрев при различных линейных скоростях на поверхности вала, влияние профиля формы полюсов рабочего зазора МЖГ на разогрев МЖ при различных скоростях, влияние объёма заправляемой МЖ на её разогрев и создаваемый при этом момент трения МЖГ для различных скоростей. Фиксация температуры осуществляется тепловизионным методом. На рис. 2 представлены тепловизионные картины одного из опытов. Момент трения МЖГ определяется с помощью измерения потребляемой мощности приводного двигателя.



а б в г

Рис. 2. Тепловое состояние МЖГ: а – 10 с; б – 2 мин; в – 10 мин; г – 60 мин

На рис. 3–8 представлены некоторые из полученных результатов. Для удобства было введены следующие обозначения: МЖ1.3 – МЖ с намагниченностью насыщения 40 кА/м на основе синтетического масла, МЖ2.3 – намагниченность насыщения 40 кА/м на основе полиэтилсилоксановой жидкости, МЖ3.2 – – намагниченность насыщения 40 кА/м на основе полиметилсилоксановой жидкости; угол – конфигурация магнитной системы с зубцом, образованном определенным углом, на неподвижном полюсе и рабочим зазором 0,5 мм; зазор – конфигурация магнитной системы с зубцом на подвижном валу, в этом случае варьируется величина зазора; $S_{МЖ}$ – площадь поперечного сечения МЖ пробки.

Из анализа рис. 3–4 можно сделать следующие выводы: при выполнении зубцового концентратора магнитного поля на неподвижном полюсе при увеличении линейной скорости гладкого вала величина критического давление МЖГ уменьшается; с увеличением индукции магнитного поля величина удерживаемого перепада увеличивается; в конфигурации с зубцом на неподвижном полюсе величина угла образующая зубец в приделах 40°–60° мало влияет на критическое давление МЖГ.

Из рис. 5–6 следует: при работе на высоких скоростях концентратор магнитного поля лучше выполнять на валу, тогда МЖ под действием центробежных сил смещается в область с большей магнитной напряжённостью, что положительно сказывается на величине удерживаемого МЖГ перепада давлений.

По данным рис. 7–8 можно заметить, что с течением времени при вращении уплотняемого вала происходит разогрев МЖ, вместе с тем вязкость МЖ уменьшается из-за чего оказываемый МЖГ момент сопротивления уменьшается. Из рис. 8 следует что величина разогрева значительно зависит от вязкости жидкости основы МЖ.

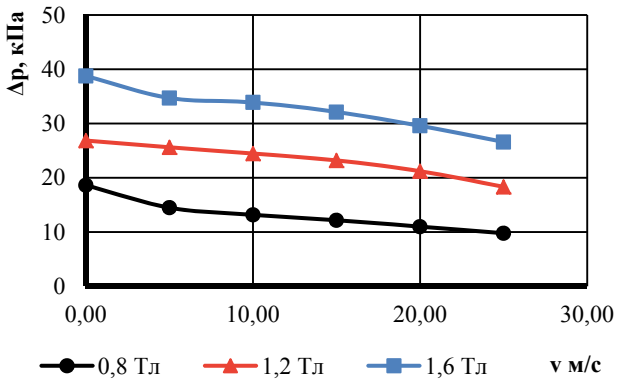


Рис. 3. Критическое давление от частоты вращения. Угол 60°, МЖ1.3

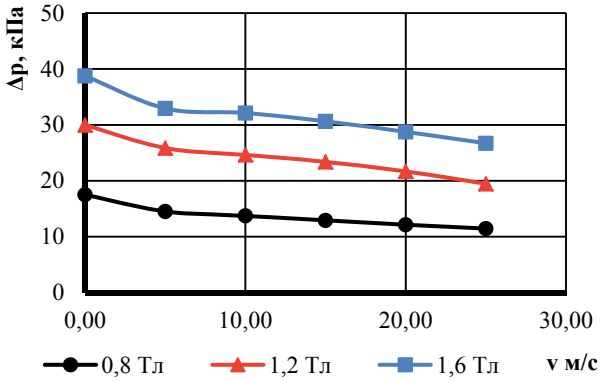


Рис. 4. Критическое давление от частоты вращения. угол 40°, МЖ1.3

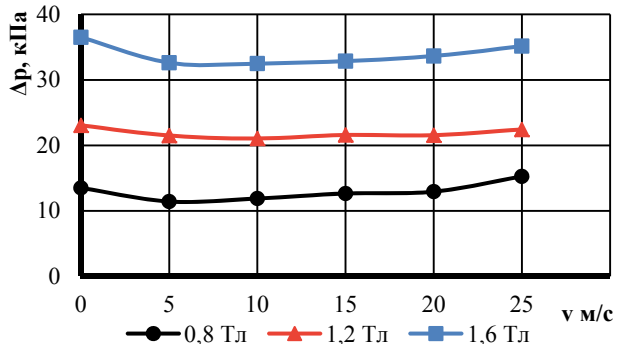


Рис. 5. Критическое давление от частоты вращения. Зазор 0,5 мм, МЖ1.3

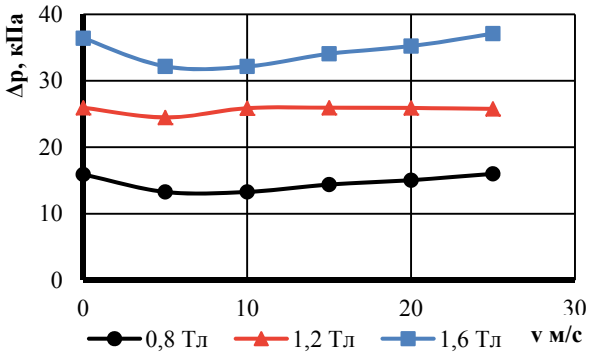


Рис. 6. Критическое давление от частоты вращения. Зазор 0,8 мм, МЖ1.3

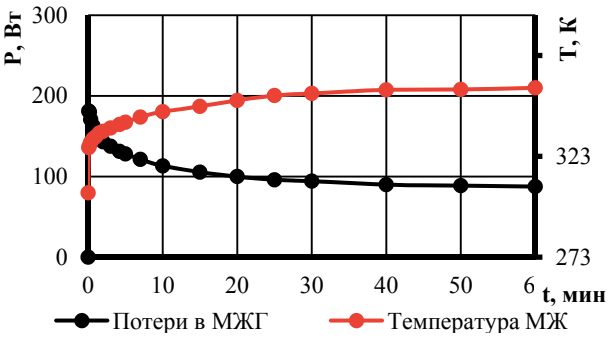


Рис. 7. Зависимость потерь на трение и температуры МЖ в МЖГ. МЖ1.3, скорость 25 м/с, зазор 0,5 мм, S МЖ = 4 мм²

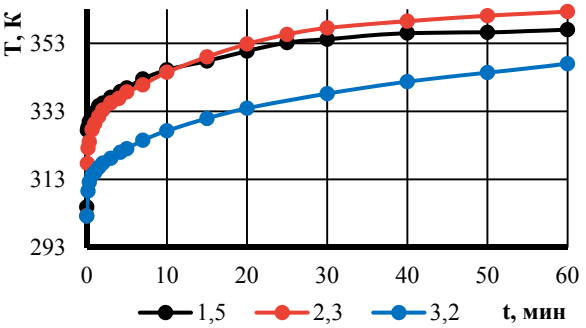


Рис. 8. Изменение температуры от времени для разных образцов МЖ. зазор 0,5 мм, скорость 25 м/с

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, https://rscf.ru/project/22-79-00156/ «Исследование тепловых и гидродинамических эффектов в нанодисперсных магнитных жидкостях для разработки моделей и методик расчёта высокоскоростных и высокотемпературных герметизаторов»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.В., Михалёв Ю.О. Мышкин Н.К. Подгорков В.В., Сизов А.П. Магнитные жидкости в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 275 с.
2. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2011. – 264 с.
3. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования: монография. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2017. – 136 с: ил.
4. Meng Z. An analysis on the magnetic fluid seal capacity / Z. Meng, Z. Jibin, H. Jianhui // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 303. – P.428–431. doi:10.1016/j.jmmm.2006.01.060

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB

И.С. Патокин

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А1-42

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

На сегодняшний день вакуумные выключатели (ВВ) широко используются в сетях среднего напряжения, благодаря своим отличным электрическим и дугогасительным свойствам. Основным их предназначением является отключение токов короткого замыкания. При размыкании контактов вакуумного выключателя образуется дуга из испарившегося материала контактов. Обычно дуга прерывается при первом переходе тока через ноль, поскольку взрывоэмиссионные процессы прекращаются, пары металла деионизируются, охлаждаются и конденсируются. Таким образом, зазор быстро восстанавливает свою высокую диэлектрическую прочность, способную выдержать переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Однако так бывает не всегда.

В последуговой фазе иногда может сохраняться высокая проводимость промежутка, поскольку там сосредотачивается достаточно плотная плазма, образовавшаяся в течении цикла горения дуги. Помимо этого, вследствии все еще большой температуры электродов присутствуют пары металла с микрочастицами. Эти и другие факторы приводят к снижению диэлектрической прочности промежутка во время возникновения быстронарастающего ПВН, и, как следствие, к дальнейшему его повторному пробою.

Общепринято, сопровождающие последуговой ток процессы условно делить на три фазы. На первой фазе перед нулевым током ионы покидают катод и двигаются в сторону анода. После достижения током нуля только что образовавшиеся ионы продолжают двигаться к аноду по инерции. Электроны, компенсируя ионный ток, выравнивают свою скорость со скоростью ионов, поэтому общий электрический ток через промежуток равен нулю. На второй фазе процесс продолжается до тех пор, пока электроны не изменят свое направление; до этого момента суммарный заряд внутри промежутка равен нулю. При отсутствии заряда напряжение на зазоре остается нулевым. Как только электроны меняют свое направление, последуговой ток переходит во вторую фазу, в которой электроны покидают катод, оставляя

за собой ионный слой пространственного заряда. Теперь зазор между электродами не является нейтральным, и на него накладывается ПВН. На третьей фазе катодный слой продолжает расширяться, пока не достигнет нового анода. В этот момент начинается третья фаза последугового тока. Электрический ток уменьшается, так как все электроны покинули межэлектродный промежуток. Электрическое поле между контактами перемещает оставшиеся ионы к катоду, но ток, возникающий при этом, ничтожно мал.

В данной работе для анализа критической для выключателя фазы последугового тока используется continuous transition model (CTM) Эндрюса-Варея, которая описывает рост катодного слоя (s) ионного пространственного заряда [1]. Вместе с этим в модели учитывается и взаимодействие внешней цепи с остаточной плазмой дуги.

Модель CTM представлена следующими уравнениями:

$$s^2 = \frac{4\varepsilon_0 U_0}{9\rho_i}\left[\left(1+\frac{U_{TRV}}{U_0}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3U_{TRV}}{U_0} - 1\right] \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{M_i}{2e}\left(\mathrm{v}_i + \frac{ds}{dt}\right)^2 \quad (2)$$

$$i_{pa} = A\rho_i\left(\frac{ds}{dt} + \mathrm{v}_i\right), \quad (3)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; U_{TRV} – ПВН; M_i – масса ионов; e – элементарный заряд; A – объем разрядной области; ρ_i – заряд ионов;v_i – скорость дрейфа ионов.

Первое уравнение (1) описывает расширение катодного слоя. Второе уравнение (2) определяет электрический потенциал ионов на границе катодного слоя, который зависит от скорости расширения слоя (ds/dt) и скорости дрейфа ионов металла (v_i). Наконец, третье уравнение (3) описывает последуговой ток, который протекает через ВВ после начала роста катодного слоя, но до завершения процесса отключения. Ток имеет две составляющие: это ток смещения, который пропорционален скорости движения катодного слоя (ds/dt) (аналогично току смещения, обусловленному электрическим полем в уравнении Максвелла), и проводящую составляющую, зависящую от скорости движения ионов (v_i).

Моделирование взаимодействия высоковольтной цепи и последугового тока выключателя выполняется в программном комплексе MATLAB 2022b. Предварительно составляются три системы дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), которые включают в себя уравнения напряжения и тока внешней по отношению к выключателю синтетической цепи, а также уравнения CTM.

Из различных существующих курсов по MATLAB известно, что для решения жестких систем уравнений (в частности, ДАУ) применяется многошаговый метод переменного порядка ode15s, использующий формулы численного «дифференцирования назад».

В качестве примера на рис. 1 представлена часть кода для фазы II.

Стоит заметить одну важную особенность при решении ДАУ в MATLAB. Для того чтобы можно было использовать решатель ode15s, систему уравнений необходимо представить в виде [3]:

$$M(t)y' = F(t,y) \quad (4)$$

где $M(t)$ – матрица масс (своя для каждой фазы).

Полученные в процессе моделирования графики представлены на рис. 2.

Представленная модель является относительно упрощенной, и представляет для нас интерес для дальнейшего анализа взаимодействия вакуумного выключателя с электрической цепью.

```
[t,y] = ode15s(@fII, [t(end) t_final], y(end,:), optionsII, ...
A, q_iScaled, v_0, V, U_s, L, C_ep, d, M_iScaled, eps_0);

function dydt = fII(t, y, A, qi, v_0, V, Us, L, Cep, M_i)

dydt(1,1) = -y(4)/(qi*V);                    % (Концентрация ионов)'
dydt(2,1) = (y(3) - y(4))/Cep;               % (Напряжение)'
dydt(3,1) = (Us - y(2))/L;                   % (Ток контура)'
dydt(4,1) = y(4) - A*qi*y(1)*v_0;            % (Ток выключателя)'
dydt(5,1) = y(5) - (M_i/(2*qi))^(1/2)*v_0;   % (Напряжение)'
dydt(6,1) = 0;                               % (Напряженность поля)'
dydt(7,1) = 0;                               % (Толщина слоя ионного заряда)'

end
```

Дополнительно настраиваемые параметры решателя ode15s

Функция системы дифференциальных уравнений фазы II

Рис. 1. Пример кода на языке MATLAB для фазы II (аналогично для оставшихся фаз)

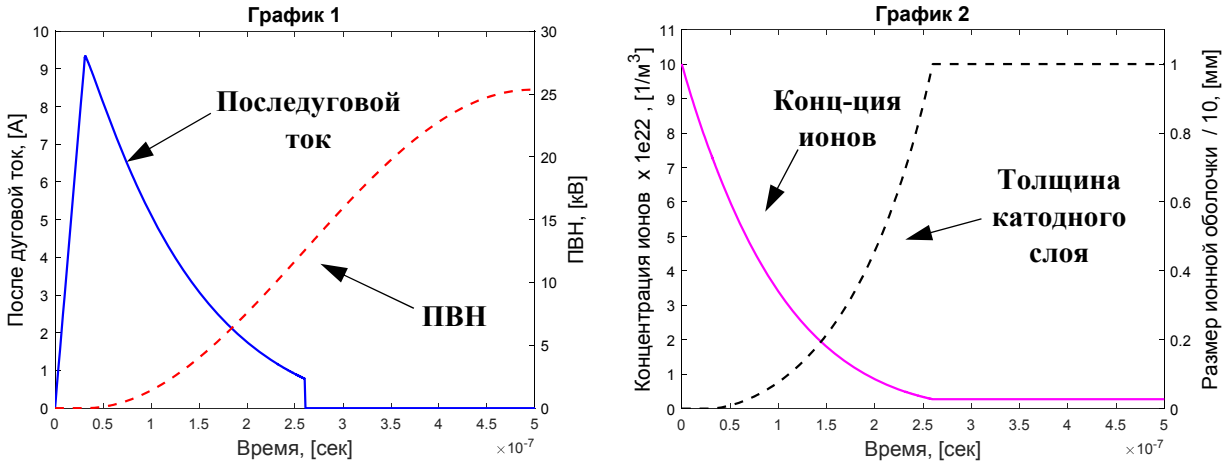


Рис. 2. График 1: Синяя линяя – последуговой ток выключателя, красная пунктирная линия – переходное восстанавливающееся напряжение; График 2: Фиолетовая линия – концентрация ионов, черная пунктирная линия – размер ионной оболочки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andrews J.G., Varey R.H. Sheath growth in a Low Pressure Plasma // The Physics of Fluids – 1970. – V. 14. – No. 2. – P. 339–343.
2. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил.;
3. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВАКУУМЕ

В.П. Здорникова

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ33

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

Бортовая кабельная сеть (БКС), входящая в состав космического аппарата (КА), объединяет в единую систему бортовую аппаратуру с целью обеспечения электрической связи. Срок активного существования КА напрямую связан со сроком службы БКС [1].

Надежность БКС определяется, главным образом, надежностью изоляции. К внешним воздействующим факторам, оказывающим влияние на КА, относятся: космическая радиация, вакуум, невесомость, температура, атомарный кислород и т. д.

Среди нагрузок, воздействующих на изоляцию в процессе эксплуатации наиболее выраженное действие оказывает температура. Перегревы (даже локальные) приводят к резкому снижению срока службы и ухудшению эксплуатационных свойств бортовой кабельной сети, поскольку в условиях космоса отсутствует теплопроводность и конвекционный теплообмен [5]. В связи с этим на стадии проектирования важно определить реальную температуру элементов конструкции кабельных изделий (КИ). При эксплуатации (в рабочем состоянии) температура КИ $T_{КИ}$ определяется номинальным значением тока $I_{ном}$.

Способы определения температурного состояния ТПЖ включают в себя как экспериментальный подход, так и методы цифрового моделирования.

Рабочая температура токопроводящей жилы $T_{ТПЖ}$ экспериментально определяется с использованием термовакуумной установки, которая имитирует условия эксплуатации космического аппарата [2].

Оценка теплового состояния токопроводящей жилы при помощи цифрового моделирования осуществляется с использованием программной среды *Comsol Multiphysics* [4].

Результаты определения температуры образца ТПЖ, полученной с помощью цифровой модели и в ходе эксперимента, при различных значениях тока приведены в табл. 1. Графическая интерпретация результатов представлена на рис. 1.

Таблица 1. Температура образца ТПЖ, определенная с помощью цифровой модели и в ходе эксперимента

Значение тока, А	Температура ТПЖ, К		
	Цифровая модель	Эксперимент	
		Термопара	Тепловизор
0	293	293	293
25	295,84	293	294
50	304,48	294	295,6
75	318,82	314	313,3
100	338,91	332	335,3
125	364,83	351	356,2
150	396,43	393	396
175	433,78	424	427,8
200	476,88	464	467,5
225	522,72	522	526,1

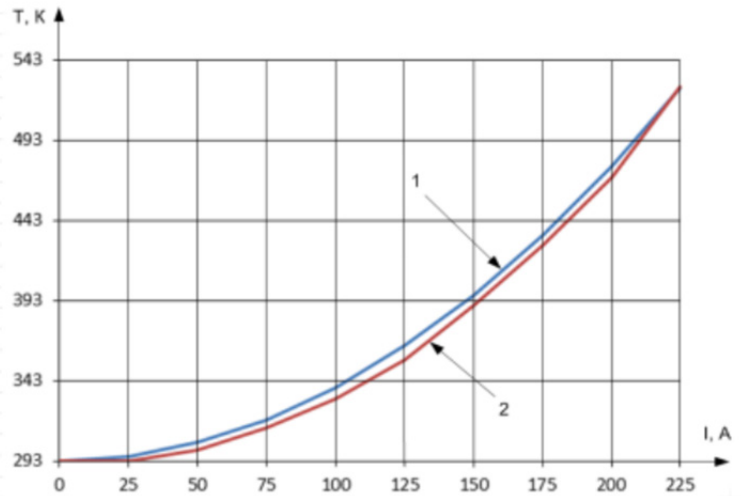


Рис. 1. Температура токоведущего элемента по результатам моделирования (1) и эксперимента (2)

Расхождение результатов моделирования и эксперимента не более 3 %.

Работа продолжает цикл исследований, проводимых совместно с АО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева.

На основе ранее проведенных научных исследований выделены следующие результаты [3]:

- отработана методика измерения удельного объемного сопротивления изолированных токопроводящих жил при создании вакуума;
- разработана базовая цифровая модель токопроводящей жилы с использованием программной среды *Comsol Multiphysics*, учитывающая токовый нагрев и теплообмен с окружающей средой;
- проведена оценка изменения электрического сопротивления физических моделей элементов бортовой кабельной сети;
- разработана методика испытаний кабельных изделий с учетом токового нагрева ТПЖ;
- проведена экспериментальная проверка адекватности цифрового двойника токопроводящей жилы с расхождением не более 3 %;
- сформулированы рекомендации по экспериментальному определению степени нагрева ТПЖ при давлении до 10^{-7} атм;
- оценено тепловое состояние под воздействием токовых нагрузок на реальных образцах, используемых в БКС.

Полученные рекомендации, подходы и цифровые модели кабельных изделий станут отправной точкой для дальнейшей научно-исследовательской деятельности. В будущем предполагается использовать их в качестве базы для проведения научных исследований.

Планируется оценить тепловое состояние:

- токопроводящей жилы из различных металлов;
- новых конструкций БК и проводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абламейко С.В., Саечников В.А., Спиридонов А.А. Малые космические аппараты. – 2012.
2. Хафизов Д.Е., Казанцев В.В., Ефремов С.В. Моделирование перспективных конструкций элементов бортовой кабельной сети космического аппарата // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов в 9 ч., Новосибирск, 30 ноября–4 декабря 2020. – Новосибирск: НГТУ, 2020 – Т. 9 – С. 113–115.
3. Хафизов Д.Е., Казанцев В.В. Определение электрофизических параметров БКС с учетом внешних воздействующих факторов // Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире: материалы XXI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Рубцовск, 25–26 Апреля 2019. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2019 – С. 270–273.
4. Базовая платформа: Comsol Multiphysics® [Электронный ресурс] URL: https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics (дата обращения: 13.11.2023)
5. ОКБ КП // Основное конструкторское бюро кабельной промышленности [Электронный ресурс] URL: http://www.okbkp.ru/production/cabels/bort/ (дата обращения: 13.11.2023).

ВОПРОСЫ ИЗОЛИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ПРОВОДОВ С ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛОЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

К.А. Харитонова[1], Е.В. Блинова[2]

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ООЭ, гр. А2-27[1], гр. 5АМ28[2]

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент, ТПУ

Назначение бортовых авиационных проводов – передача электрической энергии для питания различного электрооборудования и приборов на борту самолета [1]. Основными требованиями к материалам токопроводящей жилы современного бортового провода являются низкая масса сплава, термостабильность, улучшенные физико-механические характеристики и невысокая стоимость. При выборе сплава вновь разрабатываемого бортового провода следует учитывать следующие эксплуатационные особенности: цикличность температурных режимов работы, длительная эксплуатация при пониженном давлении в условиях невозможности обеспечения необходимого теплоотвода, наличие влаги и конденсата агрессивных веществ, технологичность токопроводящей жилы при ее монтаже в бортовую кабельную систему (БКС). Часть вышеуказанных специфических проблем представляется возможным нивелировать при помощи правильно подобранного материала изоляционного слоя провода.

На сегодняшний день известны множество вариантов комбинированной изоляции проводов авиационного назначения с применением материалов различного свойства для устранения местных агрессивных эксплуатационных факторов. Так, например, для проводов, соединяющих подвижные части самолета, в качестве одного из слоев комбинированной изоляции применяется кремнийорганическая резина, которая обладает морозостойкостью, высокой гибкостью и долговечностью, стойкостью к озону и солнечной радиации, механической и электрической прочностью и отличными электроизоляционными свойствами. Эти характеристики позволяют обеспечить безотказность электрической системы выпуска шасси самолета. Для проводов зажигания в качестве одного из слоев, обеспечивающих работу при наиболее высоких и нестабильных напряжениях, может использоваться фторопластовая лента, обмотанная с необходимой радиальной толщиной с одновременной промазкой сополимером. Применение специфичных материалов в производстве бортовой кабельной техники требует соблюдения специфических технологических особенностей материала и условий его переработки.

Для алюминиевых сплавов, применяемых в качестве токопроводящей жилы, для бортового провода характерно образование на поверхности проволоки оксидного слоя (Al_2O_3), который является отличным естественным защитным покрытием ТПЖ от различных агрессивных сред, но одновременно с этим хорошим электроизолятором. Слой Al_2O_3 препятствует проникновению примесей и дальнейшему окислению, а также сращиванию алюминиевых проволок, но приводит недостаточной надежности таких соединений и снижает безопасность при их применении [2]. Так, например, для однопроволочной жилы этот фактор является препятствием при монтаже провода: для устранения слоя необходимо произвести механическую зачистку жилы непосредственно перед монтажом, в случае же изготовления бортового авиационного провода наличие оксидного слоя на многопроволочной жиле может привести к отказу всей системы. Для устранения данной проблемы предлагается нанесение адгезионного защитного покрытия толщиной около 0,01 мм из суспензии фторопласта. Обеспечение правильной скрутки ТПЖ и такого защитного покрытия ТПЖ позволит сохранить технологичность строительной длины провода в процессе ее прохождения по маршруту изготовления.

Использование в качестве электроизоляции полиимидно-фторопластовой пленки (ПМФ) позволяет существенно увеличить удельную мощность и надёжность электрооборудования, повышает температуру эксплуатации, уменьшает объём и вес [3]. ПМФ для изоляционного слоя бортового провода обеспечивает требуемую электрическую и механическую прочности, высокую нагревостойкость, на сегодняшний день в качестве изоляционного слоя малой толщины для проводов серии БИФ и БК на предприятии ОКБ КП применяется полиимидно-фторопластовая лента (ПМФ) с односторонним или двусторонним покрытием фторопластового слоя. Основа ленты имеет толщину 30–40 мкм, а покрытие – 40–50 мкм, плотность около 1.41 г/см^3. Обмотка такой лентой производится обычно с перекрытием от 30 до 50 % с последующей термообработкой для перестройки фторопластового покрытия между слоями изоляции и обеспечения монолитности.

Рекомендуется в качестве альтернативы к имеющейся ленте ПМФ использовать новую ленту с сниженной плотностью и утоненным фторопластовым покрытием (примерно 10 мкм), при таком решении будет иметься большая экономия по массе изоляции, и снижение радиальной толщины изоляционного слоя провода. Для ТПЖ из алюминиевого сплава предлагается использовать ленту с двусторонним покрытием с предварительным нанесением адгезионного слоя из суспензии фторопласта. Предполагается, что применение такой комбинации материалов в первом слое изоляционного «пирога» провода позволит обеспечить необходимую электрическую и механическую прочности.

Для выполнения данной задачи в соответствии с направлением развития предприятия по авиационной тематике в рамках концепции импортозамещения планируется провести ряд исследовательских работ для изучения облегченной ленты ПМФ. Установление фактических значений физико-механических и электрических параметров ленты ПМФ в рамках внутреннего входного контроля и сравнения данного материала с образцами зарубежных производителей. Также следует проверить предположение по ощутимому снижению физико-механических качеств спеченной ленты с утоненным фторопластовым слоем, и провести опытно-конструкторские работы по изготовлению авиационного провода сниженной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дикерман Д.Н., Кунегин В.С. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 47.
2. Пешков И.Б. Кабели и провода. Основы кабельной техники. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 25.
3. Егоров А.И. Особенности адгезионных свойств полиимидно-фторопластовых пленок // Кабели и провода. – 2016. – Вып. 1(356). – С. 18–21.

Секция 6
Энергосбережение и энергоэффективность

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ДЭС С АККУМУЛЯТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Д.Г. Орешков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ24

Научный руководитель: Б.В. Лукутин, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

На сегодняшний день дизельные электростанции актуальны в следующих областях: регионы с плохо развитой инфраструктурой электроснабжения, в отдаленных районах и населенных пунктах; временные строительные объекты; морская и авиационная промышленности; резервное электроснабжение.

Основные проблемы дизельных электростанций:

- *Повышенный расход топлива:* дизельные электростанции требуют дорогостоящего топлива, поэтому их эксплуатация может быть дорогой. Кроме того, требуется регулярное обслуживание и замена деталей, что также сопряжено с расходами.
- *Зависимость от нефтепродуктов:* дизельным электростанциям необходимо наличия топлива, что делает их зависимыми от поставок нефтепродуктов. Это может привести к проблемам автономного электроснабжения при трудностях с доставкой или росте цен на дизельное топливо.

Основной идеей данной работы является экономия топлива за счет выравнивания режима работы ДЭС с помощью аккумуляторных батарей, работающих в режиме заряда-разряда через двунаправленный статический преобразователь электроэнергии (рис. 1). В результате неравномерный график электрической нагрузки дизельной системы электроснабжения дополняется энергией заряда аккумуляторов, при низком уровне текущего электропотребления, и энергией разряда в периоды максимальных нагрузок. Загрузка ДЭС в рассматриваемом энергетическом комплексе может быть оптимизирована по критерию расхода топлива. Установленная мощность ДЭС выбирается не по пиковому электропотреблению нагрузки, а по её среднесуточному значению.

Объектом исследования является поселок Алысардах Республики Саха (Якутия).

В работе рассчитаны характерные графики нагрузок данного поселка для разных сезонов года, а также выбрана дизельная электростанция АД-40-Fregat. Для базового варианта с

обычной ДЭС рассчитан годовой расход топлива, который составил 58454,64 литров дизельного топлива, а также его стоимость: 4512698 руб. в год.

Для улучшения технико-экономических характеристик базовой ДЭС предложен дизельный генератор Baudouin MGEp16BN меньшей установленной мощности с аккумуляторной системой накопления электроэнергии, позволяющей производить обмен электроэнергии с ДЭС через двунаправленный статический преобразователь. Для данного варианта годовой расход топлива составил 54312 литров, а его стоимость – 4192886 руб. в год. Выбраны аккумуляторные батареи и построена суточная циклограмма состояния их заряда (рис. 2), что позволило оптимизировать их ёмкость в соответствии с выбранным режимом работы дизель-генератора.

Следующим шагом оптимизации энергетического комплекса является изменение коэффициента загрузки ДЭС с помощью варьирования ёмкости аккумуляторов. В результате анализа суточной циклограммы заряда аккумуляторов (рис. 3) определено соотношение между коэффициентом загрузки ДЭС и ёмкостью аккумуляторов. Установлено, что увеличение ёмкости накопителя позволяет сократить годовой расход топлива до 47523 литров, а его стоимость до 3668776 руб.

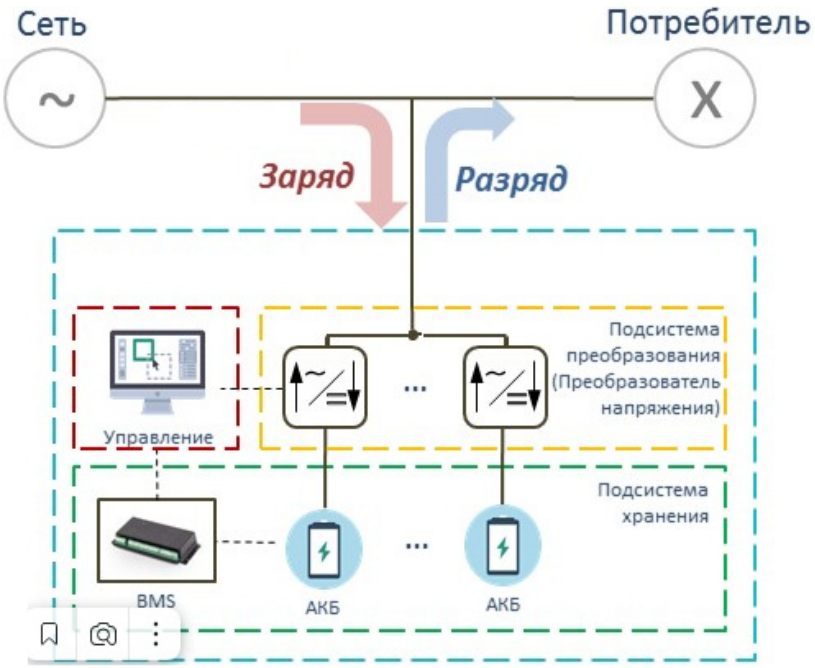


Рис. 1. Схема двунаправленного статического преобразователя электроэнергии

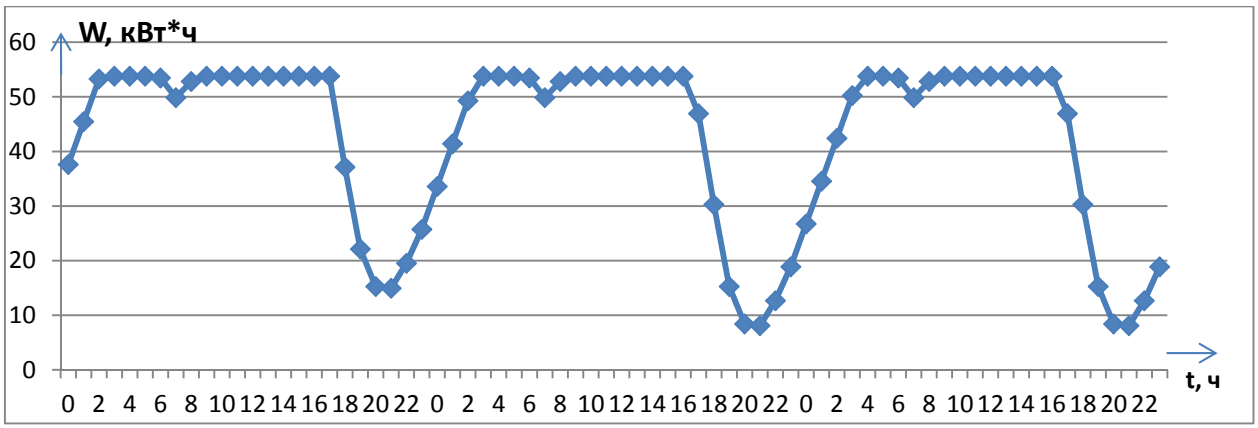


Рис. 2. Суточная циклограмма заряда аккумуляторных батарей

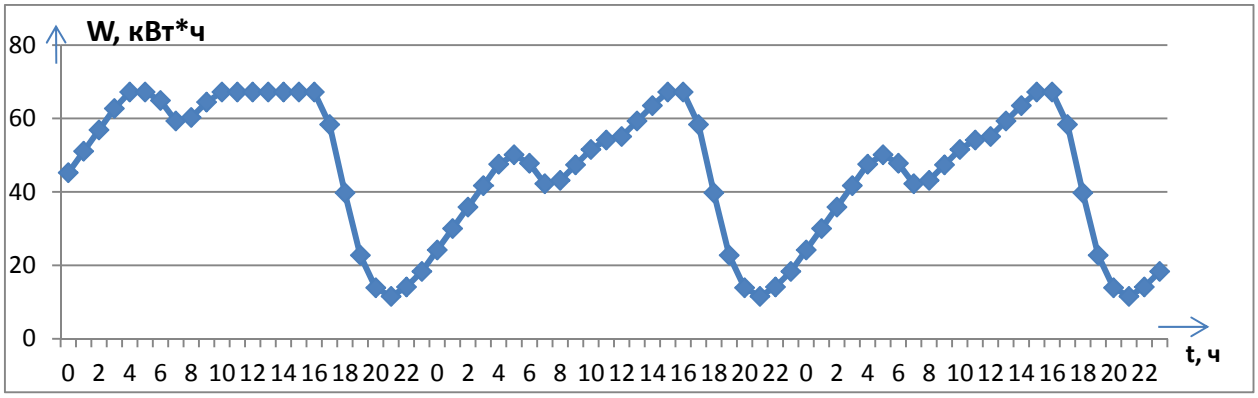


Рис. 3. Суточная циклограмма заряда аккумуляторных батарей большей емкости

Заключение

Сравнивая варианты построения ДЭС, видно, что применение системы накопления электроэнергии с возможностью энергообмена позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы дизельных систем электроснабжения. Для рассмотренного примера, годовой расход топлива сокращается на 10931,64 литров и его стоимость на 843922,6 рублей, по сравнению с вариантом классической ДЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информация об объеме производства и фактических расходах на производство 1 кВт·ч электрической энергии за 2021 г. URL: http://www.rushydro.ru/press/holding-news/112186.html (дата обращения 11.03.2023).
2. Типовые суточные графики электрических нагрузок. URL: https://online-electric.ru/ %20 (дата обращения 02.04.2023).
3. Дизельные генераторы Фрегат. URL: https://dgufregat.ru/ (дата обращения 13.04.2023).
4. Дизельные генераторы. Сайт завода Амперос. URL: https://mge-power.ru/product/dizelnyy-generator-baudouin-mgep16bn (дата обращения 19.04.2023).
5. Литий-железо-фосфатные LiFePo4 аккумуляторы. URL: https://lifepo4.ru/akkumulyator-lifepo4-24v-560ah (дата обращения 27.04.2023).
6. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ7. – Новосибирск: Сиб. Унив. изд-во, 2009. – 853 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ

А.А. Свинухова[1], А.П. Корчагина[2]

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭФ, гр. А3-08[1]; ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ22[2]

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Высокие темпы развития промышленности побуждают искать новые современные материалы способные удовлетворить растущие потребности. На данный момент особенно актуальны материалы способные выдерживать высокие и сверхвысокие температуры для применения в аэрокосмической отрасли и в энергетике [1]. Потенциальным кандидатом для использования в таких условиях является сверхвысокотемпературная керамика (UHTC), характеризующаяся температурой плавления 3300 К [2]. Но ввиду повышающихся требований

данный класс материалов не всегда отвечает поставленным задачам, что приводит к исследованиям новых материалов, в частности, высокоэнтропийных карбидов [3].

Высокоэнтропийная керамика представляет собой твердый раствор из четырех и более основных компонентов карбидов переходных металлов в почти эквиатомных соотношениях или, по крайней мере, с содержанием каждого элемента от 5 до 35 ат. % в однофазной структуре [4]. Высокоэнтропийные карбиды металлов привлекли огромное внимание для потенциальных применений в различных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, режущие инструменты и ядерные реакторы. Такое широкое применение обусловлено необычным сочетанием привлекательных физико-химических свойств этих соединений: температура плавления, превышающая 3000 К, высокая твердость, химическая инертность, хорошие электро- и теплопроводность, и низкое поглощение нейтронов [5].

На данный момент существует ряд широко известных методик для синтеза высокоэнтропийной керамики. Высокоэнтропийная керамика может быть получена методом искрового плазменного спекания (SPS) с предварительной высокоэнергетической обработкой порошковых смесей компонентов в шаровых мельницах [6], методом спекания во вспышке (FS) [7], спеканием без давления (PS) [8], горячим прессованием (HP) [9] и реактивным высокоэнергетическим шаровым измельчением (R-HEBM) [10].

Несмотря на достоинства каждая из этих методик характеризуется большими энергетическими затратами, что в конечном счете влияет на стоимость полученного материала. Основными причинами являются: большая длительность процесса синтеза, использование вакуумного оборудования, применение вспомогательных веществ (инертные газы, растворы). Альтернативным вариантом получения высокоэнтропийных карбидов может служить электродуговой синтез.

Электродуговой синтез – перспективная ветвь развития получения керамических материалов. Реализация данного метода в открытой воздушной среде с достижением эффекта экранирования реакционного объема генерирующимся потоком газов диоксида углерода и монооксида позволяет отказаться от вакуумного оборудования и упростить устройство дугового реактора. В совокупности с небольшим количеством времени, требующимся для синтеза, данный метод можно назвать энергоэффективным и многообещающим. Ранее уже было успешно апробировано получение высокоэнтропийной керамики $HfTaTiNbZrC_5$ электродуговым безвакуумным методом [11–13].

Все эксперименты были выполнены на оригинальном безвакуумном электродуговом реакторе, разработанном в лаборатории Томского политехнического университета. Основными элементами реактора являются графитовые анод и катод, которые подключены к источнику постоянного тока. В качестве исходных реагентов были взяты порошки чистых металлов (титан, цирконий, ниобий, гафний, тантал) и углерод с размером частиц не более 10 мкм. Исходная смесь реагентов подвергалась гомогенизации в шаровой вибрационной мельнице Retsch mm 500. После гомогенизации смесь порошков закладывалась в графитовый тигель и подвергалась плазменному воздействию в течение 45 с при силе постоянного тока 200 А. В процессе синтеза электрические параметры реактора регистрировались двухканальным осциллографом Rigol 1052E.

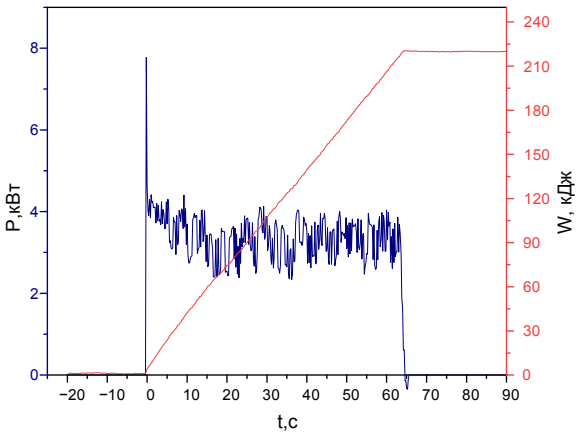


Рис. 1. Осциллограммы мощности и напряжения в зависимости от времени

Электрические параметры синтеза такие, как напряжение, ток и время фиксировались с помощью двухканального цифрового осциллографа. На основании данных осциллографа были рассчитаны следующие параметры: изменение энергии и мощности в зависимости от времени (рис. 1).

При синтезе высокоэнтропийного карбида $TiZrNbHfTaC_5$ было проведено 27 экспериментов, исходя из полученных значений выполнен анализ однородности распределения полученных данных.

На основании проведенных экспериментов были получены следующие результаты: среднее значение напряжения 32,78 ± 3,30 В; среднее значение тока 108,78 ± 5,4 А; среднее значение мощности 3,44 ± 0,23 кВт; среднее значение энергии 221,63 ± 10,94 кДж. Исходя из полученных экспериментальных данных можно считать, что электродуговой безвакуумный синтез энергоэффективен и является хорошей альтернативой существующим методикам получения высокоэнтропийных карбидов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Synthesis and high-temperature properties of medium-entropy (Ti,Ta,Zr,Nb)C using the spark plasma consolidation of carbide powders / D. Demirskyi, T.S. Suzuki, K. Yoshimi, O. Vasylkiv // Open Ceramics. – 2020. – V. 2. – P. 1–9. – ISSN: 2666-5395.
2. Permeability and mechanical integrity of porous biomorphic SiC ceramics for application as hot-gas filters / A. Gómez-Martín, M.P. Orihuela, J.A. Becerra, J. Martínez-Fernández, J. Ramírez-Rico // Materials and Design. – 2016. – V. 107. – P. 450–460. – ISSN: 1873-4197.
3. Phase, microstructure and related mechanical properties of a series of (NbTaZr)C-Based high entropy ceramics / Zhongtao Li et al. // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – P. 14341–14347. – ISSN: 1873-3956.
4. Synthesis of single-phase (ZrTiTaNbMo)C high-entropy carbide powders via magnesiothermic reduction process / Baoqiang Li et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – V. 42. – P. 6767–6773. – ISSN: 1873-619X.
5. Theory of bonding in transition-metal carbides and nitrides / J. Häglund, A. Fernández Guillermet, G. Grimvall, M. Körling // Physical Review B. – 1993. – V. 48. – P. 11685–11691. – ISSN 2469-9969.
6. High-entropy carbide: A novel class of multicomponent ceramics / Jieyang Zhou, Jinyong Zhang, Fan Zhang, Bo Niu, Liwen Lei, Weimin Wang // Ceramics International. – 2018. – V. 44. – P. 22014–22018. – ISSN: 1873-3956.
7. Reactive flash spark plasma sintering of high-entropy ultrahigh temperature ceramics / Joshua Gild, Kevin Kaufmann, Kenneth Vecchio, Jian Luo // Scripta Materialia. – 2019. – V. 170. – P. 106–110. – ISSN: 1872-8456.
8. Pressureless sintering and properties of $(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})C$ high-entropy ceramics: The effect of pyrolytic carbon / Duo Yu et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – P. 3823–3831. – ISSN: 1873-619X.
9. First-principles study, fabrication, and characterization of $(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})C$ high-entropy ceramic / Beilin Ye, Tongqi Wen, Kehan Huang, Cai-Zhuang Wang, Yanhui Chu // Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – V. 102. – P. 4344–4352. – ISSN:1551-2916.
10. High-entropy (HfTaTiNbZr)C and (HfTaTiNbMo)C carbides fabricated through reactive high-energy ball milling and spark plasma sintering / D.O. Moskovskikh et al. // Ceramics International. – 2020. – V. 46. – P. 19008–19014. – ISSN: 1873-3956.
11. Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide $TiZrNbHfTaC_5$ in self-shielding DC arc discharge plasma / A.Ya. Pak, P.S. Grinchuk, A.A. Gumovskaya, Yu.Z. Vassilyeva // Ceramics International. – 2022. – V. 48. – P. 3818–3825. – ISSN: 1873-3956.
12. Production of $HfTaTiNbZrC_5$ High-Entropy Carbide Micropowder in the Plasma of an Atmospheric Pressure Arc Discharge / A.Ya. Pak, P. S. Grinchuk, G. Ya. Mamontov, T. Yu. Yakich, A. A. Gumovskaya // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – V. 94. – P. 88–94. – ISSN 1573-871X.
13. Machine learning-driven synthesis of $TiZrNbHfTaC_5$ high-entropy carbide / A.Ya. Pak, V. Sotskov, A.A. Gumovskaya et al. // npj Computational Materials. – 2023. – V. 9. – P. 1–11. – ISSN 2057-3960.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УРАВНЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЧАСОВ НА ОСНОВЕ АКТУАЛЬНЫХ БИБЛИОТЕК НУКЛИДОВ

Р.В. Дадашов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5091

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, к.пед.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Введение

Нейтронно-физические расчеты ядерных реакторов являются важной частью при проектировании, строительстве и эксплуатации АЭС в целом. В целях безопасной эксплуатации и эффективного управления реактором такие расчеты должны быть максимально точными, поскольку от этого зависит гибкость изменения и пределы мощности установки, загрузка топлива, габариты конструкционных материалов, параметры систем защиты. Все эти аспекты должны соответствовать оптимальным значениям технико-экономического обоснования и высоким требованиям ядерной безопасности.

Важность запаздывающих нейтронов

В результате деления ^{235}U под действие нейтронов происходит образование осколков деления, имеющих разные атомные массы (A) и зарядовые числа (Z). Среди продуктов деления были обнаружены осколки с A = 72–161 и Z = 30–65. Часть из этих осколков являются ядрами-предшественниками запаздывающих нейтронов, которые в дальнейшем претерпевают бета-распад и становятся ядрами-излучателями запаздывающих нейтронов. Именно благодаря запаздывающим нейтронам (ЗН), увеличивающим время жизни одного поколения нейтронов на несколько порядков, возможно безопасно управлять ядерным реактором, и контролировать самоподдерживающуюся цепную реакцию деления.

Суммарная доля выхода ЗН (β) – среднее число запаздывающих нейтронов, приходящееся на один получаемый нейтрон деления в критическом реакторе бесконечных размеров [1]. На данный момент пользуются шестигрупповым приближением (13 родоначальников ЗН) с усредненными свойствами изотопов, при делении ядер ^{235}U на каждые 10000 нейтронов деления лишь 64 нейтрона будут запаздывающими, а остальные 9936 нейтронов – мгновенными (или 0,64 % всех нейтронов – запаздывающие, а остальные 99,36 % нейтронов – мгновенные). В данной работе будет сделана попытка повышения точности приближения, за счет рассмотрения вклада 38 родоначальников ЗН в отдельности.

Расчет доли выхода запаздывающих нейтронов

Расчет будем вести по следующей формуле [1]:

$$\beta_i = \frac{\gamma_i \cdot p_{\beta i}}{\nu_5}, \quad (1)$$

где γ_i – доля выхода i-го родоначальника ЗН [2]; $p_{\beta i}$ – вероятность бета-распада родоначальника ЗН с образованием нейтрона [3]; ν_5 – число нейтронов деления рождающихся в одном акте деления ядра ^{235}U под действием теплового нейтрона (ν_5 = 2,416 [1]).

В ходе выполнения работы были обобщены современные данные из разных источников, включая зарубежные, на основе которых были рассчитаны доли выхода по каждому элементу (табл. 1). Изотопы были отобраны по принципу наибольшей величины произведения γ_i и $p_{\beta i}$.

Таблица 1. Вклад родоначальников в суммарный выход ЗН

Родоначальник	γ_i	$p_{\beta i}$, %	β_i
^{87}Br	2,11E-02	2,531	0,0002211
^{88}Br	1,75E-02	6,723	0,0004872
^{89}Br	1,24E-02	13,77	0,0007070
^{90}Br	3,95E-03	25,62	0,0004190
^{91}Br	1,11E-03	30,41	0,0001398
^{92}Br	4,27E-05	33,1	0,0000059
^{93}Br	1,56E-05	64	0,0000041
^{92}Kr	1,65E-02	0,03323	0,0000023
^{93}Kr	3,84E-03	1,992	0,0000317
^{94}Kr	1,15E-03	1,118	0,0000053
^{93}Rb	4,25E-02	1,601	0,0002817
^{94}Rb	1,98E-02	10,392	0,0008520
^{95}Rb	7,84E-03	8,84	0,0002870
^{96}Rb	1,53E-03	14,19	0,0000899
^{97}Sr	1,67E-02	0,032	0,0000022
^{98}Sr	6,89E-03	0,233	0,0000066
^{99}Sr	1,02E-03	0,0962	0,0000004
^{100}Sr	1,51E-04	1,112	0,0000007
^{101}Sr	4,55E-05	2,523	0,0000005
^{97}Y	1,89E-02	0,0581	0,0000045
^{98}Y	2,78E-02	0,33	0,0000380
^{99}Y	2,04E-02	1,973	0,0001667
^{103}Zr	4,10E-03	1	0,0000170
^{105}Zr	4,12E-04	2	0,0000034
^{105}Nb	1,95E-03	1,8	0,0000145
^{134}Sn	1,07E-04	17	0,0000075
^{135}Sb	9,84E-04	20	0,0000815
^{136}Te	1,20E-02	1,38	0,0000686
^{137}Te	2,62E-03	2,912	0,0000316
^{137}I	3,26E-02	7,631	0,0010301
^{138}I	1,66E-02	5,302	0,0003644
^{139}I	6,84E-03	9,743	0,0002760
^{140}I	2,75E-03	7,884	0,0000898
^{141}I	4,88E-04	21,23	0,0000429
^{142}Cs	3,00E-02	0,0916	0,0000114
^{143}Cs	1,26E-02	1,582	0,0000825
^{144}Cs	4,34E-03	2,981	0,0000536
^{145}Cs	8,16E-04	13,56	0,0000458

Анализ полученных результатов

Для оценки повышения уровня точности нового приближения на основе полученных результатов с 38 родоначальниками и стандартного шестигруппового приближения, выполнен расчет уравнения обратных часов (УОЧ) (см. рис. 1).

Вид самого уравнения [1]:

$$\rho = \frac{l}{T} + \sum_{i=1}^{N} \frac{\beta_{эi}}{1 + \lambda_i T} \ , \qquad (2)$$

где ρ – сообщенная реактору реактивность; l – среднее время жизни мгновенных нейтронов (l = 0,0001 [1]); λ – постоянная распада i-го элемента; T – установившийся период реактора; N – количество рассматриваемых групп или элементов в зависимости от приближения (6 или 38).

С помощью УОЧ оператор реакторной установки может быстро и точно оценить связь реактивности и периода реактора в процессе пуска, изменения мощности, останова и т. д.

График УОЧ по новому приближению отклоняется на 0,015 % – 0,003 % от графика по стандартному приближению (построенному по данным из [1]) только при небольших значениях периода (от 5 до 25 с) реактора, далее расхождение постепенно уменьшается до 0,0005 %.

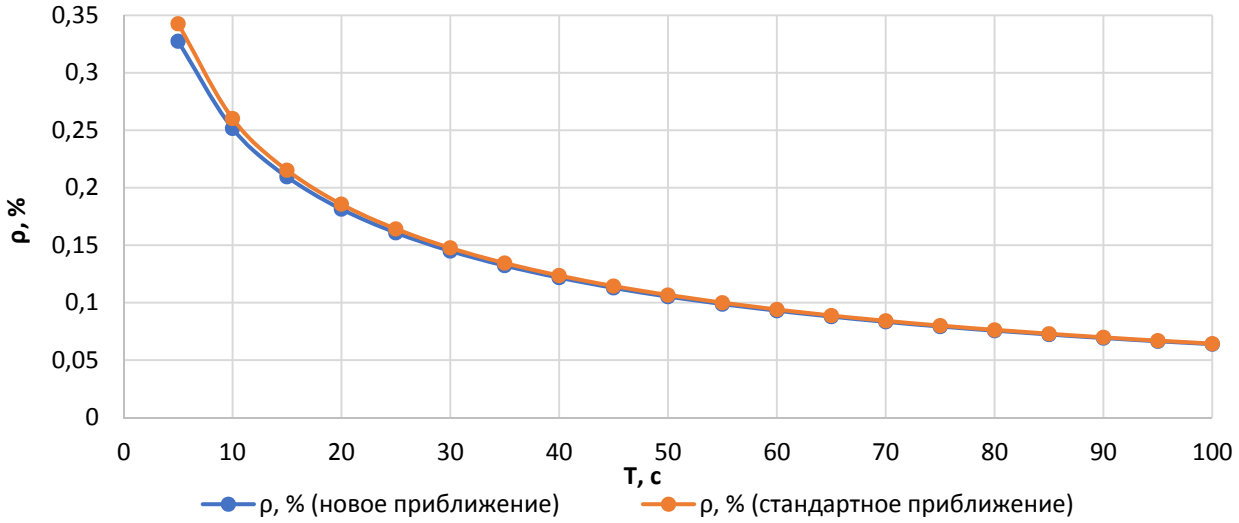


Рис. 1. График УОЧ для двух приближений

Шестигрупповое приближение

Данное приближение используется для упрощения вычислений по УОЧ. Шесть групп родоначальников отобраны по схожим характеристикам (период полураспада, постоянная распада). В разных источниках представлены таблицы с шестигрупповым приближением на основе разных элементов, точность которых составляет соответственно 48 [1], 37 [4] и 78 % [5] от суммарной доли выхода, вычисленной по новому приближению (0,005972). Для повышения уровня точности расчетов и сохранении шестигруппового приближения была составлена уточненная таблица на основе 19 элементов, играющих наибольшее значение в процессе генерации ЗН (табл. 2).

Таблица 2. Уточненная таблица 6 групп родоначальников ЗН

Номер группы	Родоначальник	$T_{1/2}$	Абсолютная доля выхода группы
1	^{87}Br	55,65	0,0002211
2	^{137}I	24,5	0,0010301
3	^{88}Br	16,29	0,0005555
	^{136}Te	17,63	
4	^{89}Br	4,4	0,0010756
	^{138}I	6,23	
	^{97}Y	3,75	
5	^{137}Te	2,49	0,0021285
	^{93}Kr	1,286	
	^{94}Rb	2,702	
	^{105}Nb	2,95	
	^{90}Br	1,91	
	^{99}Y	1,47	
	^{139}I	2,28	
	^{143}Cs	1,791	
6	^{95}Rb	0,3775	0,0005153
	^{91}Br	0,543	
	^{145}Cs	0,587	
	^{141}I	0,43	

Согласно табл. 2, вклад в суммарную долю выхода ЗН составляет 88 % от 0,005972.

Заключение

Благодаря новой графической зависимости (рис. 1), полученной с помощью актуализации расчета суммарной доли ЗН, можно точнее: оценивать зависимость периода реактора от реактивности и наоборот, определять величину перемещения стержней управления и защиты, и т. д. Это позволит точнее и безопаснее управлять ядерным реактором, что в свою очередь позволит увеличит период его эксплуатации. Также была составлена уточненная таблица, которая повышает точность расчёта по стандартному шестигрупповому приближению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзликин Г.Я. Основы теории реакторов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2015. – 452 с.
2. Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Data and Reactor Engineering Division, Nuclear Data Center. – Japan, 2023. – URL: https://www.ndc.jaea.go.jp. (дата обращения 28.10.2023).
3. IAEA Nuclear Data Section – Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission Data. – USA, 2022. – URL: https://www-nds.iaea.org/relnsd/delayedn/delayedn.html. (дата обращения 28.10.2023).
4. H. Böck, M. Villa. Physics and Kinetics of Triga Reactor, Atomic Institute of the Austrian Universities, 2007. – 36 с.
5. Impact of delayed neutron constants on reactivity effects measured in a fast reactor / A. Krása et al. – Belgian Nuclear Research Centre, 2019. – 9 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА БОРА

А.А. Кузнецова[1], Ю.З. Васильева[2], П.В. Поваляев[3]

Томский политехнический университет,
ЛПМЭО ИШЭ ТПУ, инженер[1]; научный сотрудник[2]; младший научный сотрудник[3]

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Карбид бора является уникальным материалом, характеризующимся высокой твердостью, высокой температурой плавления (более 2500 °С), низкой плотностью (около 2,5 г/см^3), термостабильностью, хорошими электрическими и ядерными характеристиками [1]. Вышеперечисленные свойства позволяют использовать карбид бора для производства сверхтвердой керамики, износостойких покрытий, абразивных порошков, а также поглотителя нейтронного излучения [2–4].

Основным методом получения карбида бора является карботермическое восстановление из оксида бора. Синтез карбида бора проводится в среде инертного газа в течение нескольких часов при температуре 1500–2300 °С [5]. Также для синтеза карбида бора используется самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механический синтез в шаровых мельницах путем размола исходных материалов в течение длительного времени, плазменное распыление, кристаллизация из расплава [6]. Данные методы характеризуются низкой производительностью, высокими энергетическими затратами на получение карбида бора, что вносит существенный вклад в стоимость получаемого продукта.

Перспективным для синтеза карбида бора является использование электродугового плазменного метода. Такой метод обеспечивает высокие скорости нагрева и позволяет достичь

высоких температур в широком диапазоне [7]. Применение безвакуумного электродугового плазменного синтеза позволяет существенно упростить и удешевить используемое оборудование. Реализация процесса синтеза в открытой воздушной среде позволит значительно повысить энергоэффективность получения карбида бора ввиду отсутствия необходимости получения и поддержания требуемой степени вакуума [8].

В работе были проведены экспериментальные исследования по получению карбида бора энергоэффективным плазменным методом в открытой воздушной среде. Полученный материал был исследован методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа марки JEOL JEM-2100F.

На рис. 1 представлены результаты просвечивающей электронной микроскопии карбида бора. Установлено, что основная доля частиц имеет размер от 200 нм до 500 нм, частицы имеют неправильную форму с характерной огранкой (рис. 1, *а*, *б*). По результатам ПЭМ определены межплоскостные расстояния из картины дифракции электронов (рис. 1, *в*): 4,49 Å, 2,59 Å, 1,71 Å, 1,65 Å, 1,44 Å, 1,26 Å, которые в пределах допустимых погрешностей соответствуют эталонным межплоскостным расстояниям фазы карбида бора B_4C (карточка № 35-798, PDF4+), и межплоскостное расстояние 1,52 Å, которое в пределах допустимых погрешностей соответствует эталонному межплоскостному расстоянию фазы карбида бора $B_{13}C_2$ (карточка № 71-108, PDF4+).

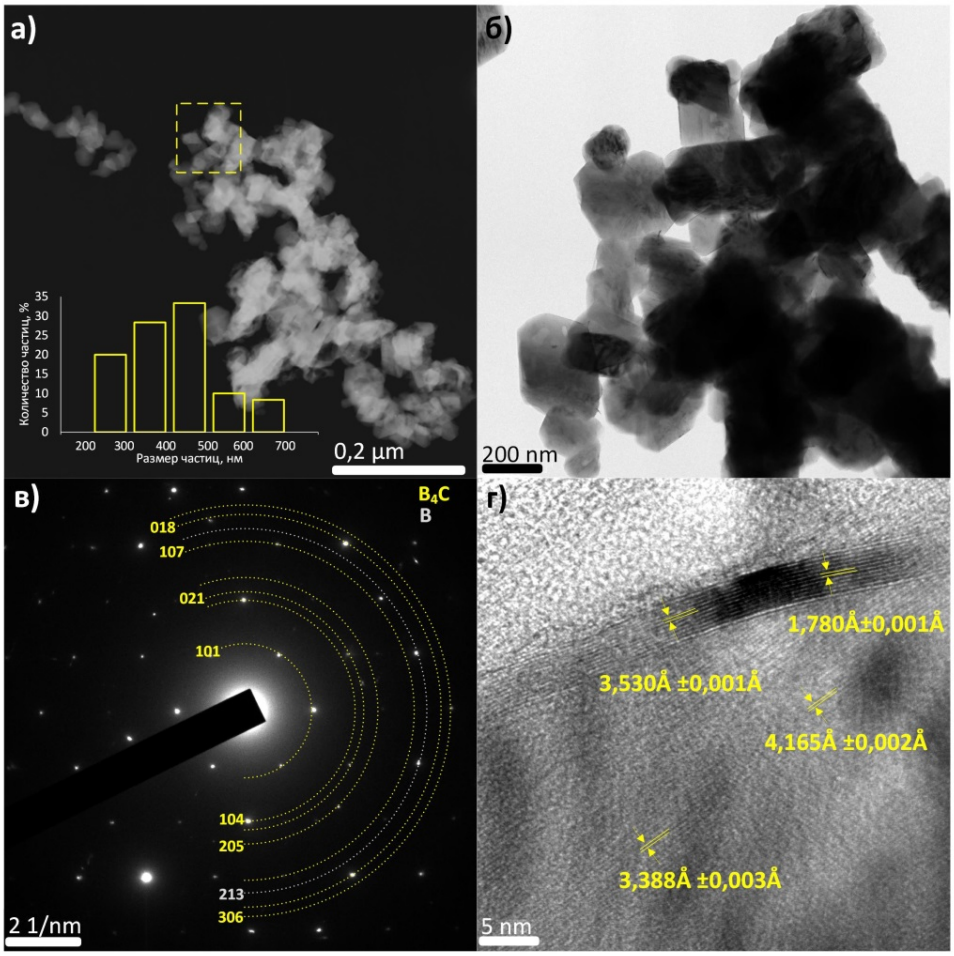


Рис. 1. Результаты просвечивающей электронной микроскопии карбида бора: а – темнопольный снимок скопления частиц, б – светлопольный снимок скопления частиц, в – соответствующая картина дифракции электронов, г – снимок в режиме прямого разрешения

По ПЭМ-снимкам определено, что структура некоторых частиц представляет собой тип «ядро-оболочка» с оболочкой, состоящей из атомных слоёв с межплоскостным расстоянием 3,530 ± 0,001 Å и 3,592 ± 0,072 Å, что соответствует структуре графита. В ядре этих частиц идентифицированы межплоскостные расстояния равные 3,960 ± 0,040 Å и 3,935 ± 0,075 Å, что соответствует структуре карбида бора B_4C (карточка № 35-798, PDF4+) (рис. 1, *г*).

На основании представленных данных можно сделать вывод о возможности реализации процесса синтеза порошка карбида бора безвакуумным электродуговым плазменным методом, обладающим повышенными показателями энергоэффективности в сравнении с прямыми аналогами. Частицы полученного карбида бора являются наноразмерными со структурой «ядро-оболочка» и средним размером 400 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства //Успехи химии. – 2012. – Т. 81. – №. 6. – С. 549–559.
2. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress / V. Domnich, S. Reynaud, R.A. Haber, M. Chhowalla // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – Vol. 94, № 11. – P. 3605–3628.
3. Thermoelectric properties of boron-carbide thin film and thin film based thermoelectric device fabricated by intense-pulsed ion beam evaporation / S. Sasaki, M. Takeda, K. Yokoyama, T. Miura, T. Suzuki, H. Suematsu, W. Jiang, K. Yatsui //Science and Technology of Advanced Materials. – 2005. – Vol. 6, № 2. – P. 181.
4. Ballistic impact damage observations in a hot-pressed boron carbide / J. C. LaSalvia, R.B. Leavy, J.R. Houskamp, H.T. Miller, D.E. MacKenzie, J. Campbell //Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2009. – Vol. 30, № 5. – P. 45.
5. Boron carbide – A comprehensive review / F Thevenot // Journal of the European Ceramic Society – 1990. – Vol. 6, № 4. – P. 205.
6. Synthesis of low carbon boron carbide powder using a minimal time processing route / A. Mishra, R.K. Sahoo, S.K. Singh, B.K. Mishra //Journal of Asian Ceramic Societies. – 2015. – Vol. 3, №. 4. – P. 373–376.
7. 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 and Hard Materials. – 2020. – 105343.
8. Синтез порошка карбида бора безвакуумным электродуговым методом и получение объемной керамики методом искрового плазменного спекания / Р.С. Мартынов и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 65–76.

БЕЗВАКУУМНЫЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ И ЕГО ЭНЕРГОЕМКОСТЬ В СРАВНЕНИИ С СИНТЕЗОМ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ

А.И. Кокорина, А.А. Свинухова, А.Д. Мисюкова, П.В. Поваляев

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ЛПМЭО

Научный руководитель: А. Я. Пак, д.т.н., заведующий ЛПМЭО ИШЭ ТПУ

Карбид вольфрама WC характеризуется высокой температурой плавления, высокими твердостью и износостойкостью, высокими электро- и теплопроводностью и применяется в сферах обрабатывающей промышленности, бурения горных пород, изготовления режущих инструментов и штампов, а также в качестве носителя катализатора в реакциях получения водорода [1–2]. В качестве решения проблемы развития методов получения карбида воль-

фрама предлагается безвакуумный электродуговой синтез, который возможно реализовать без применения вакуумного оборудования в силу образования угарного и углекислого газов, которые экранируют реакционный объем от кислорода воздуха [3]. Данный метод отличается простотой и возможностью быстрого достижения высоких температур. Также широко распространен синтез карбида вольфрама методом цементации в вакуумной печи [4–5]. Так, в работе [5] за 6 часов при температуре 1150 ºС в результате карботермической реакции получили 200 г карбида вольфрама WC.

Установка представляет собой трехфазный электродуговой реактор (рис. 1), модуль питания которого включает в себя три источника постоянного тока.

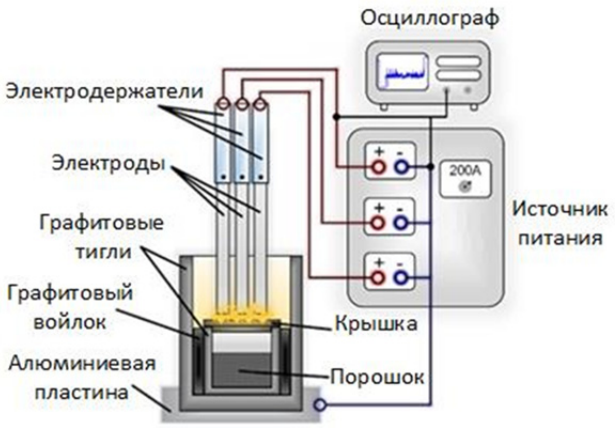


Рис. 1. Принципиальная схема трехфазного электродугового реактора постоянного тока

Их выводы подключены к электрододержателям, необходимым для установки графитовых стержней (анодов) и тиглей (катод). Под катодом подразумевается система из двух графитовых тиглей: внешнего (высота 55 мм и внешний диаметр 50 мм) и внутреннего (высота 20 мм и внешний диаметр 30 мм). Внутренние стенки внешнего тигля оборачивали графитовым войлоком, а во внутренний тигель засыпали 30 г исходной смеси (порошок вольфрама и углерода в соотношении 15,31:1). Также внутренний тигель закрывали графитовой крышкой, чтобы минимизировать возможность попадания примесей. Синтез длился в течение 120 с. В процессе синтеза ток и напряжение дугового разряда записывались на осциллограф. По данным осциллографа была определена энергия, введенная в систему в процессе синтеза, равная 0,3 кВт·ч. С учетом массы загрузки, получаем энергоемкость процесса, равную 0,01 кВт·ч/г. После синтеза был проведен рентгенофазовый анализ (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 7000 s). Было установлено, что продукт синтеза содержит 72,6 вес. % WC и 27,4 вес. % W_2C (рис. 2).

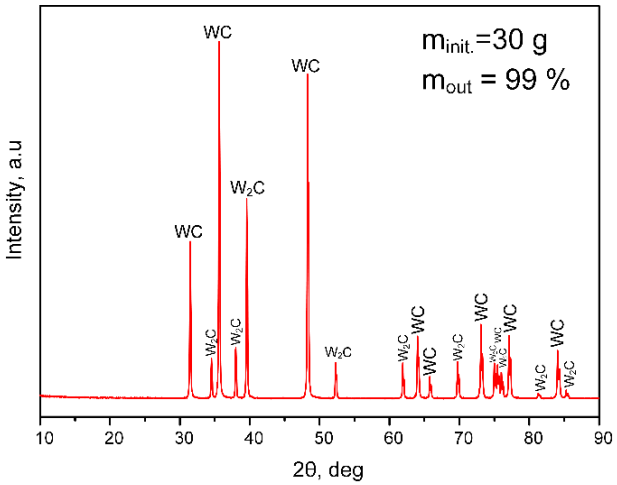


Рис. 2. Картина рентгеновской дифракции полученного образца

Для сравнения была взята горизонтальная вакуумная печь ПЭС 2100В. Общая мощность печи, включая главный блок, вакуумный блок, блок управления и чиллер – 120 кВт. Из них 100 кВт – мощность нагревателей. На основе литературных данных возьмем скорость нагрева 5 ºС/мин, температуру синтеза 1150 ºС и время 6 ч. С учетом нагрева, процесс синтеза длится 9,83 ч. Таким образом, в процессе синтеза была потрачена энергия, равная 983 кВт·ч. Масса загрузки составила 200 г. Таким образом, энергоемкость составила 4,915 кВт·ч/г.

Таким образом, подтверждено, что безвакуумный электродуговой синтез характеризуется меньшими электрозатратами, чем процесс карботермической реакции в вакуумной печи. Также стоит учесть, что процесс безвакуумного электродугового синтеза занимает гораздо меньше времени, особенно с учетом отсутствии необходимости организации вакуума.

Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания вузам (проект № FSWW-2022-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tripathy H. High temperature thermophysical properties of spark plasma sintered tungsten carbide // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – V. 104. – № 105804.
2. Uhlmann E. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM // Procedia CIRP. – 2018. – V. 68 – P. 86–90.
3. Pak A.Y. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials – 2020. – V. 93. – № 105343.
4. Medeiros F. F. P. Synthesis of tungsten carbide through gas–solid reaction at low temperatures // Materials Science and Engineering A315. – 2001. – P. 58–62.
5. Polini R. Toward Greener Synthesis of WC Powders for Cemented Tungsten Carbides Manufacturing // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 8458−8466.

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.А. Суховеев

Томский политехнический университет,
ИШЭ 5АМ23

Научный руководитель: Ю. Л. Шаненкова к.т.н., доцент НИ ТПУ

Карбид кремния представляет интерес, поскольку обладает высокой температурой плавления, твёрдостью, износостойкостью, а также химической стойкостью. Все эти свойства позволяют применять материалы из карбида кремния в различных сферах деятельности и используется в различных областях производства, от абразивных материалов, износостойкой и жаростойкой керамики до радиационно-стойких композитов, также представляют интерес наноструктуры на основе SiC, которые потенциально могут проявлять высокий эффект в катализе. При всем обилии разнообразных техник для синтеза нанокарбида кремния, существует проблема полноценного использования уникальной совокупности физических характеристик SiC вследствие сложности получения качественных наноструктур, загрязнений и грубой дисперсности получаемого продукта, энергозатратности и многостадийности используемых методик. В связи с этим фундаментальной научной задачей является разработка новой методики получения наноструктур карбида кремния, пригодных для использования в качестве катализаторов.

В данной работе предлагается осуществлять синтез композитного материала на основе наноструктурированного карбида кремния путем переработки отходов сельскохозяйственной продукции – РШ, ШО, СО. Предварительно осуществлялась карбонизация исходной биомассы. Полученные биочары обрабатывались в высокоскоростной струе плазмы дугового разряда. Конечный синтезированный композитный материал исследовался в качестве катализатора и сокатализатора платины в реакции выделения водорода (HER).

Преимущество подхода заключается в экологичности, поскольку биомасса содержит углерод и зачастую кремнезем, обеспечивая почти идеальный исходный материал для синтеза кристаллов карбида кремния. При этом также решается задача утилизации отходов, т. к. ежегодно в мире производятся миллионы тонн.

Указанные типы биомассы подвергались термообработке обработке путем окислительной карбонизации в реакторе с кипящим слоем катализатора при пониженной температуре (460 °C) для достижения необходимых соотношений углерода и кремния и формирования материала, пригодного для использования в плазменном процессе.

Основой плазмодинамического синтеза является применение КМПУ с графитовыми электродами. В канал формирования плазменной структуры закладываются исходные прекурсоры – смесь биочара и углерода. При замыкании силового ключа начинает протекать ток разряда. Происходит возгонка прекурсоров в плазменное состояние с образованием сильноточного дугового разряда, который ускоряется вдоль ускорительного канала. При выходе плазменной структуры в пространстве камеры-реактора (1 атм), заполненной аргоном (инертный газ), формируется сверхзвуковая плазменная струя, в условиях которой происходит синтез карбида кремния, в виде нанокристаллических частиц. (из жидкого кристаллизуется). В результате получен нанодисперсный материал, содержащий гексагональный карбид кремния. Содержание побочных фаз SiO_2 и C возможно регулировать посредством изменения соотношения с сибунитом.

Электропитание ускорителя обеспечивается ЕНЭ при указанных на слайде зарядных параметрах. На рисунке приведены осциллограммы I и U на электродах ускорителя, а также кривые мощности разряда и выделившейся энергии, которые показывают достижение таких энергетических условий, при которых обычно происходит синтез SiC из прекурсоров в виде коммерчески доступных кремния и углерода. В качестве углерода предложено использовать материал сибунит с высокой удельной поверхностью, что позволяет повысить реакционную способность смеси прекурсоров. (добавление углеродного прекурсора для осуществления реакции соединения кремния и углерода, повышения проводимости смеси прекурсоров и повышения эффективности процесса их возгонки).

По результатам элементного анализа в состав биочаров отходов сельскохозяйственной продукции входит достаточно высокая доля кремния (35–50 мас. %), что позволяет использовать биочары в качестве прекурсоров синтеза карбида кремния.

В презентации на рисунке будут приведены микроснимки исходных образцов биомассы в виде биологических элементов растительной ткани злаковых культур (наружный эпидермис выглядит неровным и представляет собой сильно ребристую структуру с выступами), а также микроснимки карбонизированного сырья, по которым видно частичное сохранение микроструктуры исходного органического сырья и протекание термической деструкции.

Также будут приведены рентгеновские дифрактограммы продуктов плазмодинамического синтеза. Судя по форме дифрактограмм, биочары обладают сходным фазовым составом. Во всех случаях, судя по соответствующим максимумам интенсивности, происходит формирование кристаллической фазы гексагонального карбида кремния. Наибольшее количество SiC образуется в случае использования в качестве прекурсора биочара рисовой шелухи. Сканирующие микроснимки, показывают формирование высокодисперсного продукта в процессе синтеза, с агломератами до нескольких десятков нанометров.

Электрокаталитические свойства исследовались известным методом трехэлектродной ячейки с использованием электрохимического анализатора Potentiostat CHI604e (CH Instruments). В процессе сьемки на электроды программно подается напряжение, а прибор регистрирует протекающий в цепи потенциостата ток, по величине которого можно судить о каталитической активности материала путем сравнения основных характеристик: перенапряжения η_1, η_{10}, тафелевского наклона b. Раствор – стандарт.

Также будут представлены кривые вольтамперометрии (LSV – Linear sweep voltammetry). Результаты приведены в сравнении с коммерческим образцом Pt/C HISPEC 3000. С использованием полученных данных были построены графики Тафеля, для указанных образцов с целью определения Тафелевского наклона b и сравнения их кинетической активности в ре-

акции выделения водорода. Идеальный катализатор должен обладать как можно меньшим значением *b*, то есть давать прирост по току и, соответственно, по количеству производимого водорода при наименьшем изменении напряжения.

Для получения материала с более высокой электрокаталитической активностью производилась модификация платиной, на выходе получался продукт, с осажденной на поверхности частиц платиной 5 мас. %. Как видно из представленных данных, все полученные образцы после модификации даже 5 мас. % платины становятся сравнимы по своим характеристикам с коммерческим образцом, а по показателю перенапряжения при 100 мА/см^2 (η_{100}) даже превосходят его. Это свидетельствует о перспективности использования разработанного способа плазмодинамического синтеза карбида кремния из сельскохозяйственных отходов для получения материалов, которые в качестве сокатализаторов могут быть сопоставимы по своим характеристикам с коммерческими образцами.

Выводы

1. По итогу работы произведен синтез наноструктурированного карбида кремния из сельскохозяйственных отходов плазмодинамическим методом.
2. Полученный материал может использоваться в качестве катализатора и сокатализатора платины в реакции выделения водорода (HER).
3. Синтезированный материал обладает высокой каталитической активностью, сравнимой с активностью коммерческой платины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р. А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства // Успехи химии, 2009.
2. Пат. 2431947 РФ. H05H 11/00, F41B 6/00. Коаксиальный ускоритель / Сивков А.А., Пак А.Я.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАТА МЕТАНА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

П.С. Нагибин, Н.Е. Шлегель

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ3З

Научный руководитель: Н.Е. Шлегель, к.т.н., инженер-исследователь, ИШФВП ТПУ

Несмотря на активное развитие систем получения энергии из возобновляемых источников, потребление ископаемых ресурсов составляет более 80 % [1]. Одними из наиболее вредных факторов использования ископаемых топлив являются выбросы парниковых газов, которые влекут за собой увеличение темпов глобального потепления. Добыча угля открытым способом приводит к загрязнению близлежащих территорий мелкодисперсной пылью, транспорт нефти и нефтепродуктов нередко сопровождается их утечкой в лито- и гидросферу, а утечки природного газа в атмосферу оказывают существенное влияние на темпы глобального потепления [2]. Другой проблемой, связанной с использованием ископаемых топлив, является их интенсивная исчерпаемость. Решением данных проблем служит вовлечение угольных, индустриальных и коммунальных отходов, биомассы и других горючих компонентов в энергетический сектор путем создания композиционных жидких топлив [3]. Объемы таких отходов, ежегодно формирующихся во всем мире, значительно превышают возможности существующих технологий по их переработке и утилизации [4].

В [5] показано, что использование композиционных жидких топлив сопровождается меньшими, по сравнению с традиционными видами топлив, значениями антропогенных газовых выбросов. Помимо этого, использование высокореакционных компонентов (например, отработанные масла, нефтепродукты и др.) позволяет добиться схожих, а иногда и более высоких энергетических характеристик, по сравнению с традиционными котельными топливами (уголь, мазут) [5]. Использование композиционных жидких топлив на основе отходов зачастую сопровождается высокой инерционностью зажигания, особенно при использовании топлив с повышенным содержанием воды или высоковлажных отходов [6]. Для интенсификации зажигания таких топлив можно использовать подсветку факела при помощи гидрата метана, формирующегося в зонах пониженных температур при добыче углеводородов. Прямое сжигание газового гидрата осложняется нестабильной скоростью диссоциации горючего газа и самоконсервацией поверхности гидрата [7]. Поэтому для успешной реализации условий совместного сжигания газовых гидратов и композиционных жидких топлив необходимо диссоциировать горючий газ из кристаллической решетки кристаллогидрата. Помимо горючего газа побочным продуктом данного процесса является вода с высокой степенью очистки [8], пригодная для использования в бытовых и промышленных целях.

В качестве основного компонента композиционного жидкого топлива использован шлам коксующегося каменного угля, представляющий типичный отход углеобогащения. Шлам состоит из угольных и минеральных частиц разной дисперсности (до 100 мкм). Для создания композиционного жидкого топлива с повышенной реакционной способностью использовалась добавка отработанного турбинного масла, которое принято от поставщика тепловой и электрической энергии в Томской области.

Схема стенда, использующегося для определения состава газа после диссоциации гидрата, времен задержки зажигания и длительности горения исследуемых топлив представлена на рис. 1.

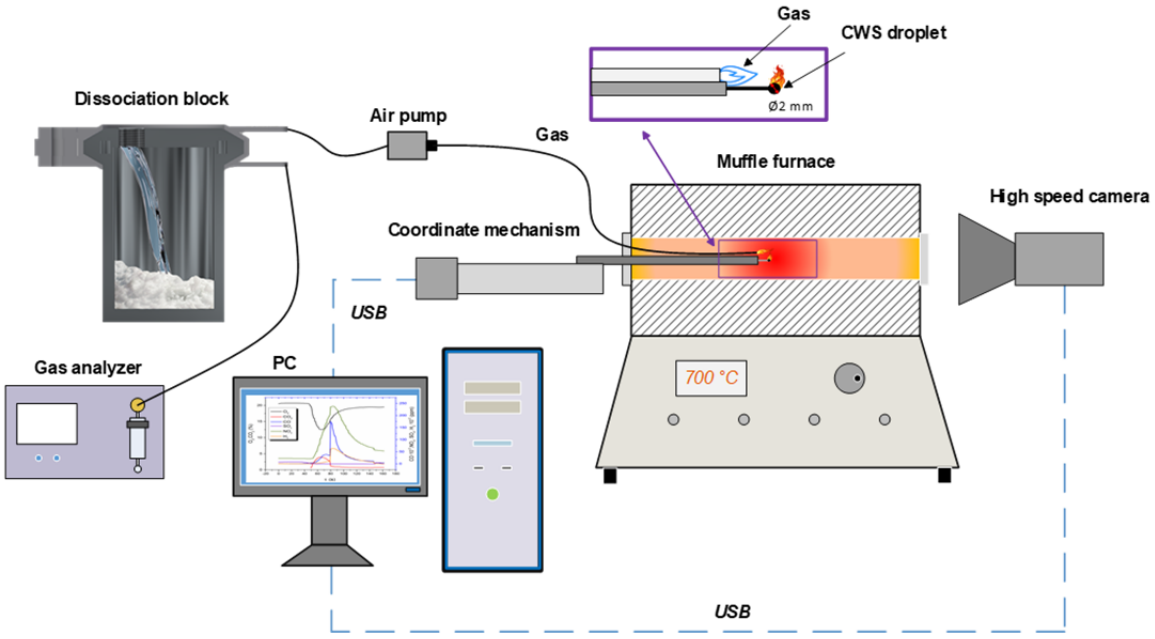


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

На рис. 2, *а* представлены видеокадры, полученные при зажигании и горении капли композиционного жидкого топлива «50 % угольный шлам, 50 % вода» в факеле диссоциирующего из газового гидрата метана. На первом кадре представлен момент зажигания метана при вводе образцов в высокотемпературную среду. На втором кадре показан момент зажига-

ния капли топлива, сопровождающийся образованием парогазовой смеси на основе паров, выделяющихся с поверхности композиционного жидкого топлива, и инициированием горения. На третьем кадре видны две пламенные зоны, соответствующие газофазному горению капли топлива и диссоциирующего с поверхности гидрата метана. На четвертом кадре представлен процесс гетерогенного горения твердых компонентов топлива в факеле метана. При сравнении данных кадров с полученными при зажигании и горении композиционного жидкого топлива «40 % угольный шлам, 50 % вода, 10 % отработанное турбинное масло» (рис. 2, *б*), выделены несколько отличий. На этапе зажигания метана и газофазного зажигания капли топлива (рис. 2, *б*, 1 и 2 кадры соответственно) регистрировался эффект микро-взрывного дробления, вызванный наличием масла в составе композиционного жидкого топлива.

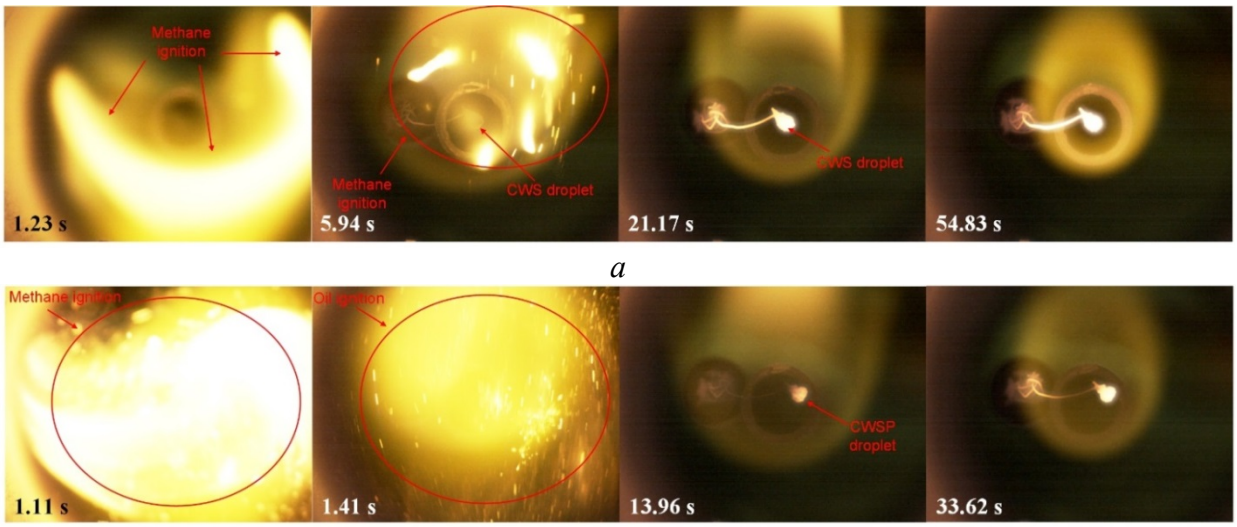


Рис. 2. Кадры зажигания и горения капель КЖТ в факеле метана при T_g=800 °С: а – 50 % угольный шлам, 50 % вода; б – 40 % угольный шлам, 50 % вода, 10 % отработанное турбинное масло

На рис. 3 показаны установленные в экспериментах времена задержки зажигания топливных композиций. Использование гидрата метана в опытах с композиционным жидким топливом «50 % угольный шлам, 50 % вода» интенсифицирует зажигание во всем исследуемом диапазоне температуры. Так, в зависимости от температуры в камере сгорания, время задержки зажигания снизилось в 1,1–4,3 раза. В свою очередь, при сжигании композиционного жидкого топлива с добавкой турбинного масла совместно с газовым гидратом регистрировалось увеличение времени задержки зажигания при температуре 700 °С в камере сгорания. Дальнейшее увеличение температуры в камере сгорания приводит к существенно нелинейному снижению времени задержки

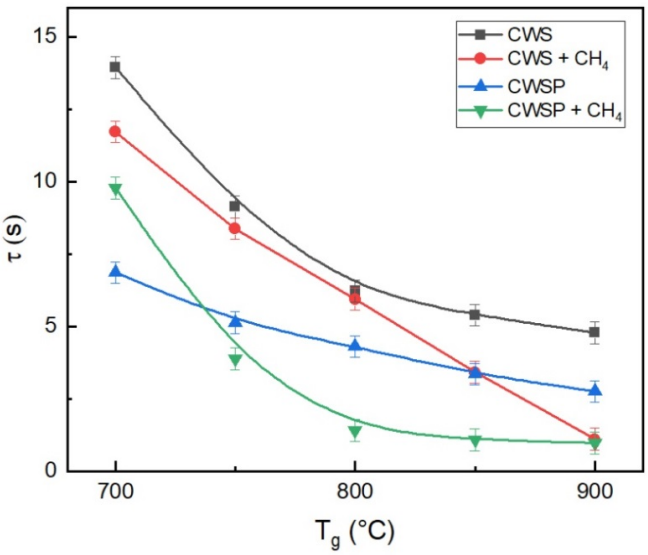


Рис. 3. Времена задержки зажигания исследуемых топлив

зажигания вследствие нескольких причин. Во-первых, возрастают скорости прогрева топлива, выхода влаги, паров горючей жидкости и летучих компонентов с поверхности твердых компонентов. Во-вторых, рост температуры в камере сгорания интенсифицирует горение метана, что также приводит к увеличению теплового потока к капле композиционного жидкого топлива. При температуре в камере сгорания около 900 °С времена задержки зажигания композиционных жидких топлив с добавкой отработанного турбинного масла и без него сопоставимы. Они составляли 0,97 и 1,11 с, соответственно. Без использования газового гидрата времена задержки зажигания составили 2,76 с для КЖТ с добавкой отработанного турбинного масла и 4,78 с для КЖТ без турбинного масла.

Данный эффект позволил сформулировать заключение о том, что использование высокореакционных добавок для интенсификации зажигания композиционных топлив из отходов совместно с газовым гидратом целесообразно лишь при относительно невысоких температурах в камере сгорания. Эти условия соответствуют так называемому низкотемпературному режиму горения топлив, реализуемому в топках энергетических котлов для сдерживания концентраций формирующихся антропогенных выбросов.

Вывод

Установлены интегральные характеристики процессов зажигания и горения композиционных жидких топлив различного состава совместно с гидратом метана. Установлено, что добавка турбинного масла в состав композиционного жидкого топлива приводит к микровзрывному дроблению, тем самым интенсифицируя ее зажигание на величину до 2.1 раза. Обосновано, что использование газового гидрата позволяет интенсифицировать процессы зажигания композиционных жидких топлив.

Коэффициенты эффективности совместного сжигания композиционного жидкого топлива с гидратом метана выше на 34–48 % по сравнению с аналогичными коэффициентами при их моносжигании.

Исследование выполнено при поддержке программы Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект Приоритет-2030-НИП/ЭБ-006-375-2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels // Sci Total Environ. – 2021. – Vol. 772. – P. 144909. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144909.
2. Xie G. Zhi, Zhang L. Peng, Li C. Ying, Sun W. Dong. Accelerated methane emission from permafrost regions since the 20th century // Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap. – 2023. – Vol. 195. – P. 103981. https://doi.org/10.1016/J.DSR.2023.103981.
3. Vershinina K., Shevyrev S., Strizhak P. Coal and petroleum-derived components for high-moisture fuel slurries // Energy. – 2021. – Vol. 219. – P. 119606. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119606.
4. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: The World Bank, 2018. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0.
5. Zou H, Liu C, Evrendilek F, He Y, Liu J. Evaluation of reaction mechanisms and emissions of oily sludge and coal co-combustions in O_2/CO_2 and O_2/N_2 atmospheres // Renew Energy. – 2021. – Vol. 171. – P. 1327–1343. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.02.069.
6. Romanov D.S., Vershinina K.Y., Dorokhov V.V., Strizhak P.A. Rheology, ignition, and combustion performance of coal-water slurries: Influence of sequence and methods of mixing // Fuel. – 2022. – Vol. 322. – P. 124294. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124294.
7. Misyura S.Y. et al. The influence of key parameters on combustion of double gas hydrate // J Nat Gas Sci Eng. – 2020. – Vol. 80. – P. 103396. https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2020.103396.
8. Nallakukkala S., Lal B. Seawater and produced water treatment via gas hydrate: Review // J Environ Chem Eng. – 2021. – Vol. 9. – P. 105053. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105053.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ДЛЯ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПОДАЧЕ ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА В ГОРЕЛКИ КОТЛА ТГМЕ 464

С.В. Горбунов

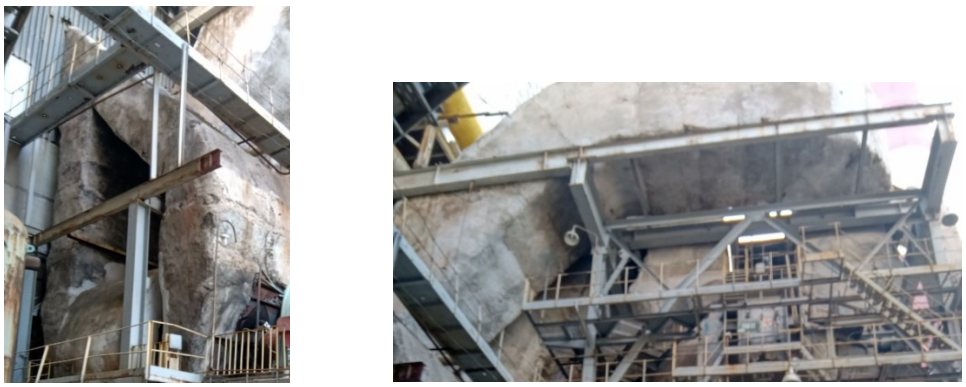
Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, АТЭС, гр. ЭЖКХм-1-23

Научный руководитель: М.Г. Зиганшин, д.т.н., профессор АТЭС

Подача воздуха в горелки котла ТГМЕ 464 осуществляется дутьевым вентилятором ВДН-25×2, производительность которого превышает 500 тыс. м^3/ч. Он имеет электродвигатель мощностью 2,5 МВт (рис. 1), который позволяет создавать напор около 8 кПа.

Анализ режимных характеристик котла показал существенные затраты энергии дутьевым вентилятором на преодоление сопротивления в коммуникациях до котла и на входе в горелочные устройства. Фасонные элементы воздушного короба на начальном участке возле дутьевого вентилятора и на сложных разворотах короба на отметке +12,3 м имеют в своих конструкциях острые кромки (рис. 2). При прохождении через них потока воздуха образуются вихревые зоны и теряется большое количество энергии. Энергетические же параметры потока соизмеримы с величиной его энергии на входе в аппарат.

Рис. 1. Вентилятор двухстороннего всасывания ВДН-25×2 с электродвигателем мощностью 2,5 МВт



а *б*

Рис. 2. Фасонные элементы воздушного короба котла ТГМЕ 464: а – разделение потоков на всасе, б – комбинация поворота на 135° с двумя поворотами на 90°

Поэтому важной задачей для обеспечения минимального сопротивления при номинальном расходе дутьевого воздуха в горелки является снижение сопротивления воздушного тракта. Здесь идеальным вариантом являлась бы оптимизация обвязки котла коммуникациями. Однако вследствие недостаточности пространства на данном и большинстве других энергетических объектов этого достичь не удастся. Поэтому более реальный путь – снижение сопротивления в коммуникациях. На воздуховодах вентиляционных систем сечением не более 1000×1000 мм эффективно использование специальных фасонных элементов, спрофилированных по очертанию вихревой зоны, образующейся в них. Однако данные по структуре потока в представленных выше сочетаниях и конфигурациях местных сопротивлений в доступной литературе отсутствуют, в том числе и у современных исследователей, использующих наряду с натурным численный эксперимент [1, 2]. А в классических справочных изданиях [3] отсутствуют даже данные о коэффициентах местных сопротивлений (КМС) в них. Имеется только запатентованный метод расчета ориентировочных значений КМС для сочетаний отводов [4] на обычных воздуховодах.

Кроме того, на энергетических объектах короба воздушных трактов имеют габариты порядка 2000 мм и более. Вследствие больших габаритов здесь более рационально использовать не профилирование фасонных элементов, а всталять в них, например, по местам поворотов и/или разветвления потоков, вкладыши с профилями, повторяющими очертания вихревых зон. Для достижения минимального сопротивления при номинальном расходе дутьевого воздуха в горелки первоначально необходимо создание компьютерных моделей вкладышей.

До настоящего времени для воздуховодов такого размера исследовательские работы не проводились. Необходима проверка возможности моделирования вихревых зон в воздушных потоках методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Изначально расчет выполняется на базе программного продукта ANSYS Fluent с использованием метода конечных элементов. CFD-моделирование в данном случае включает в себя решение уравнений Навье-Стокса, описывающих движение воздуха в геометрической модели воздушного короба котла с проблемными фасонными элементами, и уравнения неразрывности. Для моделирования вихревых зон рассмотрены доступные в ANSYS Fluent модели турбулентности k-epsilon и k-omega, которые показали практически равноценный учет эффектов турбулентности потоков в фасонных элементах. Для котла используется горячее дутье, однако воздушный короб теплоизолирован, и в первом приближении не учитывается теплоотдача в окружающую среду. Поэтому уравнение энергии не задействуется, движение потока принимается изотермическим и несжимаемым. При моделировании вихревых зон учитывается и множество других факторов, таких как геометрия устройства, характеристики входящего потока, параметры расчетной сетки. Для верификации и валидации полученных результатов использованы существующие данные численных экспериментов других исследователей и проведены собственные лабораторные исследования. Результаты расчетов позволяют визуализировать и анализировать вихревые зоны, в том числе их форму, интенсивность и распределение значений скорости и давления по пространству.

Далее для решения этой задачи предполагается адаптация отечественного аналога ANSYS Fluent – программного продукта FlowVision.

В дальнейшем для создания вкладышей необходимо проведение аналогичного численного эксперимента с верификацией и валидацией полученных результатов на основе лабораторных исследований по воздушным трактам остальных котлов котлотурбинных цехов вследствие различия их конфигурации при различном расположении котлов в различных ТЭС. На сегодняшний день энергетические предприятия, в которые используются подобные вкладыши, отсутствуют. Созданные в проекте компьютерные модели вкладышей в фасонные элементы воздушного тракта котла предположительно позволят снизить затраты электроэнергии на подачу дутьевого воздуха до 15 %. По предварительным подсчетам, для одного котла ТГМЕ 464 экономия по затратам электроэнергию может составить до 6 млн руб. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ziganshin A., Solodova E., Logachev K. Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 890. – P. 012146. – DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012146.
2. Зиганшин А.М., Озеров А.О., Солодова Е.Э. Численное исследование течения в П-образном отводе и снижение его сопротивления // Известия вузов. Строительство. – 2019. – Т. 721, № 1. – С. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. CFD-based fluid device resistance calculation method. 李京浩, 闫大强, 陈纲, 丁炜堃, 陈义学 (Li Tszinkhao, Yan Datsyan, Chen Gan, Din Veykun', Chen Isyue). Patent China CN107808021B. 2021-06-15 Publication

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРИТОКОВ К ГЕОТЕРМАЛЬНОМУ ТЕПЛООБМЕННИКУ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ИСПАРЕНИЯ В ЕГО ЗАСЫПКЕ

С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый, Д.Д. Смоляков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова

Научный руководитель: В.Ю. Половников, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В исследованиях [1–3], посвященных тепловым режимам скважин с коаксиальными геотермальными теплообменниками (КГТ), фиксируется достаточно широкий диапазон линейных плотностей теплового потока (60–300 Вт/м при глубине скважин 2000–3000 м). Такой разброс теплопритоков к КГТ объясняется различными температурами горячих пород и теплофизическими характеристиками исследуемых объектов.

Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между КГТ и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента [4] до материалов с фазовыми переходами [5]. В [6] было предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Целью данной работы является исследование интенсификации теплоподвода к геотермальным теплообменникам.

Прототипом рассматриваемой конструкции КГТ установленного в скважине является реальный объект, геометрические и физические параметры которого подробно описаны в [5]. Обсадная колонна, выполняющая в [5] роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а наружная труба КГТ из стали. На рис. 1 приведена схема области решения рассматриваемой задачи.

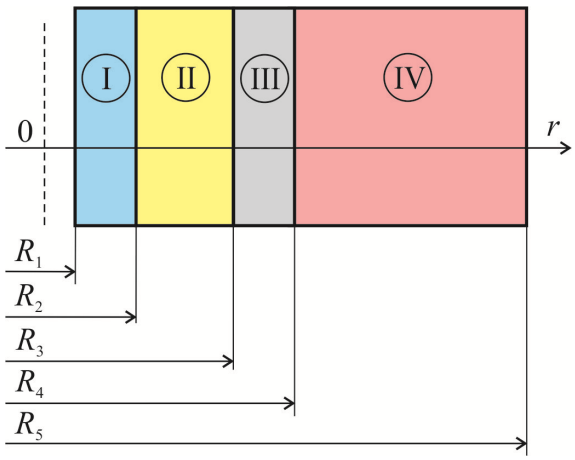


Рис. 1. Схема области решения:
I – наружная труба КГТ; II – засыпка;
III – обсадная колонна; IV – горячие породы

Предполагается, что до начала эксплуатации КГТ в рассматриваемой области решения (рис. 1) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени

отличный от нуля через КГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. При этом предполагается, что на внутренней наружной трубы КГТ устанавливается постоянная температура, равная температуре энергоносителя, а на границе контакта между увлажненной засыпкой и обсадной колонной реализуется процесс испарения влаги.

Постановка задачи и метод решения аналогичны описанным в [7]. Теплопроводность (λ) и теплоемкость (*c*) песчаной засыпки, при известной плотности (ρ) и объемной влажности (*W*), вычислялись из следующих соотношений [6]:

$$\lambda = -1.337 + 0.00125\rho + 0.01\,W; \quad (1)$$

$$c = -0.018 + 0.0009\rho + 0.031\,W. \quad (2)$$

Геометрические параметры (R_1=0,05 м; R_2=0,055 м; R_3=0,14 м; R_4=0,25 м; R_5=10 м) соответствовали конструкции скважины описанной в [5]. Начальная температура, в рассматриваемой области решения, принималась равной температуре разогретых пород 373,15 К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла 278,15 К. Объемная влажность песчаной засыпки варьировалась от начальной (W = 5 %) до 25 % и была ограничена открытой пористостью. Теплофизические характеристики, использовавшиеся при проведении моделирования, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Свойство	λ, Вт/(м·К)	*c*, Дж/(кг·К)	ρ, кг/м^3
Труба	57,5	466	7860
Засыпка	Расчет по (1)	Расчет по (2)	1900
Цемент [5]	1,78	800	2490
Горячие породы [5]	1,3	775	1990

В табл. 2 и 3 в зависимости от W и времени эксплуатации КГТ представлены результаты расчета теплопритоков в рассматриваемой системе с учетом и без учета эффекта испарения влаги в засыпке КГТ. Изменение величин теплопритоков к КГТ свидетельствуют об их ожидаемом росте с увеличением объемной влажности песчаной засыпки W и закономерном снижении с увеличением времени работы КГТ. Время эксплуатации КГТ (6 месяцев) выбрано исходя из типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

Таблица 2. Теплопритоки к КГТ с учетом испарения

Время, мес.	W = 5 %	W = 10 %	W = 15 %	W = 20 %	W = 25 %
0,03	541,77	558,59	575,05	591,00	606,47
1	237,67	240,28	242,73	245,02	247,19
3	213,55	215,26	217,16	218,95	220,63
6	200,73	202,50	204,16	205,71	207,17

Таблица 3. Теплопритоки к КГТ без учета испарения

Время, мес.	W = 5 %	W = 10 %	W = 15 %	W = 20 %	W = 25 %
0,03	510,46	527,20	543,58	559,46	574,85
1	202,27	204,79	207,15	209,36	211,45
3	177,79	179,42	181,24	182,95	184,56
6	164,79	166,48	168,06	169,54	170,93

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе свидетельствует о её существенном влиянии на уровень теплопритоков к КГТ. За рассматриваемый период эксплуатации КГТ (6 месяцев) снижение теплопритоков во времени составляет около 200 % от первоначального уровня. Здесь следует отметить, что результаты моделиро-

вания указывают на резкое снижение тепловых потоков в первые дни работы КГТ (аналогичные выводы сделаны в [5] при исследовании материалов с фазовыми переходами). Это объясняется интенсивным охлаждением металлического корпуса КГТ (рис. 2) из-за его сравнительно высокой теплопроводности (табл. 1). Этот результат имеет конкретное практическое применение, поскольку позволяет обоснованно выбирать пути регулировки расхода энергоносителя для выравнивания теплосъема от КГТ во времени.

Исследование влияния влажности песчаной засыпки (W = 5–25 %) на теплопритоки в конструкции КГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков на 12,0 % в начальный период эксплуатации КГТ и до 3,5 % к концу этого периода. Более высокий рост теплопритоков в начальный промежуток времени объясняется тем же обстоятельствами что и при анализе нестационарности процессов переноса в рассматриваемой системе. Учет наличия испарения влаги в засыпке КГТ приводит к заметному увеличению тепловых потоков в рассматриваемой системе. Сопоставление результатов численного моделирования (табл. 2 и 3) свидетельствует о том, что испарение влаги приводит к росту теплоподвода к КГТ на 21,2–21,8 %. Адекватность результатов численного моделирования подтверждается численным сопоставлением с известными данными о работе геотермальных скважин с КГТ [1–5]. В [1–5] линейные плотности теплового потока составляют 60–300 Вт/м, что хорошо согласуется с результатами данной работы (табл. 2 и 3).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system / Z.H. Wang, F.H. Wang, J. Liu // Energy Convers. Manag. – 2017. – Vol. 153. – P. 603–615.
2. Field test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs) / J.W. Deng, Q.P. Wei, M. Liang // Energy Build. – 2019. – Vol. 184. – P. 289–299.
3. Experimental and simulation studies of geothermal single well for building heating / X.B. Bu, Y.M. Ran, D.D. Zhang // Renew. Energy. – 2019. – Vol. 143. – P. 1902–1909.
4. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation / H. Park, S. Lee, S. Yoon, J. Choi // Applied Energy. – 2013. – Vol. 103. – P. 12–24.
5. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile / Z. Cao, G. Zhang, Y. Liu, X. Zhao, C. Li // Renew. Energy. – 2022. – Vol. 184. – P. 374–390.
6. Теплофизические свойства увлажненного песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2017. – No. 2 (31). – С. 100–109.
7. Снижение теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации / В.Ю. Половников, С.Д. Шелемехова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – No 9. – С. 18–24.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ В СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Д.В. Димитрюк

Ульяновский государственный технический университет,
ЭФ, ЭПиАПУ, гр. ЭАбд-41

Научный руководитель: Я.К. Старостина, к.т.н., доцент ЭФ ЭПиАПУ УлГТУ

Вопрос об оптимизации энергопотребления является одним из ключевых при построении систем электроприводов и включает в себя снижение тепловыделения его составляющих частей. Актуальность данного вопроса также обусловлена энергетической стратегией Российской Федерации, ввиду повышения энергоэффективности промышленных объектов.

Также в связи с тем, что основным параметром, определяющим надежность, энергетическую эффективность и массогабаритные показатели ПЧ, является величина потерь, рассеиваемая в его силовых элементах, ее расчет является одной из основных задач, стоящих перед разработчиком [1].

Таким образом, целью исследования является выявление существующих на данный момент проблем в сфере тепловыделения силовой электроники электроприводов, в частности преобразователя частоты, в процессе эксплуатации и анализ методов управления данного процесса.

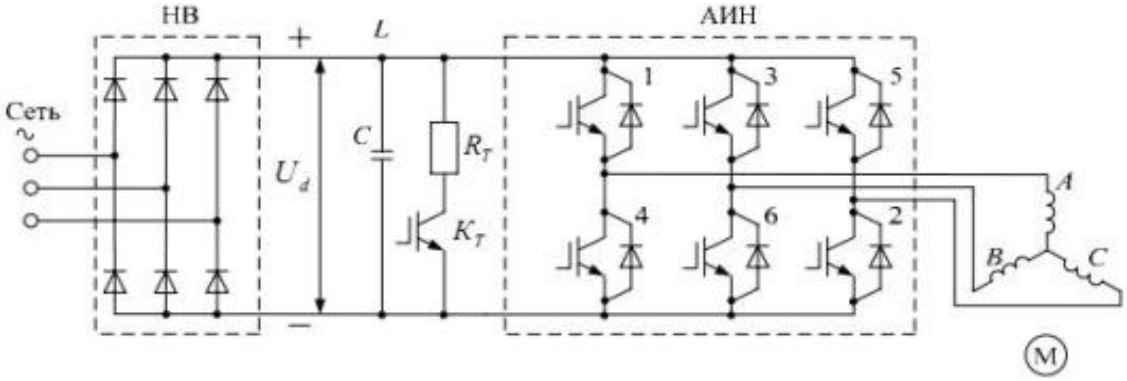


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя частоты

Рассмотрим процесс тепловыделения в инверторной части преобразователя частоты, в частности IGBT-транзистора. Само устройство может находится в полностью закрытом состоянии (режим отсечки), полностью открытом состоянии (режим насыщения) и активном состоянии (коммутационный режим). Также для данного типа транзисторов выделяют динамические и статические потери.

Таким образом, для количественного определения потерь мощности в транзисторном ключе используется следующее математическое выражение:

$$\Delta P_{\text{ТК}} = \Delta P_{\text{ТКО}} + \Delta P_{\text{ТКН}} + \Delta P_{\text{динТК}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ТКО}}$ – потери мощности в транзисторном ключе в режим отсечки; $\Delta P_{\text{ТКН}}$ – потери мощности в транзисторном ключе в режим насыщения; $\Delta P_{\text{динТК}}$ – динамические (коммутационные) потери в транзисторном ключе.

В закрытом состоянии через IGBT-транзистор ток не протекает, утечки мизерны, процесс тепловыделения не происходит, следовательно, можно пренебречь статическими потерями на данном участке работы транзистора.

$$\Delta P_{\text{ТКО}} = 0.5 * I_{\text{к о}} * U_{\text{кэ}} \approx 0, \quad (2)$$

где $I_{\text{к о}}$ – ток утечки; $U_{\text{кэ}}$– напряжение, прикладываемое к запертому транзистору.

Далее мы подаем на затвор транзистора напряжение. После подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора, в свою очередь, движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору [3].

Переход транзистора из закрытого в открытое состояние характеризуется временем отпирания. В данный промежуток времени работы транзистора происходят коммутационные потери (динамические потери). Значение тока возрастает, однако принимает свое конечное значение не мгновенно. В свою очередь, процесс выключения IGBT состоит из двух этапов: первый этап протекает относительно быстро и соответствует выключению управляющего n-канального полевого транзистора [2]. Второй этап определяется процессом рассасывания зарядов, накопленных в базовой области биполярного транзистора p-n-p типа (БТИ-3а), и представляет собой рекомбинационную фазу выключения в режиме работы этого транзистора с «оборванной» базой [2].

IGBT-транзистор управляется с помощью широтно-импульсной модуляции, соответственно, от частоты ШИМ напрямую зависит частота переключения транзистора, что, в свою очередь, приводит к процессу тепловыделения элемента. Следовательно, как поддерживать частоту ШИМ, достаточную для правильной технической эксплуатации, при условии минимального тепловыделения транзистора?

Другим вопросом является тепловыделение транзистора при его открытом состоянии, поскольку в данный промежуток времени напряжение на электронном устройстве не равно нулю, присутствуют статические потери, пренебречь которыми нельзя. Для описания данного процесса используется следующее математическое выражение:

$$\Delta P_{\text{ТК Н}} = 0.5 * I_{\text{к ном}} * U_{\text{кэ ост}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{к ном}}$ – номинальный ток, протекающий через транзистор; $U_{\text{кэ ост}}$– остаточное напряжение на открытом транзисторном ключе, напряжение между коллектором и эмиттером.

Рассмотрим динамические потери в процессе переключения транзисторного ключа, для этого используется формула:

$$\Delta P_{\text{динТК}} = \frac{1}{\pi * \sqrt{2}} * \frac{(I\text{к} * U\text{кэ}) * (t_{\text{к}(on)} + t_{\text{к}(off)}) * f_{sw}}{2}, \quad (4)$$

где $I_{\text{к}}$ – ток, протекающий через транзистор; $U_{\text{кэ}}$ – напряжение между коллектором и эмиттером; $t_{\text{к}(on)}$ – продолжительность переходного процесса на открывании транзистора; $t_{\text{к}(off)}$ – продолжительность переходного процесса на закрывании транзистора; f_{sw} – частота ШИМ.

В качестве IGBT транзистора далее рассматривается тип BUP 314D при температуре перехода 125°. Необходимые для расчетов характеристики и допустимые параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики и допустимые параметры BUP 314D

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Напряжение между коллектором и эмиттером	$U_{\text{кэ}}$	1200	В
Ток, протекающий через транзистор	$I_{\text{к}}$	41	А
Продолжительность переходного процесса на открывании транзистора	$t_{\text{к}(on)}$	75	нс
Продолжительность переходного процесса на закрывании транзистора	$t_{\text{к}(off)}$	420	нс
Максимальная частота переключения	$f_{sw\,\max}$	10	кГц

Далее исследуется зависимость величины динамических потерь от частоты переключения, принимаем промежуточные значения частоты ШИМ от 5000 до 10000 Гц.

Таким образом, для снижения количества динамических потерь при по коммутационном режиме транзистора применяется метод управления частотой ШИМ, которая определяется как наиболее оптимальная для технической эксплуатации устройства, куда входит инвертор.

Рассмотрим процесс тепловыделения в выпрямителе преобразователя частоты. Протекающий через диод выпрямленный ток приводит к тепловым потерям, следовательно, как снизить тепловые потери диода в открытом состоянии при эксплуатации ПЧ?

Одним из эффективных методов решения данной проблемы является оптимальный выбор диода. Необходимо учитывать его тепловое сопротивление и потери мощности в открытом состоянии. Таким образом, необходимо выбирать диод с малым тепловым сопротивлением и меньшими потерями мощности.

Также необходимо соблюдать максимальное значение тока при его протекании через открытый диод, так как работа диода в пределах спецификаций поможет снизить тепловые потери.

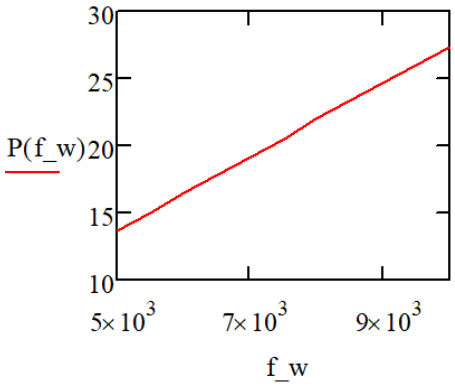


Рис. 2. График зависимости $\Delta P_{\text{динТК}}$ *от* f_{sw}

Звено постоянного тока также является важным составляющим элементом преобразователя частоты, так как тепловые потери на данном элементе при его эксплуатации могут сказаться на его работоспособности. Тепловые потери обусловлены особенностью работы конденсатора, его процессами зарядки и разрядки. Следовательно, для управления процессом тепловыделения в звене постоянного тока необходимо использовать конденсатор с меньшим сопротивлением потерь. Также снизить тепловые потери позволяет правильный выбор максимально возможной емкости конденсатора, при которой обеспечивается работоспособность преобразователя частоты. Поскольку тепловые потери происходят из-за перезарядки конденсатора, то может помочь операция по минимизации времени зарядки и разрядки. Чем меньше времени требуется на процессы зарядки и разрядки, тем меньше тепловые потери.

Таким образом, анализ проблем в сфере тепловыделения преобразователя частоты позволил выявить возможные способы управления данным процессом в его инверторе, выпрямителе и звене постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов П.Д. Проблемы определения потерь в преобразователях частоты с ШИМ при использовании транзисторных модулей различных производителей / П.Д. Гаврилов, Е.А. Лир // Вестник КузГТУ. – 2004. – № 6.2. – С. 59–63. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-opredeleniya-poter-v-preobrazovatelyah-chastoty-s-shim-pri-ispolzovanii-tranzistornyh-moduley-razlichnyh-proizvoditeley (дата обращения: 29.10.2023).
2. Панасенко Н.В. О возможности снижения потерь энергии при выключении высоковольтных IGBT-приборов и ее схемотехническая энергоэффективность / Н.В. Панасенко, Д.Ю. Шаповалов, А.А. Краснов // Электрификация транспорта. – 2016. – № 11. – С. 44–51. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-snizheniya-poter-energii-pri-vyklyuchenii-vysokovoltnyh-igbt-priborov-i-ee-shemotehnicheskaya-energoeffektivnost/viewer (дата обращения: 29.10.2023).
3. Рогачёв К.Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). – URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/transistor.htm. (дата обращения: 29.10.2023). – Текст: электронный.

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ И ПАРА НА ВЫХОДЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА КГПУ С ВВОДОМ ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ

Е.С. Болдушевский, А.А. Туболев, Н.Н. Галашов

Томский политехнический университет,
Инженерная школа энергетики, НОЦ И.Н. Бутакова

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

Ввод пара в камеру сгорания (КС) контактной газопаровой установки (КГПУ) эффективный и простой способ увеличения ее мощности и КПД [1, 2], а также снижения выбросов NO_x и CO [3, 4]. Для получения этого пара за газовой турбиной (ГТ) устанавливают котел-утилизатор (КУ).

В [5] была разработана программа расчета тепловых схем КГПУ. Расчеты показали, что ввод пара в КС повышает КПД только при температурах газопаровой смеси на выходе КС выше 900 °С. При этом значительное увеличение КПД достигается при температуре выше 1100 °С. Также было определено, что температура газопаровой смеси на выходе ГТ достигает 700–900 °С, поэтому на выходе КУ можно получать перегретый пара до 650–800 °С. В работе [6] проведены расчеты с температурами вводимого в КС пара 525–780 °С. На рис. 1–3 приведены зависимости изменения электрического КПД нетто, расхода и температуры вводимого в КС пара от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС.

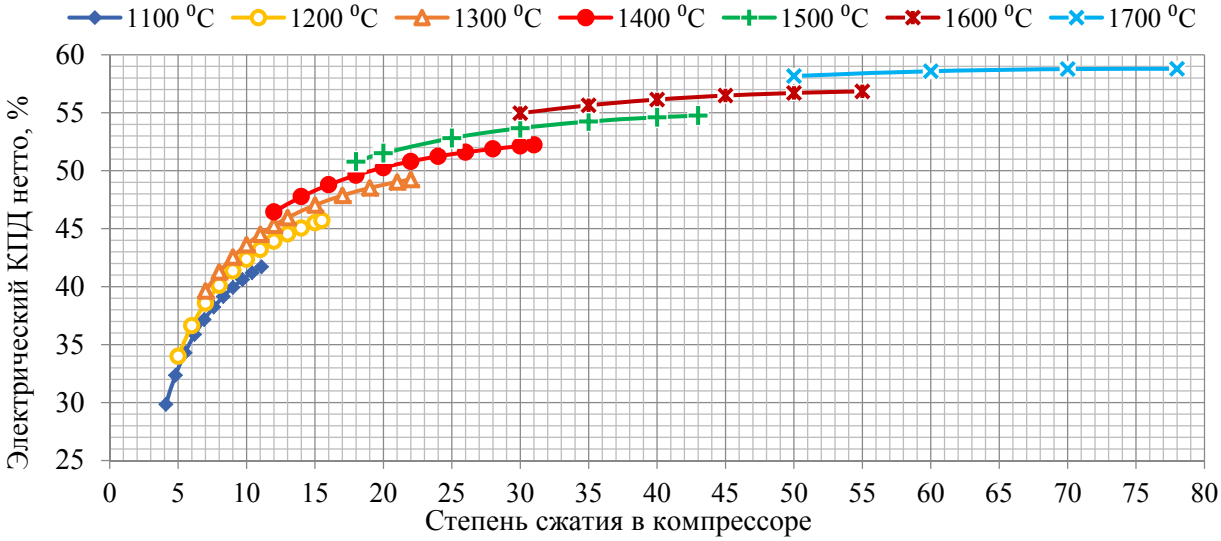


Рис. 1. Зависимость электрического КПД нетто от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

Представленные зависимости говорят о высокой эффективности КГПУ, особенно при высоких температурах газопаровой смеси на выходе КС и большой степени сжатия в компрессоре. При этом с увеличением температуры газопаровой смеси на выходе КС и степени сжатия в компрессоре КПД значительно возрастает, а расход и температура, вводимого в КС пара, существенно снижаются.

Кроме высокого КПД, сравнимого с работающими парогазовыми установками, достоинством КГПУ являются низкие капитальные затраты и простая тепловая схема, а их главный недостаток – большие потери теплоты и пара с уходящими газами. При этом также происходит загрязнение атмосферы паром.

Уменьшить потери теплоты и пара с уходящими газами можно путем установки на выходе КУ конденсационного теплоутилизатора. Теоретические вопросы применения теплоутилизаторов в котельных и на ТЭС рассмотрены в [7–9]. Расчет тепловой схемы с ПГУ с теплоутилизатором для отпуска теплоты приведен в [10].

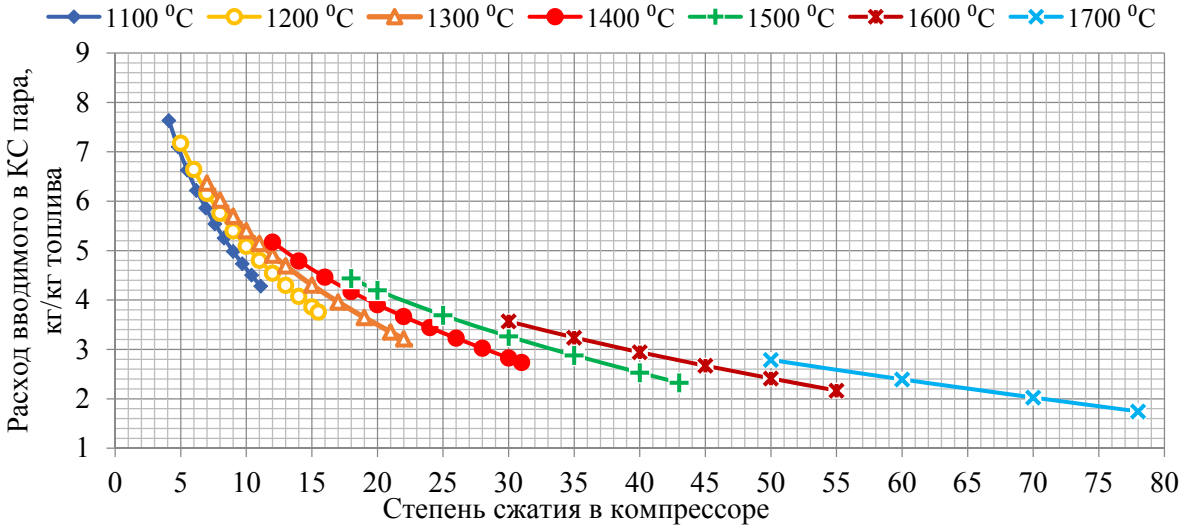


Рис. 2. Зависимость вводимого в КС расхода пара от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

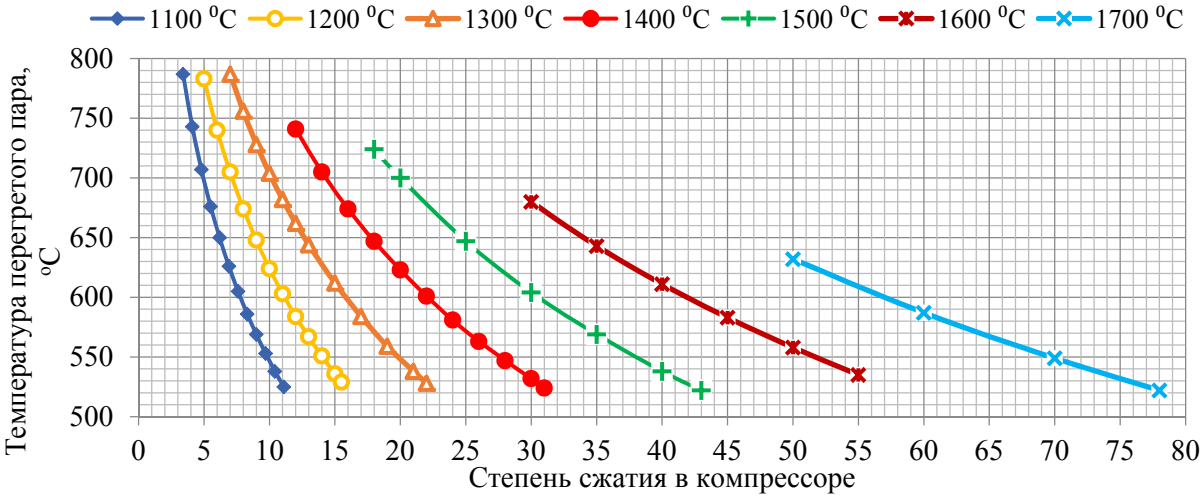


Рис. 3. Зависимость температуры пара, вводимого в КС, от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

Рассмотрим, какие теплоутилизаторы можно использовать в КГПУ для повышения их энергоэффективности.

Теплоутилизаторы делятся на две основные группы: контактные и поверхностные. Наибольшее применение нашли контактные теплоутилизаторы с пассивной и активной насадкой. В них насадка для увеличения теплообмена орошается водой.

Контактные теплоутилизаторы с пассивной насадкой просты в изготовлении и имеют высокую тепловую эффективность. Их недостатками являются: нагрев только воды и до температуры не выше точки росы; существенное аэродинамическое сопротивление (400–1600 Па); зависимости аэродинамического сопротивления от плотности орошения; низкая скорость газов (1–2,5 м/с); загрязнение воды при контакте газами; высокий влагоунос.

Контактные теплообменники с активной насадкой (КТАН) по сравнению предыдущими имеют следующие достоинства: меньше аэродинамическое сопротивление (400–800 Па); нагреваемый теплоноситель не контактирует с греющими газами; более высокая скорость газов. К их недостаткам относятся: нагрев теплоносителя в насадке не выше температуры мокрого термометра; коэффициент использования тепла ниже, чем у теплообменников с насадкой.

Поверхностные конденсационные теплоутилизаторы в последнее время нашли широкое применение для глубокого охлаждения дымовых газов. Применение в них труб с высоким коэффициентом оребрения позволило приблизить их по эффективности к контактным теплообменникам. В теплоутилизаторах этого типа можно выделить две зоны охлаждения – сухую и мокрую. Критерием разделения служит температура точки росы в уходящих газах. На трубах, металл которых имеет температуру ниже точки росы, происходит конденсация пара, содержащегося в уходящих газах. Конденсат, в зависимости от парциального давления двуокиси углерода в дымовых газах, имеет pH ниже 7 и обладает коррозионными свойствами. Для предотвращения коррозии трубы делают из коррозионностойких материалов – чугуна, нержавеющей стали, меди, а также применяют биметаллические трубы. Коэффициент теплопередачи в мокрой зоне близок к коэффициенту теплопередачи для активной насадки КТАНа, в сухой зоне он значительно ниже. Существенным достоинством поверхностных конденсационных теплоутилизаторов является то, что в них: нет системы орошения; в качестве нагреваемого теплоносителя можно использовать не только воду, но и другие вещества; теплоноситель можно нагревать до температуры близкой к температуре входящих газов, поэтому его можно использовать в Органическом цикле Ренкина для выработки электроэнергии.

Применение поверхностных конденсационных теплоутилизаторов в КГПУ особенно ресурсно- и энергоэффективно в связи с тем, что уходящая газопаровая смесь содержит значительно больше пара, чем дымовые газы при обычном сжигании топлива. Поэтому из нее можно использовать значительно больше теплоты и влаги для полезного использования в цикле.

Повысить экономичность КПГУ можно с помощью поверхностного конденсационного теплоутилизатора и Органического цикла Ренкина с воздушным конденсатором [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов NO_x и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
4. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 5. – С. 9–29.
5. 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.
6. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А, Болдушевский Е.С. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 27–36.
7. Аронов, И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
9. Кудинов, А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
10. 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.
11. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – № 10(999). – С. 11–15.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИЭ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ

Р.И. Рамазанова

Казанский государственный энергетический университет,
ИЭЭ, ЭС, гр. ИЭСм-1-22

Научный руководитель: Ю.Н. Зацаринная, к.т.н., доцент, КГЭУ

В наше время вопрос использования возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроэнергетических систем становится все более важным. Особенно значимым является учет этого аспекта в северных регионах РФ, где климат и географическое положение создают дополнительные требования и сложности для энергосистем. В этой статье мы обсудим основные моменты применения ВИЭ для увеличения энергоэффективности электроэнергетических систем в северных областях нашей страны [1].

Прежде всего, стоит упомянуть, что использование ВИЭ является одним из главных направлений энергетической политики России до 2035 года. ВИЭ являются экологичными, не производят вредных атмосферных выбросов и не загрязняют окружающую среду. Более того, их применение позволяет снизить зависимость от импорта углеводородов и укрепить энергетическую независимость страны.

Использование ВИЭ в северных регионах России обладает своими особенностями, обусловленными климатическими условиями и местоположением. Этот регион отличается продолжительными зимами, низкими температурами и слабой солнечной активностью [2].

К основным характеристикам таких систем можно отнести следующие аспекты:

1. Большая протяженность линий электропередач и значительные расстояния между источниками энергии и потребителями: в связи с обширными территориями и сложными природными условиями. В данных территориях требуется применение специальных технологий и решений для обеспечения надежного и эффективного энергоснабжения.

2. Использование в основном органических видов топлива и энергии, включая природный газ, уголь, нефть и дизельное топливо, что приводит к ухудшению экологической обстановки в регионе. А также зависимость в поставке данных видов топлива, где транспортная логистика неразвита.

3. Высокая стоимость электроэнергии, которая обусловлена значительными расстояниями и сложными климатическими условиями, которые требуют больших затрат на строительство и обслуживание энергосистемы. Также использование дорогостоящих источников энергии, таких как природный газ, нефть, уголь и дизельное топливо.

Одним из решений проблем энергоснабжения северных регионов может стать использование гибридных станций, которые сочетают в себе возобновляемые источники энергии и традиционные. Это позволяет снизить зависимость от дорогого топлива, такого как природный газ или уголь, и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу [2, 3].

Кроме того, гибридные станции могут использовать энергию ветра, солнца и других источников, что делает их более эффективными и экологически чистыми. Они также могут работать в режиме когенерации, когда тепло, вырабатываемое при производстве электроэнергии, используется для отопления зданий или подогрева воды.

Однако, использование возобновляемых источников энергии имеет свои недостатки. Например, они могут быть менее надежными, чем традиционные источники, и их выработка может зависеть от погодных условий. Кроме того, строительство и эксплуатация таких станций может быть дороже, чем традиционных.

В нашей статье мы рассмотрим использование гибридного комплекса, в состав которого входит ветро-энергетическая установка (ВЭУ) и дизель-генераторная установка (ДГУ). Анализ литературных источников показал, что в качестве подобных автономных комплексов ВИЭ для гарантированного электроснабжения потребителей северных и северо-восточных регионов страны с экстремальными годовыми перепадами температур от –60 до +40 °С наиболее перспективными являются горизонтально-осевые ветрогенераторы с синхронными генераторами на постоянных магнитах. Их модульная конструкция и достаточно высокая надежность при грамотном проектировании и производстве установок делают их привлекательным выбором.

Построение изолированных систем электроснабжения с использованием нескольких типов источников энергии, объединенные общей шиной постоянного тока, позволяет преодолеть 20 % ограничение доли мощности ВЭУ. Также возможно использование ДГУ с синхронными генераторами с постоянными магнитами, которые благодаря своему инверторному типу, имеют меньший удельный расход топлива с переменной нагрузкой [3].

Уровень замещения в ветродизельных установках зависит от используемой стратегии управления и компоновки оборудования. Существует две основные стратегии управления:

1. Ветроэнергетические установки работают параллельно с дизельными генераторами, снижая их нагрузку и экономя топливо.

2. Дизельные генераторы отключаются при высокой выработке на ветрогенераторах, позволяя им работать без использования дизельного топлива.

Для максимальной экономии топлива и высокой доли замещения, необходимо отключать ДЭС в тех случаях, когда энергии от ВЭС хватает для покрытия нагрузки. ВЭУ могут работать в автономном режиме. Но для этого необходимы интеллектуальная автоматизированная система управления и вспомогательные устройства для управления активной и реактивной выходной мощностью, а также компенсации колебаний мощности от ветрогенераторов [4]. Данный вариант представлен на рис. 1.

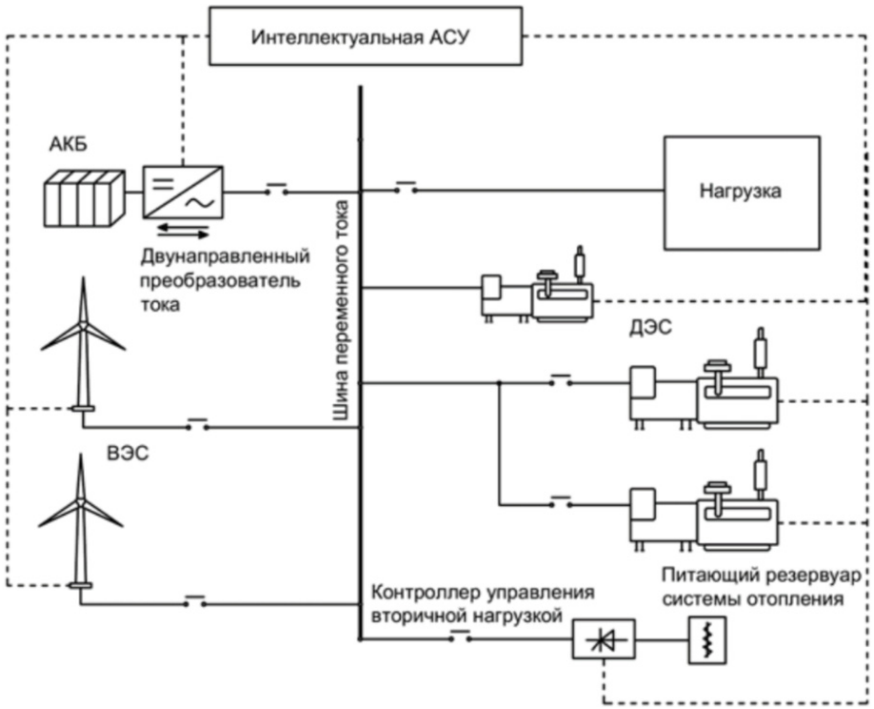


Рис. 1. Схема ветродизельного комплекса с высоким уровнем замещения с системой аккумулирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паньков И.А., Фролов В.Я. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 563–568.
2. Зайченко В.М., Чернявский А.А. Автономные системы энергоснабжения. – М.: НЕДРА, 2015. – С. 285.
3. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Обоснование рациональных вариантов энерго-, топливоснабжения децентрализованных потребителей региона: методический подход, результаты исследований // Энергетическая политика. – 2011. – № 4. – С. 42–49.
4. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Халгаева Н.А. Влияние природных и стоимостных факторов на выбор оптимальной мощности ветроэлектростанции в составе ветродизельного комплекса на Востоке РФ // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2016. – № 19–20. – С. 21–28.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА

Е.С. Болдушевский, А.А. Туболев, Н.Н. Галашов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Контактные газопаровые установки (КГПУ) с вводом пара в камеру сгорания (КС) позволяют существенно повысить мощность и КПД цикла [1, 2], а также снизить выбросы вредных веществ [3].

Расчеты, выполненные с помощью программы расчета тепловых схем КГПУ [4, 5], показали, что ввод пара в КС позволяет повыть электрический КПД до 53–57 %.

Главный недостаток КГПУ – большие потери пара с уходящими газами и загрязнение окружающей среды паром.

Для уменьшения потерь теплоты и пара с уходящими газами на выходе котла-утилизатора устанавливают конденсационные теплоутилизаторы. Теоретические вопросы применения теплоутилизаторов рассмотрены в [6–8].

Теплоутилизаторы делятся на контактные и поверхностные. В работе [9] рассмотрено применение контактного теплоутилизаторы с активной насадкой для отпуска теплоты в системе теплоснабжения.

Главным недостатком контактных теплоутилизаторов является нагрев теплоносителя в насадке не выше температуры мокрого термометра.

Более подходят для утилизации теплоты и пара, а также глубокого охлаждения дымовых газов в схемах КГПУ поверхностные теплоутилизаторы. В теплоутилизаторах этого типа можно выделить две зоны охлаждения – сухую и мокрую. Критерием разделения на зоны служит температура точки росы. Поверхностные теплоутилизаторы позволяют нагревать не только воду, но и низкокипящие вещества до температуры близкой к температуре входящих в них газов, что позволяет использовать их в Органическом цикле Ренкина для дополнительной выработки электроэнергии [10].

Применение поверхностных теплоутилизаторов в КГПУ особенно энергоэффективно в связи с тем, что уходящая газопаровая смесь содержит значительно больше пара, чем дымовые газы при традиционном сжигании топлива. Поэтому из нее можно полезно использовать значительно больше теплоты и влаги.

Ниже приведен алгоритм расчета поверхностного теплоутилизатора на выходе котла-утилизатора КГПУ.

Сначала приведены постоянные величины, используемые в расчете.

Плотности при нормальных условиях:

- $\rho_{0ПГ}$ = 0,725 кг/м^3 – природного газа;
- ρ_{0H2O} = 0,804 кг/м^3 – водяного пара;
- ρ_{0CO2} = 1,977 кг/м^3 – диоксида углерода;
- ρ_{0N2} = 1,25 кг/м^3 – азота;
- $\rho_{0в}$ = 1,293 кг/м^3 – воздуха.

Молекулярные массы:

- $\mu_в$ = 28,96 г/моль – воздуха;
- μ_{N2} = 28,013 г/моль – азота;
- μ_{CO2} = 44,01 г/моль – диоксида углерода;
- μ_{H2O} = 18,016 г/моль – водяного пара.

Удельные изобарные массовые теплоемкости:

- C_{CO2} = 0,8658 кДж/(кг·К) – диоксида углерода;
- C_{N2} = 1,0316 кДж/(кг·К) – азота;
- C_{H2O} = 1,968 кДж/(кг·К) – водяного пара;
- $C_в$ = 1,005 кДж/(кг·К) – воздуха;
- $C_к$ = 4,19 кДж/(кг·К) – конденсата;
- $\eta_{то}$ = 0,99 – КПД теплообменника.

Исходные данные:

- $B_{ПГ}$ – расход природного газа, м^3/с;
- CH_4, C_2H_6, и т. д. – состав природного газа в %;
- $P_{СТ}$ – статическое давление ПГС в теплоутилизаторе, Па;
- $t_{1ГПС}$ – температура ГПС на входе теплоутилизатора, °С;
- $t_{2ГПС}$ – температура ГПС на выходе теплоутилизатора, °С;
- $t_{1Т}$ – температура теплоносителя на входе теплоутилизатора, °С;
- $\Delta t_Т$ – недогрев теплоносителя до $t_{1ГПС}$, °С;
- $C_Т$ – теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·К);
- α – коэффициент избытка воздуха;
- d – относительный расход пара, добавленный в ГПС, кг/кг топлива;
- $d_{ПГ}$ – влагосодержание природного газа, кг/кг топлива.

Расчет воздуха, топлива и продуктов сгорания производится по формулам [11].

Теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для сжигания 1 м^3 сухого природного газа

$$V^0_в = 0{,}0476[0{,}5CO+0{,}5H_2+1{,}5H_2S+\Sigma(m+n/4)C_mH_n-O_2],\ м^3/м^3. \quad (1)$$

Продукты сгорания 1 м^3 сухого природного газа.

Теоретический объем азота

$$V^0_{N2} = 0{,}79V^0_в + N_2/100,\ м^3/м^3. \quad (2)$$

Теоретический объем диоксида углерода

$$V^0_{CO2} = 0{,}01[CO_2+CO+H_2S+\Sigma mC_mH_n]\ ,\ м^3/м^3. \quad (3)$$

Теоретический объем водяных паров

$$V^0_{H2O} = 0{,}01[H_2S+H2+0{,}5\Sigma nC_mH_n+0{,}124d_{ПГ}]+0{,}016V^0_в,\ м^3/м^3. \quad (4)$$

Объем сухих продуктов сгорания

$$V_{СГ} = V^0_{N2} + V^0_{CO2} + (\alpha-1)\cdot V^0_в,\ м^3/м^3. \quad (5)$$

Объем добавленного водяного пара

$$V_d = d\cdot\rho_{ПГ}/\rho_{H2O},\ м^3/м^3. \quad (6)$$

Объем водяных паров

$$V_{H2O} = V^0_{H2O} + 0{,}016(\alpha-1)\cdot V^0_в.+ V_d,\ м^3/м^3. \quad (7)$$

Суммарный объем влажных продуктов сгорания

$$V = V_{СГ} + V_{H2O},\ м^3/м^3. \quad (8)$$

Объемная доля диоксида углерода

$$r_{CO2} = V^0_{CO2}/V. \quad (9)$$

Объемная доля азота

$$r_{N2} = V^0_{N2}/V. \quad (10)$$

Объемная доля добавленного водяного пара

$$r_d = V_d/V. \quad (11)$$

Объемная доля водяного пара

$$r_{H2O} = V_{H2O}/V. \quad (12)$$

Объемная доля воздуха

$$r_в = (\alpha - 1)\cdot V^0_в /V. \quad (13)$$

Парциальное давление водяного пара

$$P_{H2O} = r_{H2O}\cdot P_{СТ},\ Па. \quad (14)$$

Температура точки росы определяется как функция от P_{H2O} в состоянии насыщения

$$t_p = P_s(P_{H2O}),\ °C. \quad (15)$$

Температура точки росы разделяет теплоутилизатор на сухую и мокрую зоны.

Массовый расход сухих дымовых газов на 1 м^3 топлива

$$m_{СГ} = V_{RO2}\cdot\rho_{0RO2} + V^0_{N2}\cdot\rho_{0N2} + V^0_в\cdot\rho_{0в}\cdot(\alpha-1)\cdot V^0_в,\ кг/м^3. \quad (16)$$

Массовый расход добавленного водяного пара на 1 м^3 топлива

$$m_d = V_d\cdot\rho_{0H2O},\ кг/м^3. \quad (17)$$

Массовый расход водяного пара на 1 м^3 топлива

$$m_{H2O} = V_{H2O}\cdot\rho_{0H2O}/\rho_{0ПГ},\ кг/м^3. \quad (18)$$

Массовый расход дымовых газов на 1 м^3 топлива

$$m_{ГПС} = m_{СГ} + m_{H2O},\ кг/м^3. \quad (19)$$

Влагосодержание дымовых газов на входе теплоутилизатора

$$d_{1ГПС} = m_{H2O}/m_{СГ},\ кг/кг. \quad (20)$$

Влагосодержание насыщенных продуктов сгорания на выходе теплоутилизатора

$$d_{2ГПС} = \frac{0,0006382 + 0,004\alpha}{\alpha + 0,199}\exp(0,062t_{2ГПС}),\ кг/кг. \quad (21)$$

Массовый расход сухих дымовых газов

$$G_{СГ} = m_{СГ}\cdot B_{ПГ},\ кг/с. \quad (22)$$

Массовый расход дымовых газов

$$G_{ГПС} = m_{ГПС}\cdot B_{ПГ},\ кг/с. \quad (23)$$

Массовый расход добавленного водяного пара

$$G_d = m_d\cdot B_{ПГ},\ кг/с. \quad (24)$$

Массовый расход конденсата

$$G_к = G_{СГ}\cdot(d_{1ГПС} - d_{2ГПС}),\ кг/с. \quad (25)$$

Массовый расход избытка конденсата по отношению к добавленному пару

$$\Delta G_к = G_к - G_d,\ кг/с. \quad (26)$$

Сумма произведений $\mu_i\cdot r_i$

$$\mu_\Sigma = \mu_в\cdot r_в + \mu_{N2}\cdot r_{N2} + \mu_{CO2}\cdot r_{CO2} + \mu_{H2O}\cdot r_{H2O}. \quad (27)$$

Массовая доля воздуха

$$g_в = r_в\cdot\mu_в/\mu_\Sigma. \quad (28)$$

Массовая доля азота

$$g_{N2} = r_{N2}\cdot\mu_{N2}/\mu_\Sigma. \quad (29)$$

Массовая доля диоксида углерода

$$g_{CO2} = r_{CO2}\cdot\mu_{CO2}/\mu_\Sigma. \quad (30)$$

Массовая доля водяного пара

$$g_{H2O} = r_{H2O} \cdot \mu_{H2O} / \mu_{\Sigma}. \quad (31)$$

Массовая теплоемкость дымовых газов

$$C_{ГПС} = C_{в} \cdot g_{в} + C_{CO2} \cdot g_{CO2} + C_{N2} \cdot g_{N2} + C_{H2O} \cdot g_{H2O}, \text{ кДж/(кг·К)}. \quad (32)$$

Удельная теплота парообразования при давлении P_{H2O}

$$r = f(P_{H2O}), \text{ кДж/кг}. \quad (33)$$

Теплота, отданная газами и конденсатом в теплоутилизаторе,

$$Q_{УТ} = G_{ГПС} \cdot C_{ГПС} \cdot (t_{1ГПС} - t_{2ГПС}) + G_{к} \cdot r, \text{ кВт}. \quad (34)$$

Теплота, отданная газами в сухой зоне теплоутилизатора,

$$Q_{СУХ} = G_{ГПС} \cdot C_{ГПС} \cdot (t_{1ГПС} - t_{р}) , \text{ кВт}. \quad (35)$$

Теплота, отданная газами в мокрой зоне теплоутилизатора,

$$Q_{МОК} = Q_{ГПС} - Q_{СУХ}, \text{ кВт}. \quad (36)$$

Расход нагреваемого теплоносителя

$$G_{Т} = Q_{ГПС} \cdot \eta_{то} / [C_{Т} \cdot (t_{1ГПС} - \Delta t_{Т} - t_{1Т})] , \text{ кг/с}. \quad (37)$$

Представленный алгоритм реализован в программе электронной таблицы excel и используется для исследования тепловых схем КГПУ с утилизацией низкопотенциальной теплоты уходящих газов.

На рис. 1 приведен пример расчета по программе теплоутилизатора на следующие исходные данные: $B_{ПГ}$ = 1 м^3/с; объемный состав топлива в %: CH_4 = 98,72; C_2H_6 = 0,12; C_3H_8 = 0,01; CO_2 = 0,14; N_2 = 1; $P_{СТ}$ = 104,4 кПа; $t_{1ГПС}$ = 110 °С; $t_{2ГПС}$ = 40 °С; $t_{1Т}$ = 20 °С; $\Delta t_{Т}$ = 10 °С; $C_{Т}$ = 4,19 кДж/(кг·К); α = 1,3. Видим, что при изменении ввода пара от 0 до 10 кг/кг топлива $Q_{УТ}$ линейно возрастает от 3,8 до 22 МВт, при этом основная доля приходится на мокрую часть, от 2,8 до 21 МВт. Расход конденсата изменяется от 1,05 до 8,3 кг/с. Во всем диапазоне избыток конденсата по отношению к введенному пару составляет 1,05 кг/с. Расход нагреваемой от 20 до 100 °С воды в теплоутилизаторе изменяется от 11,3 до 65 кг/с в зависимости от расхода ввода пара.

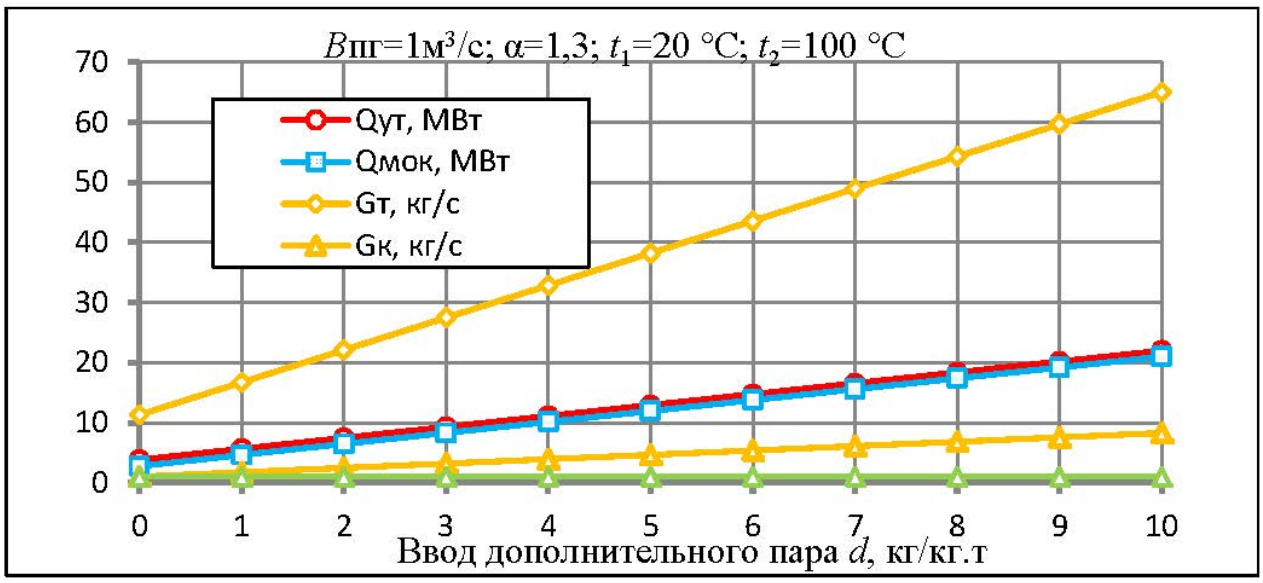


Рис. 1. Результаты расчета теплоутилизатора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов NO_x и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.

4. 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.
5. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А, Болдушевский Е.С. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 27–36.
6. Аронов, И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
7. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
8. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
9. 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.
10. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – № 10(999). – С. 11–15.
11. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и дополн. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.

NANOMATERIALS COMPOSED OF AG-MODIFIED G-C3N4 FOR USE IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

I.V. Maltseva, I.S. Smirnov, D.Yu. Piarnits

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, megafaculty of life sciences, Infochemistry Scientific Center, group O3243

Superviser: Ekaterina V. Skorb, professor Dr.

Nowadays environmental applications, particularly energy saving, energy efficiency are crucial concepts in our modern world, aiming to reduce the consumption of energy resources while maintaining or even improving the quality of life. One of the global goals is to improve the technology by obtaining and developing new materials by technological advances and improved processes [9].

Currently, one of the most relevant areas of materials science in the field of hydrogen energy, wastewater and gas treatment is researches connected with graphitic carbon nitride (g-C_3N_4). g-C_3N_4 is known as an appropriate material for photocatalysts based on its suitable energy band structure (2.78–2.83 eV), visible light absorption and high stability. Prevalent methods of pristine g-C_3N_4 synthesis are based on low-cost nitrogen-rich organic precursors, such as urea, melamine and dicyandiamide, etc. [3–5]. Nevertheless, the practical use of pristine g-C_3N_4 has been hindered by various drawbacks such as a small surface area and the quick recombination of electron-hole pairs generated by light. (e^--h^+) pairs [2, 7]. In this research we used melamine barbiturate (MB) as another nitrogen-containing precursor for g-C_3N_4 (CN-MB) synthesis due to its precise characteristics. The choice is justified by numerous works reporting extraordinary properties in modified barbiturates [6], such as light-sensitive swelling of self-assemblies [8], changing colour or various biological applications.

In this work the sample CN-MB was obtained by thermal polymerization using 2 g of melamine and barbituric acid compounds. For this, the respective amounts of substances (1 gram of barbituric acid and 1.015 g of melamine) were taken in a 1:1 molar ratio. Each substance was dissolved in 500 ml of water (with poor dissolution of the substance, the solution was heated to 40 °C). On the next step, the solutions were placed into the refrigerator for 30 minutes until 5 °C, then drained into

a glass and ultrasonicated for 5 mins. The resulting substance was dried at 100–120 °C. The pristine CN-MB material was prepared by thermal treatment processing of the melamine-barbiturate precursor in argon flow at 350 °C for 1 hour and 8 °C·min^{-1}. The heating regime comprised the treatment of the 2 g of MB. The resulting orange powder was labelled CN-MB (Fig. 1, *a*).

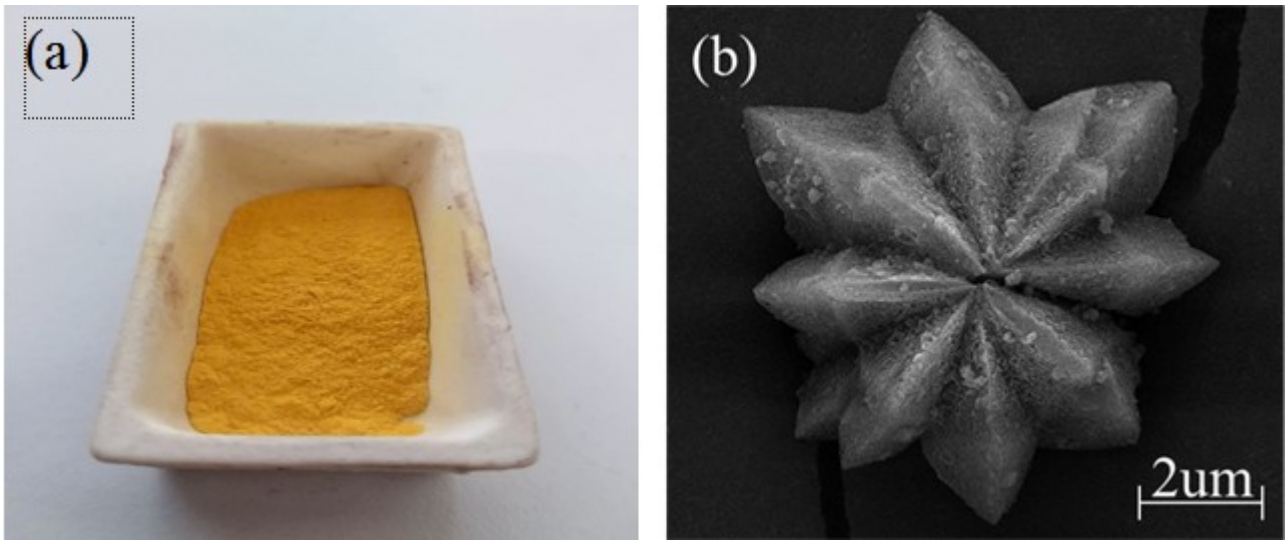


Fig. 1 (a) CN-MB orange powder, (b) SEM image of CN-MB from melamine barbiturate supramolecular self-assemblies (350 °C)

The SEM image (Fig. 1, *b*) shows the general morphology of our CN-MB composites, which are shaped like stars. The composites are visible arranged randomly.

The resulting substance doesn't have the expected photocatalytic properties, so it was decided to modify the composite. Combining Ag with CN-MB offers several advantages compared to traditional semiconductor materials. Such modification can enhance semiconductor properties by increasing the specific surface area, adjusting the light response range, accelerating electron migration rates, promoting the separation of electron-hole pairs and preventing their recombination [1]. Additionally, CN-MB can effectively transfer Ag nanoparticles on its surface, avoiding the aggregation caused by the high surface energy and abundant surface defects. Taking these advantages into consideration, metal nanoparticles and CN-MB are mutually beneficial choices for each other.

We proposed an approach of synthesis CN-MB from melamine barbiturate supramolecular self-assemblies and covered it with Ag nanoparticles.

For covering the composites with Ag, silver nitrate ($AgNO_3$, pure, LenReactive) was firstly dissolved in an ethanol solution (EtOH, 96 %). Then, the prepared CN-MB materials were added to the prepared $AgNO_3$ solutions in proportions to obtain the suspensions with the Ag content of 1.0 and 2.5 wt %, respectively. The mixtures were stirred magnetically for 2 hours to obtain a homogeneously dispersed suspension and then dried in air for 2 hours at 70 °C and then 2 hours at 150 °C. At last, the composites were ground in an agate mortar to obtain a fine powder.

The surface of CN-MB + Ag-n % composites was also examined using SEM (Fig. 2). The images demonstrate that on the surface of CN-MB + Ag-1 % there are less Ag nanoparticles, than on the sample with 2.5 % Ag concentration. This tendency will affect the photocatalytic properties of the composites.

The X-Ray Diffraction (XRD) powder patterns of CN-MB Ag-n % composites are shown in fig. 3. The composites have characteristic peaks at 13°, so we can conclude that CN-MB composites have heptazine structure. Moreover, at 27,23° the peaks of silver and CN-MB overlap each other, as evidenced by the expansion at 28°–36° zone.

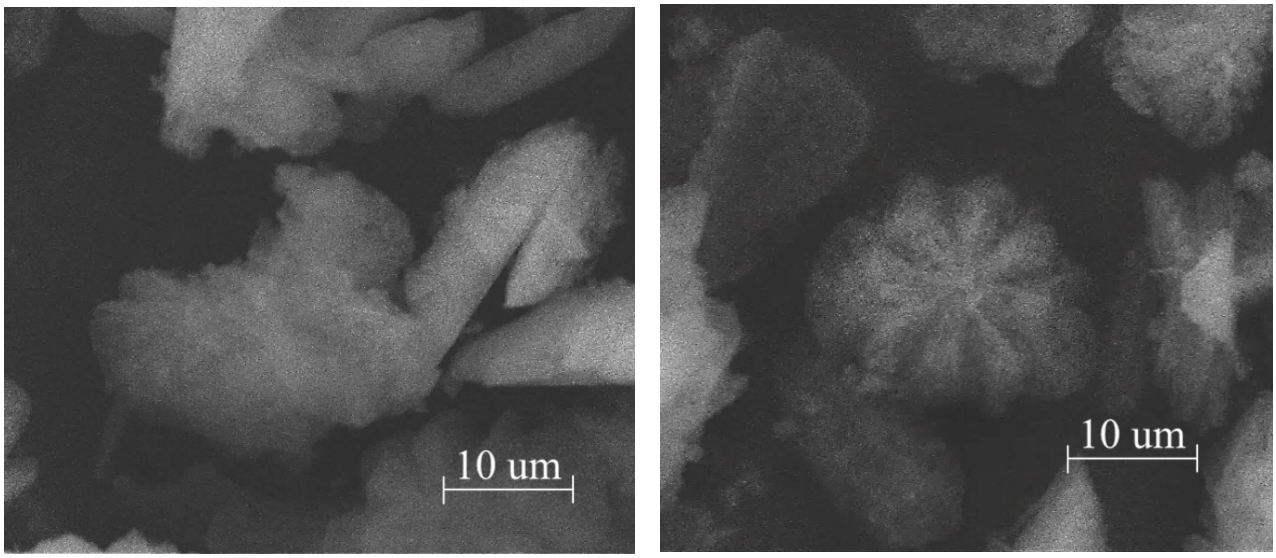


Fig. 2. SEM images of (a) CN-MB + Ag-1 %, (b) CN-MB + Ag-2.5 %

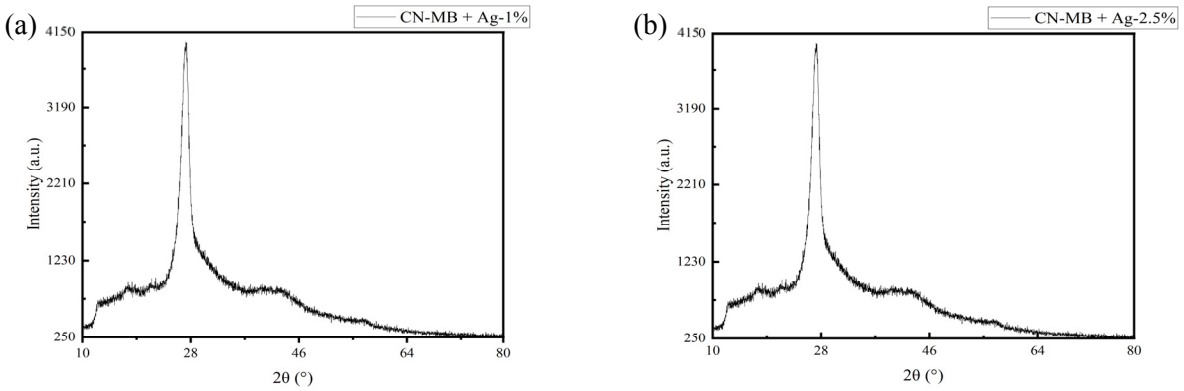


Fig. 3. XRD Spectra of (a) CN-MB + Ag-1 %, (b) CN-MB + Ag-2.5 %

The measurement of bang gap energy using UV-Vis spectrophotometer was also done on CN-MB Ag-n % composites (Fig. 4, 5). Based on the Tauc plot method calculation we can see that CN-MB has the E_g value of 2.87 eV, for CN-MB + Ag-1 % and CN-MB + Ag-2.5 % it is 2.78 eV and 2.61 eV respectively. The results let us understand that with adding 1 % of Ag the band gap of the composite decreases by 3.14 % and by 9.06 for 2.5 % concentration of Ag.

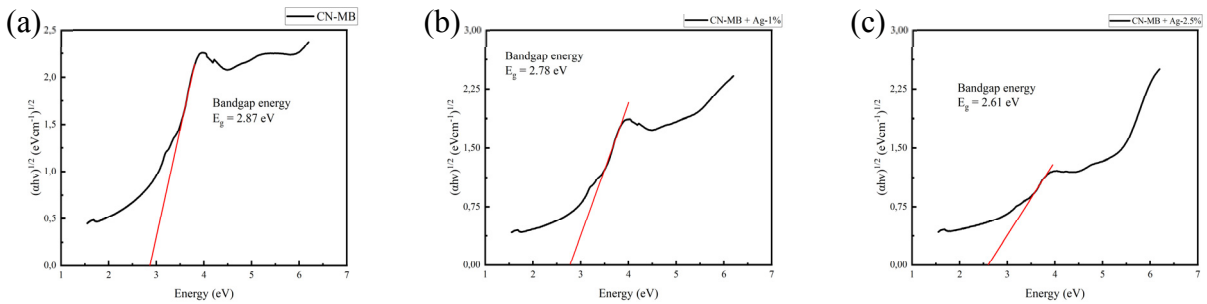


Fig. 4. The reflectance UV-Vis spectra of the (a) CN-MB, (b) CN-MB + Ag-1 %, (c) CN-MB + Ag-2.5 %, based on the Tauc plot method for indirect allowed transitions

The photodegradation of Rhodamine B (fig. 6) demonstrated the influence of CN-MB + Ag-n % on the rate of this process. On the images we can see a tendency that with the increasing of Ag con-

centration, the rate of the dye degradation increases. In fact, CN-MB + Ag-1 % decomposes the dye 2 times more effectively and CN-MB + Ag-2.5 % 6 times more effectively than pristine CN-MB.

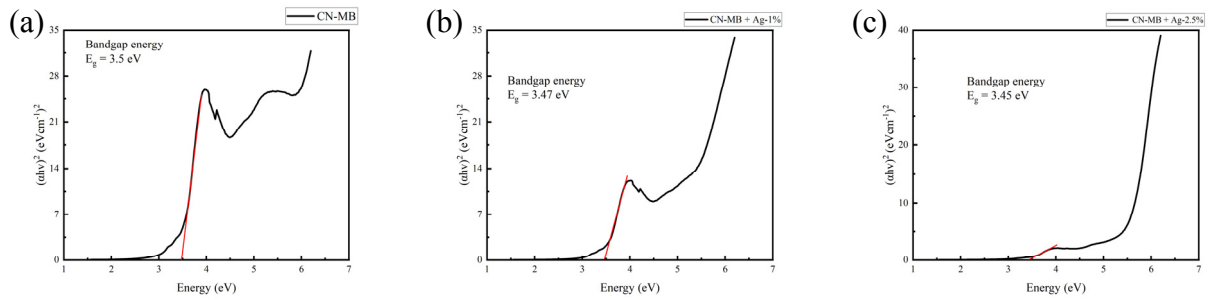


Fig. 5. The reflectance UV-Vis spectra of the (a) CN-MB, (b) CN-MB + Ag-1 %, (c) CN-MB + Ag-2.5 %, based on the Tauc plot method for direct allowed transitions

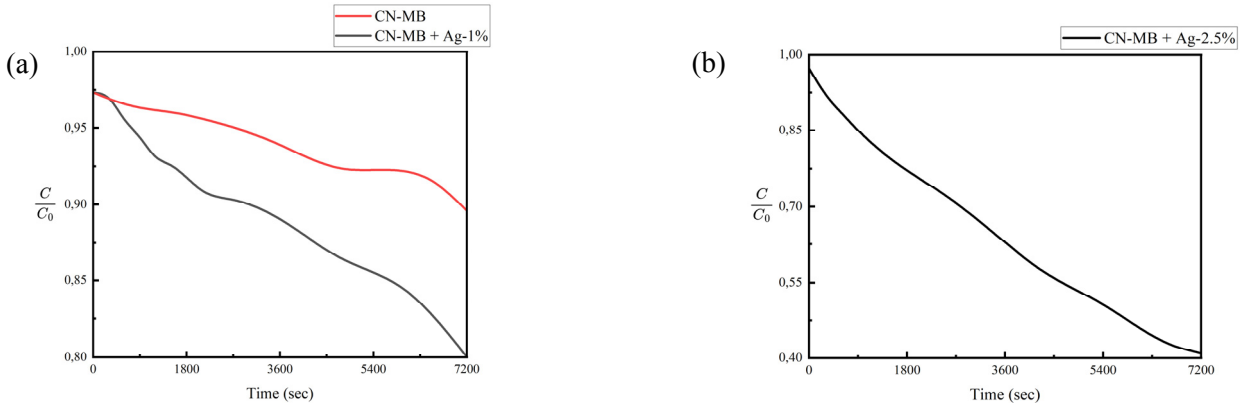


Fig. 6. Photocatalytic degradation of Rhodamine B as a function of time under UV light (350 nm). Experimental conditions: C_o = 0.05 g·L^{-1}, $C_{catalyst}$ = 0.4 g·L^{-1}, pH = 7, T = 25 °C. (a) by CN-MB and CN-MB + Ag-1 %, (b) By CN-MB + Ag-2.5 %

In conclusion, CN-MB Ag-1 % and 2.5 % composites were fabricated by thermal vapor method. The modification of pristine CN-MB by Ag nanoparticles led to the following enhancements: the bandgap energy of the composites decreased to 2.78 and 2.61 eV, the photocatalytic degradation increased by 6 times. These composites may find application in such areas as energy saving and energy efficiency as an effective photocatalyst. In the future we are planning to use various precursors for g-C_3N_4 synthesis and cover them with different metal nanoparticles to find the best combinations.

REFERENCES

1. Chen Y. et al. The Collision between g-C3N4 and QDs in the Fields of Energy and Environment: Synergistic Effects for Efficient Photocatalysis // Small. – 2023. – Vol. 19, no. 14.
2. Huang D. et al. Megamerger in photocatalytic field: 2D g-C3N4 nanosheets serve as support of 0D nanomaterials for improving photocatalytic performance // Applied Catalysis B: Environmental. – 2019. – Vol. 240. – P. 153–173.
3. Majdoub M., Anfar Z., Amedlous A. Emerging chemical functionalization of g-C3N4: Covalent/noncovalent modifications and applications // ACS Nano. – 2020. – Vol. 14, no. 10. – P. 12390–12469.
4. Ni L. et al. Significantly Enhanced Photocatalytic Performance of the g-C3N4/Sulfur-Vacancy-Containing Zn3In2S6Heterostructure for Photocatalytic H2and H2O2Generation by Coupling Defects with Heterojunction Engineering // Inorganic Chemistry. – 2022. – Vol. 48, no. 61. – P. 19552–19566.
5. Poomipuen K. et al. Dual Activation of Peroxymonosulfate Using MnFe2O4/g-C3N4 and Visible Light for the Efficient Degradation of Steroid Hormones: Performance, Mechanisms, and Environmental Impacts // ACS Omega. – 2023.

6. Shilovskikh V. V. et al. Melamine–Barbiturate Supramolecular Assembly as a pH-Dependent Organic Radical Trap Material // Chemistry – A European Journal. – 2020. – Vol. 70, no. 26. – P. 16603–16610.
7. Xiao Y. et al. Molecule Self-Assembly Synthesis of Porous Few-Layer Carbon Nitride for Highly Efficient Photoredox Catalysis // Journal of the American Chemical Society. – 2019. – Vol. 6, no. 141. – P. 2508–2515.
8. Yagai S., Karatsu T., Kitamura A. Photoresponsive melamine·barbiturate hydrogen-bonded assembly // Chemical Communications. – 2003. – Vol. 15, no. 3. – P. 1844–1845.
9. Zhang X. et al. Government intervention, industrial structure, and energy eco-efficiency: an empirical research on new energy demonstration in cities // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 1, no. 13. – P. 19446.

СПОСОБ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТА ЗА СЧЕТ КРУГЛОГОДИЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

А.В. Клоков[1], А.В. Бахмадов[2]

МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Э2 ВИЭ, гр. Э2-13М[1]; Э2 ВИЭ, гр. Э2-73Б[2]

Научный руководитель: Е.Ю. Локтионов, к.т.н., доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Термостабилизация грунта представляет собой неотъемлемый аспект в современной инженерии. Задача этого процесса заключается в поддержании стабильных температурных условий в грунте с учетом колебаний окружающей среды. Одним из методов достижения этой цели является круглогодичное регулирование теплопередачи.

Применение тепловых экранов, материалов с высокой теплоизоляцией позволяет управлять тепловыми потоками, предотвращая сезонные изменения температуры грунта. Этот подход имеет несколько ключевых преимуществ. Во-первых, стабильная температура способствует улучшению механических свойств грунта (например, супеси или суглинка). Это особенно важно для обеспечения устойчивости фундаментов и других инженерных конструкций. Во-вторых, энергосберегающие аспекты данного метода являются значимыми. Стабильные условия в грунте снижают потребность в энергозатратах на отопление и охлаждение зданий за счет использования грунтовых теплообменников, что способствует повышению их эффективности. В-третьих, круглогодичное регулирование теплопередачи оказывает положительное влияние на долговечность строений. Предотвращение экстремальных температурных воздействий способствует уменьшению риска повреждений и обеспечивает продление срока службы конструкций.

Предлагаемый метод термостабилизации заключается в том, что в холодный сезон (когда температура грунта на глубине от 0 до 10 см становится выше температуры атмосферного воздуха) тепло от поверхности грунта отнимается конвекцией, однако проблема заключается в том, что теплопоток ограничивается наличием слоя снега, выполняющего функцию природного теплоизолятора. Поэтому в зимний сезон теплоизоляционный слой поднимается над поверхностью грунта выше толщины снежного покрова на 10–15 см; отсутствие снега под покрытием из теплоизоляционного материала позволяет эффективно использовать конвекцию для охлаждения грунта, так как теплообмен осуществляется потоками воздуха. В теплый период года (когда, наоборот, температура воздуха выше температуры терморегулируемого участка грунта) в естественных условиях тепловой поток направлен в грунт за счет конвекции, поглощения солнечной инсоляции и впитывания атмосферных осадков. При использовании предложенного метода в теплый сезон теплоизоляция размещается на поверхности грунта, ограничивая теплопередачу конвекцией и излучением (в том числе благодаря снижению коэффициента поглощения из-за высокого альбедо внешнего покрытия), способ-

ствует отводу атмосферных осадков за пределы области, на которую распространяется защитный эффект теплоизоляции.

Внешнее покрытие теплоизолятора должно обладать низким коэффициентом поглощения солнечной инсоляции и защищать от атмосферных осадков. Эффективным решением является использование оцинкованного профилированного листа как водонепроницаемого материала с низким коэффициентом поглощения (альбедо составляет около 0,85, что означает поглощение составляет всего 15 % и отражение – 85 % солнечной энергии).

На учебной базе САФУ им. М.В. Ломоносова «Бабонегово» (г. Архангельск) был создан прототип системы термостабилизации грунта. Общий вид установки представлен в теплое и в холодное времена года на рис. 1, *а* и *б*. Основные составные элементы: оцинкованные профлисты, пеноплекс и поддерживающая конструкция в виде досок.

Термостабилизируемый участок состоит из грунта размерами 6 × 6 м. Система мониторинга осуществляется посредством программируемого реле (ОВЕН ПР200) и группы модулей (ОВЕН ПРМ, ПРЕ), передающих данные по интерфейсу RS-485. Осуществляется мониторинг температур грунта и торфа на глубинах 0, 10, 20, 40, 80, 160, 320 и 500 см, а также тепловых потоков на различных участках установки.

а *б*

Рис. 1. Общий вид прототипа системы круглогодичной термостабилизации грунта: а – теплое время года; б – холодное время года

Теплоизоляционный слой обладает потенциалом стать податливым, например, при реализации в виде надуваемой структуры, наполненной газом. Для обеспечения энергии механизма перемещения рекомендуется использовать возобновляемые источники, такие как солнечные панели, с расчетом необходимой площади для обеспечения требуемой энергии для электропривода на протяжении всего процесса. Солнечная панель может быть размещена на установке, вместо профильных листов, выполняя функцию защиты от солнечного излучения и от жидких осадков. Перемещение установки может быть осуществлено постепенно в течение периода до 14 дней, сам процесс перемещения может занимать один день, используя наиболее солнечные часы в течение этого времени. Разумным представляется начинать процесс перемещения, учитывая данные о температуре грунта на глубине от 0 до 10 см и окружающей среде. В холодные периоды времени, когда установка находится в поднятом состоянии, ориентация относительно поверхности грунта может иметь наклон с учетом предотвращения скопления снега и обеспечения циркуляции воздуха под ней для охлаждения поверхности грунта. В теплые периоды времени установка не обязательно должна находиться в прямом контакте с грунтом; важно, чтобы теплоизоляция способствовала максимальному снижению тепловых потоков из атмосферы в грунт.

В данной экспериментальной установке подъем устройства осуществляется при помощи механической системы. Планируется реализовать электрическую систему управления с автоматическим методом определения точек пересечения температур воздуха и поверхности грунта.

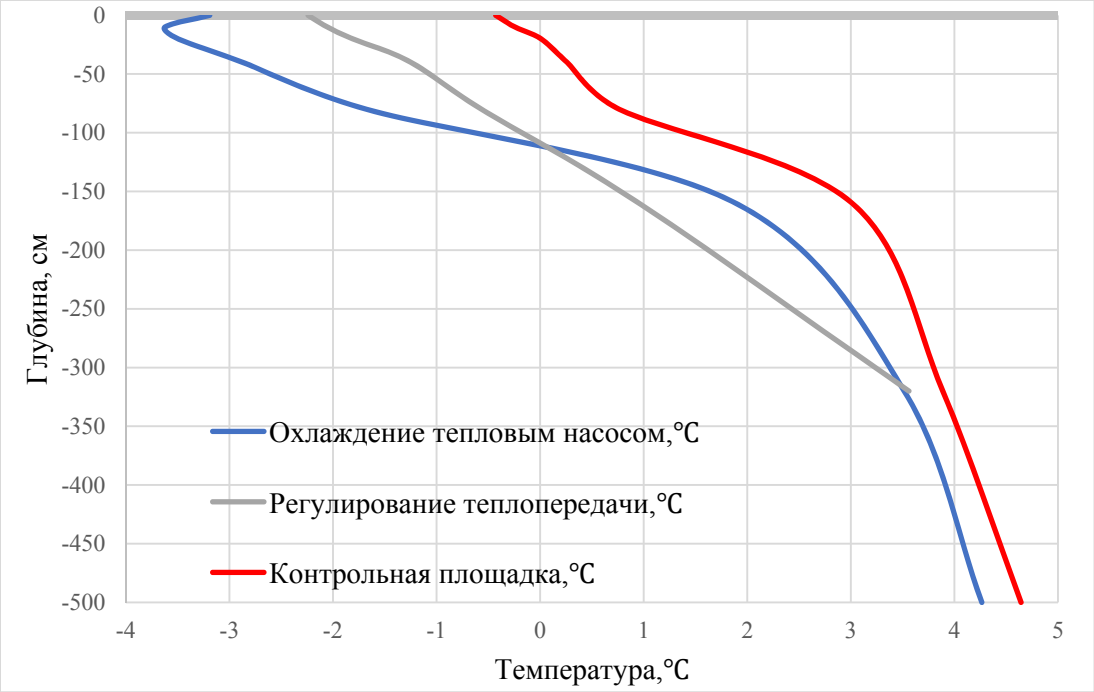
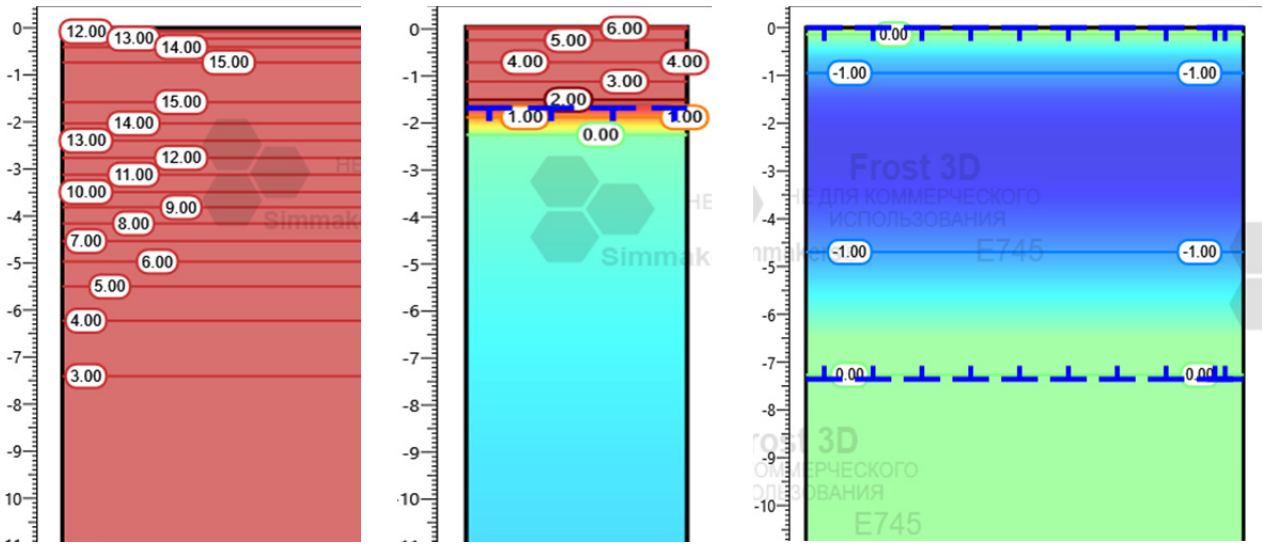


Рис. 2. Температуры грунта 25.03.2023 при разных способах термостабилизации



а *б* *в*

Рис. 3. Результаты численного моделирования теплового состояния грунта для Читы в сентябре:
а – естественные условия; б – фиксированная теплоизоляция; в – предлагаемый способ

Механизм подъема и опускания установки теплоизоляционного покрытия должен быть тщательно выбран с учетом технических, экономических и функциональных параметров. Сравнение различных систем, таких как гидравлическая, электрическая, механическая, пневматическая, или комбинированный подход, позволяет сделать вывод в пользу электри-

ческой системы с использованием электрической лебедки как оптимального решения для большинства сценариев применения. Эта система обеспечивают хороший баланс между производительностью, стоимостью и управляемостью, что делает их предпочтительным выбором в контексте инженерных приложений.

Данный способ обеспечивает более стабильные и контролируемые температурные условия в разное время года, что может быть полезно для различных применений. Это уменьшает нагрев грунта летом и усиливает охлаждение грунта зимой, что сопоставимо с альтернативными методами, такими как тепловые насосы (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования для города Читы.

Таким образом, предложенный метод гарантирует благоприятные условия для охлаждения грунта зимой и снижения его нагрева летом при небольших технических изменениях по сравнению с поверхностной теплоизоляцией и защитой от атмосферных осадков.

Работа выполнена при поддержке РНФ и Архангельской области (грант 22-19-20026). Авторы благодарят ООО НТЦ Симмэйкерс за предоставление бесплатной академической лицензии на программный комплекс для геотехнических расчетов Frost 3D. Данное программное обеспечение специально разработано для прогнозирования состояния и проектирования строений, учитывая условия вечной мерзлоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шараборова Е.С., Локтионов Е.Ю. Способ термостабилизации грунта за счет круглогодичного регулирования теплопередачи // Патент РФ № 2 779 706 – 2022 – приоритет от 14.03.2022.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ПОТРЕБЛЯЕМУЮ ЗДАНИЕМ ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ

М.В. Колосов, Е.Е. Шишкова, Ю.Л. Липовка

Сибирский федеральный университет,
ИСИ, ИСЗиС

Научный руководитель: Ю. Л. Липовка, д.т.н., профессор каф. ИСЗиС ИСИ СФУ

Цель исследования – определить влияние солнечной радиации на потребляемую зданием тепловую энергию. В исследовании используются данные теплоснабжающей организации с тепловых приборов учета г. Красноярска и фактические данные солнечной радиации из открытой базы данных Weather Data & Weather API. В результате исследования определено наличие избытка тепла в здании преимущественно в марте и сентябре, перегрев помещения радиацией через окна превышает потребность здания на отопление. Исследование показало, что определенное количество солнечной радиации приводит к избытку тепла и перетопу помещений. Устранение избытка тепла возможно переоборудованием ИТП путем внедрения системы для получения данных о погоде и метеорологических факторах из онлайн-баз данных.

Ключевые слова: теплопотребление здания, солнечная радиация, температура наружного воздуха, тепловая энергия, избыток тепла, индивидуальный тепловой пункт, перетоп помещений.

Проблема влияния радиации на регулирование теплопоступлений в здание заключается в неоднородности и разнообразии фактических значений метеорологических факторов, влияющих на погоду в течение всего отопительного периода. В исследованиях на тему строи-

тельства и регулирования тепловых режимов солнечная радиация представлена преимущественно в качестве возобновляемого источника энергии. При проектировании отопления в расчете используются значения солнечной радиации из СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология» и обозначаются как суммарная солнечная радиация на горизонтальную и вертикальную поверхности при безоблачном небе [1]. Для расчета солнечной радиации также существуют компьютерные программы, основанные на сборе информации о теплопоступлениях и формировании сводной таблицы с последующим построением диаграммы почасовых поступлений [2]. Данные из нормативных документов усреднены и не отражают фактическую ситуацию в определенный момент в отличие от счетчиков учета тепла.

Для исследования путем снятия значений со счетчиков взяты данные теплоснабжающей организации о теплопотреблении здания в г. Красноярске за период с 1 января 2020 года по 1 апреля 2023 года. Фактические данные солнечной радиации взяты из открытой базы данных Weather Data & Weather API [3]. Максимальные значения солнечной радиации определены в период с июля по октябрь, максимальные значения теплопотребления определены в период с декабря по февраль (рис. 1–2).

Закрашенной областью обозначен избыток потребляемой тепловой энергии, значение которого определяется интегрированием области между линиями потребляемой тепловой энергии с учетом радиационной составляющей и без (рис. 3). Избыток тепловой энергии в здании определяется в точке –17 до +8 °С. Значение тепловой энергии на отопление обратно пропорционально значению температуры наружного воздуха, которая повышается под влиянием солнечной радиации. Солнечная радиация, проходящая через оконные проемы, нагревает отапливаемое помещение, превышая потребность в тепле от отопления и нарушая тепловой баланс. В результате исследования определено наличие избытка тепла в здании преимущественно в конце отопительного периода (весна) и в его начале (сентябрь) (рис. 4).

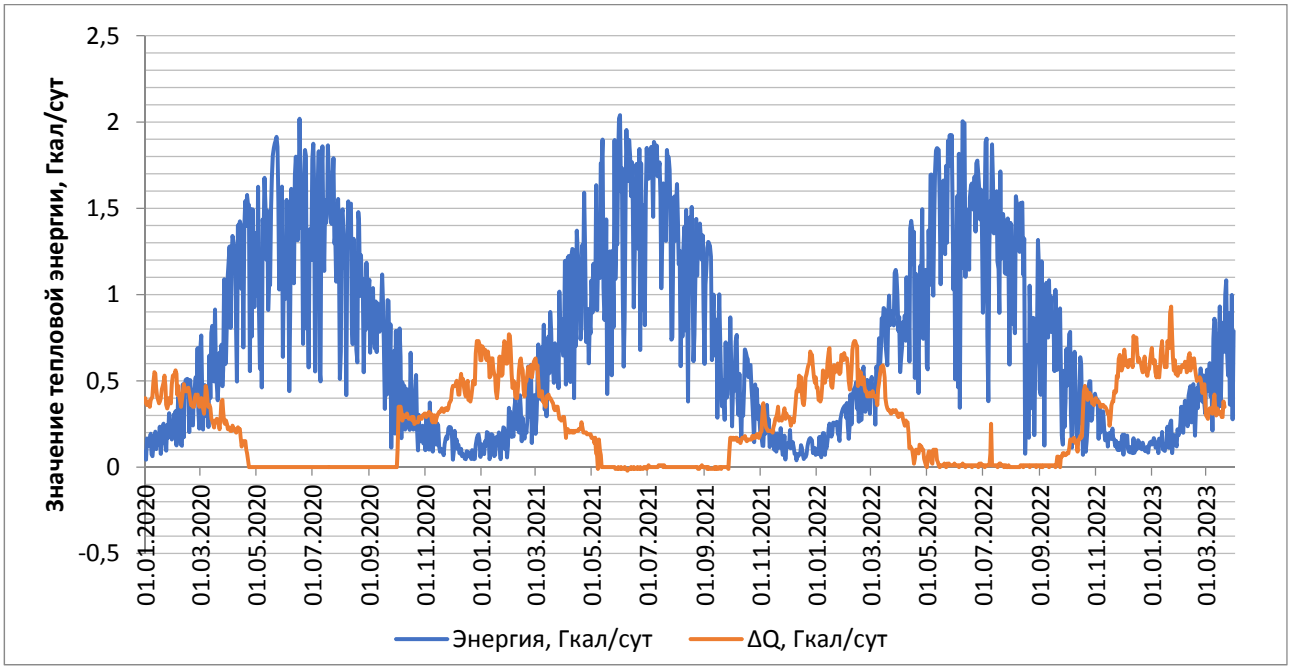


Рис. 1. Суммарная суточная солнечная радиация на горизонтальную и вертикальную поверхности через окна и тепловая потребляемая зданием энергия по дням выбранного периода (1 января 2020 – 1 апреля 2023)

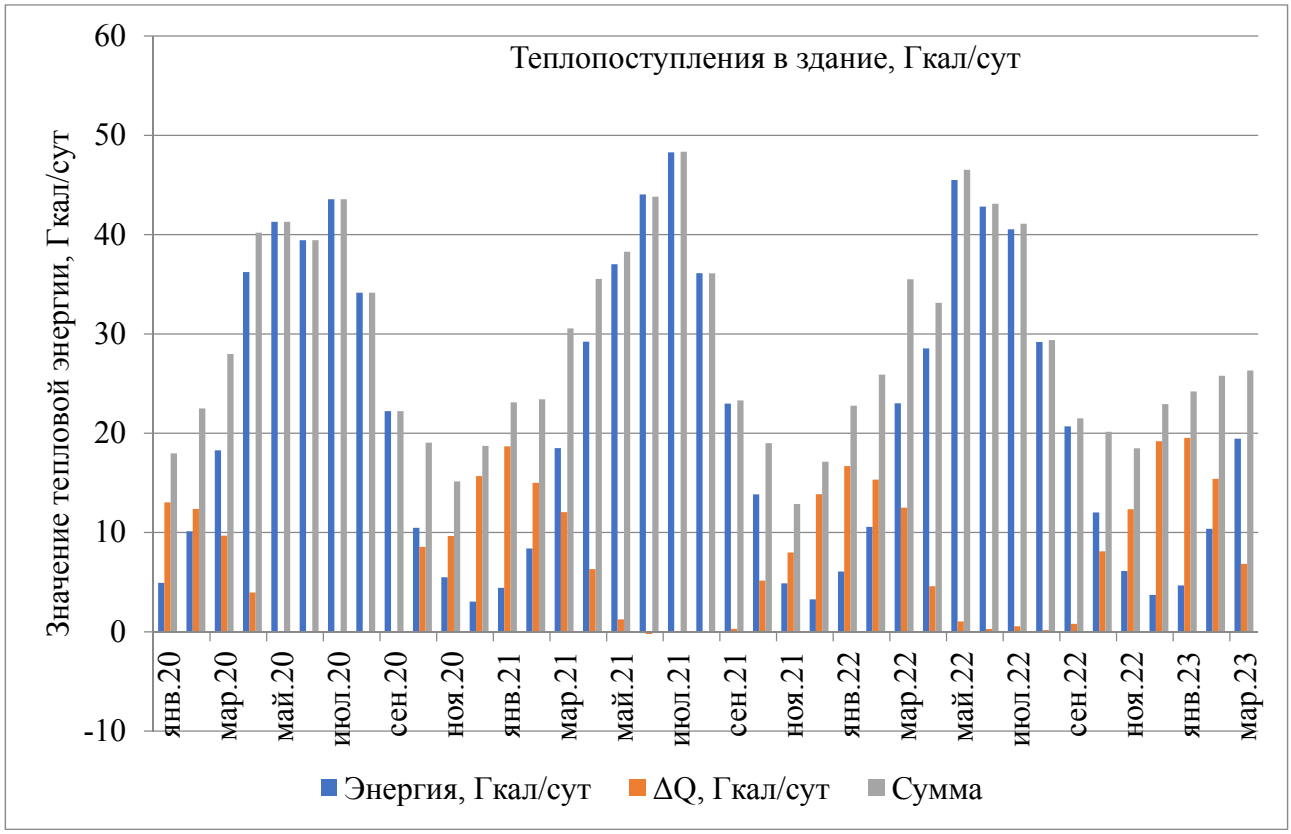


Рис. 2. Значения теплопоступлений в здание (1 января 2020 – 1 апреля 2023)

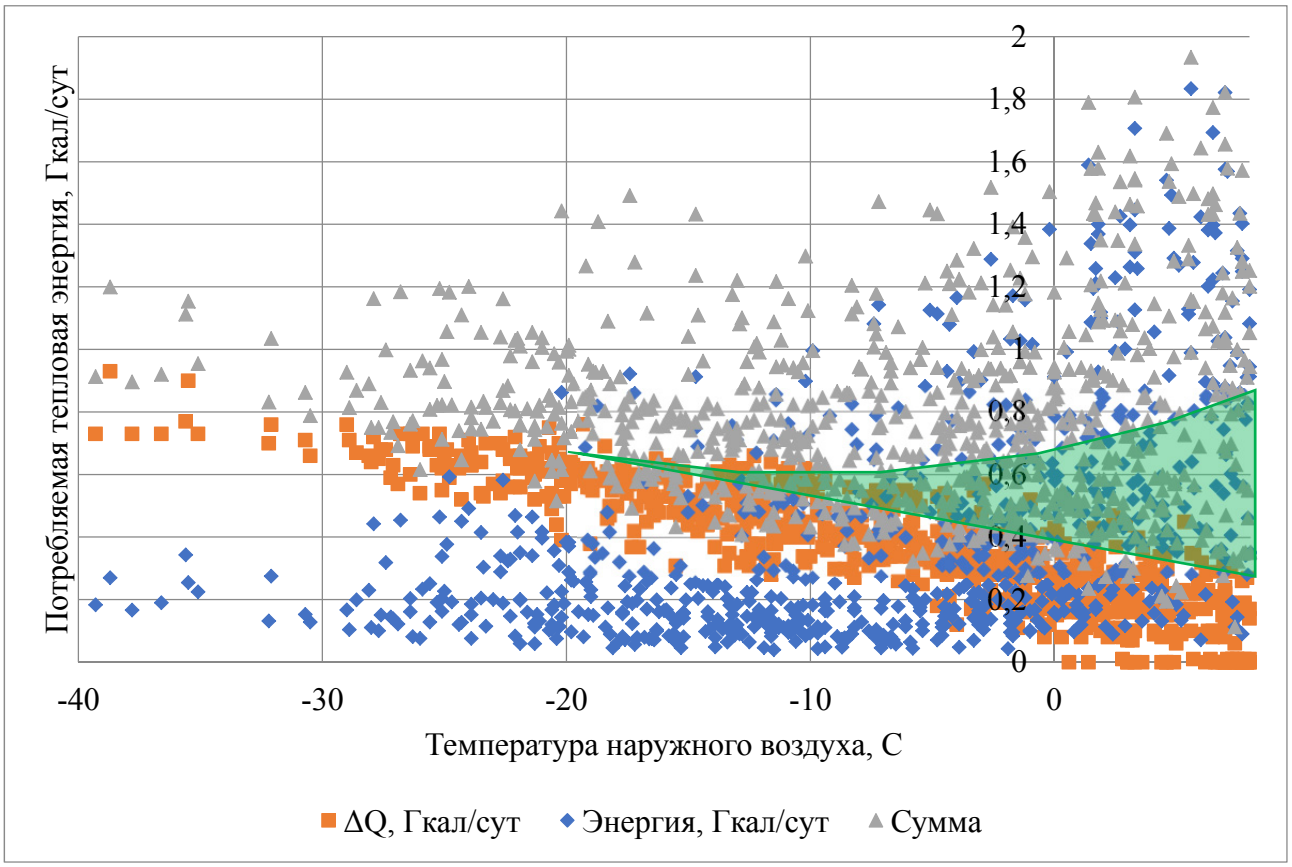


Рис. 3. Зависимость теплопоступлений в здание от температуры наружного воздуха

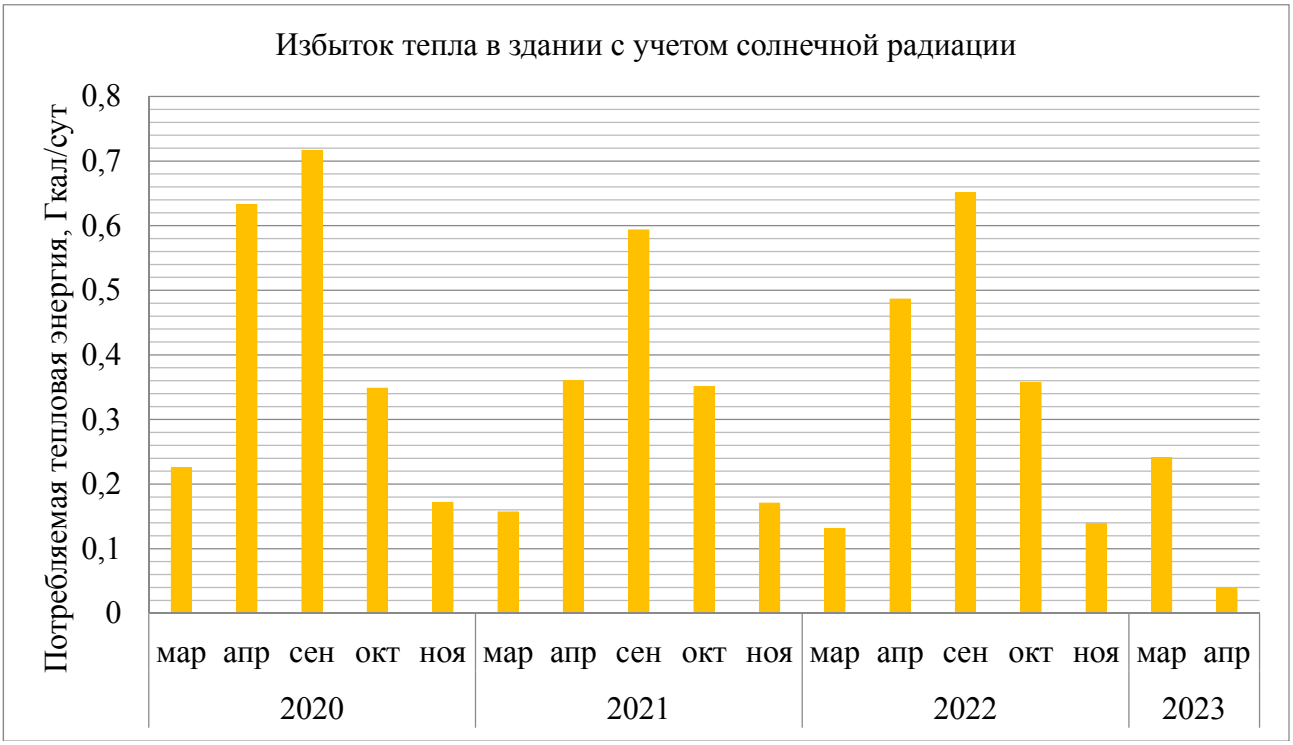


Рис. 4. Избыток тепла в здании с учетом солнечной радиации

Исходя из графиков зависимостей, можно сделать вывод, что определенное количество солнечной радиации приводит к избытку тепла и перетопу помещений. Устранить перетоп помещений возможно переоборудованием ИТП путем внедрения системы, позволяющей получать данные о погоде, осадках и облачности, давлении и влажности из онлайн-баз данных, соединенных системами SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных). Работа систем SCADA основывается на отслеживании и фиксации данных о состоянии погоды и последующем их сохранении и предоставлении в открытый доступ [3]. База данных формируется из результатов проведения спутниковых и наземных измерений. В работе систем применяются современные математические модели распространения солнечного излучения в атмосфере Земли, верификации моделей происходит на основе сравнения результатов расчетов и данных наземных измерений. Погрешность исходной информации базы NASA по средним суммам солнечной радиации для большинства солнечных месяцев составляет не более 15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 131.13330.2020. Строительная климатология: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. N 859 / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М.: НИИСФ РААСН, 2021.
2. Шмидт М.Н., Липовка Ю.Л. Расчет тепло-холодопроизводительности систем кондиционирования микроклимата // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2014661561. Заявка № 2014616534 от 08.07.2014
3. Конструктор запросов погоды // Weather Data & API Global Forecast & History Data : база данных о погоде. – URL: https://www.visualcrossing.com/ (дата обращения: 21.09.2023).

ПРИМЕНЕНИЕ РОССИЙСКОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ RENGA ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

Р.Р. Даминов[1], Б.Р. Хисамиев[2], А.Р. Хуснутдинова[2]

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, АТЭС, гр. ЭЖКХм-1-23[1]; гр. ЭЖКХм-1-22[2]

Научный руководитель: М.Г. Зиганшин, д.т.н., профессор АТЭС

Эффективное управление системами теплоснабжения жилых зданий является важной задачей для снижения энергопотребления в строительном секторе. Одним из перспективных подходов является создание цифровых двойников зданий и их инженерных систем с использованием BIM-технологий (рис. 1).

Рис. 1. Создание цифрового двойника здания с помощью BIM-технологий

Ранее цифровые модели инженерных систем создавались преимущественно в ПО Revit компании Autodesk. Однако в связи с уходом Autodesk с российского рынка актуальной стала задача импортозамещения в области BIM-технологий с переходом на отечественный программный комплекс Renga.

В данной статье рассматриваются последние обновления ПО Renga, а также приводится пример построения цифрового двойника системы отопления жилого дома в ПО Revit и Renga.

За последние месяцы ПО Renga получило ряд улучшений, позволяющих расширить возможности одновременного редактирования 3D-модели несколькими пользователями. Обновления коснулись таких инструментов, как Лестница, Пандус, Помещение, Сборка, Крыша, Элемент и др.

Кроме того, появилась возможность использовать уже готовые спецификации и не тратить время на создание новых маркеров и спецификаций. Это существенно упрощает работу проектировщиков и приближает функционал Renga к зарубежным аналогам вроде Revit.

В настоящее время в ПО Renga можно создавать практически все инженерные системы здания, используя собственные оригинальные принципы построения систем. Например, при моделировании системы вентиляции коммуникации оборудования создаются через дерево схемы вентиляции (рис. 2).

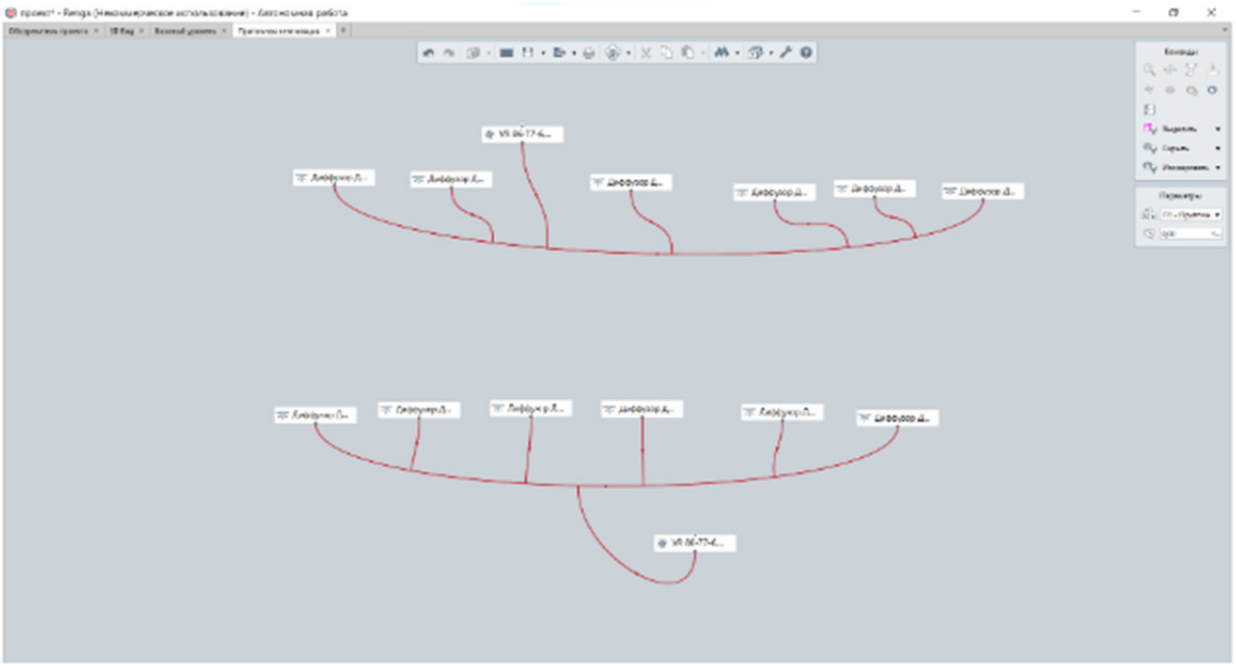


Рис. 2. Создание системы вентиляции проектируемого объекта в ПК Renga через дерево схемы вентиляции

Таким образом, ПО Renga активно развивается в направлении расширения функционала для информационного моделирования инженерных систем зданий, что открывает перспективы его применения для создания цифровых двойников.

Для оценки возможностей ПО Renga было выполнено моделирование системы отопления 10-этажного жилого дома в программах Revit и Renga. Сначала традиционным способом был рассчитан однотрубный тупиковый вариант системы отопления с определением диаметров труб и площадей отопительных приборов.

Затем на основе расчетов в ПО Revit была построена цифровая информационная модель системы отопления. Далее та же модель была выполнена в ПО Renga с верификацией результатов по данным из Revit.

Дополнительно создана лабораторная модель помещения и отопительного прибора для последующей валидации цифрового двойника на основе Renga.

Сопоставление результатов моделирования в двух программных комплексах показало их хорошее соответствие. Это свидетельствует о принципиальной возможности замены ПО Revit на ПО Renga при создании цифровых моделей инженерных систем зданий.

Использование отечественного ПО Renga для построения цифровых двойников систем теплоснабжения жилых зданий открывает перспективы повышения эффективности управления тепловой энергией. По оценкам, внедрение цифровых двойников на основе ПО Renga позволит сэкономить до 135 млн рублей для компаний, эксплуатирующих городские системы теплоснабжения. Дальнейшее развитие функционала ПО Renga и накопление практического опыта применения будут способствовать расширению использования BIM-технологий в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуснутдинова А.Р. Цифровое информационное моделирование зданий на основе ПО REVIT И RENGA / А.Р. Хуснутдинова, М.Г. Зиганшин // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы VIII Национальной научно-практической конференции (Казань, 8–9 декабря 2022 г.). – Казань: Центр публикационной активности КГЭУ, 2023. – С. 453–455.
2. СП 54.13330.2022 «СНиП 31-01-2003 Здания жилые многоквартирные»
3. СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий»
4. СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»
5. Smart BIM в О и В. Информационное моделирование в отоплении и вентиляции = Smart BIM in HVAC. Information Modeling in Heating and Ventilation Systems: учебно-методическое пособие для учебной и научной работы студентов направления «Строительство» (квалификация «магистр»). Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.М. Зиганшин, М.Г. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2019. – 349 с.
6. Знакомство с Renga // Renga. – URL: https://help.rengabim.com/ru/index.htm

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ УТИЛИЗАТОРОВ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА

К.В. Колотилкина

Самарский государственный технический университет,
ТЭФ, ТОТиГ, гр. 2-УПНК-1.2.2

Научный руководитель: В.А. Кудинов, д.ф.-м.н., профессор ТОТиГ, ТЭФ

Современные технологии в области вентиляции позволяют экономить энергию в холодное время года через разнообразные технические решения, включая пассивную теплоутилизацию и применение термодинамических циклов, особенно тепловых насосов. Их использование позволяет поддерживать стабильный коэффициент производительности (COP) при снижении температуры внешнего воздуха за счёт стабильности температуры вытяжного воздуха. Рекомендуется использовать отрицательные температуры кипения в таких насосах для повышения утилизации тепловой энергии при сохранении энергоэффективности [3].

Цель данной работы – исследование оптимальных температур кипения для тепловых насосов на объектах в нескольких российских городах с использованием методики оценки годовой эффективности. Исследуется модель сбалансированной вентиляционной системы с потоком воздуха 1500 м^3/ч при температуре помещения 25 °C. Для теплового насоса приняты характеристики компрессоров Copeland серии ZBD с хладагентом R404A из-за их линейно-

сти функции производительности при изменении нагрузки и минимальных потерь. Данные о производительности компрессоров соответствуют информации от Copeland Select. Внешние условия оцениваются на основе климатических профилей, основанных на статистических данных за последние 15 лет наблюдений метеорологических условий. Сравнительный анализ климатических профилей городов Самара, Воронеж и Краснодар представлен на рис. 1.

В работе был анализирован диапазон температур от +10 до –29 °С. Для каждой температуры в этом интервале с шагом 1 °С, используя отечественное программное обеспечение SMath Solver, получены данные о годовой эффективности. В выражении (1), путем определения номинальной производительности теплового насоса для заданных температур кипения в диапазоне температур наружного воздуха, которые требуют его подогрева, находим [3]:

$$Q_{hp} = \frac{(\frac{L \cdot \rho_{ex}}{3600}) \cdot C_{pex} \cdot (T_{ex} - (T_{0j} - \Delta T_{ev}))}{K_{cj}} \cdot K_{hj}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где L – расход воздуха в системе вентиляции, м^3/ч; ρ_{ex} – плотность вытяжного воздуха при температуре T_{ex}, кг/м^3; C_{pex} – теплоемкость вытяжного воздуха при температуре T_{ex}, кДж/К; T_{ex} – температура вытяжного воздуха, К; T_{0j} – температура кипения, К; ΔT_{ev} – температурный напор на испарителе, К; K_{cj} – холодильный коэффициент при температуре кипения T_{0j}; K_{hj} – отопительный коэффициент при температуре кипения T_{0j}.

Рис. 1. Температурные значения за выбранный период

Для данного температурного диапазона определены реальные тепловые нагрузки на вентиляционную систему (2) [3]:

$$Q_{ri} = (\frac{L \cdot \rho_i}{3600}) \cdot C_{pi} \cdot (T_{\text{sup}} - T_{outi}), \text{ кВт} \quad (2)$$

где ρ_i – плотность наружного воздуха при температуре T_{outi}, кг/м^3; C_{pi} – теплоемкость наружного воздуха при температуре T_{outi}, кДж/К; T_{sup} – требуемая температура на входе, К; T_{outi} – температура наружного воздуха i, К.

Использование теплового насоса для части тепловой нагрузки в системе вентиляции влияет на нагрузку калорифера вентиляционной установки (3) [1]:

$$Q_{hi} = Q_{ri} - Q_{hp}. \quad (3)$$

Когда тепловой насос имеет излишнюю производительность при конкретных температурах наружного воздуха, его потребляемая мощность вычисляется с использованием формулы (4) [1]:

$$N_{hpi} = N_{hp} K_d (1 - \frac{Q_{hp} - Q_r}{Q_{hp}}), \text{ кВт} \quad (4)$$

где Kr – коэффициент потерь при регулировании.

Результаты вычислений тепловой нагрузки, энергопотребления тепловым насосом и нагревателем при каждом температурном режиме учитывают количество часов, когда наблюдалась соответствующая температура наружного воздуха, для получения среднегодовых данных (5, 6):

$$Q_h = \quad (Q_{hi} \cdot \tau_i), \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (5)$$

$$N_{hp} = \quad (N_{hpi} \cdot \tau_i), \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (6)$$

С учетом предоставленной информации, для каждой температуры кипения была проведена оценка среднегодовой энергетической эффективности, выраженной в процентах (7):

$$K = \frac{Q_r - (N_{hp} + Q_h)}{Q_r} \cdot 100\% \quad (7)$$

Рис. 2 показывает изменения среднегодовой энергетической эффективности для городов Самара, Воронеж и Краснодар в зависимости от температур кипения от +10 до –29 °С. Всплески эффективности связаны с высокой утилизацией тепловой энергии при повышенных значениях COP при снижении температуры кипения от 15 °С до максимальных точек. Эффективность уменьшается из-за падения COP и избыточной мощности теплового насоса при различных температурах окружающей среды. Графики показывают максимальные точки экономии энергии, отражающие различные температуры кипения для разных городов: – 6 °С для Самары (70 % эффективности), – 5 °С для Воронежа (71 % эффективности) и 0 °С для Краснодара (80 % эффективности).

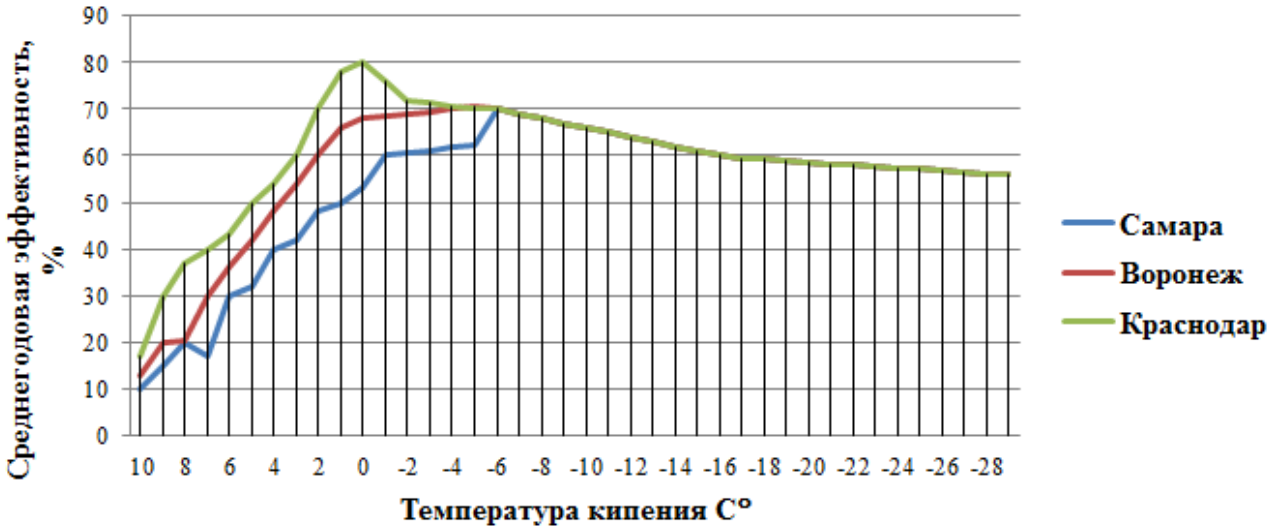


Рис. 2. Среднегодовая энергетическая эффективность

Энергетические характеристики при использовании тепловых насосов для обогрева часто не отражают экономической эффективности этой технологии. В России стоимость электроэнергии, потребляемой насосами, обычно выше стоимости тепловой энергии из городских сетей или местных теплоэлектростанций. Полученные энергетические данные могут быть применимы, например, для использования в качестве дополнительного нагрева электрокалорифером или для оценки экологических аспектов в целях учета сбережения условного первичного топлива [2].

Для оценки финансовой выгоды необходимо учесть коэффициент, отражающий различие в цене электроэнергии и тепловой энергии (8):

$$K_e = \frac{C_e}{C_h}, \tag{8}$$

где стоимость 1 кВт электроэнергии (C_e) и тепловой энергии (C_h).

Для большинства регионов России, значение коэффициента K_e, касающегося централизованного тепло- и газоснабжения, обычно колеблется от 2,5 до 3,5 [3]. Однако, в случае локальных ТЭЦ, этот коэффициент может существенно изменяться в зависимости от используемого в них типа топлива [2]. С учётом указанного коэффициента можно произвести расчет среднегодовой экономической эффективности данной системы (9):

$$K = \frac{Q_r - (K_e N_{hp} + Q_h)}{Q_r} \cdot 100 \ \%. \tag{9}$$

При расчете используется среднее значение коэффициента K_e = 2,8 для всех рассматриваемых городов. Результаты при данном коэффициенте показаны на рис. 3. Экономия энергии снижается от 85 до 70 % в энергетическом и от 40 до 30 % в экономическом выражении, а также происходит смещение оптимальных температур кипения на примерно 5 К в сторону увеличения. Распределение максимальных показателей эффективности в зависимости от температур соответствует климатическим характеристикам изучаемых населенных пунктов. Графики среднегодовой экономии аналогичны графикам рассчитанных энергетических значений, однако ухудшение COP при температурах кипения ниже 0 °C сильнее влияет на изменение эффективности, возможно, приводя к отрицательным экономическим результатам при температурах кипения ниже –10 °C. Это свидетельствует о более ограниченном выборе температур кипения при значениях K_e выше 2,5.

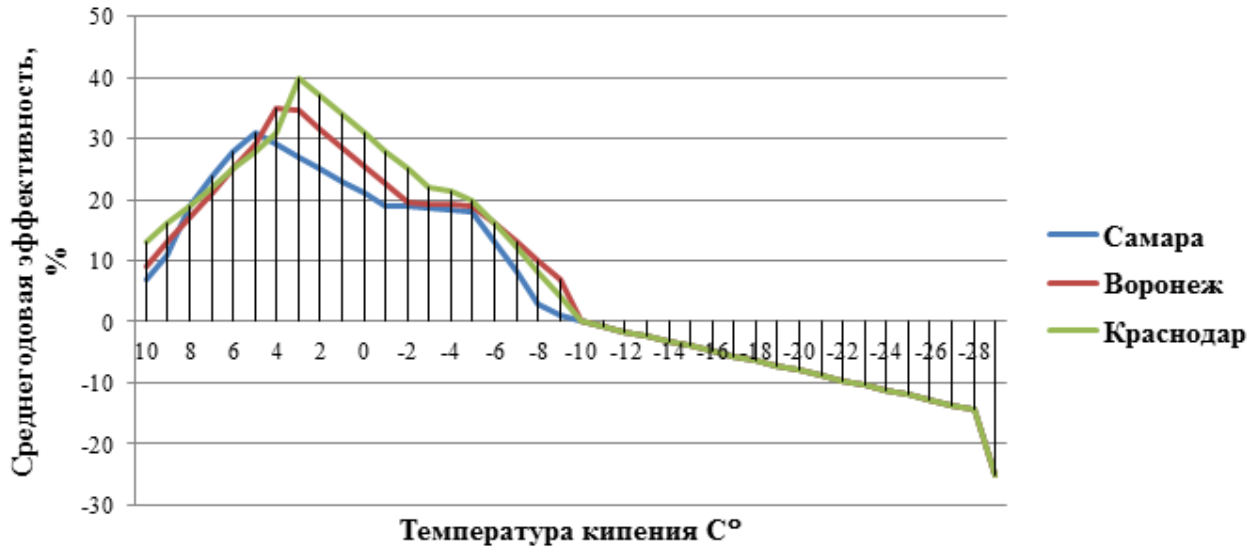


Рис. 3. Среднегодовая экономическая эффективность

Проведенные расчеты, используя методику оценки среднегодовой эффективности при проектировании систем жизнеобеспечения, подтвердили необходимость учета среднегодовых показателей, а также региональных климатических и экономических факторов при выборе рабочих параметров систем теплоутилизации на основе тепловых насосов. Результаты выявляют характерные зависимости, что позволяет заключить о целесообразности применения данного оборудования в конкретных условиях объекта. Также подтверждена возможность адаптации методики для решения широкого круга инженерных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с. ISBN 978-5-94275-558-4. – URL: https://e.lanbook.com/book/2014 (дата обращения: 01.11.2023).
2. Данилов О.Л., Гаряев А.Б., Яковлев И.В., Клименко А.В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 424 с.
3. Кудинов В.А. Теплотехника: учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. – М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 424 с.: ил.; ISBN 978-5-905554-80-3. – URL: https://znanium.com/catalog/product/977184 (дата обращения: 05.11.2023).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА УСИЛЕНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Е.В. Дьячук

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, ЭОС, гр. ЭОСм-1-22

Железобетонные конструкции играют важную роль в современном строительстве, благодаря своей прочности и долговечности. Однако с течением времени они подвержены нагрузкам, коррозии и другим факторам, которые приводят к их износу и возможным повреждениям. Для увеличения срока службы таких конструкций и повышения их прочности, разрабатываются различные методы и технологии. Одним из перспективных методов усиления является применение сталефибробетона.

Определение сталефибробетона

Сталефибробетон – это композитный материал, получаемый путем введения стальных волокон в состав бетона. Волокна придают материалу дополнительную прочность и устойчивость к различным видам нагрузок.

Преимущества сталефибробетона

1. Увеличение износостойкости: Стальные волокна повышают износостойкость бетона, защищая его от трещин и повреждений при воздействии динамических нагрузок.

2. Усиление прочности: Применение сталефибробетона позволяет увеличить прочность железобетонных конструкций, что важно при строительстве большинства инженерных сооружений.

3. Легкость в применении: Процесс усиления сталефибробетоном относительно прост и не требует дополнительного оборудования. Волокна равномерно распределяются в бетоне и укрепляют его структуру.

4. Экономическая эффективность: Использование сталефибробетона сокращает объем требуемых строительных материалов и снижает общую стоимость конструкции.

5. Стальные волокна в СФБ также могут способствовать повышению огнестойкости, поскольку они помогают поддерживать структурную целостность бетона в условиях высоких температур. Это особенно важно для критически важных с точки зрения безопасности сооружений, таких как туннели и огнестойкие барьеры.

Перспективы развития метода

1. Усовершенствование технологии изготовления: Современные разработки в области сталефибробетона подразумевают улучшение технологии производства, что позволит получить материал с более высокими характеристиками прочности и долговечности.

2. Исследования новых композиций: исследования направлены на разработку более эффективных композиций сталефибробетона, используя различные типы стекловолокна, полимеров или других добавок, которые могут улучшить характеристики материала.

3. Расширение области применения: сталефибробетон может использоваться не только для усиления железобетонных конструкций, но и для создания новых типов конструкций, таких как фасады, стены и перекрытия. Усиление сталефибробетоном может значительно улучшить проектные решения и архитектурные возможности.

Подход инженеров и строителей к использованию сталефибробетона для укрепления железобетонных конструкций

1. Структурная оценка.

Перед реализацией сталефибробетонной конструкцией крайне важно провести комплексную структурную оценку существующей бетонной конструкции. Эта оценка помогает определить степень повреждения, конкретные области, нуждающиеся в усилении, и необходимые расчетные параметры смеси сталефибробетона.

2. Микс-дизайн.

Следующим шагом является разработка соответствующего сочетания железобетона, армированного стальной фиброй. Это включает в себя выбор типа и количества стальной фибры, а также пропорций бетонной смеси. Состав смеси направлен на достижение желаемых структурных и долговечных характеристик.

3. Приложение.

Сталефибробетон обычно применяется с использованием традиционных методов строительства. Сталефибробетонная смесь укладывается и уплотняется, как обычный бетон. В случае модернизации существующих конструкций важно обеспечить надлежащее сцепление между существующим бетоном и верхним слоем из сталефибробетона.

4. Контроль качества.

Меры контроля качества имеют решающее значение для обеспечения целостности железобетона, армированного стальной фиброй. Это включает в себя мониторинг процесса смешивания, диспергирования волокон и процедур отверждения. Также проводится комплексное тестирование железобетона для проверки его работоспособности.

5. Техническое обслуживание.

Регулярное техническое обслуживание и проверки необходимы для обеспечения долгосрочной работы конструкций, армированных СФБ. При необходимости могут применяться профилактические меры, такие как покрытие поверхности и защита от коррозии.

Заключение

Метод усиления сталефибробетоном является перспективным решением для повышения прочности и устойчивости железобетонных конструкций. Этот метод обладает множеством преимуществ и может быть усовершенствован в будущем благодаря разработкам в области технологии производства и исследованиям новых композиций. Расширение области применения сталефибробетона открывает новые возможности для строительной отрасли и помогает создавать более прочные и долговечные конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 52-104-2009. Сталефибробетонные конструкции. – М.: ОАО НИЦ Строительство, 2010. 63 с.
2. Плевков В.С., Мальганов А.И., Уткин Д.Г. Оценка технического состояния, восстановление и усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений с применением фибробетона: учебное пособие / под ред. В.С. Плевкова. – Томск: Издво Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016.
3. Поднебесов П.Г., Теряник В.В. Внецентренно сжатые колонны, усиленные обоймами из самоуплотняющегося сталефибробетона // Бетон и железобетон. – 2015. – № 3.
4. Al-Osta M.A. и др. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete // Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 134, no. 2013. – P. 279–296.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ ВСТАВОК ИЗ КЕРАМИКИ НА ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ

Ю.Ф. Сабирова

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, ЭОС, гр. ЭОСм-1-23

В настоящее время большое внимание уделяется изучению улучшенной теплоотдачи через пористый материал. Пористые материалы представляют значительный научный и технологический интерес для преобразования и хранения энергии.

Простыми словами, пористая среда, это та среда, которая имеет твердую матрицу со связанными между собой пустотами. Примерами природных пористых сред являются пляжный песок, песчаник, известняк, ржаной хлеб, дерево и легкие человека. К искусственным пористым средам относятся керамика, композитные материалы и высокопористые пенопласты [1]. Пустое пространство, созданное из-за матричного расположения среды, обеспечивает возможность протекания жидкости через область, которая может переносить тепло из одной области в другую, тем самым способствуя конвективному режиму жидкости, а также теплу [2]. Кроме того, более интенсивная конвекция выше для систем, заполненных пористым материалом, чем для систем без пористого материала из-за высокой теплопроводности пористой матрицы по сравнению с теплопроводностью жидкости, особенно для газовых потоков [3].

Как уже было сказано ранее, большой интерес нашли пористые материалы, благодаря своему улучшенному теплообмену, свойствам пористой структуры и т. д.

Падение давления, режимы течения и переход от одного к другому необходимы для любого применения, связанного с течением жидкости через пористый материал, а также для скоростей теплоотдачи или скорости реакции. Параметры перепада давления, такие как проницаемость и коэффициенты сопротивления инерции, сильно различаются для пористой среды из металла; то же самое можно сказать и о границах режимов течения [4].

Как уже было сказано ранее пеноматериал может быть изготовлен из различного материала, наиболее распространенный материал для изучения, это металл и керамика. Пеноматериал на основе керамики, схож строением и морфологией на металлическую пену. Однако в некоторых сферах необходимы современные конструкционные материалы, которые должны быть прочнее, жестче, легче по весу и более устойчивыми к агрессивным средам. Поэтому двумя основными преимуществами использования керамических материалов в конструкции теплообменников по сравнению с более традиционными металлическими материалами являются их термостойкость и коррозионная стойкость [5].

Также благодаря данным преимуществам пенокерамика нашла широкое применение в области теплоизоляции, использование в качестве насадок в колоннах, в качестве каталитических реакторов, теплообменников, солнечных приемников [6].

В работе [6] представлены экспериментальные результаты измерения перепада давления для различных твердых керамических пористых сред. В экспериментах варьировались материал, размеры пор и пористость (10,20,45 PPI).

Для экспериментов по перепаду давления использовался обогреваемый проточный канал. Падение давления на пористых вставках при различных скоростях воздуха до 9 м/с определяли чувствительным манометром. Для измерения скорости потока использовали измерительную секцию с диафрагмой и преобразователь перепада давления. Воздух и образец нагревались до постоянной температуры 40 ºС. Образцы были обернуты несколькими слоями резиновой ленты, чтобы исключить байпас воздуха между образцом и корпусом. Благодаря полученным экспериментальным данным получены две константы уравнения Эргуна. Результаты показали, что обе константы оказались независимыми от объемного содержания и размера пор (PPI). Эта корреляция также позволяет определять гидравлический диаметр пористых вставок на основе измерений перепада давления. Для оценки удельной поверхности по геометрическим параметрам, которые можно легко получить с помощью световой микроскопии, в данной работе также представлена простая корреляция. Если сравнить данные о перепаде давления губок и уплотненных слоев сфер с пористостью, представляющей технический интерес (с одинаковым гидравлическим диаметром), обнаруживается, что образцы имеют более низкий перепад давления. Проведенное исследование и полученная корреляция перепада давления в канале обеспечит простой метод определения гидравлических диаметров твердых керамических губок с неизвестными геометрическими параметры.

В исследовании [7] представлены экспериментальные результаты о коэффициентах теплоотдачи для различных керамических губок (вариации материала, пористости и размера пор). Полученные коэффициенты теплоотдачи в пределах 40–500 Вт/м^2 К. Скорость воздуха в канале варьировалась от 0,5 до 5 м/с. Полученные коэффициенты корреляции получены в безразмерной форме, чтобы обеспечить «универсальную» корреляцию для оценки коэффициентов теплоотдачи любой керамической пены с использованием данных о перепаде давления. Таким образом, коэффициенты теплоотдачи могут быть оценены из экспериментов по перепаду давления. Наблюдается сильное влияние приведенной скорости воздуха и свойств типа пены на теплообмен. Экспериментальные данные коррелируют с подходом Нуссельта-Рейнольдса, как это обычно делается для данных теплоотдачи.

Проведенное исследование [8] показывает как пористые свойства, пористость, размер ячеек и толщина образца влияют на объемный конвективный теплообмен. Исследованные образцы имеют толщину 30–105 мм, пористость 0,75–0,85, PPI 30–60 и поверхностную скорость 0,58–1,76 м/с. В работе используется метод однократного выдувания для определения объемного коэффициента теплоотдачи пенокерамики в диапазоне температур от 283 до 323 К. В частности, анализ чувствительности пористости пены, размера ячеек, скорости и толщины образца на объемный коэффициент теплоотдачи внутри пенокерамики. Результаты показывают, что толщина образца оказывает значительное влияние на объемный коэффициент теплоотдачи, который уменьшается с увеличением толщины образца. На основе экспериментальных данных предлагается новая корреляция, включающая толщину образца, пористость, приведенную скорость и свойства жидкости. Полученная корреляция включает толщину пористой вставки из керамики, ее пористость, скорость газа и свойства газа и считается более применимой. Корреляция хорошо согласуется с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali H. M. et al. A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 135. – P. 649–673.
2. BadruddinI. A. et al. Heat transfer in porous media: a mini review //Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 24. – P. 1318–1321.
3. Mohamad A.A. Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media Part I: constant wall temperature // International journal of thermal sciences. – 2003. – Vol. 42, no. 4. – C. 385–395.
4. Bağcı Ö., Dukhan N. Experimental hydrodynamics of high-porosity metal foam: Effect of pore density // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 103. – P. 879–885.
5. Nemanič V. et al. Synthesis and characterization of melamine–formaldehyde rigid foams for vacuum thermal insulation // Applied energy. – 2014. – Vol. 114. – P. 320–326.
6. Dietrich B. et al. Pressure drop measurements of ceramic sponges–determining the hydraulic diameter // Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64, no. 16. – P. 3633–3640.
7. Dietrich B. Heat transfer coefficients for solid ceramic sponges–experimental results and correlation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 61. – P. 627–637.
8. Xu S. et al. Experimental Study of the Convective Heat Transfer and Local Thermal Equilibrium in Ceramic Foam // Processes. – 2020. – Vol. 8, no. 11. – P. 1490.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВСТАВОК НА ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ

Ю.Ф. Сабирова

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, ЭОС, гр. ЭОСм-1-23

В данной работе представлен обзор исследований влияния пористой среды из пенометалла на теплопередачу и гидродинамику.
Ключевые слова: теплообмен, пористая среда, металл, алюминий, медь, перепад давления.

На протяжении многих десятилетий пористые среды представляют большой интерес для изучения [1]. Пена – это инженерный материал, изготовленный из различных материалов, таких как стекло, пластик, металл и керамика [2]. Пористостью называется объемная доля, занимаемая пустотами, т. е. общий объем пустот, деленный на общий объем, занимаемый твердой матрицей, и объемы пустот [3].

Ячеистые структуры пенопластов определяют такие свойства, как жесткость, прочность, общий вес и тепловые характеристики, также они обладают огнестойкостью и химической стойкостью [4]. Благодаря интенсивности теплообмена между проницаемой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их соприкосновения, нашли широкое применение во многих сферах промышленности, сельского хозяйства. Также в процессах производства энергии связанных с тепло- и масообменом в пористых средах, энергетических системах, таких как компактные теплообменники, тепловые трубы, электронное охлаждение [5].

В работе [6] проводилось исследование конвективного теплообмена металлической пены, представляющий собой прямоугольный канал. Также металлическая пена подвергалась воздействию теплового потока 12 787 Вт/м^2 с одной стороны. Образец пеноалюминия с открытыми порами имел 20 пор на дюйм и пористость 91,8 %. Эксперимент проводился в диапазоне чисел Рейнольдса 2,8–25 с использованием воды в качестве рабочего тела. Измерения перепада давления показали, что течение находится в режиме Форхаймера. Проницаемость была получена $3{,}88 \cdot 10^{-8}$ м^2, коэффициент Форхаймера – 0,085. Коэффициент трения Фаннин-

га коррелирует с числом Рейнольдса на основе проницаемости в степени –0,5. Длина термического входа определялась для меньших скоростей потока и достигала 2,6 гидравлических диаметров. Результаты теплоотдачи показали, что среднее число Нуссельта хорошо коррелирует с числом Рейнольдса в степенном законе с показателем степени числа Рейнольдса, равным 0,61. Число Нуссельта также хорошо коррелировало с числом Рейнольдса, равного 10. Коэффициент j Колберна для теплоотвода из металлической пены коррелировал с числом Рейнольдса в степени –0,39 и был на 407 % выше, чем у пустого канала. Соответственно, полученные значения являются разумными по сравнению с данными для аналогичной пористой среды, доступными в литературе.

Большой интерес нашла пористая среда из металла, благодаря своей способности эффективного перемешивания и конвекции, из-за большого отношения площади к объему и их сложной структуры. Несмотря на их недавнее изучение, они с успехом используются во многих передовых технологиях. Например, их применение можно найти в пластинчатых пенопластовых рекуператорах, регенераторах, радиаторах, трубчатых реакторах, конденсаторах и топливных элементах, и это лишь некоторые из них [7].

Предлагаемая модель в работе [8] проста, но эффективна, так как позволяет избежать строгих численных расчетов, необходимых для анализа теплоотдачи в металлической пене, используемой в качестве протяженных поверхностей теплоотдачи во многих сферах, таких как радиаторы и теплообменники. Исследование проводится с высокопористыми медными образцами с открытыми порами, помещенными между пластинами при постоянной температуре. Конвективная жидкость после попадания в пористую среду при равномерной температуре выходит с пространственными изменениями. Также температура конвективной жидкости(на выходе) в любом месте, перпендикулярном направлению базовой пластины, уменьшается с увеличением скорости.

В работе [9] представлены экспериментальные данные по перепаду давления для течения воды в двух пеноалюминиях с открытыми порами, имеющих 10 и 40 пор на дюйм (PPI). Два образца имеют одинаковую пористость (88,5 %). Определены и сопоставлены режимы течения и переходы между ними. Показано, что одна и та же пена имеет разные значения проницаемости и коэффициент Форхаймера при разных режимах течения и при разных режимах пост-Дарси. Использование квадратного корня из проницаемости, измеренной в режиме Дарси, в качестве характерной длины для определения числа Рейнольдса и коэффициента трения позволяет хорошо коррелировать данные о перепаде давления.

В статье [10] экспериментально охарактеризован двадцать один образец алюминиевой и медной пены с различным количеством пор на дюйм (PPI), которое варьируется от 5 до 40, и с пористостью в диапазоне от 0,896 до 0,956. Исследованы образцы разной высоты (20 и 40 мм). Измерения проводились при изменении скорости воздушных масс от 2 до 7 кг/с·м^2 и наложением трех различных скоростей теплового потока: 250 и 400 Вт.

Результаты показывают, что медные образцы демонстрируют более высокие характеристики теплоотдачи, чем алюминиевые модели, благодаря их высокой теплопроводности. При постоянной пористости, даже если и медные, и алюминиевые образцы высотой 20 мм имеют примерно половину площади теплообмена по сравнению с образцами высотой 40 мм, они демонстрируют более высокую эффективность. Можно сделать вывод, что в случае теплового управления нормированная средняя температура стенки и мощность насоса на единицу площади теплоотдачи могут использоваться для сравнения различных характеристик теплоотдачи металлических пен.

Анализируя полученные результаты с изученной литературой можно сделать вывод, что на величину перепада давления существенное влияние оказывает геометрическая структура из пены. Перепад давления увеличивается с уменьшением диаметра ячейки и пористости. Для всех протестированных случаев течения (для всех жидкостей и пенообразователей) из-

меренное падение давления в однофазном потоке монотонно увеличивается с увеличением скорости жидкости. Перепад давления воздуха и воды увеличивается экспоненциально и может быть описан с помощью закона Форхаймера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Badruddin I.A. et al. Heat transfer in porous media: a mini review // Materials Today: Proceedings. – 2020. – T. 24. – P. 1318–1321.
2. Kavšek M. et al. Melamine-formaldehyde rigid foams–Manufacturing and their thermal insulation properties // Journal of Cellular Plastics. – 2022. – Vol. 58, no. 1. – P. 175–193.
3. Nagai K., Musgrave C. S. A., Nazarov W. A review of low density porous materials used in laser plasma experiments // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25, no. 3. – P. 030501.
4. Kavšek M. et al. Melamine-formaldehyde rigid foams–Manufacturing and their thermal insulation properties // Journal of Cellular Plastics. – 2022. – Vol. 58, no. 1. – P. 175–193.
5. Mohamad A. A. Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media Part I: constant wall temperature // International journal of thermal sciences. – 2003. – Vol. 42, no. 4. – P. 385–-395.
6. Arbak A., Dukhan N. Performance and heat transfer measurements in asymmetrically-heated metal foam cooled by water // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Vol. 20. – P. 100688.
7. T'Joen C. et al. Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, no. 15–16. – P. 3262–3274.
8. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Vol. 77. – P. 28–37.
9. Bağcı Ö., Dukhan N. Experimental hydrodynamics of high-porosity metal foam: Effect of pore density // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 103. – P. 879–885.
10. Mancin S. et al. Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 62. – P. 112–123.

ВОРОВСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПУТИ ЕГО МИНИМИЗАЦИИ В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

С.Ю. Куликов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, ЭФ, ЭПП, гр. Э-01

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент ЭПП ЭФ АлтГТУ

Проблема воровства электроэнергии в наше время имеет огромное значение, ведь она является одним из важнейших ресурсов современного общества. Масштабы ущерба наносящийся по энергетическим компаниям по всей России приобретают катастрофические масштабы и исчисляется миллиардами рублей, а Алтайский край не является исключением. В 2020 году в Алтайском крае специалисты компании «Алтайкрайэнерго» выявили 615 случаев хищения электроэнергии – 7,8 млн кВт·ч. В денежном эквиваленте это 26,5 млн рублей. К краже электроэнергии относится как и несанкционированное подключение к сети электроснабжения, так и действия с приборами учета, направленные на намеренное занижения показателей расхода электроэнергии, именно этот метод хищения оказался наиболее распространенным в нашем крае.

Разветвленность магистральных и распределительных электрических сетей сложной конфигурации и их огромная протяженность в нашем регионе создает благоприятные условия для незаконных действий. Но людей, занимающихся данным видом противоправных действий не пугают серьезные последствия в виде относительно небольших штрафов, а так же редкая уголовная ответственность, где даже при огромных хищениях практически не дохо-

дит до реальных тюремных сроков. Сейчас основные манипуляции с электроэнергией лежат на плечах коммерческих организаций из-за чего государство практически не осуществляет контроль за фактами хищения, а из-за этого отсутствуют действенные меры по снижению данного явления. Отсюда выходит первое и главное направление по снижению воровства в целом, которое стоит принять ко вниманию – создание государственного органа, направленного на контроль организации политики повышения энергоэффективности в том числе за счет предотвращения энергохищения. Побудителем к действию можно считать, растущую пропорционально объемам хищения, сумму не оплаченных налогов в госбюджет за украденное электричество.

Алтайский край находится на одном из последних мест по средней заработной плате в стране от чего жизненный уровень в регионе и большое количество способов «сэкономить» на воровстве даже небольшого количества электроэнергии создает огромную и распространенную среди населения проблему. Из чего стоит сделать вывод, что нужно не только пресекать проблему по факту, но и смотреть глобальнее и повышать жизненный уровень граждан региона чтобы риски несения серьезного наказания были не сопоставимы с выгодой полученной от хищения.

Пока в стране не создан специальный орган контроль за незаконным потреблением электроэнергии проводят сами компании, осуществляющие ее распределение. В распоряжении у крупнейших Алтайских компаний уже находятся в том числе самые современные технологии, помогающие контролировать линии электропередач на наличие незаконных присоединений. Так например один из самых распространенных и примитивных способов кражи электроэнергии, так называемый «наброс» проводов на линию электропередач «Алтайкрайэнерго», одна из ведущих компаний электроэнергетики Алтайского края, уже выявляется с помощью беспилотных летательных аппаратов, основной задачей которых является проведение осмотра и диагностики линий электропередач. Такой метод выявлений незаконных присоединений весьма эффективен и позволяет намного чаще и быстрее проводить мониторинг ЛЭП, как в населенных пунктах, так и в труднодоступной и/или отдаленной местности.

С 2016 г. «Алтайкабель» начал серийно производить самонесущие изолированные провода типа СИП. При использовании проводов СИП на воздушных линиях существенно снижается число незаконных подключений, а также случаев воровства. Значительное снижение несанкционированных подключений к линии и случаев вандализма и воровства. А учитывая огромную протяженность линий электропередач низкого и среднего напряжения в крае, где может применять данный вид проводов, развитие данного направления приведет не только к увеличению надежности в обеспечении электрической энергией, но и сократит общее количество «врезаний» в линии передач.

Рис. 1. Умный счетчик электроэнергии

Также в регионе начинают приобретать популярность «умные» приборы учета, которые осуществляют хранение и защиту данных о расходе электроэнергии и передает их напрямую в компанию. «Умный» прибор учета – это фактически небольшой компьютер, который не просто считает киловатт-часы, но и помогает экономить электроэнергию. Новые счетчики можно запрограммировать на многотарифный учет и платить за энергию, потребленную ночью, намного дешевле.

Воровство электроэнергии является весьма актуальной проблемой для России и Алтайского края в частности, но представляется она не только головной болью электроэнергетических компаний региона, но и государства, которое теряет большое количество денежных средств, которые можно было бы пустить на развитие региона, замену устаревшего электрического оборудования, повышение качества электроснабжения и повышение уровня жизни граждан в целом. Также воры подвергают окружающих опасности, замыкая энергопроводящие части сети, создавая опасную дугу. Также это может быть причиной пожара, что в летний период может привести к серьезнейшим последствиям. Повсеместное применение новых технологий в виде умных счетчиков и современных изолированных проводов значительно осложнит намерения недобросовестных жителей региона незаметно украсть электрическую энергию, а иногда и вовсе исключит такую возможность. Действенным методом пресечения преступления еще на уровне идеи должно являться ужесточение мер наказания, применяемых к людям безучетно потребляющим электроэнергию. А воры должны быть осведомлены, что рано или поздно им все равно придется заплатить, но уже, возможно, не только штрафом, но и серьезной уголовной ответственностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красни В.В. 102 способа хищения электроэнергии : учебное пособие / В В. Красник. – Москва : ЭНАС, 2013. – 160 с. – ISBN 978-5-4248-0029-0. – URL: https://e.lanbook.com/book/104572 (дата обращения: 05.11.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Майлис Н.П. Введение в судебную экспертизу : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 021100 «Юриспруденция» / Н.П. Майлис. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА ; Закон и право, 2017. – 112 с. – ISBN 978-5-238-00768-0. – URL: https://znanium.com/catalog/product/1025553 (дата обращения: 05.11.2023).
3. Шахова Е. Как воруют электроэнергию в Алтайском крае / Шахова Екатерина. – URL: https://brl.mk.ru/social/2021/03/19/ kak-voruyut-elektroenergiyu-v-altayskom-krae.html (дата обращения: 05.11.2023).
4. Одна из крупнейших энергокомпаний Алтайского края проводит разноплановую работу по пресечению незаконного потребления электроэнергии // Официальный сайт Алтайского края. – URL: https://www.altairegion22.ru/gov/ administration/stuct/industry/news/?ELEMENT_ID=970219 (дата обращения: 05.11.2023).

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Д.А. Горбатов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ИЭ, ВШЭМ, гр. 3261501/01201

Научный руководитель: А.А. Жарковский, д.т.н., профессор ВШЭМ СПбПУ Петра Великого

Современные подходы проектирования энергоэффективных проточных частей гидромашин основаны на решении задачи трехмерного расчета течения вязкой жидкости в исследуемой расчетной области [1]. Основным способом достижения высокого уровня КПД является поиск наиболее оптимальной геометрической формы проточной части насоса с помощью различных оптимизационных алгоритмов [2].

Цель работы заключается в улучшении энергетических показателей на номинальном режиме работы погружного электронасоса высокой быстроходности с использованием численной оптимизации геометрии проточной части.

Объект исследования – погружной электронасос моноблочного типа с консольным расположением рабочего колеса и коэффициентом быстроходности n_s = 205. На рис. 1 представлена цифровая модель, содержащая: входной патрубок *1*, рабочее колесо *2*, направляющий аппарат *3*, кольцевую область между корпусом электродвигателя и корпусом насоса *4*, напорный патрубок *5*.

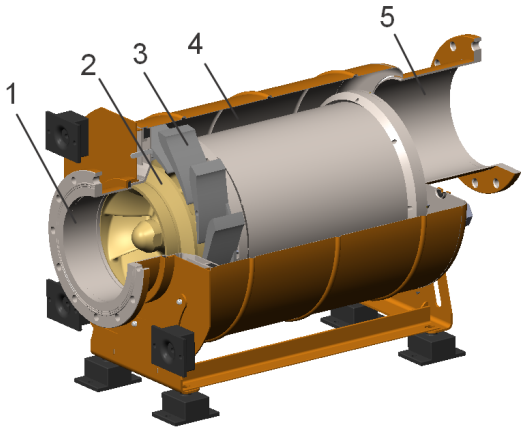


Рис. 1. Цифровая модель погружного электронасоса

Параметрическая модель расчетной области включает 9 варьируемых геометрических параметров. На рис. 2 в меридианной проекции и в плане указаны выбранные параметры: втулочные и периферийные углы лопасти рабочего колеса на входе и в средней части линии тока – $\beta_{л1вт}$, $\beta_{л1пер}$, $\beta_{л1-2вт}$, $\beta_{л1-2пер}$; входной и выходной угол лопатки направляющего аппарата – $\beta_{л3}$, $\beta_{л4}$; ширина канала направляющего аппарата – b_3; ширина канала кольцевой области – b, ширина канала между электродвигателем и напорным патрубком – B.

При выполнении оптимизационных расчетов для экономии вычислительных и временных ресурсов используется упрощенная математическая модель с учетом периодичности расчетной области. Из расчетной области также исключены элементы креплений и кабельного ввода, обтекаемые потоком. Расчетная сетка – неструктурированная тетраэдральная. В области высоких градиентов локальных параметров течения сгенерированы призматические слои. Общее количество элементов сетки составило примерно 400 тыс. Граничные условия: на входе – полное давление, на выходе – массовый расход. Модель турбулентности – k-epsilon [3]. Параметры течения между вращающимся и стационарным доменами осредняются по окружности, тип интерфейса – Stage. Сходимость задачи определяется по количеству итераций, которое составило 1500 на одну расчетную точку.

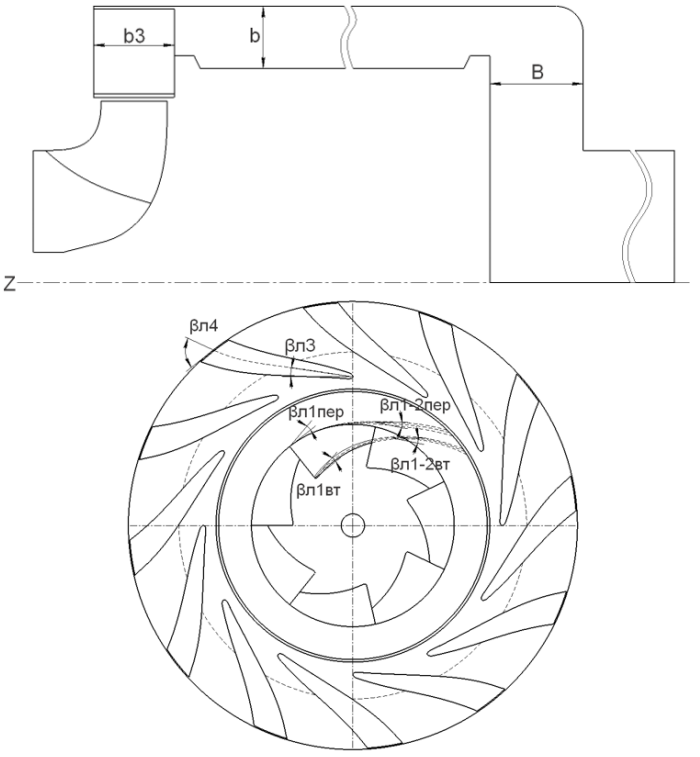


Рис. 2. Варьируемые геометрические параметры

Численная оптимизация геометрии проточной части насоса проводилась методом латинского гиперкуба. Расчетные точки данного LHS метода случайным образом распределяются по ортогональной сетке пространства параметров так, чтобы любые две точки не имели одинаковых значений какого-либо входного параметра, при этом метод обеспечивает равномерное распределение параметров в пространстве [4].

С учетом диапазонов изменений значений выбранных варьируемым геометрических параметров создана таблица, состоящая из 1000 расчетных точек. В соответствии с таблицей выполнены прямые гидродинамические расчеты в стационарной постановке. Целевая функция – максимизация гидравлического КПД насоса.

В результате проведенной оптимизации определен наилучший вариант геометрии проточной части. По оптимизированному варианту построена полноразмерная расчетная область без геометрический упрощений и выполнены численные расчеты с математической моделью, соответствующей валидированной, на основании экспериментальных данных, математической модели исходной проточной части насоса. В табл. 1 приведены сравнительные значения геометрических параметров и результатов гидравлического КПД исходного и оптимизированного вариантов проточных частей, а на рис. 3 проиллюстрирована визуализация структуры течения в расчетных областях насоса.

Таблица 1. Значения параметров исходного и оптимизированного вариантов проточных частей

№	Параметр	Исходный вариант	Оптимизированный вариант
1	b_3 / D_2	0,23	0,18
2	b / D_2	0,18	0,26
3	B / D_2	0,27	0,30
4	$\beta_{л1вт}$	15,7°	19,4°
5	$\beta_{л1пер}$	14,9°	15,2°
6	$\beta_{л1-2вт}$	28,5°	31,8°
7	$\beta_{л1-2пер}$	20,1°	26,9°
8	$\beta_{л3}$	15,2°	13,3°
9	$\beta_{л4}$	90,0°	67,9°
10	КПДг	68,6 %	75,6 %

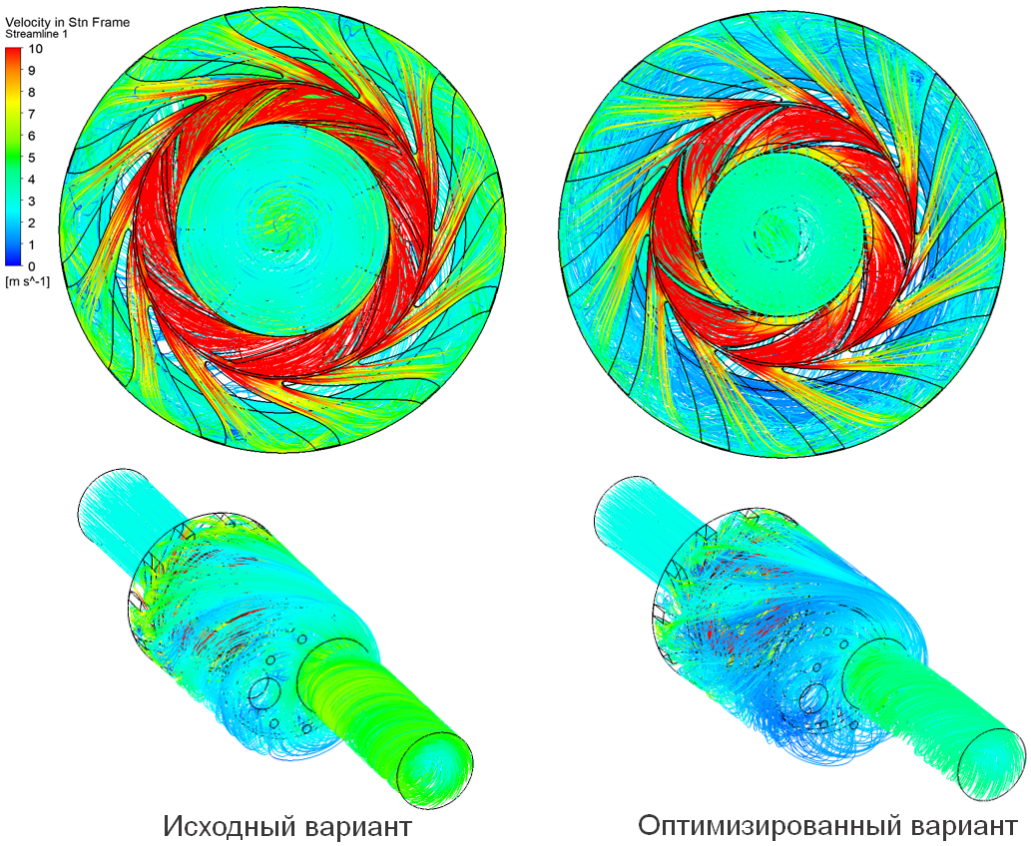


Рис. 3. Линии тока в исходном и оптимизированном варианте проточных частей

Результаты расчетов упрощенной математической модели с периодичной расчетной областью, используемой в оптимизационном цикле задачи, отличаются от результатов расчетов в полной постановке. Так, наилучший вариант геометрии проточной части при оптимизации показал значение гидравлического КПД равное 78,6 %, а с учетом математической модели в полной постановке – 75,6 % (табл. 1). Расхождение указанных значений может быть вызвано геометрическим упрощением расчетной области, а также недостаточным качеством расчетной сетки математической модели, применяемой в оптимизации. Для проверки предположения необходимо выполнить расчеты в полной постановке нескольких наилучших вариантов геометрии проточных частей, полученных при оптимизации, и сравнить результаты расчетов.

Из приведенных данных в табл. 1 следует, что оптимизированная проточная часть имеет увеличенное значение ширины канала в кольцевой области ($b / D_2 = 0{,}26$) и ширины канала между электродвигателем и напорным патрубком ($B / D_2 = 0{,}30$), что привело к уменьшению скоростей в отводящем устройстве, как показано на рис. 3. Данное обстоятельство сказалось на снижении уровня гидравлических потерь в проточной части.

Таким образом, в результате проведения оптимизационных расчетов методом латинского гиперкуба из табл. 1 видно, что гидравлический КПД насоса удалось повысить на 7 % относительно исходного варианта проточной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свобода Д.Г., Жарковский А.А., Иванов Е.А., Щуцкий С.Ю., Дягилев П.Ю. Создание осевых насосов с высоким КПД и незападающей формой характеристики // Вестник машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 37–41.
2. Волков А.В., Парыгин А.Г., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А. К вопросу об оптимизации проточной части рабочих колёс центробежных насосов // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11. – № 4. – С. 311–318.
3. Гарбарук А.В. Современные подходы к моделированию турбулентности : учеб. пособие / А.В. Гарбарук и др. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
4. Свобода Д.Г., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Щуцкий С.Ю. Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием поверхности отклика // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 8 (749). – С. 74–83.

ПОВЫШЕНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА КОЛЬЦЕВОГО ВНУТРЕННЕГО ОРЕБРЕНИЯ ТРУБЫ

П.В. Любимов

Санкт-Петербургский горный университет,
ЭНФ, ТиТ, гр. ТэМ-23

Научный руководитель: Е.М. Ротинян, к.т.н., доцент кафедры ТиТ

Энергосбережение является одним из приоритетных направлений развития современной технической и экономической составляющей ТЭК России. Последние технические достижения в области энергосбережения позволяют более рационально относится к использованию топлив и связных с ними теплоэнергетическими системами. Интенсификация теплообмена одна из областей, рассматриваемых энергосбережением, включенная в промышленность, теплоэнергетику, транспорт и строительство, это позволяет повысить эффективность системы обмена теплом в целом и улучшить производительность устройств, таких как конденса-

торы, испарители, котлоагрегаты ТЭЦ. Интенсификация теплообмена может быть достигнута через различные методы, такие как охлаждение поверхности, использование обтекателей, аэрации, увеличение скорости течения и изменение физических свойств рабочих сред, сюда же относятся и методы оребрения поверхностей, этот процесс позволяет сократить затраты на энергию, уменьшить размер оборудования и повысить его надежность. Благодаря интенсификации теплообмена можно улучшить работу системы охлаждения, повысить эффективность процессов термической обработки и оптимизировать энергетические системы. Оребрение является одним из методов интенсификации теплообмена, он заключается в размещении ребер или пластинок, специальных вставок, на поверхности теплообмена, что увеличивает площадь контакта между теплоносителями.

К способам повышения эффективности протекания тепловых процессов внутри труб круглого сечения можно отнести применение пассивных методов [1], предполагающих включение в состав конструкции внутренних участков трубных пучков теплообменных поверхностей перфорированные круглые кольца, вихревые образующие винтовые сечения или присоединенные спиральные провода [2].

Среди известных способов и методов оребрения наибольший интерес представляют кольцевые конструкции, позволяющие локально интенсифицировать параметры теплообмена.

В данной статье представлено исследование кольцевой конструкции, что представляет из себя один из вариантов внутреннего оребрения, исследуются разные вариации кольцевого оребрения в сравнении с гладким кольцевым аналогом, представленным проточной частью самой трубы, с целью определить оптимальный способ интенсификации теплообмена. Исследуемая жидкость – однофазный воздух.

Все расчеты проводятся с использованием программного комплекса SolidWorks 2022, симуляция тепловых процессов осуществляется с использованием «пакета» SolidWorks flow simulation [3]. Исходные данные материала и среды представлены в табл. 1.

Материал трубы и оребрения представлен алюминием, на рисунке 1 представлены исследуемые варианты оребрения: A – гладкая поверхность, B – кольцевое оребрение, C – кольцевое оребрение с вращением, D – кольцевое оребрение с пропусками.

Далее на рис. 2–5 представлены результаты расчетов коэффициентов теплоотдачи и тепловых потоков, проведена симуляция течения потока и распределение температуры жидкости – воздух по длине трубы для упомянутых ранее вариантов.

В табл. 2 сведены результаты расчетов поверхностных параметров, представленные тепловыми потоками исследуемой среды и коэффициентами теплоотдачи.

Таблица 1. Характеристики трубы и граничные условия

Параметр	Единица измерения	Значение
Геометрия трубы:	–	–
$d_н$	м	0,028
L	м	1
$d_в$	м	0,022
Оребрения (для всех):		
шаг	м	0,05
толщина	м	0,002
высота	м	0,002
кол-во	–	15
Параметры окружающей среды:		
p	Па	101325
t	℃	20,05
Параметры жидкости:		
$t_{вх}$	℃	80,05
Q	кг/с	0,0001

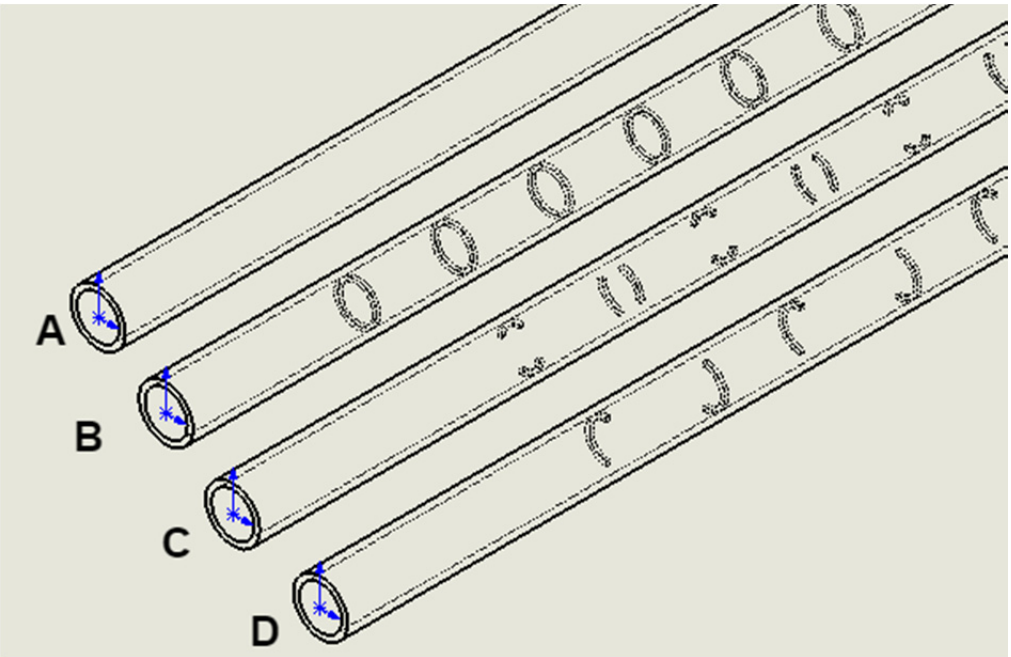


Рис. 1. Рассматриваемые варианты оребрения трубы

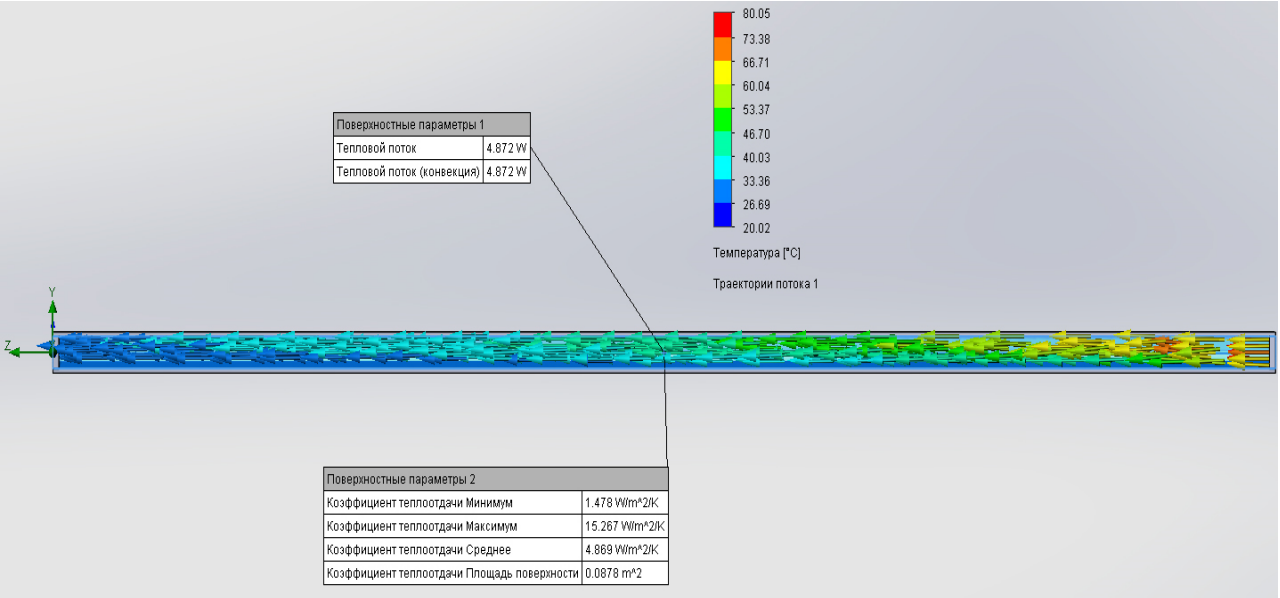


Рис. 2. Симуляция движения потока и теплофизических параметров для случая гладкой трубы, вариант – A

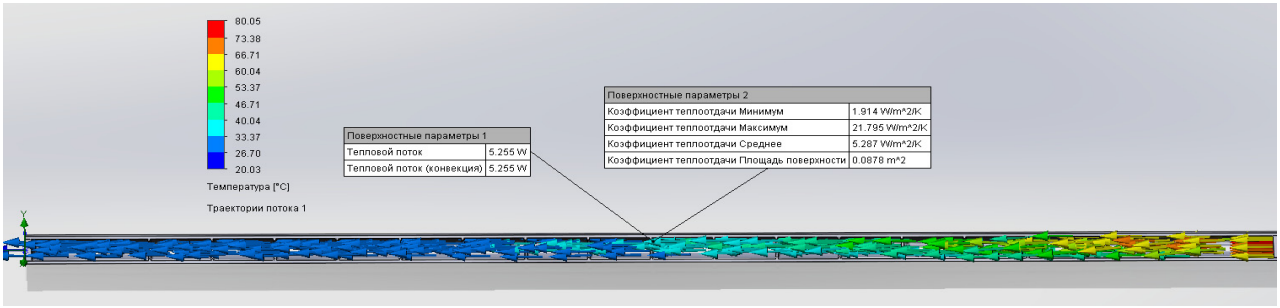


Рис. 3. Симуляция движения потока и поверхностных тепловых параметров для случая кольцевого оребрения, вариант – B

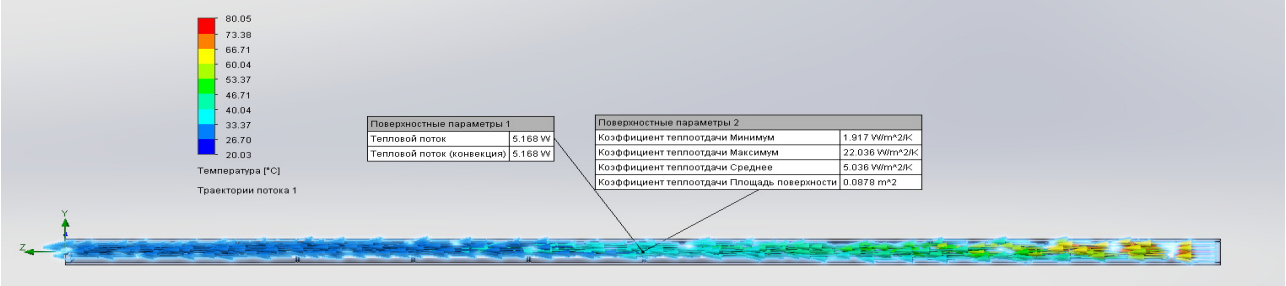


Рис. 4. Симуляция движения потока и поверхностных тепловых параметров для случая кольцевого оребрения с прерыванием, вариант – C

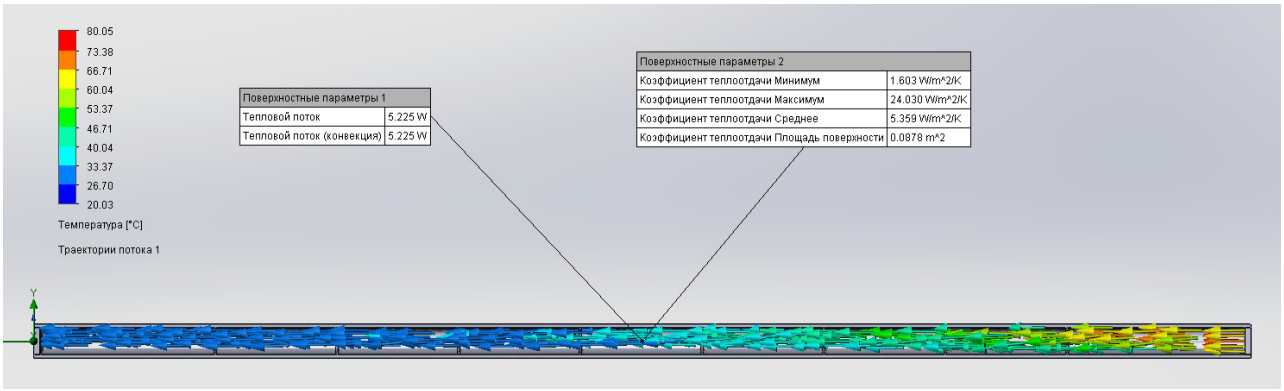


Рис. 5. Симуляция движения потока и поверхностных тепловых параметров для случая кольцевого оребрения с пропусками, вариант – D

Таблица 2. Результаты расчетов поверхностных параметров

Вариант	Тепловой поток, Вт	Коэффициент теплоотдачи минимальное значение, Вт/(м^2·К)	Коэффициент теплоотдачи максимальное значение, Вт/(м^2·К)	Коэффициент теплоотдачи среднее значение, Вт/(м^2·К)	Площадь поверхности наружная, м^2
A	4,872	1,478	15,267	4,869	0,0878
B	5,255	1,914	21,795	5,297	0,0878
C	5,168	1,917	22,036	5,287	0,0878
D	5,225	1,603	24,030	5,359	0,0878

Из расчетов следует, что наибольшим коэффициентом теплоотдачи и, как следствие, наиболее оптимальными геометрическими параметрами, обладает вариант D – кольцевое оребрение с пропусками, это может быть связано с явлениями турбулизации потока и созданием вторичных набегающих потоков, способствующих более интенсивному перемешиванию среды и завихрениям в области пограничного теплового слоя, где в основном преобладает молекулярная теплопроводность [4]. Определенное наибольшим коэффициентом теплоотдачи оребрение, оказывает существенное влияние на формирование гидродинамического и теплового пограничных слоев на более ранних участках трубы, повышая характеристики теплопереноса, форм-фактор предложенного варианта внутреннего оребрения обладает способностью к большей децентрализации потока, что также может способствовать интенсификации теплообмена. Использование кольцевого оребрения помимо вышеизложенного способствует более равномерному распределению тепла на поверхности теплообмена в сравнении с простыми прямыми или спиральными аналогами, поскольку основу приращения коэффициента теплоотдачи составляет турбулизация потока, можно заключить, что кольцевое оребрение способствует формированию наилучшего гидродинамического поведения, из рассмотренных вариантов, как упоминалось ранее, наилучшим оребрением выступает кольцевое с пропусками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications / Tabish Alam, Man-Hoe Kim // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – V. 81. – P. 813–839. – ISSN 1364-0321.
2. Experimental investigation on heat transfer enhancement in a circular tube with equilateral triangle cross sectioned coiled-wire inserts / Orhan Keklikcioglu, Veysel Ozceyhan // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 131. – P. 686–695. – ISSN 1359-4311.
3. SolidWorks Flow Simulation Tutorial // MySolidWorks: информ.-справочный портал. 2022 URL: https://my.solidworks.com/training/elearning/69/solidworks-flow-simulation (дата обращения 10.11.2023).
4. Аметистов Е.В. и др. Теоретические основы теплотехники теплотехнический эксперимент. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 543 с.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ МОТОР/ГЕНЕРАТОР ДЛЯ КИНЕТИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Е.А. Кущенко

Научный исследовательский университет «МЭИ», ИЭТЭ, ЭМЭЭА

Научный руководитель: Е.П. Курбатова, к.т.н., доцент ИЭТЭ ЭМЭЭА НИУ «МЭИ»

Хранение энергии играет ключевую роль в энергетических системах. Для децентрализованных энергетических сетей аккумуляторы становятся неотъемлемой частью. Они обеспечивают высокое качество электроэнергии и надежность за счет функционирования в качестве резервных источников. При получении энергии с возобновляемых источников требуются системы хранения энергии из-за нестабильных показателей выходной мощности в следствии изменения погодных условий.

Кинетические накопители энергии (КНЭ) эффективно сглаживают быстрые колебания мощности с временем от долей секунды до десятков минут. Их использование способствует повышению скорости реагирования энергетической системы на изменения баланса между производимой и потребляемой мощностью, связанными, например, с изменениями скорости ветра [2]. Использование кинетических накопителей также снижает необходимость в частых и неэффективных разрядах электрических аккумуляторных батарей, ресурс которых ограничен определенным количеством циклов заряда-разряда.

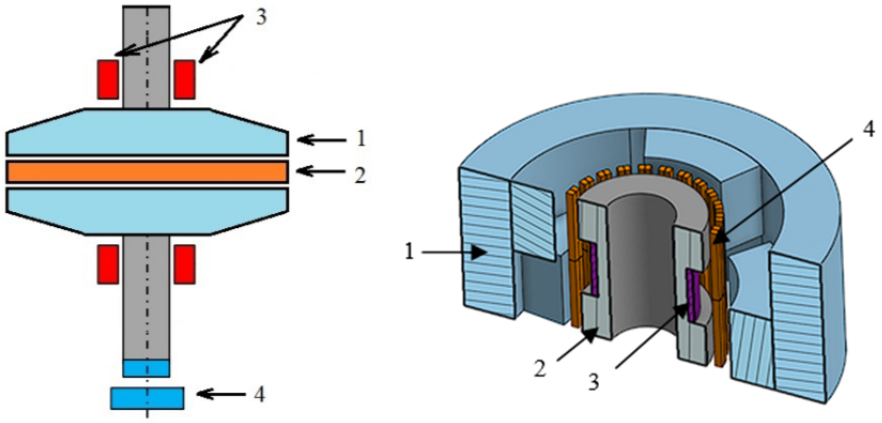
Плотность тока современных высокотемпературных сверхпроводниковых материалов (ВТСП) позволяет проводить токи, более чем в 100 раз превышающие значения для медных проводников, благодаря чему увеличивается создаваемое магнитное поле и улучшаются удельные показатели машины.

Инерционной массой (маховика) планируется использовать только ротор, выполненный из магнитного материала, без установки дополнительной массы или увеличения момента инерции другими способами. Поэтому при проработке конструкции мотор/генератора к ротору предъявлялось дополнительное требование по моменту инерции, обеспечивающему запасенную энергию 100 кДж при вращении со скоростью 10 000 об/мин.

Для проведения расчетов характеристик мотор/генератора была построена магнитная система конструкции в программе численного анализа электромагнитных полей EasyMag3D. Изображение полученной модели представлена на рис. 2.

Для оценки эффективности работы конструкции в качестве мотор/генератора КНЭ был проведен анализ, включающий расчеты ЭДС холостого хода (в режиме генератора) и элек-

тромагнитного момента (в режиме двигателя). Все расчеты осуществлялись в стационарном режиме, и индуцированные токи не учитывались.



а *б*

Рис. 1. Модель кинетического накопителя энергии:
а – принципиальная схема устройства (1 – маховик; 2 – мотор/генератор;
3 – ВТСП подшипники; 4 – опорный подшипник); б – ВТСП мотор-генератор
(1 – ротор-маховик; 2 – статор; 3 – обмотка возбуждения; 4 – обмотки статора)

Рис. 2. Магнитная система мотор/генератора

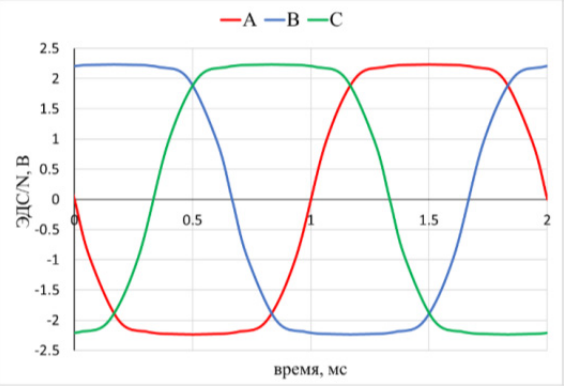


Рис. 3. Удельная ЭДС ХХ ВТСП мотор/генератора

Сначала были выполнены расчеты магнитного поля в магнитных системах с целью определения допустимого тока в обмотках возбуждения из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Максимальное (критическое) значение тока, протекающего через ВТСП ленту в сверхпроводящем состоянии, ограничено и зависит нелинейно от магнитного поля, воздействующего на ВТСП материал. Для определения допустимого тока возбуждения в обмотках с ВТСП проведено сравнение характеристики ВТСП ленты [3], предназначенной для изготовления обмоток возбуждения, с зависимостью критического тока от магнитной индукции. Это было выполнено с учетом распределения магнитной индукции в области размещения ВТСП обмотки от тока возбуждения в этой обмотке.

ЭДС холостого хода рассчитывалась при номинальной скорости вращения ротора 10 000 об/мин и при рассчитанных допустимых значениях тока возбуждения (табл. 1). В режиме холостого хода отсутствует нагрузка, то есть токи в обмотках якоря равны нулю. На данном этапе моделирования рассчитывалось удельное ЭДС e0=e/N на один виток фазы, состоящей из последовательно соединенных катушек с одним витком. Рассчитанная ЭДС ХХ представлена на рис. 3.

Таблица 1. Параметры ВТСП обмотки возбуждения

Поперечное сечение катушки	Число витков	Допустимый ток	Расчетная плотность тока
5×24 мм^2	84	156 А	110 А/мм^2

Трехфазная модель исследуемого мотор/генератора в Matlab/Simulink, построенная на этом принципе, показана на рис. 4. При построении макромодели сделано допущение, что магнитная система не насыщается, что позволяет использовать принцип суперпозиции и разделить влияние поля возбуждения, ЭДС собственной и взаимной индуктивности. Она состоит из блоков ЭДС холостого хода для трех фаз (ЭДС ХХ), задаваемых управляемыми источниками напряжения Controlled Voltage Source, блока с заданием параметров трехфазной обмотки, реализуемой с помощью блока Mutual Inductance, электрической нагрузки в виде резисторов в каждой фазе. В блоке Mutual Inductance задаются следующие параметры: сопротивление R, индуктивность фаз L, а также взаимная индуктивность M. Также в модели присутствуют блоки для проведения математических расчетов и представления временных зависимостей дифференциала потокосцепления. Регулирование потока возбуждения за счет изменения тока в обмотке возбуждения не рассматривалось. Ток в сверхпроводящей обмотке возбуждения считается неизменным. В результате получены осциллограммы напряжения и тока в режимах КЗ и ХХ.

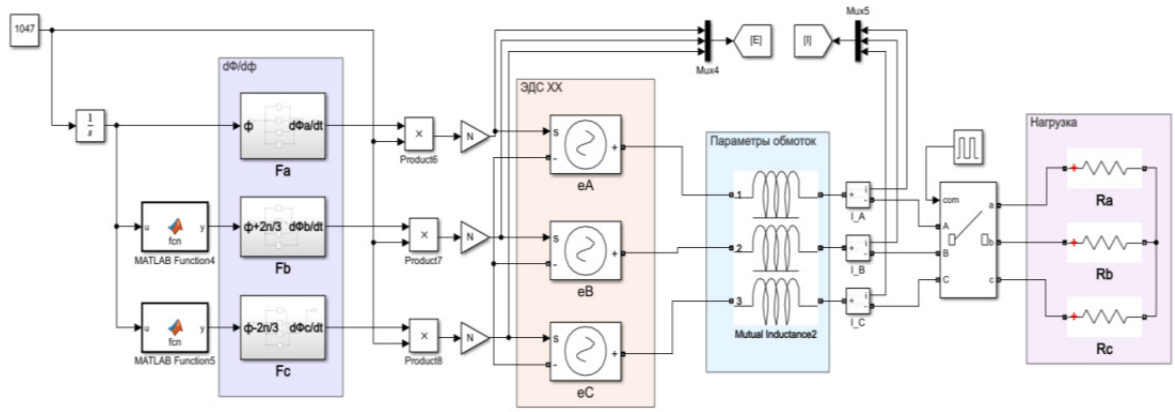
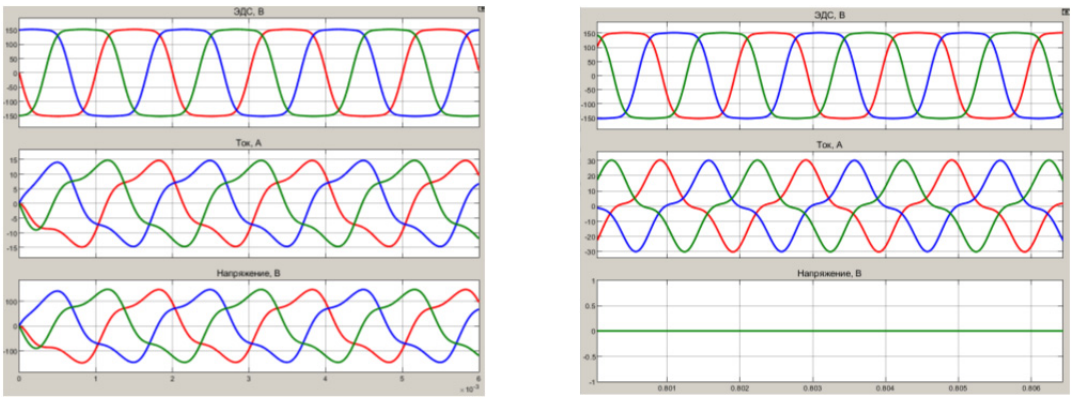


Рис. 4. Модель ВТСП мотор-генератора КНЭ в программе MATLAB/Simulink

Таблица 2. Полученные параметры обмоток

Индуктивность	Взаимная индуктивность	Сопротивление	Число витков
1,82 мГн	0,63 мГн	1,06 Ом	65



а *б*

Рис. 5. Осциллограммы ЭДС ХХ, тока в фазах и напряжения:
а – при нагрузке 10 Ом; б – в режиме КЗ

В результате работы были проанализированы осциллограммы ЭДС ХХ, напряжения и токов в длительном (J=2,5 А/мм^2), и в импульсном (J=25 А/мм^2) режиме работы.

Таблица 3. Результаты анализа мотор/генератора в различных режимах

Параметр	Значение
f, Гц	667
Iкз, А	17,2
Exx, В	130
Iн (импульсный режим), А	12,4
Iн (длительный), А	3,8
ω, рад/с	1047
P (длительный/импульсный режим), кВт	1,42 / 2,86
η (длительный/импульсный режим)	0,97 / 0,85

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessment of Energy Storage Systems for Multiple Grid Service Provision / J. Ramakrishnan, S. Hashemi, C. Træholt // 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). –Setubal, Portugal. – 2020. – P. 333–339.
2. Power Smoothing Control of DFIG Based Wind Turbine using Flywheel Energy Storage System / M. Nadour, A. Essadki, T. Nasser // 2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT). – Rabat, Morocco. – 2020. – P. 1–7.
3. Electromagnetic Characteristic Analysis and Optimization Design of a Novel HTS Coreless Induction Motor For High-Speed Operation / B. Liu, R. Badcock, H. Shu, L. Tan, J. Fang // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – Vol. 28, no. 4. – P. 1–5.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОГРАФИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

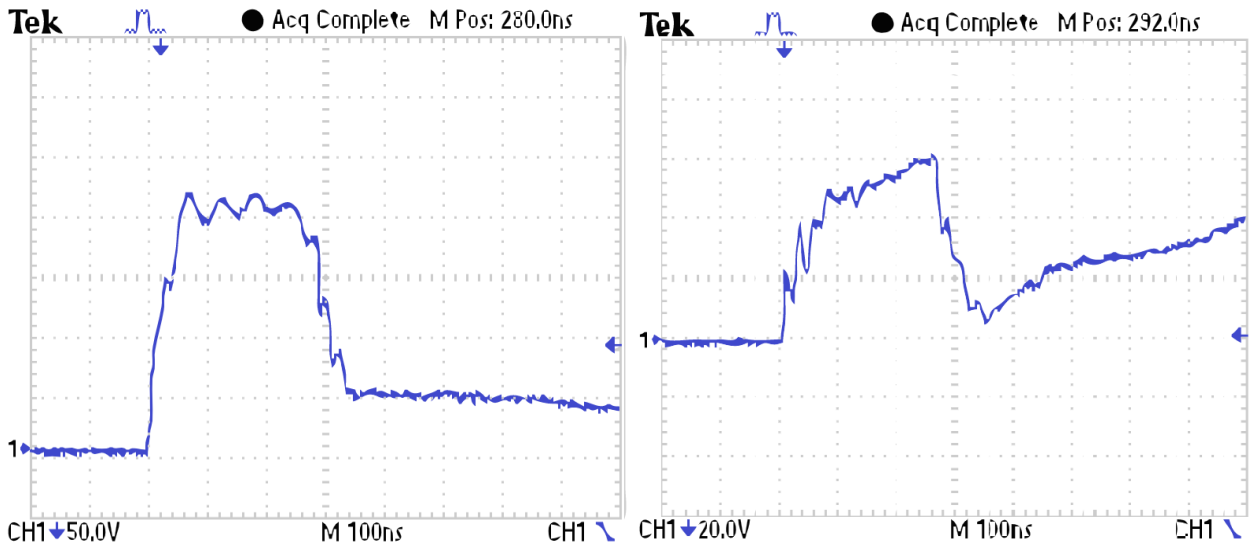
Р.А. Литунов

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ28

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

Частичные разряды (ЧР) вызывают разрушение изоляции высоковольтного энергетического оборудования в результате неконтролируемого и интенсивного развития [1]. Деструкция высоковольтной изоляции энергетических систем в силовых трансформаторах и электрических машинах часто становится причиной аварий с серьезными последствиями [2]. Существующие технологии диагностики, не смотря на их большое многообразие, не всегда позволяют своевременно обнаружить ЧР, и поэтому количество аварий увеличивается. Срок службы многих высоковольтных аппаратов не достигает проектного срока службы. Согласно исследованиям [3–5], более половины всех отказов высоковольтного оборудования, и прежде всего силовых трансформаторов связана с повреждениями изоляции. Несмотря на большое количество методов идентификации ЧР, каждая технология имеет недостатки, связанные с проблемой потерь, сложным процессом измерения и другими явлениями [5–7]. Поэтому разработка технологии контроля ЧР в высоковольтной изоляции в режиме on-line является актуальной задачей.

Для исследования и подтверждения эффективности импульсного метода и его применимости к диагностике ЧР, были выполнены эксперименты, в которых использовались прямоугольные импульсы длительностью 520 нс. Данный подход предполагает подачу импульса на участок изоляции с возможным ЧР. Элемент, имитирующий ЧР, представлял собой латунный электрод, в форме острия, вставленный в ячейку из органического стекла. Напряжение 3 кВ подавалось на ячейку от испытательного трансформатора. Таким образом, был организован ЧР типа «неполного пробоя» на поверхности органического диэлектрика. Схема эксперимента выглядит следующим образом: генератор импульсов генерирует зондирующий импульс наносекундной длительности, который подается на детекторную ячейку. Осциллограф измеряет зондирующий импульс, подаваемый на ячейку. Сначала зондирующий импульс длительностью 260 нс подается на ячейку без ЧР. Затем в схему помещается ячейка с ЧР в виде короны. Форма волны импульса, подаваемого на ячейку без ЧР, показана на рис. 1, *а*. Ситуация с активным ЧР приведена на рис. 1, *б*.



а *б*

Рис. 1. а – Частичный разряд отсутствует; б – Частичный разряд активен

Физической основой подобной деформации прямоугольного импульса является взаимодействие импульсов ЧР с зондирующим импульсом. Оба сигнала содержат большое количество высокочастотной составляющей. Взаимодействие двух частотных диапазонов при прохождении импульса через участок, содержащий ЧР, приводит к деформации исходной формы импульса. Таким образом, импульсное зондирование позволяет обнаруживать ЧР в высоковольтной изоляции за счёт деформации формы зондирующего импульса.

Импульсное зондирование позволяет обнаруживать ЧР за счёт деформации формы зондирующего импульса. Деформация формы импульса происходит от начальной формы под воздействием ЧР. Наблюдаемая в экспериментах картина может быть объяснена следующим образом. Физической основой подобной деформации прямоугольного импульса является взаимодействие импульсных волн ЧР с зондирующими импульсными волнами. Оба сигнала являются импульсами и содержат большое количество высокочастотной составляющей. Прямоугольный импульс на выходе генератора обогащен высокими частотами в диапазоне от сотен кГц до десятков МГц. Этот же диапазон частот имеет ЧР, возникающий во внутренних дефектах высоковольтной изоляции под воздействием рабочего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / В.С. Богомолов, Т. Е. Касаткина, С.С. Кустов // Вестник ВНИИЭ. – 1997. – С. 25–32.
2. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния / М.И. Чичинский // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 29–31.
3. Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем и определение перспектив надежной работы ЭЭС России / А.Ю. Хренников // Электрические станции – 1999. – № 8. – С. 67–70.
4. Цурпал С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов // Материалы X Международной научно – технической конференции. – Запорожье: Запорожский трансформаторный завод, 2000. – С. 122–126.
5. Соколов В.В. Ранжирование состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2006. – С. 7–18.
6. Modelling of Partial Discharge Development in Electrical Tree Channels / A. Schwab, M. Suck, M. Noskov, A. Malinovskii // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2003. – Vol. 10. – P. 425–434.
7. Registration and Simulation of Partial Discharges in Free Bubbles at AC Voltage / S.M. Korobeynikov, A.V. Ridel, A. Medvedev, D.L. Karpov, A.G. Ovsyannikov, M.V. Meredova // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – V. 26. – P. 1035–1042.

ВОДОРОДНЫЙ ТРАНСПОРТ: РЕАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.А. Макуева[1], Р.И. Разакова[2]

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, ХВ, ВЭм-1-22[1]; Та-1-21[2]

Научный руководитель: А.А. Чичиров, д.х.н., зав. кафедрой ХВ, ИТЭ, КГЭУ

Для масштабного внедрения водородного топлива в человеческую жизнь требуется создание соответствующей инфраструктуры. В данной работе предлагается рассмотреть на каком этапе и в каком состоянии находится производство водородного топлива в России, и какие перспективы по его внедрению в ближайшем будущем нас ожидают.

У России имеются некоторые барьеры, которые тормозят внедрение низкоуглеродного топлива и транспорта, а именно многочисленные инвестиции в пользу нефтегазовой отрасли, высокая стоимость «зеленого» топлива для конечного покупателя и страх населения, связанный с безопасностью на водородных АЗС. При этом развитие водородной энергетики продолжает оставаться значимым направлением исследований и разработок, ведущих к декарбонизации и низкоуглеродному развитию. Использование водородного топлива позволит сократить выбросы углеводородов в атмосферу в таких секторах, как транспорт, химическая промышленность, производство удобрений, металлургия и т. д. [1].

Неоспоримым достоинством водородного топлива для автотранспорта является его экологичность, поскольку на выходе мы получаем водяной пар. К преимуществам, в качестве энергоносителя, также можно отнести высокую плотность энергии – 33 кВт·ч/кг, что делает его особенно эффективным по сравнению с традиционными топливами. Водород может транспортироваться на большие расстояния, что позволяет распределять энергоресурсы между странами [2].

На текущий момент Госкорпорация «Росатом» совместно с Правительством Сахалинской области и ведущими российскими промышленными и транспортными компаниями прораба-

тывают целый комплекс вопросов, связанных с развитием водородного транспорта и заправочной инфраструктуры. В планах у участников проекта внедрение на острове Сахалин пассажирского железнодорожного сообщения с применением поездов на водородных топливных элементах [3].

4 сентября 2019 года было заключено Соглашение о сотрудничестве по разработке проекта пассажирского железнодорожного сообщения на Сахалине с вводом в эксплуатацию поездов на водородных топливных элементах. Участниками проекта являются Госкорпорация Росатом, Российские железные дороги, АО «Трансмашхолдинг» и правительство Сахалинской области. В планах было установить 2 ВЗС, находящихся в Южно-Сахалинске и Холмске, ввести в эксплуатацию 7 водородных поездов (5 двухвагонных, 2 трехвагонных).

Выбор пал на Сахалинскую область по следующим причинам:

- наличие ресурсов для генерации водородного топлива, а именно природного газа, угля, а также возможность введения сооружений новой ветрогенерации для получения чистой электроэнергии;
- льготное финансирование от Фонда развития Дальнего Востока и ВЭБ;
- небольшие транспортные логистические издержки для экспорта в страны АТР.

Однако начало пассажирских перевозок на водородных поездах на Сахалине пришлось сдвинуть с 2023 года на 4 квартал 2025 г. Также в связи с международными санкциями и необходимостью заменить поставщиков, создание водородного транспорта может возрасти на 20–25 %. Поезда для проекта должен поставить АО «Трансмашхолдинг», стоимость их достигает 3,4–3,7 млрд руб.

Госкорпорация «Росатом» рассматривает следующие методы генерации водорода: паровая конверсия метана с технологиями улавливания CO_2, электролиз, технология паровой конверсии метана в симбиозе с атомной генерацией [3].

Целевые показатели по водородным заправочным станциям на 2025 год составляют 100 объектов, в дальнейшем их количество будет ежегодно возрастать.

Следует отметить, что у России уже имеется опыт международного сотрудничества в сфере водородных технологий. Так, например, в период с 1998 по 2012 год велась работа по разработке проекта модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с прямым газотурбинным циклом ГТ-МГР мощностью 600 МВт. Разработка велась совместно с компанией General Atomics (США) с участием Framatome (Франция) и Fuji Electric (Япония) [3].

Основные рынки водородных заправочных станций сконцентрированы в Германии (H2 Mobility), США (CaFCP и H2 USA), Японии (HySUT) [2]. В США, Канаде, Норвегии выстраиваются «Водородные шоссе» между городами протяженностью 500–1000 км, вдоль которых планируется установить необходимую «водородную» инфраструктуру [4].

По данным за последние несколько лет количество ВЗС стремительно растет, например, в 2006 г. насчитывалось 140 заправок, в 2008 г. – 175, в 2018 г. – 300, в 2020 г. – 570, эксплуатируются как общедоступные, так и частные (мобильные, домашние) станции. Ниже представлена информация по лидирующим странам по эксплуатации и строительству ВЗС (табл. 1) [5].

Таблица 1. Количество ВЗС в странах мира

Страна	США	Азия	Германия	Европа	Великобритания
Количество	107	178	84	117	11

Между системой генерации H_2 и компрессором устанавливаются герметичные буферные резервуары. Водород хранится в виде сжатого газа или в сжиженном состоянии. Немаловажным является решение проблемы, связанной с транспортировкой H_2 к месту его использования. Поскольку водород обладает высокой диффузионной способностью, возможно возник-

новение, так называемой, водородной коррозии металла. В свою очередь, водородная коррозия приводит к необратимым потерям механических свойств металла, что повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций на ВЗС [6].

Учитывая вышеизложенное, на текущий момент Россия не готова к полному переходу к безуглеродному транспорту, поскольку обслуживание его является очень дорогостоящим для конечного потребителя. Безопасный и устойчивый переход к использованию водорода требует изучения и полного понимания вопросов безопасности, связанных с водородом, а также немалых вложений от государства в создание соответствующей инфраструктуры. Для минимизации риска возникновения пожаро- и взрывоопасных ситуаций, необходимо избегать возникновения утечек и выбросов опасных веществ в атмосферу [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макуева Д.А. Состояние и перспективы внедрения водородных заправочных станций / Д.А. Макуева, Р.И. Разакова // Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 118–120.
2. Гайнутдинова Д.Ф. Перспективы создания водородных заправочных станций / Д.Ф. Гайнутдинова // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие», Санкт-Петербург, 28–30 марта 2022 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2022. – С. 144–146.
3. Запуск первых в России водородных поездов перенесли на 2025 год // РБК URL: https://www.rbc.ru/business/11/01/2023/63bc0cf79a79474cf4d1c1b0 (дата обращения: 10.11.2023).
4. Где в мире распложены заправочные станции для водородных автомобилей [FCEV] // Zap-online.ru URL: https://zap-online.ru/info/avtonovosti/vodorodnie-zapravki (дата обращения: 21.02.2023).
5. Клуманн А., Соллид Ч. Заправочные станции на основе электролизера для различных проектов в Европе // Альтернативная энергетика и экология. – 2003. – Спец. выпуск. – С. 29.
6. Нанотехнологии в разработке топливных элементов / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, С.М. Власов, Х.В. Гибадуллина // Труды Академэнерго. – 2014. – № 3. – С. 103–122.
7. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе / А.А. Филимонова, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, Р.И. Разакова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 104–115. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-2-104-115.

Секция 7
Новации инженерного образования

МЕТОД КЕЙСОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКЕ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

М.А. Проскуряков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А26

Научный руководитель: Е.А. Беляускене, Старший преподаватель ОММФ ИЯТШ ТПУ

Метод кейсов (case method) возник в Гарвардской бизнес-школе в начале XX в. Он был разработан профессором Чарльзом Й. Беллом для преподавания делового образования. Метод кейсов является активным и интерактивным подходом к обучению, где студенты анализируют реальные или фиктивные ситуации, называемые «кейсами», и предлагают свои решения и стратегии.

Кейсы представляют собой истории из реального бизнес-мира, которые позволяют студентам расширить свои знания и навыки в управлении, принятии решений и анализе проблем. В ходе обучения студенты изучают кейсы, обсуждают и анализируют их, и работают в группах, чтобы предложить свои решения и доводы. Этот метод способствует развитию критического мышления, коммуникации, аналитических и презентационных навыков.

Метод кейсов широко используется в гуманитарных дисциплинах по всему миру и считается эффективным способом подготовки студентов к реальным вызовам и проблемам, с которыми они столкнутся в будущей профессиональной деятельности.

В статье описывается применение метода кейсов в обучении студентов 2 курса бакалавриата специальности «Электроэнергетика и электротехника». В осеннем семестре при изучении дисциплины «Математика» предлагается выполнить кейс «Математическое моделирование полета БПЛА». Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – это инновационные технологические устройства, которые позволяют осуществлять полеты без участия пилота на борту. Современные БПЛА представляют собой комплексные системы, состоящие из беспилотного летательного аппарата, системы управления, навигации и средств передачи данных. На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты становятся все более популярными и востребованными в различных сферах, от коммерческого авиастроения до военных операций. Они предоставляют широкий спектр возможностей и применений, сокращая риски для пилотов и открывая новые горизонты для научных исследований, наблюдения за окружающей средой, мониторинга погоды и т. д.

В предлагаемом кейсе необходимо создать математическую модель полета БПЛА. Студенты должны использовать знания по математике и по физике. Кроме того, при выполнении задания может быть использовано программирование для проектирования модели на компьютере и проведения симуляций полета БПЛА. Математическое моделирование полета БПЛА позволяет проводить различные анализы и строить прогнозы, например, прогнозирование дальности полета и расхода топлива: модель может использоваться для определения ожидаемой дальности полета и расхода топлива в зависимости от различных факторов, таких как масса БПЛА, параметры двигателя и другие.

Кейс: Вы являетесь членом команды в аэрокосмической компании, которая занимается разработкой нового типа БПЛА для разведывательного соединения РФ. Компания стремится максимизировать дальность полета БПЛА и минимизировать расход топлива для разведки и наблюдения противника. Ваша задача: Используя предоставленный набор данных, включающий массу БПЛА, параметры двигателя и другие факторы, разработайте модель прогнозирования дальности полета и расхода топлива для новой модели БПЛА. На основании результатов прогнозирования, определите лучший вариант характеристик для БПЛА, который обеспечивает максимальную дальность полета с минимальными затратами на топливо.

Решение кейса содержит следующие этапы:

1) описание и обоснование выбора простой модели для решения поставленных задач;
2) подготовка данных и построение модели;
3) результаты прогнозирования дальности полета на основе массы БПЛА;
4) анализ результатов и возможные способы улучшения модели.

На первом этапе студенты делятся на небольшие группы по 4–5 человек. Свое решение они начинают с изучения информации о БПЛА, отрасли и ситуации, описанной в кейсе. Они анализируют факты и данные, чтобы понять, с чем они имеют дело.

На втором этапе студенты определяют проблему кейса, а затем начинают собирать информацию о лучших БПЛА в мире, их характеристиках и многое другое.

На третьем этапе студенты должны перевести разработанную модель в математические уравнения. Это может потребовать использования алгебры, геометрии и тригонометрии, в зависимости от сложности задачи. Например, для моделирования движения в трехмерном пространстве может понадобиться использование векторов и матриц. А также должны решить систему уравнений, которые получили в предыдущем этапе. Это может быть выполнено аналитическими методами, численными методами или с использованием специализированного программного обеспечения. Студенты должны проанализировать полученные результаты. Это может включать проверку совместимости с требованиями и ограничениями, оценку точности модели, сравнение результатов с реальными данными и т. д.

И заключительным этапом студенты должны сделать выводы на основе анализа результатов. Они могут оценить эффективность модели и ее приложение в реальных ситуациях, а также предложить улучшения или дальнейшие исследования.

Студенты работают с кейсами в малых группах. Они анализируют информацию, проводят исследования, формулируют проблему или вопрос, и предлагают свои решения или стратегии. Затем они делятся своими выводами и доводами в классе или на специальных семинарах. Это обсуждение позволяет студентам узнать разные точки зрения и подходы и улучшить свои навыки аргументации и коммуникации.

Предварительно было проведено анкетировано, в котором приняло участие 88 студентов из трех различных школ ТПУ. Наибольшее количество участников 42 % являются студентами Инженерной школы энергетики. Большинство студентов 52 % обучаются в настоящее время на втором курсе. По данным опроса только 45 % участников знакомы с методом кейсов, при этом только 25 % сами принимали участие в решении кейса.

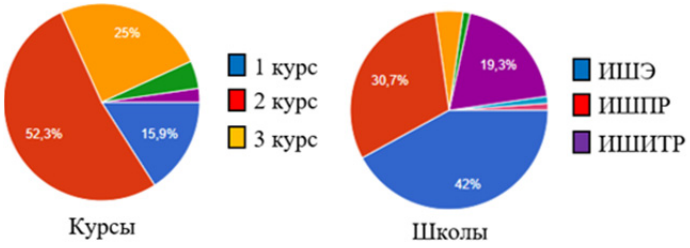


Рис. 1. Состав участников опроса

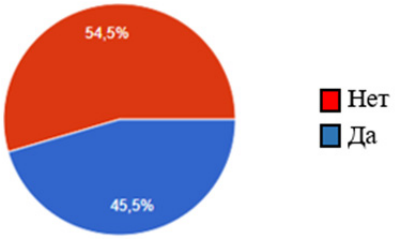


Рис. 2. Знают ли студенты, что такое метод кейсов

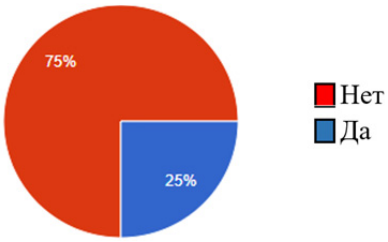


Рис. 3. Принимали ли студенты участие в решении кейсов

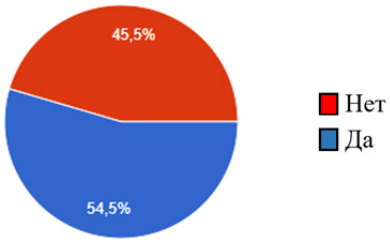


Рис. 4. Желание студентов принимать участие в решении кейсов

Метод кейсов в вузах помогает студентам применять теоретические знания, которые они получили в учебе, к реальным ситуациям. Он также способствует развитию самостоятельности, творчества и критического мышления. Кроме того, он готовит студентов к будущей профессиональной деятельности, где они будут сталкиваться с реальными проблемами и принимать важные решения.

Метод кейсов позволяет студентам развить не только знания и навыки, но и способность адаптироваться к новым ситуациям, решать проблемы, работать в команде и применять критическое аналитическое мышление в своей будущей карьере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канатников А.Н., Шмагина Е.А. Задача терминального управления движением летательного аппарата // Нелинейная динамика и управление. – 2010. – Вып. 7. – С. 79–94.
2. Стрекалова Н.Д., Беляков В.Г. Санкт-Петербургский филиал Нац. исслед. ун-та «Высшая школа экономики». – СПб.: Отдел оперативной полиграфии НИУ ВШЭ, 2013. – 80 с.
3. Юлдашев З.Ю., Бобохужаев Ш.И. Инновационные методы обучения: Особенности кейс-стади метода обучения и пути его практического использования. – Ташкент: «IQTISOD-MOLIYA», 2006. – 88 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ФОРМУЛ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

Ю.С. Цыбочкина

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5081

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В последние годы в нашей стране и за рубежом заметно вырос интерес к атомной энергетике. Более 30 стран мира эксплуатируют 444 атомных реактора для выработки электроэнер-

гии, а 66 новых атомных станций находятся в стадии строительства. Атомная энергетика обеспечивает доступ к чистой, надежной и доступной энергии. Однако атомные энергоблоки имеют сравнительно невысокий КПД, причем основные потери теплоты имеют место в конденсаторе паротурбинной установке АЭС. В силу этого представляется целесообразным совершенствование работы конденсационной установки.

Как правило, конденсатор современных турбин АЭС представляет собой горизонтальный кожухотрубный теплообменный аппарат, в котором происходит конденсация отработавшего в турбине пара за счет передачи некоторой теплоты пара охлаждающей воде, перекачивающейся через теплообменные трубки циркуляционными насосами, при постоянном давлении. Образовавшийся конденсат откачивается конденсатными насосами из конденсатосборника в систему регенерации.

Одним из способов повышения эффективности процесса конденсации отработавшего пара является интенсификация теплообмена в конденсаторе, в частности за счет использования трубок с негладкой поверхностью [1].

Для численной иллюстрации эффективности данного способа интенсификации теплообмена необходимо построение модели, позволяющей проводить сравнительные расчеты для гладких и негладких трубок.

Параметром, характеризующим эффективность теплообмена, является коэффициент теплопередачи. Достаточной точностью расчета коэффициента теплопередачи обладает методика предложенная ВТИ (при $t_{1в} \leq 35$ ℃) [2].

$$k = 4070a\left(\frac{1{,}1W_в}{d_{вн}^{\,0{,}25}}\right)^x\left(1-\frac{0{,}52-0{,}002d_k\sqrt{a}}{1000}(35-t_{1в})^2\right)\left(1-\frac{z-2}{10}\left(1-\frac{t_{1в}}{35}\right)\right) \quad (1)$$

где a – коэффициент состояния поверхности теплообмена конденсатора (учитывает степень загрязненности теплообменных трубок); $d_{вн}$ – внутренний диаметр теплообменных трубок, мм; $W_в$ – скорость охлаждающей воды в трубках, м/с; d_k – удельная паровая нагрузка конденсатора, кг/(м^3 · ч); $t_{1в}$ – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, ℃; z – число ходов охлаждающей воды; $x = 0{,}12a(1+0{,}15t_{1в})$.

Интенсификация теплообмена обычно учитывается умножением соответствующего коэффициента теплоотдачи, рассчитанного для гладких труб, на некоторый ненулевой коэффициент, зависящий от параметров негладкой трубы.

Однако выражение (1) не представляет возможным учесть интенсификацию теплообмена за счет применения накатаных[3] труб, т. к. в этой формуле коэффициенты теплоотдачи в явном виде не присутствуют. Вследствие чего предлагается следующий подход – расчет производить по традиционному выражению для коэффициента теплопередачи (2), но подобрать выражения для определения $\alpha_в$ и $\alpha_п$, которые бы обеспечивали близкие значения коэффициента теплопередачи для гладких трубок.

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_в}+\frac{(d_н-d_{вн})}{2\lambda_{ст}}+\frac{1}{\alpha_п}\right)^{-1} \quad (2)$$

где $\alpha_в, \alpha_п$ – коэффициент теплоотдачи со стороны воды и пара, Вт/(м^2 · К); $d_н$ – наружный диаметр теплообменных трубок, мм; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м · К);

При расчете коэффициента теплоотдачи со стороны охлаждающей воды не возникает сложностей, т. к. все формулы обеспечивают одинаковую точность. Одна из самых популярных представлена ниже.

$$\alpha_в = 0{,}023Re_в^{\,0{,}8}Pr_в^{\,0{,}4}\frac{\lambda_в}{d_{вн}} \quad (3)$$

[3] Накатка – витое профилирование теплообменных трубок с внутренней и наружной стороны одновременно [3].

где $\lambda_в -$ коэффициент теплопроводности охлаждающей воды, Вт/(м · К); $Re_в = (W_в d_{вн})/\nu_в -$ число Рейнольдса по водяной стороне; $\nu_в -$ кинематическая вязкость, м^2/с; $Pr_в -$ число Прандтля по водяной стороне.

При расчете коэффициента теплоотдачи со стороны пара напротив, появляется необходимость подбора для него такого выражения, которое бы при подстановке в выражение (2) обеспечило достаточную близость результатов по сравнению с выражением (1).

Известно некоторое количество эмпирических формул, выведенных для расчета коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара. Для сравнения были выбраны следующие выражения [4]:

1. Эмпирическая формула, полученная в ВТИ

$$\alpha_п = 28{,}3\alpha_{Nu}П^{0{,}08}Nu^{-0{,}58} \quad (4)$$

где $П = \left(\rho_п {W_п}^2\right)/(\rho_k g d_н) -$ безразмерное число; $\rho_п -$ плотность пара, кг/м^3; $W_п -$ скорость набегающего потока пара в трубном пучке, м/с; $Nu = (\alpha_{Nu} d_н)/\lambda_k -$ число Нуссельта; $\alpha_{Nu} -$ теоретический коэффициент теплоотдачи со стороны пара (по (5)).

$$\alpha_{Nu} = 0{,}725\left(\frac{{\lambda_k}^3 {\rho_k}^3 r g}{\mu_k \Delta t_{пс} d_н}\right) \quad (5)$$

$\lambda_k -$ коэффициент теплопроводности конденсата пара, Вт/(м · К); $\rho_k -$ плотность конденсата, кг/м^3; $\mu_k -$ динамическая вязкость, Па · с; $r -$ скрытая теплота парообразования, кДж/кг; $g = 9{,}81$ м/с$^2 -$ ускорение свободного падения; $\Delta t_{пс} = (t_s - t_{ст}) -$ температурный напор, °С; $t_s -$ температура насыщения в конденсаторе, °С; $t_{ст} -$ температура стенки теплообменной трубки, °С

2. Эмпирическая формула КТЗ:

$$\alpha_п = 19\alpha_{Nu}П^{0{,}1}Nu^{-0{,}5}\left(1 + \frac{z}{2}\right)^{0{,}33}\bar{s}^{0{,}15} \quad (6)$$

где $\bar{s} = s_{узк}/(\pi d_н N) -$ относительный периметр набегания пара на трубный пучок; $s_{узк} -$ периметр набегания пара в сечении между трубками по периферии трубного пучка; $N -$ число труб в пучке.

3. Эмпирическая формула С.С. Кутателадзе:

$$\alpha_{см} = \alpha_{Nu}(1 - 4{,}716\varepsilon^{0{,}477}) \quad (7)$$

где $\varepsilon = D_{возд}/D_k -$ относительное содержание воздуха в паре, кг/кг.

Сравнительные расчеты коэффициента теплопередачи проводились основе характеристик, характерных для конденсационной установки турбины К-1200-6,8/50 Ленинградской АЭС-2. Исходные данные на один корпус конденсаторной группы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для проведения расчета

D_k, кг/ч	$G_в$, кг/ч	a	$d_н$, мм	$d_{вн}$, мм	z, –	d_k, кг/(м^3 · ч)	p_k, кПа	$D_{возд}$, кг/с
1644000	170000000	0,81	28	26,8	1	32,5	4,76	0,039

Результаты расчетов представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что в диапазоне скоростей от 0,2 до 0,7 м/с наиболее близкие к зависимости (1) значения выражений (4) и (7). Однако при повышении скорости течения охлаждающей воды в трубках, значения, получаемые из выражения (7) имеют больший разбег, чем значения выражения (4) по сравнению со значениями коэффициента теплопередачи, полученными из выражения (1). Значения коэффициента теплопередачи, полученные через введение коэффициента теплоотдачи, вычисленного по эмпирической формуле КТЗ, образуют собой линию, имеющею несколько другой характер, относительно линии зависимости (1).

Очевидно, что только формула (4) дает достаточно близкие значения коэффициента теплопередачи относительно соответствующих значений КТП по эмпирической формуле (4). Связано это может быть с тем, что обе формулы были выведены одним институтом.

Это указывает на возможность использования эмпирической зависимости (4) в разрабатываемой модели расчета оценки эффективности интенсифицированных поверхностей нагрева в конденсаторах АЭС.

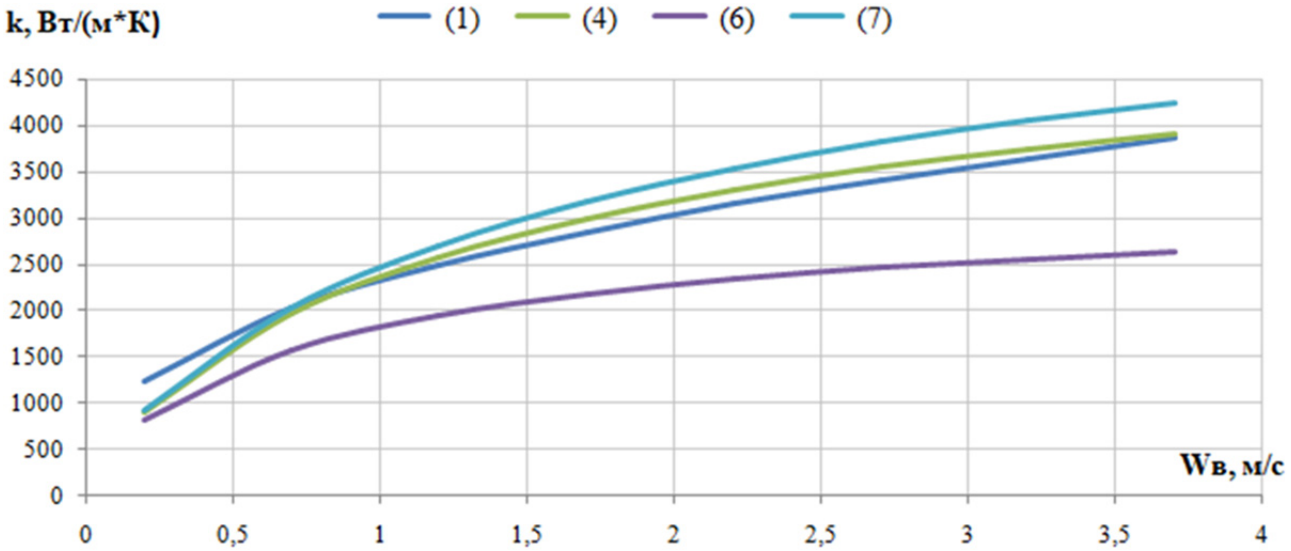


Рис. 1. Распределение коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости движения охлаждающей воды

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В., Байгалиев Б.Е. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ен-та, 2004. – 432 с.
2. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций. – Москва: СПО Союзтехэнерго, 1982.
3. Бродов Ю.М. и др. Современная ситуация и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2019. – 104 с.
4. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: ечебное пособие для вузов. – Москва: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КЕЙСОВ НА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

А.А. Барковская

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5091

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, к.п.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова, ТПУ

Качественная подготовка инженерных кадров для отечественной промышленности – основная задача российских технических университетов. Учебные заведения обеспечивают студентов широким спектром теоретических знаний, которые в свою очередь необходимы для дальнейшей работы выпускников. Но устраиваясь на работу, молодой инженер может

столкнуться с трудностями в решении реальных задач, из-за отсутствия во время обучения многосторонней практической базы.

В связи с большим количеством теоретических дисциплин, использование студентами готовых знаний может формировать у них стереотипное, узконаправленное мышление. Такое восприятие препятствует творческому и креативному подходу, поиску нестандартных решений, становится затруднительно посмотреть на проблему с другой стороны [1]. Решением данной проблемы может стать внедрение инженерных кейсов в учебную план.

«Инженерный кейс – это практическая задача, основанная на реальной производственной ситуации, которая готовится по материалам конкретного технологического предприятия, компании, холдинга, корпорации или другой организации» [2, с. 9]. Такие задачи не всегда могли бы быть рассмотрены во время обучения, что способствует развитию гибкого и неординарного мышления. Во время решения кейсов студентам приходится использовать не только теоретические знания, полученные в вузе, но и получать новые, улучшать свои навыки в поиске информации, использовать свои идеи или же дорабатывать существующие. В таком случае студенты занимают не только роль слушателей, они становятся участниками своего образовательного процесса.

Решение кейсов способствует развитию и формированию профессиональных компетенций не только по своему направлению подготовки, но и в других, так как решение кейсов обычно требует применение междисциплинароного подхода. Например, с экономической точки зрения, т. е. получить умения оценки производственных и непроизводственных затрат, проведения маркетингового исследования и т. д. Кроме того, во время решения кейсов студенту необходимо взаимодействовать со своими сверстниками, а также преподавателями, что в свою очередь влияет на умение вести переговоры, налаживать коммуникации, делиться своим опытом и учиться у других. Однако не менее важным преимуществом инженерных кейсов является то, что не существует одного единственного правильного решения. Любой способ, предложенный при решении кейсов, имеет право на существование и может быть в последствии доработан. Последующая доработка предложенного решения кейса требует более глубокого уровня погружения в изучаемый вопрос и оказывает положительное влияние на уровень мотивации студентов, что является одним из важнейших педагогических условий эффективной подготовки студентов к профессиональной деятельности [3]. В процессе решения кейсов студенты развивают свои лидерские качества и навыки публичных выступлений [4]. Современный инженер должен четко и ясно излагать свои мысли. Важно не только подготовить решение, но еще и грамотно его презентовать, умело донося свою идею и решение до слушателей различных сфер деятельности (экономисты, инженеры, менеджеры и т. д.).

Существует специальный международный инженерный чемпионат «CASE-IN», участие в котором может дать колоссальный опыт студентам в решении реальных задач. Также можно внедрить кейсы в действующие основные образовательные программы (ООП) в качестве учебной исследовательской работы студента (УИРС) или же в те дисциплины, которые наиболее приближены к производству, электростанциям и т. п., т. е. в те предметы, где изучается и рассматривается, например, оборудование и его процессы наиболее углубленно. Кроме того, инженерные кейсы можно внедрить и в виде курсовых проектов. В таком случае, студенты объединяются в команды, распределяют между собой роли и каждый решает свою задачу. Курсовой проект может включать в себя несколько этапов: от технического задания и документации до создания 3D-модели объекта.

Внедрение кейсов в качестве УИРС или творческого проекта наиболее уместно было бы на первом и втором курсах обучения: так студенты могут ознакомиться с новым форматом работы и приспособиться к нему. Уже далее, для старшекурсников предлагается включать в учебный план кейсы в качестве курсовых проектов по дисциплинам, наиболее относящимся к будущей профессии.

Таблица 1. Этапы выполнения курсового проекта

№ этапа	Этап реализации курсового проекта	Краткое содержание (вид работ)
1	Получение кейса	Получение задание от преподавателя
2	Объединение в команды	Объединение в команды по 3–4 человека
3	Распределение ролей	Необходимо распределить роли между собой по интересам (инженер, экономист и т. п.)
4	Обсуждение плана работы	Анализ полученного задания
5	Определение сроков выполнения отдельных задач	Составление командой личного графика выполнения подзадач
6	Проверка промежуточных результатов	Данный этап может осуществляться, не только участниками команды, но и совместно с преподавателем, обсуждение трудностей, взаимопомощь
7	Подготовка проделанной работы для сдачи	Доработка решения, оформление презентации и вспомогательных материалов, подготовка к защите
8	Защита курсового проекта	Защита, подведение итогов комиссией, получение обратной связи от преподавателей и других студентов

Также в течение семестра каждый студент должен отчитываться своему руководителю о проделанной работе, чтобы преподавателю было легче оценить внесенный вклад в решение кейса. Защита курсового проекта в данном случае предполагает не только наличие комиссии, т. е. преподавателей, но еще и других студентов. При презентации своего решения приветствуются чертежи, различные схемы, а также модели, сделанные своими руками или с помощью 3D-принтера. Выполнение курсового проекта может оцениваться по нескольким критериям: насколько точно студенты поняли задачу, полноценность решения, его применимость в реальной жизни, а также оригинальность презентации.

Таким образом, выполнение курсовых проектов в качестве решения инженерного кейса оказывает влияние на три типа навыков, имеющих важное значение для молодого специалиста [2]:

- технические навыки – углубление специальных и профессиональных знаний;
- навыки человеческих отношений – работа в команде и взаимодействие с преподавателями;
- концептуальные навыки – способность оценки общей ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжакова В.А., Демченко А.И. Использование кейс-технологии в формировании профессиональных компетенций студентов технического вуза // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Психолого-педагогические науки. – 2022. – Т. 16, № 1–2. – С. 83–92. DOI:10.31161/1995-0659-2022-16-1-2-83-92.
2. Инженерный кейс: от практических задач до инновационных решений: сборник инженерных кейсов по итогам научно-образовательной конференции «Метод инженерных кейсов: достижения и вызовы будущего» с использованием материалов Международного инженерного чемпионата «CASE-IN» / под ред. Е.С. Воронцовой. – Томск, 2019. – 269 с.
3. Лавриненко С.В. Педагогические условия и модель подготовки студентов технического вуза к профессиональной деятельности специалистов атомной энергетики / С.В. Лавриненко // Научно-педагогическое обозрение. – 2018. – № 3 (21). – С. 101–107. – DOI 10.23951/2307-6127-2018-3-101-107. – EDN UVIHYJ.
4. Методические рекомендации по использованию инженерных кейсов в качестве измерительного инструментария/ под ред. Н.В. Трифоновой; – СПб., 2019. – 40 с.

ПОДХОДЫ К ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ С ОТРАСЛЕВЫМИ ЛИДЕРАМИ НА ИННОВАЦИОННОЙ ОСНОВЕ

А.А. Черных, Е.С. Воронцова

Томский политехнический университет,
ИШЭ, гр. 5Б15

Научный руководитель: Т.С. Тайлашева, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова, ИШЭ

Быстроразвивающийся мир и стремительное изменение технологий приводят к тому, что возникает нехватка специалистов, способных обладать достаточными навыками для работы в новых условиях. Сегодняшнее состояние экономики страны настроено на применение наукоемких технологий практически во всех отраслях, это способствует повышению уровня востребованности высококвалифицированных кадров, способных качественно решать сложные задачи с разносторонним подходом на стыке различных научных знаний.

Развитие современной промышленности тесно связано с цифровизацией. Большим спросом сейчас пользуются цифровые двойники, математическое моделирование физических процессов, нейротехнологии. Таким образом, с приходом цифровизации возникает потребность в синхронизации совершенного знания технологических процессов и умения создать программные продукты. Востребованность рынка труда выводит нас на специалистов с уникальным набором компетенции – с одной стороны он должен знать, понимать и владеть опытом основной профессиональной деятельностью, с другой стороны он должен обладать знаниями и умениями, отвечающими вызовам цифровизации.

Особое внимание навыкам и компетенциям выпускников уделяют компании и предприятия. Особо значимыми являются такие компетенции, как способность к самообразованию и саморазвитию, приобретение и использование новых умений в новых областях знаний, не связанных на прямую со сферой профессиональной деятельности. Крупные компаний отрасли всегда внимательно следят за качеством образования и новыми тенденциями, а также инновациями в этой сфере. Востребованность специалистов очень часто привязано к направлениям развития компаний и предприятий.

Одним из факторов формирования конкурентоспособного выпускника является специализированное образовательное пространство, связанное с будущей профессиональной деятельностью. На сегодняшний день к таким образовательным пространствам относятся научно-технологические и экспериментальные лаборатории, которые оснащены специализированным программным обеспечением, интерактивные комплексы и цифровые фабрики.

Примерами организованных специализированных образовательных пространств в Томском политехническом университете по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» являются:

- Студенческое конструкторское бюро (СКБ) АО «Силовые машины», деятельность которого направлена на работу студентов над конструкторскими и инновационными проектами. Специализированные компьютеры и программное обеспечение, с помощью которого студенты решают задачи и кейсы по паровым турбинам, предоставляются компанией-партнером.
- Школа моделирования ООО «ДЖЭТ ЛАБ» (дочернее предприятие Госкорпорации «Росатом»), специализирующаяся на математическом моделировании технологических процессов и объектов энергетики в программных комплексах САПФИР и REPEAT, модельно-ориентированной среде проектирования и математического моделирования. Обучение виртуальному испытанию проектируемого оборудования, моделирование энергообъектов

и технологических процессов, создание решений для повышения эффективности и снижения затрат производственных процессов и количества простоев – это все, является лишь общим перечнем того, чем занимаются студенты в процессе обучения в школе.

Подобные образовательные пространства способствуют получению представления о всей технологической цепочке: от идеи до проектирования оборудования и его эксплуатации. Для студентов участие в подобных пространствах является крайне ценным, поскольку на выходе они обладают востребованными знаниями в области проектирования и инжиниринга, а также знания в области цифровизации отрасли. В свою очередь для университета наличие таких образовательных пространств является возможностью предоставлять высокоуровневое образование, отвечающее запросам экономики и научному прогрессу.

Получить необходимые компетенции обучающиеся могут в рамках учебного процесса и при участии в различных мероприятиях, ориентированных на специализацию студента. Во время учебного процесса студенты выполняют проекты, участвуют в дискуссиях и интерактивах. К мероприятиям, способствующим получению компетенций, относятся виды деятельности, являющиеся совокупностью общепринятых форматов, воркшопы и питчи, например.

Исключительно положительно и успешно себя зарекомендовал такой вид проектного обучения, как кейс-технологии. Участие в мероприятии такого формата позволяет приблизиться к реальной практической задаче, основанной на работе конкретного предприятия. При решении инженерного кейса участники подходят к решению проблем с разных сторон: технической, экономической и управленческой, что способствует развитию различных навыков. Решение реальной проблемы заключается в междисциплинарном подходе, грамотной работе в команде и организации времени и информационных ресурсов. В результате проделанной работы и при успешной защите своего решения участники получают опыт публичного выступления, решения реальной практической задачи, умение анализировать и актуально представлять свою идею. Кроме того, развивается интерес к более глубокому и осознанному изучению основных дисциплин в рамках учебного процесса, потому что появляется понимание того, где и как эти знания могут быть применены.

Взаимному инновационному росту и развитию крепкого партнерства между университетом и предприятием способствуют традиции и опыт подготовки высококвалифицированных специалистов, компетентный подход к обучению с учетом требований работодателей и высокий уровень научно-педагогической школы ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцова Е.С. Перспективы применения метода инженерных кейсов в образовательном процессе Томского политехнического университета / Е.С. Воронцова, Т.С. Тайлашева // Метод инженерных кейсов: достижения и вызовы будущего. – 2019. – С. 33–35.
2. Тайлашева Т.С. Перспективы подготовки магистров по направлению «Энергетическое машиностроение» с учетом потребностей рынка труда / Т.С. Тайлашева, А.С. Заворин, К. В.Буваков // Уровневая подготовка специалистов: электронное обучение и открытые образовательные ресурсы. – 2014. – С. 430–432.
3. Преемственность компетенций в основной образовательной программе по направлению «Энергетическое машиностроение» / К.В. Буваков и др. // Уровневая подготовка специалистов: государственные и международные стандарты инженерного образования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 26–27.
4. Воронцова Е.С. Реализация международного инженерного чемпионата «CASE-IN» в Томском политехническом университете / Е.С. Воронцова // Метод инженерных кейсов: достижения и вызовы будущего. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 36–41.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ КАК МЕТОДА И СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

О.В. Никитенко, С.Ю. Шабуров

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А05

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

В развитых странах на протяжении последних десятилетий наблюдается тенденция увеличения сложности производимой продукции и технологических процессов. Это ведёт к повышению требований к знаниям и навыкам тех, кто занимается организацией этих технологических процессов – инженерам. Появляются такие понятия, как «инженерный спецназ» – специалисты нового поколения, которые имеют мультидисциплинарные знания, прокаченные soft skills, разбираются в прикладных науках и т. д. Но это «верхушка айсберга» подготовки инженеров, первоначальная и актуальная для отечественного образования задача – это уменьшение разрыва между фундаментальной академической подготовкой и практическими навыками студентов инженерных специальностей. Решение этой задачи позволит выпускникам технических вузов легче вливаться в высокотехнологичные производственные процессы. Поэтому образовательный процесс требует внесения коррективов, направленных на внедрение практико-ориентированного подхода, с целью связать теоретические дисциплины и реальные задачи, с которыми инженеры встретятся на производстве [1]. Одно из таких решений – использование виртуальной реальности.

Виртуальная реальность – созданный при помощи компьютерных технологий интерактивный трёхмерный искусственный мир, котором можно от первого лица взаимодействовать с объектами, совершать с ними манипуляции и наблюдать за последующими изменениями [2]. Виртуальная реальность или VR-технология позволяет смоделировать любую ситуацию, или создать место, явление, человека. Главное – технология погружает человека в искусственно созданные условия, где на каждое его действие есть отклик программы, которая предусматривает все возможные сценарии и реагирует на них, как в реальности.

Что представляет собой виртуальная реальность в образовании? Методисты и специалисты в области педагогике сходятся во мнении, что образовательный процесс вышел на новый уровень, в котором информационно-коммуникационные технологии являются неотъемлемой частью данной образовательной системы. В статье «На пути к виртуальной реальности» Я.Ю. Ленсу определял виртуальную реальность так: «информационная среда, существующая внутри сгенерированного компьютером информационного пространства и включающая содержательные тексты, графические и видеоматериалы, звуковое оформление» [3]. Опираясь на это определение, можно сказать, что виртуальная реальность для образования не что иное, как создание компьютерного мира, в который попадает студент, изучающий тот или иной предмет [2].

Интеграция виртуальной реальности в образовательный процесс для начала позволяет сделать обучение интересным, насыщенным и повысить вовлеченность студентов. Но главное, что компьютерный мир даёт возможность применить теоретические знания к решению инженерных задач. В этом роде виртуальная реальность, как средство обучения укладывается в концепцию образования для инженеров «планирование – проектирование – производство – применение», предложенную ещё в 2000 г. в Массачусетском технологическом институте [1]. Эта концепция основывается на том, что подготовка инженеров должна включать в себя теоретическую основу и формирование практических навыков.

В 2022 году на базе Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета была открыта «VR- лаборатория в энергетике». Она была модернизирована за счёт средств программы Минобрнауки России «Приоритет 2030» по стратегическому проекту «Энергия будущего». В рамках лаборатории на данный момент студенты могут обучаться по шести разным сценариям, к примеру, поработать на электрической подстанции, в цеху электроснабжения или химводподготовки и т. д. Для энергетиков VR-технология – это, в первую очередь, про безопасность. Технология помимо площадки для применения теоретических навыков на практике даёт возможность совершать ошибки, что в реальной жизни недопустимо. В этом плане другие интерактивные или традиционные методы обучения составить полноценную конкуренцию VR-технологии не могут.

Преимущества виртуальной технологии в образовательном процессе весьма ясны. Приведем основные из них:

- наглядность – возможность детализировать предмет или объект изучения, а так же неограниченно с ним взаимодействовать;
- вовлеченность – погружение в виртуальный мир на 360º во всех смыслах позволяет оставаться полностью сосредоточенным на процессе;
- самостоятельность – простор выбора действия даёт студентам возможность самим выстраивать обучение внутри игрового процесса в привычном для них темпе, формате и т. д.
- фокусировка – внутри VR-пространства студент один на один с программой, и его ничего не отвлекает;
- экономичность – технология позволяет в «цифре» увидеть дорогостоящие производственные процессы или объекты, и это не требует временных и финансовых затрат;
- безопасность – взаимодействие с высоким напряжением или опасными производствами в виртуальной реальности совершенно безопасно.

Но нельзя упускать из внимания, что технология виртуальной реальности даже в современных реалиях не является общедоступной. Она по популярности значительно уступает традиционным методам обучения, и этому есть свои причины. Поэтому целесообразно обратить большее внимание на недостатки VR-технологии и её влияние на человека. Среди минусов технологии можно выделить основные:

- высокая стоимость – сама технология стоит крайне дорого, а помимо неё для полноценного использования необходимо приобрести целый ряд физических устройств;
- сложность создания новых сценариев – ограниченность сценариев и высокие затраты на их создания не позволяют VR-технологии быстро расширяться;
- технические несовершенства – сбои, нарушение детализации, нарушения в работе программы и другие отклонения;
- мышление – при использовании VR-технологии происходит потеря связи с реальностью;
- влияние на здоровье – после использования систем виртуальной реальности у некоторых пользователей наблюдаются ухудшение самочувствия, недомогание, головная боль и другие неприятные симптомы. Происходит это из-за разницы в качестве изображения и во времени между поворотом головы и отображения новой картины виртуальной реальности [4]. С этой проблемой сейчас борются производители, но она еще не решена окончательно.

Самым значимым недостатком можно назвать высокую стоимость оборудования. Поэтому интегрировать виртуальную реальность в учебный процесс могут себе позволить только крупные компании или вузы, имеющие для этого техническую базу и финансовую поддержку. Но наиболее спорным является недостаток технологии, связанный с влиянием на здоровье и психику человека. В образовательный процесс VR-технология встраивается медленно, и в рамках обучения студент не так много пользуется технологией, чтобы она могла нанести физический вред или вызвать привыкание. Но все же есть один нюанс. VR-технология не является панацеей в обучении инженеров, более того, злоупотребление виртуальной реально-

стью может нести вред студенту. В равной степени, как технология помогает избежать опасности на цифровом производстве, так и заставляет терять ощущение реальности этой опасности на настоящем производстве.

На данный момент сложно утверждать, что тренировки инженеров на VR-тренажерах после приводили к негативным последствиям при работе на реальном производстве. Технология использовалась недостаточно долго, и необходимых исследований еще не было сделано. Однако можно обратиться к случаю с пожарными из США, которые при использовании VR-тренажеров, демонстрировали отличный результат по итоговому тестированию. Но в жизни, столкнувшись с реальным пожаром, они терялись [5]. Постоянная отработка навыков на определенном производстве «в цифре» не даёт гарантии, что студент так же слаженно сработает в реальности, поэтому любой VR-тренажер после себя требует инструктаж и прохождение практики в реальности.

В заключении хочется отметить, что виртуальная реальность – это крайне эффективная обучающая среда, которая способна в краткие сроки предоставить студенту все необходимые условия для взаимодействия с «реальными» объектами производствами. Что важно, для отечественного образование внедрение VR-тренажеров повысит увлеченность и самостоятельность студентов в обучении. Но при этом у данной технологии есть два ключевых недостатка: стоимость и влияние на оценку реальных ситуаций. Как и любое нововведение, виртуальная реальность открывает новое возможности в обучении, и существенно влияет, как и на сам процесс, так и на его участников. А об долгосрочных последствиях этого влияния мы сможем судить через неопределенное время, надеюсь, не слишком долгое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровков А.И. и др. Глобальные тренды в инженерном образовании // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. – Т. 9, № 4. – С. 58–76.
2. Rakhmonov A.B. The introduction of virtual reality In the educational process: advantages and disadvantages // European science. – 2020. – Vol. 5 (54). – P. 39–41.
3. Ленсу Я.Ю. На пути к виртуальной реальности // Инновационные образовательные технологии. – 2014. – № 1. – С. 71–76.
4. Monaha T. Virtual Reality for Collaborative E-learning // T. Monaha, G. McArdle, M. Bertolotto // Computers and Education. – 2006.
5. Bobby Carlton US Fire Administration Advocates The Use Of VR For Firefighter Training (July 27, 2020). URL: https://vrscout.com/news/us-fire-administration-vr-firefighter-training/ (дата обращения 07.11.2022)

СРАВНЕНИЕ ДВУ- И ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТЫХ ОБЛАСТЯХ ПРИ НАЛИЧИИ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

Суан Хоанг Кхоа Лэ

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А0-11

Научный руководитель: М.А. Шеремет, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова, ТПУ

Введение

Естественная конвекция в замкнутых областях становится интерес ом многих ученых благодаря ее широкому применению во многих областях, таких как отопление и вентиляция жилых помещений, охлаждение электронного оборудования, солнечная энергетика, хранение

радиоактивных отходов и т. д. Интенсификация естественной конвекции является одной из самых важных задач для ученых. Одним из методов интенсификации конвективного теплообмена является применение реберной структуры. Он получает широкое применение в таких важных областях, как энергетика, электронника, энергетическое приборостроение и т. д. Большое количество работ по естественной конвекции в двумерных замкнутых областях при наличии реберной структуры было изучено за прошедшие десятки лет, например, Bilgen [1] численно изучал естественную конвекцию в квадратной полости с одним тонким ребром на левой стенке; Kiwan [2] представил простой метод анализа характеристик пористого ребра.

Естественная конвекция в трехмерных областях также была изучена интенсивно, но в меньшем количестве: естественная конвекция в трехмерной кубической полости с одним ребром на горячей грани была численно исследована Frederick и Moraga [3]; da Silva и Gosselin [4] численно нашли идеальную конфигурацию прямоугольного ребра на горячей стенке кубической полости и т. д.

В данной работе проводится сравнение двумерной и трехмерной моделей естественной конвекции в замкнутых областях при наличии реберной структурой (твердых и пористых ребер) при большом диапазоне числа Рэлея ($Ra = 10^4 – 10^6$). Ключевые параметры для сравнения являются схемой движения жидкости и распределением температуры внутри полости, а также интенсивность теплообмена.

Постановка задачи

Область решения в двумерной постановке задачи показывается на рис. 1. Она представляет собой квадратную полость с размером сторон L с двумя вертикальными стенками, имеющими разные температуры T_h и T_c ($T_h > T_c$) и двумя адиабатическими горизонтальными стенками. На левой стенке располагается одно ребро (твердое или пористое), имеющее высоту h=0,1L и длину l=0,4L. Ребро находится на высоте d=0,4L от нижней стенки полости.

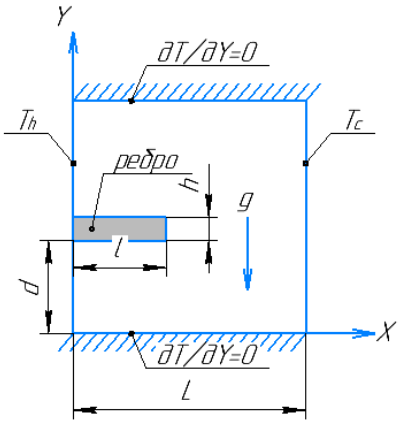


Рис. 1. Квадратная полость с одним твердым или пористым ребром

Область решения в трехмерной постановке задачи показывается на рис. 2. Она является кубической полостью с размером сторон L. На двух боковых стенках поддерживаются постоянные, но разные температуры T_h (при $y = 0$) и T_c (при y = L) ($T_h > T_c$). Другие стенки делаются теплоизолированными. На горячей стенке на высоте d=0,4L от нижнего основания полости располагается одно ребро (твердое и пористое), имеющее высоту h=0,1L, длину l=0,4L и ширину L.

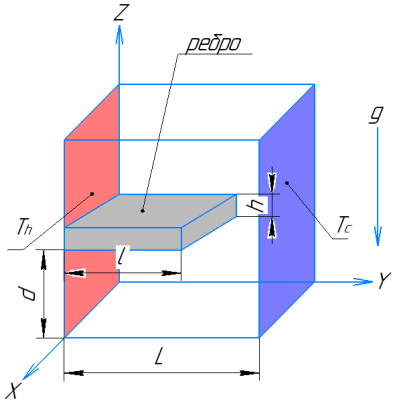


Рис. 2. Кубическая полость с одним твердым и пористым ребром

Нестационарный процесс конвективного теплообмена в двумерной постановке с учетом приближения Буссинеска описывается системой дифференциальных уравнений, состоящих из трех уравнений: уравнения Пуассона, уравнения завихренности и уравнения энергии. В безразмерных переменных в системе «функция тока–завихренность» они принимают вид:

- внутри жидкой полости:

$$\nabla^2\psi = -\omega$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial\tau} + (\vec{V}.\vec{\nabla})\omega = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\nabla^2\omega + \frac{\partial\theta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\theta=\frac{1}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\nabla^2\theta.$$

- внутри твердых ребер:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{a_s/a_f}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\nabla^2\theta$$

- внутри пористых ребер:

$$\nabla^2\psi=-\omega$$

$$\varepsilon\frac{\partial\omega}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\omega=\varepsilon\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\nabla^2\omega-\frac{\varepsilon^2}{Da}\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\omega+\varepsilon^2\frac{\partial\theta}{\partial x}$$

$$\gamma\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\theta=\frac{a_{eff}/a_f}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\nabla^2\theta.$$

Начальные и граничные условия:

$$\tau=0\rightarrow\psi=\omega=0,\theta=0{,}5$$

$$\tau>0\rightarrow x=0,0\le y\le1,\psi=0,\frac{\partial\psi}{\partial x}=0,\theta=1$$

$$x=1,0\le y\le1,\psi=0,\frac{\partial\psi}{\partial x}=0,\theta=0$$

$$y=0\text{ и }y=1,0\le x\le1,\psi=0,\frac{\partial\psi}{\partial y}=0,\frac{\partial\theta}{\partial y}=0$$

- на поверхности твердых ребер:

$$\psi=0,\frac{\partial\psi}{\partial n}=0,\theta_s=\theta_f,\frac{\partial\theta_f}{\partial n}=\frac{\lambda_s}{\lambda_f}\frac{\partial\theta_s}{\partial n}$$

- на поверхности пористых ребер:

$$\psi_p=\psi_f,\frac{\partial\psi_p}{\partial n}=\frac{\partial\psi_f}{\partial n},\omega_p=\omega_f,\frac{\partial\omega_p}{\partial n}=\frac{\partial\omega_f}{\partial n},\theta_p=\theta_f,\frac{\partial\theta_f}{\partial n}=\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f}\frac{\partial\theta_p}{\partial n}$$

Нестационарный процесс конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска внутри кубической полости описывается тремя же уравнениями, как и в случае с двумерной полостью. В безразмерных преобразованных переменных «скорость–вектор завихренности» эти уравнения записываются как:

- внутри жидкой полости:

$$\frac{\partial\vec{\omega}}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\vec{\omega}=(\vec{\omega}.\vec{\nabla})\vec{V}+\nabla\theta+\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\nabla^2\vec{\omega},$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{V}=0,$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\theta=\frac{1}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\nabla^2\theta.$$

- внутри твердых ребер:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{a_s/a_f}{\sqrt{Ra\cdot Pr}}\nabla^2\theta$$

- внутри пористых ребер:

$$\varepsilon\frac{\partial\vec{\omega}}{\partial\tau}+(\vec{V}.\vec{\nabla})\vec{\omega}=(\vec{\omega}.\vec{\nabla})\vec{V}+\varepsilon^2\nabla\theta+\varepsilon\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\nabla^2\vec{\omega}\ -\frac{\varepsilon^2}{Da}\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}\vec{\omega}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0,$$
$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\vec{V}.\vec{\nabla})\theta = \frac{a_{eff}/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta.$$

Начальные и граничные условия:

$$\tau = 0 \to u = v = w = \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \theta = 0{,}5$$
$$\tau > 0 \to x = const, u = v = w = 0, \omega_x = 0, \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$$
$$y = 0, u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 1$$
$$y = 1, u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 0$$
$$z = const, u = v = w = 0, \omega_x = -\frac{\partial v}{\partial z}, \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z}, \omega_z = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$$

- на поверхности твердых ребер:

$$u = v = w = 0, \theta_s = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_s}{\partial n}$$

- на поверхности пористых ребер:

$$u_p = u_f, v_p = v_f, w_p = w_f, \omega_{x_p} = \omega_{x_f}, \frac{\partial \omega_{x_p}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{x_f}}{\partial n}, \omega_{y_p} = \omega_{y_f}, \frac{\partial \omega_{y_p}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{y_f}}{\partial n},$$
$$\omega_{z_p} = \omega_{z_f}, \frac{\partial \omega_{z_p}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{z_f}}{\partial n}, \theta_p = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_p}{\partial n}.$$

Система дифференциальных уравнений для дву- и трехмерной моделей вместе с их граничными условиями решается методом конечных разностей. Языковая программа для написания кода – Microsoft Visual Studio 2017. Условие сходимости для итерационных методов составляет 10^{-6}, а шаг по времени – 10^{-3}. Верификация правильности написания кода была проведена путем сравнения результатов, полученных в данной работе, с результатами, полученными в работе других авторов для следующих тестовых задач: чистая полость; полость, полностью и частично заполненная пористым материалом; полость при наличии теплопроводной стенки. Анализ влияния сетки также был проведен, чтобы найти наиболее подходящую сетку для расчета. Результаты анализа показывают, что сетки 100×100 и 100×100×100 являются оптимальными для дву- и трехмерной моделей соответственно.

В ходе решения было проанализировано движение и распределение температуры внутри полости с твердыми и пористыми ребрами в дву- и трехмерном пространстве. После чего были выявлены различия между схемами движения жидкости и распределенем температуры, а также среднее число Нуссельта для этих моделей. Результаты показывают, что существенные различия в среднем числе Нуссельта в дву- и трехмерном пространстве наблюдаются в полости с твердыми ребрами. Трехмерная полость с твердыми ребрами лучше интенсифицирует теплообмен на 45–55 % по сравнению с двумерной полостью с твердыми ребрами, в то время эта разница составляет только 8–10 % для полостей с пористыми ребрами. Также было замечено, что разница между дву- и трехмерной моделями растет по мере увеличения числа Рэлея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilgen E. Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48. – P. 3493–3505.
2. Kiwan S. Thermal analysis of natural convection porous fins // Transport in Porous Media. – 2007. – Vol. 67. – P. 17–29.
3. Frederick R.L., Moraga S.G. Three-dimensional natural convection in finned cubical enclosures // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. Vol. 28. – P. 289–298.
4. Da Silva A.K, Gosselin L. On the thermal performance of an internally finned three-dimensional cubic enclosure in natural convection // International Journal of Thermal Sciences. – 2005. – Vol. 44. – P. 540–546.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL ENERGY IN THE TOMSK REGION

K.D. Kulikov, S.V. Lavrinenko, S.A. Tsybulsky

Tomsk Polytechnic University,
ISHE, REC I.N. Butakova, group 5011

Scientific supervisor: S.A. Tsybulsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of REC I.N. Butakova ISHE TPU

According to the UN [1], the world is on the verge of a climate catastrophe. The time needed to prevent this catastrophe is running out. On the one hand, there is a constant increase in energy demand, and on the other, increasing greenhouse gas emissions into the environment, which is the main cause of global warming.

The goal of global energy trends is the development of renewable energy sources (RES) [2].

Geothermal energy is a permanent and reliable source of energy, independent of weather or seasonal fluctuations, unlike solar and wind energy. Geothermal heating and cooling systems can provide buildings with inexpensive resources and, as a rule, have a longer service life, reliability and stability compared to sources such as wind and sun [3]. Geothermal energy is the heat stored beneath the Earth's surface. It can be used to provide heat or to generate electricity and, therefore, is one of the energy sources available to achieve “net zero” [4]. Currently, less than 1.0% of the potential of geothermal energy of the Earth is used, the cost of which is one of the lowest among various power generation technologies according to the statistics of the US EIA (Table 1) [5, 6].

Table 1. Average aligned cost of electricity for non-renewable and alternative fuels

Type of power plant	Cost*, $ / kW.hour
Coal	0,12–0,13
On natural gas	0,043
Atomic	0,093
Wind (on land)	0,038
Wind (offshore)	0,106
Solar (photovoltaic)	0,036
Solar (thermal energy)	0,165
Geothermal	0,040
On biomass	0,090
Hydroelectric power station	0,039

Geothermal power plants in Russia

Large reserves of geothermal resources are concentrated in the Russian Federation (Fig. 1) [7], in such regions as the Pre-Caucasus, Western and Eastern Siberia, Kamchatka, the Kuril Islands, Sakhalin, and the Far East [2]. According to some estimates, the thermal potential of geothermal resources is equivalent to 1702 trillion tons of conventional fuel (t.u.t.) [8]. In 2021, the geothermal power industry of the Russian Federation had an installed electrical capacity of 74 MW, and a thermal capacity of 110 MW [9].

Currently, geothermal resources for generating electric energy in Russia are used in the Kamchatka Territory and the Kuril Islands.

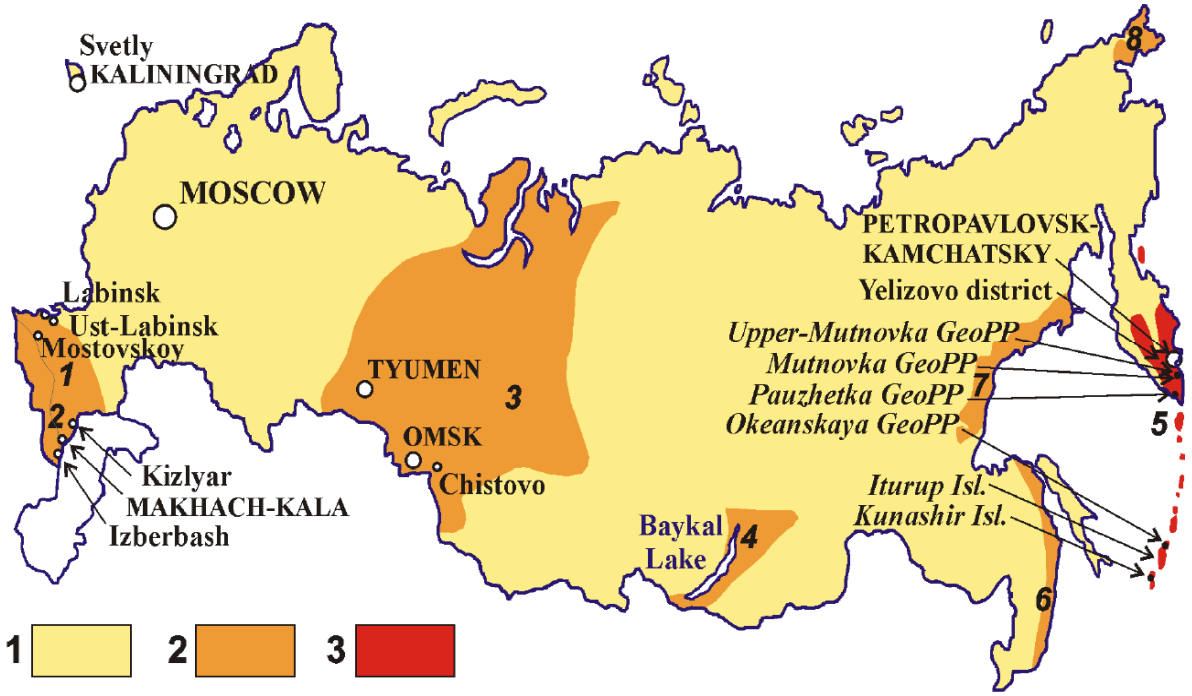


Fig. 1. Promising geothermal areas of Russia: 1 – The North Caucasus (high mountain zone), 2 – the North Caucasus (platform area), 3 – Western Siberia, 4 – the territory adjacent to Lake Baikal, 5 – the Kuril-Kamchatka region, 6 – Primorye, 7-8 – the Okhotsk-Chukchi volcanic belt

Geothermal energy of the Tomsk region

The West Siberian oil and gas-bearing megabassane has large reserves of thermal waters. A significant part of these sources is concentrated on the territory of the Tomsk region. The central part of the Tomsk region has the greatest geothermal potential. (Fig. 2) [10].

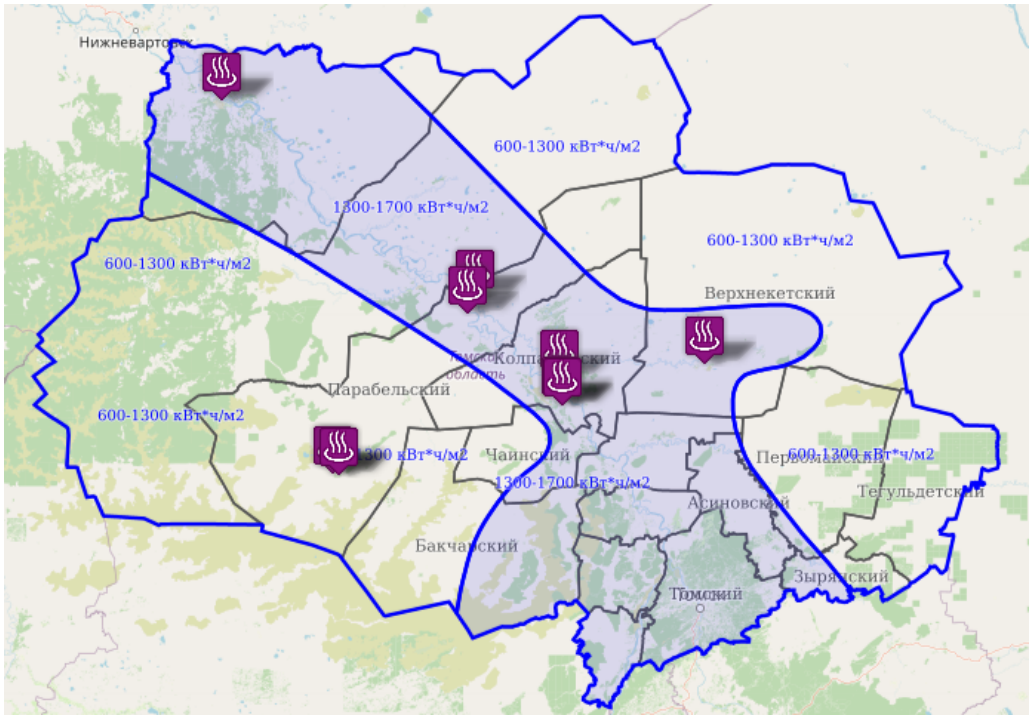


Fig. 2. Map of geothermal sources of the Tomsk region

One of the examples of the implementation of the use of geothermal energy in the Tomsk region is a kindergarten in the village of Turuntaevo (60 km from Tomsk). It was opened in June 2013 in the village of Turuntaevo, Tomsk region and is equipped with a geothermal heating system. According to their energy characteristics, the geothermal waters of the Tomsk region are low-potential and medium-potential, but they can be used not only for heating purposes, but also for generating electricity. Already, work is underway in Tomsk on the development of geothermal energy [11, 12].

Conclusion

Global warming is one of the most serious problems of modern society. In such conditions, one of the most promising ways to combat it is the use of alternative energy sources, for example, geothermal. Despite the fact that there are no high-temperature geothermal sources in the Tomsk region, modern developments make it possible to provide consumers with electric and thermal energy at relatively low temperatures, due to the implementation of the organic Rankine cycle [13].

REFERENCE

1. The Sustainable Development Goals Report 2022. URL: https://unstats.un.org/sdgs/report/2022 (дата обращения 19.11.2023).
2. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бутузов, Г.В. Томаров, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // Теплоэнергетика. – 2022. – № 1. – С. 3–17. doi: 10.1134/S004036362112002X.
3. A review on clean energy solutions for better sustainability / I. Dincer and C. Acar // International Journal of Energy Research. – 2015. – V. 39. – P. 585–606. doi: 10.1002/er.3329.
4. The role of regulation in geothermal energy in the UK / A. McClean and O. W. Pedersen // Energy Policy. – 2023. – V. 173. – P. 113378. doi: 10.1016/j.enpol.2022.113378.
5. Краткий обзор современного состояния и тенденций развития геотермальной энергетики / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. – 2023. – № 2. – С. 37–46. doi: 10.56304/S004036362302008X.
6. Cost comparison of energy sources 2023. URL: https://www.renewable-energysources.com (дата обращения 19.11.2023).
7. Geothermal Development in Russia: Country Update 2005-2009 / K.O. Povarov, V.B. Svalova // Proc. World Geotherm. Congr. – 2010. – С. 25–29.
8. Анализ технологий преобразования геотермальной энергии в электрическую // Г. Пешков. 2021. URL: https://professionals4-0.ru/project/gazprom-neft-1464 (дата обращения 19.11.2023).
9. Геотермальная энергетика: обзор российских научных школ / В.А. Бутузов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 11. – С. 36–40.
10. Возобновляемые источники энергии в Томской области. 2023. URL: https://green.tsu.ru/tomres (дата обращения 19.11.2023)
11. Лавриненко С.В., Цибульский С.А., Янковский С.А. Геотермальная энергетика и перспективы ее развития в мире и Томской области. – М.: Знание-М, 2023. – 83 с. doi: 10.38006/00187-468-3.2023.1.83.
12. Геотермальная установка энергоснабжения потребителей: пат. Рос. Федерация, No 2804793 C1, заявл. 16.03.2023; опубл. 05.10.2023. Бюл. No 28. – 5 с.
13. Cycle diagram of geothermal energy / S.A. Yankovsky, S.V. Lavrinenko, S.A. Tsibulskiy, N.S. Yankovskaya, D.L. Gamov // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. – 2023. – V. 334. – No. 7. – P. 122–136. doi: 10.18799/24131830/2023/7/4130.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИКОПТЕРОМ, СМОДЕЛИРОВАННЫМ В СРЕДЕ MATLAB

Фам Чонг Хай[1], А.М. Гунько[2], Б.И. Батомункуев[2], А.И. Салмин[2]

Томский политехнический университет,
ИШЭ, студент-аспирант[1]; студенты гр. 5А07[2]

Научный руководитель: А.А. Шилин, профессор, ТПУ

Исследованы переходные процессы прямого и плавного пуска BLDC-мотора с целью оценки влияния их переходных процессов на датчик акселерометра в мультикоптере, приведены формулы и выражения показывающие, что момент возникающий на оси напрямую влияет на силу, следовательно, на сам акселерометр. Полученная форма этих колебаний момента внесена в дополнительную модель на датчик акселерометра, что позволяет исследовать фильтр Калмена.
Ключевые слова: беспилотного летательного аппарата, мультикоптер, вектор, БЛА, автоматическая система управления полётом, фильтры Калмана.

The transient processes of the direct and soft start of the BLDC motor were studied in order to assess the influence of their transient processes on the accelerometer sensor in the multicopter; formulas and expressions were given showing that the moment arising on the axis directly affects the force, and therefore the accelerometer itself. The resulting shape of these torque oscillations is included in an additional model on the accelerometer sensor, which makes it possible to study the Kalman filter.
Keywords: unmanned aerial vehicle, multicopter, vector, UAV, automatic flight control system, Kalman filters.

Введение

При создании систем управления движением беспилотных летательных аппаратов (БЛА), манипуляторов, автономных мобильных роботов, систем позиционирования человека возникает необходимость решения задачи оценки вектора состояния объекта, содержащего пространственные координаты и скорости движения. В рамках работы над проектом [1], разрабатывается и производиться система управления мультикоптера на основе математического описания динамики движения БЛА, предложенного в работе [2]. Предыдущая работа не описывает качества сигнала акселератор.

Для управления подобным блоком реализуется использование ПД регулятора с простым способом управления, что упрощает управление и реализацию. Нужно учесть, что в жизни реализация невозможна из-за наличия шумов. Для оценки шумов, рассмотрим математическую модель прямого и плавного пуска двигателя с постоянными магнитами с BLDC-мотора, использующийся в устройствах (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Параметры BLDC-мотора AC2830-358

$P_{2н}$, Вт	$n_н$, об/мин	$U_п$, В	I_{max}, А	p	m, кг
189,3	6500	7,4	13,3	16	0,062
R, Ом	L, Гн	$J_{дв}$, кг·м^2	c_e	c_M	$M_{дв}$
2,491	0,005	$20{,}934 \cdot 10^{-6}$	0,0113	0,0112	0,278

Шум, наводящийся на акселерометре прямо пропорционален силе (рис. 1). В процессе управления можно использовать обе переменные, но они не компенсируют наличия шумов в переходном процессе (1 и 2). Для устранения шумов можно использовать фильтр Калмана, так как математическая модель описана хорошо и важно учесть, что чем лучше она описана, тем более четко формируется истинный сигнал в шумах.

$$F = mv\omega \quad (1)$$

$$M = J\varepsilon = J\frac{d\omega}{dz} \quad (2)$$

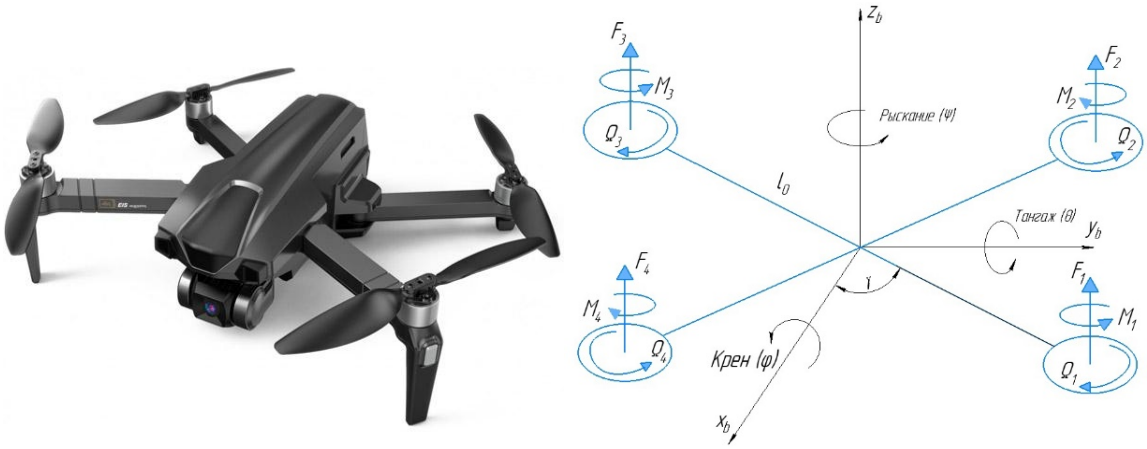


Рис. 1. БЛА, реализованный на основе BLDC-моторов на постоянных магнитах и системы координат, силы и моменты, действующие на мультикоптер

При построении системы оценки координат на основе фильтра Калмана, как правило, используется кинематическая или упрощённая динамическая (с постоянными ускорениями) модель движения аппарата. Зачастую не рассматриваются входы модели, соответствующие реальным управляющим воздействиям, подаваемым на объект. Цель данной работы – создание системы оценки ориентации и положения БЛА с использованием фильтра Калмана. Предложено использовать линейный фильтр Калмана для быстрого контура стабилизации ориентации и расширенный фильтр Калмана для подсистемы удержания заданного местоположения. Эффективность разработанной системы управления подтверждена экспериментальными результатами по управлению полётом квадрокоптера в помещении. Проблемой фильтра Калмана есть требование, что шум должен быть Гаусовым или иным, важно чтобы математическое ожидание было равно нулю.

Объект представлен в виде схемы, собранной на операционных усилителях реализующий дифференциальные уравнения, описывающие мультикоптер. Согласно статье [2] эта плата не учитывает шум, возникающий в двигателях, поэтому сам объект будет представлен реальной частью, реализованной на операционных усилителях (ОУ) и дополнительной математической моделью, которая отражает процессы в двигателе

Собрана математическая модель BLDC – мотора, где управление задается скачкообразно и плавно. Модель собрана в программном пакете Simulink, реализующая простой фильтр Калмана в виде встроенный блока MATLAB функции [2], приведена на рис 2.

Исходя из вышеизложенного, фильтр Калмана оптимизирует работу системы стабилизации БПЛА за счёт сглаживания шумов и оценки сигнала. Его применение в системах управления БПЛА является актуальным и экономически оправданным

Примечание: значения дисперсии умножены на коэффициент *K*, для того чтобы графики имели общие амплитуду (масштаб). Поскольку нас интересует только форма сигнала и насколько смещено математическое ожидание [3].

По полученным характеристикам можно произвести анализ, что из этого всего фильтр Калмана в самом простом случаи, нужно подстраивать оценивая дисперсию, где матрица измерения – *R*, то при пересчете её, это будет является числом – *R*, что является дисперсией. Если активно управлять двигателем, менять скорость, то возрастет дисперсия и мы можем это экстраполировать. Дисперсия поднимается в полтора раза при скачкообразном сигнале,

при плавном пуске в полтора раза меньше. Математическое ожидание при скачкообразном сигнале приобретает смещение, что на работу фильтра Калмана будет влиять негативно. Оно влияет на качество управления даже при настроенном фильтре [4].

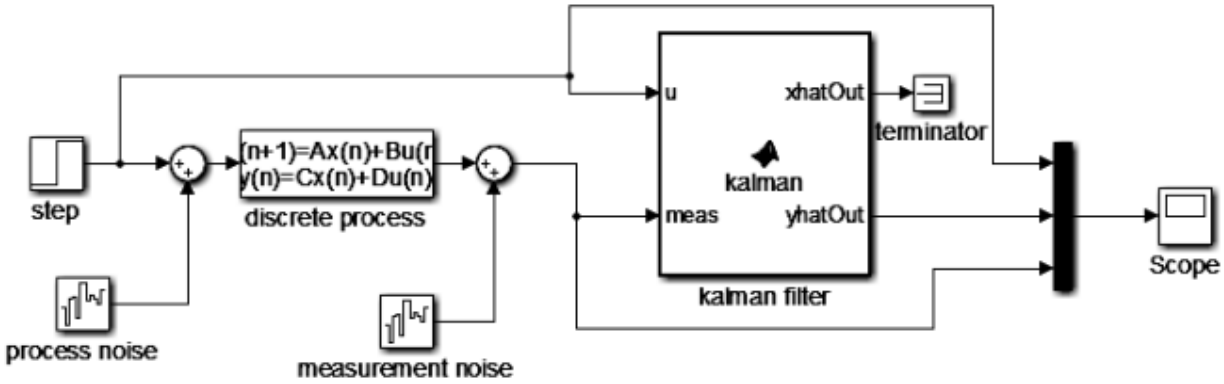


Рис. 2. Модель фильтра Калмана

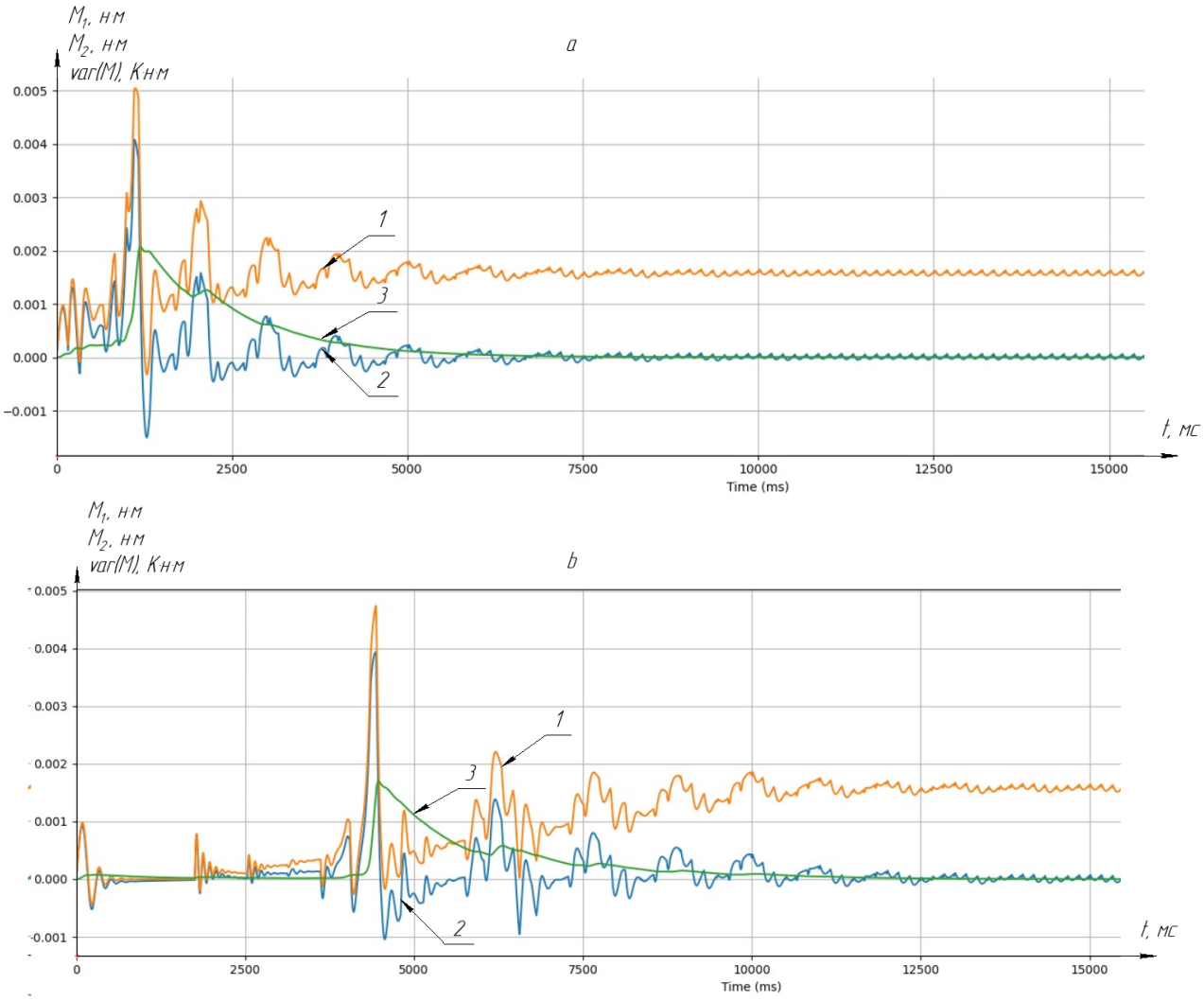


Рис. 3. сигнал управления: a – скачкообразно (1 – момент математического ожидания, 2 – шума который поступает на конструкцию от двигателя (момент тряски), 3 – дисперсия); b – плавно (1 – момент математического ожидания, 2 – шума который поступает на конструкцию от двигателя (момент тряски), 3 – дисперсия)

Смоделировав работу BLDC – мотора на предмет, как себя ведет момент и математическое ожидание момента (математическое ожидание используем, так как оно является источником шума). При плавном пуске математическое ожидание вокруг нуля больше, при скачкообразном математическом ожидание смещается. Важно отметить, что ПЛК работает на частотах 1 КГц, по математической модели работы BLDC – мотора мы можем посмотреть периодические процессы и проэмулировать этот сигнал, то есть при получение переходного процесса, мы можем из нескольких синусоид аппроксимировать сигнал с частотой 500 Гц [5]. Получив колебательную характеристику со смещением и эту ошибку, мы можем внести в измерения, кроме белого шума. Тогда мы можем использовать фильтр Калмана на данную математическую модель.

Заключение

В данной статье получили переходные процессы прямого и плавного пуска BLDC-мотора с целью оценки влияния их переходных процессов на датчик акселерометра в мультикоптере, с применением фильтра Калмана. Проанализировав их, предполагаем, что это может повлиять на качество управления даже при настроенном регуляторе. Для этого планируется сборка стенда, для исследования работы фильтра Калмана. На таком лабораторном стенде студенты могут исследовать работу фильтра Калмана, подбирая как параметры динамического объекта, так и дисперсии по шуму измерения сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батомункуев Б.И., Гунько А.М., Математическое описание динамики движения беспилотных летательных аппаратов на примере мультикоптера // Программная инженерия: Современные тенденции развития и применения (ПИ-2023): Сборник материалов VII-й Всероссийской научно-практической конференции (16 октября 2023 года), Юго-Зап. Гос. ун-т. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2023. – С. 103–105.
2. Загордан А.М. Элементарная теория вертолёта. – М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1955.
3. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Попов Н.И. Изучение движения квадрокоптера в вертикальной плоскости // Актуальные вопросы технических наук (II): материалы международной заоч. науч. конф. – Пермь: Меркурий, 2013. – С.66–69.
4. Pounds P., Mahony R., Corke P. Modelling and Control of a QuadRotor Robot. – Canberra: Australian National University, 2008. – 10 p.
5. Dierks T., Jagannathan S., Neural Network Control and Wireless Sensor Networkbased Localization of Quadrotor UAV Formations // Aerial Vehicles. – 2009. – P. 601–620.

ПРОЕКТ ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ КЛИМАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

А.М. Альчимбаева

Сибирский государственный медицинский университет,
ЛФ, ЛД, гр. 1334

Научный руководитель: А.А. Меньшикова, к.ф.н., ассистент СибГМУ

Проблемы разумной организации природопользования и воздействия эксплуатации энергетических ресурсов на состояние окружающей среды является актуальной проблемой. Вопросы изменения климата освещаются в ряде источников [1, 2]. Тема изменения экологии под воздействием климатических изменений становится своего рода вечной в вопросах вза-

имоотношении эксплуатации энергетических ресурсов и климата. Можно порассуждать о вероятности адаптации климата, не смотря на активное воздействие потребителей ресурсов. Тем не менее, абсолютная уверенность по данному вопросу отсутствует. Проводимые эксперименты имеют теоретический характер. Лабораторные эксперименты, направленные на подсчет вероятной степени изменения климатических условий при исполнении методики моделирования ситуаций демонстрируют различные результаты (на основании проекта среды с идентичными условиями). Невозможно с полной уверенностью утверждать, что в глобальных масштабах сохранится положительная тенденция, либо сохранится нейтральный статус.

Планирование защиты окружающей среды от воздействия разрушительных факторов имеет долгую историю. В настоящее время предлагаются оптимальные проекты [3]. Вместе с тем, проявляется устойчивая тенденция к развитию подобных проектов, разработке новых, что представляет собой интерес не только исключительно практический интерес, но и способствует выявлению новых оснований для развития науки, ее эвристического потенциала.

В русле развития инновационного подхода предлагается разработать новый проект мониторинга окружающей среды. В целях оптимизации существующих механизмов оценки состояния окружающей среды рекомендуется учитывать новые параметры и аспекты риска, а также создать систему оперативного сбора статистических данных. При использовании имеющегося опыта можно провести успешные манипуляции не только со сбором статистических данных, но и предоставить возможность автоматизации предложения решения проблем на основании имеющегося опыта. Таким образом, снимается проблема когнитивной нагрузки на оператора. Подобная стратегия является успешной и оправданной с позиции эффективности, долгосрочности действия и окупаемости, поскольку сочетает в себе все необходимые качества емкости, оперативности, скорости обработки информации и принятия решений, помощи в принятии решений. В отношении внедрения новейших аспектов, которые необходимо учитывать при обработки информации и статистических данных предоставляется возможность использовать достижения современной науки. В первую очередь необходимо рассматривать функциональный динамический аспект изменения. В этой связи предлагается изменить представление об объекте. Помимо статистических данных рекомендуется оценивать представления о вероятностном изменении, в которых уже будут предусмотрены аспекты возможных рисков. Меняется представление о синергетических свойствах объектов и аспектов. Они становятся системными. Т. е. в плане выработанных диагностических аспектов учитывается их систематичность. В определении объективных показателей изменения климата необходимо учитывать возможный эффект воздействия выработки гидроэнергоресурсов на почвы. Подобные категории должны быть включены в опции программы. С другой стороны, объективными показателями изменения климата должны быть такие феномены, как изменение динамики воздушных масс, перспектива разрушения геологических объектов, таяние ледников.

Проект, направленный на совершенствование и изменение, связан с идеей пассивного изменения климата и пассивного внедрения аспектов противодействия изменению климата. Противодействие изменению климата под воздействием гибро-электростанций можно осуществлять в ситуации разумной изоляции. Таким образом, предлагается устанавливать объекты деструктивного воздействия в определенных зонах с учетом характера ландшафта, геохимии почв, передвижения воздушных масс и т. п.

Проведение эвристических экспериментов в целях установить новые технологии защиты окружающей среды требуют неустанного поиска решений. В настоящее время сложно восстановить полную цепь разработки и реализации проекта, что, тем не менее, не снижает эвристической ценности предпринимаемых попыток. Рассуждая о возможности дальнейшего развития технологий, методом «научного тыка» предлагается разработать и инициировать

проекты, основанные на принципе логистического подхода. К логистическим методам относится также попытка замедлить процессы на основании автохтонных механизмов и принципов, обусловливающих эволюционные процессы, так и сферу непосредственного воздействия. Теоретически необходимо установить стратегию снижения воздействия с применением усовершенствованного оборудования (возможно, фильтров). С другой стороны, представляется возможным использования функционального посредника, например, ретроспективное воздействие динамических воздушных масс, бактерий, поглощающих (радиоактивные) отходы и т. п.

Использование принципа логистического подхода представляется выходом из ситуации в связи с большим количеством потенциально возможных решений. Предполагается, что идея создания произвольных препятствий любого вида может способствовать снижению негативного воздействия производства на окружающую среду.

Результаты подобных проектов могут использоваться также в диагностических целях. На каждом новом этапе проектирование попытки решения проблемы открывают новые горизонты, объекты, для развития идей, а также инженерной мысли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Causes and Effects of Climate Change // Causes of climate change. URL: https://www.un.org/ru/climatechange/science/causes-effects-climate-change (дата обращения: 27.09.2023).
2. Показеев К.В. Экологические проблемы энергетики и актуальные проблемы возобновляемой энергетики // Процессы в геосредах. – 2022. – №. 4. – С. 1874–1884.
3. Гильденскиольд С.Р., Крылова Т.И., Левакова И.В. Проблемы применения «зеленой энергетики» в аспекте политизации экологических проблем // Современные региональные проблемы географии и экологии. Материалы V Международной научно-практической конференции. – Москва: Московский государственный областной университет, 2022. – С. 14–25.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ EXCEL ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Д.А. Смирнов

Ивановский государственный энергетический университет, ТЭФ, ПТЭ, гр. 3-4

Научный руководитель: Т. Е. Созинова, к.т.н., доцент ТОТ, ТЭФ, ИГЭУ

Целью данной научной работы является создание математической программы на базе Excel, рассчитывающей коэффициент теплоотдачи в условиях свободной конвекции для тел разных форм с использованием различных методик и последующим нахождением тепловых потоков.

С помощью данной программы можно быстро и корректно рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой энергии в условиях естественной конвекции в инженерных расчётах теплотехнического оборудования, например, паровых котлов, ядерных реакторов, рекуператоров и т. п. Можно определить зависимость коэффициента теплоотдачи от какого-либо параметра, сравнить результаты расчётов по методикам нескольких авторов между собой.

В работе организован автоматический расчёт средствами Excel коэффициента теплоотдачи по методикам М.А. Михеева [1], В.П. Исаченко [1], И.М. Михеевой [1], Ф.Ф. Цветкова [4], А.И. Леонтьева [3], П.Л. Кириллова [2] для вертикальной и горизонтальной пластин, вертикального и горизонтального цилиндров, шара и щелевого пространства; с возможным учётом

угла наклона горизонтальной пластины, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз; расчётом коэффициента теплоотдачи объекта реальной формы для следующих текучих сред: воздух, вода, трансформаторное масло, масло МС-20, масло МК, жидкий аммиак и дымовые газы.

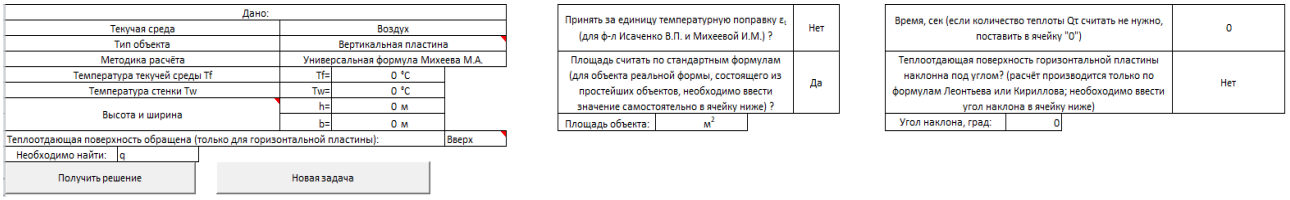


Рис. 1. Внешний вид расчётного файла

Для расчёта необходимо выбрать в раскрывающемся списке наименование текучей среды, методику для расчёта коэффициента теплоотдачи, а также тип объекта, около которого происходит перенос теплоты конвекцией (для горизонтальной пластины дополнительно определить сторону обращения теплоотдающей поверхности). Далее пользователю необходимо вручную ввести температуру теплоносителя, температуру и размеры поверхности теплообмена, выбрать определяемую физическую величину (коэффициент теплоотдачи или один из тепловых потоков).

После ввода необходимых данных автоматически будут вычислены определяющие параметры, найдена площадь поверхности объекта. С помощью встроенных в программу таблиц теплофизических свойств будут определены при определяющей температуре: критерий Прандтля, кинематическая вязкость, коэффициент объемного расширения, коэффициент теплопроводности текучей среды и критерий Прандтля, соответствующий температуре твердой поверхности (при необходимости значения физических параметров будут проинтерполированы). Полученные данные будут сведены в таблицу и пользователь увидит решение задачи. В случае невозможности расчёта (если критерий Рэлея не входит в необходимый для расчёта по соответствующей методике диапазон) появится предупреждающее сообщение.

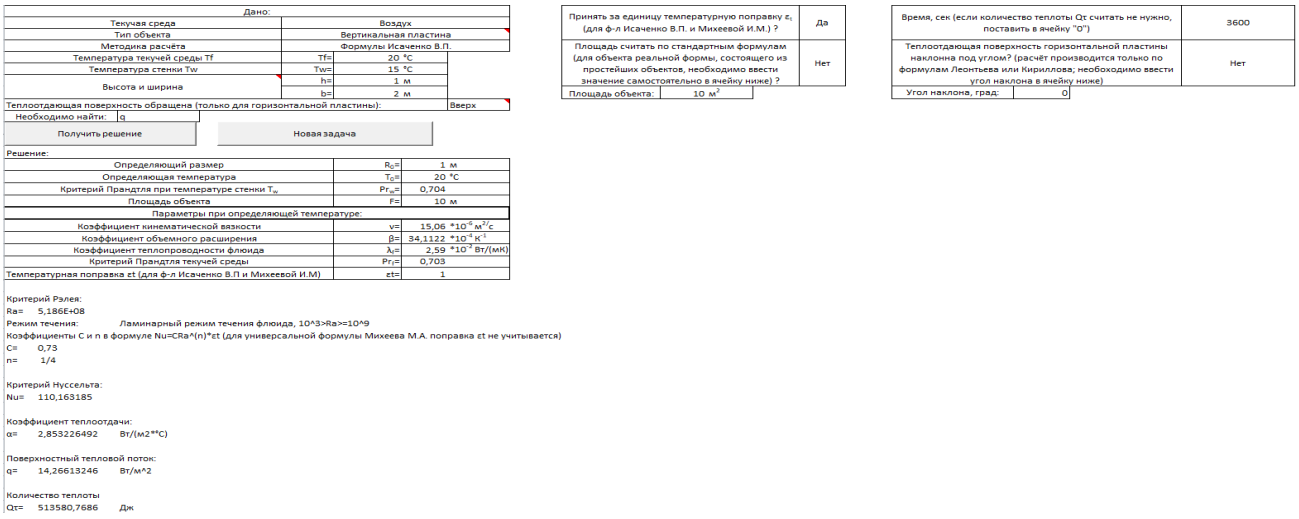


Рис. 2. Полученная таблица определяющих параметров и пошаговый расчёт коэффициента теплоотдачи, теплового потока и количества теплоты

Справа от основной таблицы представлены дополнительные настройки. С их помощью возможно принять температурную поправку, учитывающую изменение температуры текучей среды в тепловом пограничном слое, равной единице (в данной программе – для воздуха и дымовых газов); рассчитать тепловой поток для объекта реальной формы, состоящего из

вышеперечисленных (например, от стен прямоугольного здания); рассчитать количество теплоты; для методик А.И. Леонтьева [3], П.Л. Кириллова [2], ввести значение угла наклона пластины, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз.

Для более удобного использования в программе предусмотрены макросы. Кнопка «Новая задача» предназначена для очистки всех полей ввода, выбора первоначальных настроек в ячейках с раскрывающимися списками, а также полного удаления решения и таблицы с определяющими параметрами. Кнопка «Получить решение» выводит данную таблицу и пошаговый расчёт необходимых физических величин.

Вывод

Создана программа автоматического расчёта коэффициента теплоотдачи и теплового потока в электронных таблицах Microsoft Excel для любого теплотехнического оборудования в энергетике, промышленности и ЖКХ, где происходит процесс теплообмена с жидкой или газообразной средой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие. – Иваново, 2014. – 360 с.
2. Кириллов П.Л. Богословская Г.П. Тепломассобмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. – М.: ИздАт, 2008. – 256 с.
3. Теория тепломассобмена: учебник для вузов / С.И. Исаев и др.; под ред А.И. Леонтьева. – М.; Высш. школа, 1979. – 495с., ил.
4. Цветков Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену : учебное пособие / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – 2-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 196 с., ил.

ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ В УСЛОВИЯХ КОНКУРИРУЮЩИХ КОГНИТИВНЫХ ПРОГРАММ

О.А. Мерлицкая, В.В. Жукова, В.М. Копырина

Сибирский государственный медицинский университет,
ЛФ, ЛД, гр. 1334

Научный руководитель: А.А. Меньшикова, к.ф.н., ассистент СибГМУ

Основная проблема обучения студентов иностранному языку различных специальностей заключается в несистемности занятий. Сегментированное расписание занятий препятствует систематическому изучению иностранного языка. Малое количество времени, выделенное на освоение иностранного языка как дисциплины системе общего курса подготовки различных специальностей, приводит к рецессивным тенденциям в обучении. Изучение иностранного языка осложняют конкурирующие когнитивные программы, т. е. когнитивная информация, семантические паттерны, подлежащие освоению профессиональные навыки и онтология когнитивных парадигм других наук. В целом, основная проблема, связанная с влиянием конкурирующей когнитивной программы, определяется преобладанием структурных элементов концептуальной схемы установленного в сознании когнитивного субстрата, блокирующего коммуникативные навыки сознания, находящегося в состоянии активной познавательной деятельности. Увеличивается концептуальный фон статичного семантического поля. Различные синтаксические языковые конструкции претерпевают сокращение до простейшей атомарной структуры, идентичной понятию и прагматической экспликации содержания.

Когнитивная программа носит системный характер, поскольку оказывает воздействие на изменение онтологии концептуальной схемы (наполняет его новым содержанием, часто в произвольной несистематической комбинации; концептуальная схема при таком подходе стремится к самоорганизации, восстановить логическую завершенность системы под влиянием предельного метафизического вектора семантического значения понятий).

Коммуникативная же стратегия обучения иностранному языку предполагает развитие дискурсивных семантических связей и коннотаций языковых единиц, развитие диалектического потенциала, расширение фокуса внимания в области «внешней» реальности.

Формирование языковых компетенций предполагает когнитивные операции наблюдения и обобщения. В сознании преобладают ассоциативные связи, не затрагивающие изменения парадигмы концептуальной схемы.

Специфика когнитивных программ основных гуманитарных специальностей характеризуется вариативностью онтологии на примитивном уровне семантики. Когнитивные программы гуманитарных специальностей оказывают влияние на изменение понятийно-семантического плана без существенных преобразований парадигматических отношений между уровнями и компонентами концептуальной схемы. Дискурсивные пропозиции и, следовательно, коммуникативные интенции, при этом, существенно не меняются. Коммуникативные лингвистические компетенции при изучении иностранного языка соответствуют дискурсивным пропозициям гуманитарных наук. Можно установить аналогии между нарративной, описательной интенцией коммуникативно-речевого акта, метафизической структурой теоретических высказываний и положений.

При освоении когнитивных программ естественнонаучного и технического плана подразумевает специфику отношений между структурным и понятийным планом концептуальной схемы. Дискурсивные интенции исключаются, либо сводятся к минимуму.

При освоении иностранного языка в условиях конкурирующих когнитивных программ доминирует процесс поступательной (последовательной) рецессии. При обучении иностранному языку на начальном уровне под влиянием конкурирующих когнитивных программ происходит, главным образом, отторжение содержательной стороны информации и аутентичных лексико-синтаксических структур. Выстраивается последовательность ассоциативных связей с преобладанием лингвистического субстрата родного языка. Освоение лингвистического материала иностранного языка, воспринимаемого в процессе обучения, воспринятый реципиентом лингвистический фон имеет устойчивую тенденцию к концептуализации. Материал иностранного языка усваивается в форме концептуализованных понятий, согласовывается в сознании реципиента на уровне когнитивных концептуальных структур. При усвоении нового лингвистического материала имеет значение специфика понятий и коннотаций лексических единиц. Лексико-семантические единицы интерпретируются в аспекте концептуальной метафизики, воспринимаются как уникальные чужеродные формы, декодирование которых вызывает дополнительное напряжение, а также поиска эквивалента на родном языке. Компиляция лексики иностранного языка требует усилий. Когнитивные процессы в перспективе освоения иностранного языка представляют собой рецессивно направленные в соответствии с траекторией последовательной смены фаз с понижающим коэффициентом.

Выстраивается сеть ассоциативных связей между планами родного и иностранного языка, фактически формируя новую концептуальную схему. Эффективность освоения языковых компетенций при таком подходе минимальна. В сознании реципиента (учащегося) сохраняются только концептуально-лингвистические структуры, дополненные нестабильными ассоциативными связями. При этом проявляется феномен концептуально-семантического пространства, с которым соотносятся концептуальные образования нового языка. С течением времени подобные структуры исчезают из памяти. Повторное воспроизведение ранее усво-

енного лингвистического материала требует моделирования безотносительного ситуативно-семантического дискурса. В памяти остаются только те компоненты, обучение которым сопровождалось формированием нескольких элементов цепи ассоциаций с последовательной фиксацией каждого компонента в семантически неизменном дискурсе. Деструктивный эффект привносит механизм перевода. Коммуникативный подход ограничивается определенными положениями и преобразуется с течением времени в безотносительные синтагмы.

При изучении английского языка заметна деструктивная роль «инсталляции» фонетического плана лексических единиц. В большей степени процесс освоения компетенций нарушает фонетическая синтагматика английского языка (сформулированные предложения являются основанием появления безотносительного контекста, связанного с новым семантическим полем).

При освоении иностранного языка в условиях конкурирующих когнитивных программ имеет значение дифференциация сознания учащихся. Дети и выпускники школ не воспринимают когнитивные языковые единицы на уровне текста. Реципиентам более старшего поколения сложно воспринимать концептуально-фонетические элементы.

Несистематическое изучение иностранного языка или проект обучения в малых объемах создает условную реальность, своеобразную квази-учебную среду, воплощающую новую языковую систему, функционирующую по своим законам. Студенты, обученные иностранному языку в таких условиях, теряются в аутентичной языковой среде.

При обучении студентов инженерных специальностей можно предложить стратегию обучения, компилирующую несколько курсов в контексте иноязычного образования, использовать стратегию гибридного обучения [1–3]. Примененный экспериментальный опыт показывает, что выполнение педагогической работы в таких условиях в большинстве случаев оказывается успешным (теоретический кластер занятий успешно реализуется на учебных онлайн платформах). В то же время, негативный эффект от подобного обучения вызван в большей степени проблемами учебной мотивации студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 технологи: анализ возможностей и перспективы применения // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 1–8.

ФОРМИРОВАНИЕ АУТЕНТИЧНОЙ ЯЗЫКОВОЙ ЛИЧНОСТИ ПРИ ОБУЧЕНИИ ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ

А.А. Меньщикова

Сибирский государственный медицинский университет,
к.ф.н., ассистент кафедры иностранных языков

Поиск эффективных методик обучения иностранному языку в настоящее время не теряет актуальности. В настоящее время существует устойчивая тенденция отказа от применения классической традиционной методологии. В противоположность установленным тенденциям применять формализованные и стандартные принципы в обучении иностранному языку (типовые упражнения, содержащие простые однофункциональные высказывания, грамматиче-

ские формы в формулировки повествовательных предложений, таблицы грамматических форм).

Перспективные методы и подходы в обучении иностранному языку включают в себя две основополагающие стратегии: обучение иностранному языку с применением инновационных технологий, с одной стороны, либо обучение иностранному языку в системе дидактических возможностей социального потенциала. По дприменением инновационных технологий предлагается, как правило, применение интерактивных цифровых образовательных платформ. С другой стороны, приоритет коммуникативного подхода в обучении иностранному языку подразумевает различные формы сотрудничества, разработку совместных проектов в условиях языковой практики, применение метода формирования коллективного сознания. В соответствии с этим, аналогично эффективным методом следует считать принцип обучения иностранному языку, нацеленный на формирование аутентичной модели языковой личности. Данный подход является перспективным, как было неоднократно отмечено исследователями [1, 2].

В определении понятия языковой личности значимыми (основополагающими) являются прагматические референциальные связи и функционально-стилистические нормы языка.

Адаптация поведения субъекта языковой личности необходима для успешного общения на иностранном языке. Благодаря освоению стандартов языковой личности улучшается усвоение норм стилистики иностранного языка.

Можно привести два подхода, соответствующих ракурсу взгляда ученого, на понимание сущности языковой личности. На основании понимания системного синкретизма ее феномена языковая личность предстает как неделимая синкретичная сущность. С другой стороны, взгляд «со стороны» позволяет установить референциальные (т. е. выявленные в аспекте диалога с внешней реальностью) аспекты, складывающиеся в процессе повседневного общения, когнитивных операций. В целом языковая личность как феномен характеризуется синкретизмом прагматики высказываний и стилистики языковой норм, системных принципов организации коллективного сознания, сформировавшихся в социокультурной среде в процессе непрерывного общения, лингво-когнитивного освоения окружающей среды. Синкретичная система языковой личности также соотносится с отработанной моделью поведения и типичной реакции в процессе общения.

Формирование аутентичной модели языковой личности является конечной целью обучения иностранному языку, поскольку именно наличие данной структуры способствует беспрепятственному владению иностранным языком в совершенстве.

При этом, на начальном этапе обучения иностранному языку в качестве основной модели текста рекомендуется установить диалог, поскольку данный тип текстов прагматичен, акцентирует внимание на фактической информации. На первом этапе адаптации к языковой личности носителя иностранного языка необходимо сформулировать тезисы текстов и уделять больше внимания нарративным особенностям текстов определенного дискурса, также соотносить их с ситуацией общения, отмечая референциальные особенности. Выполнив необходимое количество упражнений, рекомендуется преобразовать высказывания повествовательных текстов в прагматически референциальные, чаще выбирать публицистический стиль. Далее в учебную программу курса вводится раздел изучения лексико-семантических единиц, особенности их стилистики и коннотаций. Успешные результаты обучения, т. е. формирование в сознании учащегося концептуальной схемы, идентичной языковой личности носителя другого языка, определяется непринужденностью в восприятии спонтанной иностранной речи, умением различать все существующие стилистические нюансы.

В программе обучения иностранному языку с интенсивным использованием технологии перевода увеличивается концептуальный разрыв между концептуальной схемой прагматической направленности (т. е. фиксирующей метафизическую информативность высказывания)

и нарративно-стилистическими структурами аутентичного плана языковой личности. Для успешной адаптации когнитивных структур обучающегося чужеродной языковой личности при такой стратегии обучения необходимо научить студента чувствовать стилистические нормы и специфику функциональных стилей иностранного языка. Провести обучение ускоренно позволяет комплекс заданий, направленный на поиск идентичных формаций стилистических норм и маркеров функциональных стилей.

Обучение иностранному языку в современных условиях, с учетом ограничений, накладываемых различными обстоятельствами (сокращение количества часов обучения, конкурирующие когнитивные программы и т. п.), в подавляющем большинстве случаев приводит к формированию в сознании обучаемого побочной модели языковой личности на основании лингво-когнитивных моделей иностранного языка. Тождества между лингво-семантической концептуальной схемой иностранного языка и когнитивной моделью языковой личности родного языка не устанавливается. При этом, часто обучаемый, овладевший компетенциями чтения и письма, общения на иностранном языке, плохо воспринимает иностранную речь на слух.

Сложившаяся в сознании обучаемого модель языковой личности препятствует формированию концептуальной схемы аутентичной языковой личности и оказывает рецессивное воздействие при попытке корректировки побочной модели языковой личности.

Корректировка побочной языковой личности осуществляется посредством смены коммуникативно-стилистического дискурса в пользу общенаучного и публицистического. С другой стороны, корректировка побочной языковой личности с помощью диалектического подхода предполагает развитие и сценирование диалогов.

Разыгрывая и продолжая диалоги, обучаемые органично переходят в среду естественного развития аутентичной языковой личности. Рекомендуется систематически сокращать лингвосемантический контент до повторяющихся часто употребляемых стилистических оборотов.

Эффективным способом формирования языковой личности при обучении иностранному языку является адаптация интонационным синтагмам на различном этапе, позволяющая вырабатывать устойчивую объектную ассоциативную связь с когнитивно-лингвистическими фрагментами. Повторение типовых интонационных моделей в различных ситуациях, при окказиональном подходе, также способствует закреплению референциальных аспектов языковой личности.

Обучение иностранному языку по определению является насилием над сознанием. Поэтому, в целях повышения эффективности объективной работы рекомендуется восстанавливать стабилизационные принципы в обучении, а именно, периодически соотносить контент иностранного языка с родным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yezhenova A.A., Dzharlykasymova A.S. Methodological system teaching cultural concepts in a foreign language through developing multicultural language personality // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 11-7 (79). – С. 161–166.
2. Пушкарева И.А. Формирование языковой личности в процессе обучения иностранному языку // Теория и практика социогуманитарных наук. – 2022. – № 1 (17). – С. 36–43.

ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И НОВАЦИИ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

М.В. Афанасьев

Казанский государственный энергетический университет, ЭОП, гр. БИПа-1-22

Научный руководитель: Л.Р. Уразбахтина, к.э.н., доцент КГЭУ ЭОП

Инженерное образование играет ключевую роль в развитии технологий и инноваций в современном мире. Для обеспечения качественного обучения студентов и подготовки к высокотехнологичной работе необходимо постоянное развитие и совершенствование педагогических методик и принципов планирования учебного процесса и дальнейшего функционирования бывшего студента в роли специалиста. В данной статье мы рассмотрим основные принципы планирования и новации в инженерном образовании.

Ключевыми принципами планирования в инженерном образовании являются:

1. Целеполагание. Определение конечных целей образовательной программы, а также изучение потребностей рынка труда и требований квалификации специалистов. Использование современных методологий целеполагания (S.M.A.R.T.E.S.T.) повышает общую успеваемость группы обучающихся. Исходя из данных исследования С.С. Гречихина сделан вывод, что у 70 % студентов из исследуемой группы увеличиваются показатели обучаемости при наличии стратегии целеполагания, и у 65 % респондентов отмечается улучшение успеваемости [1].
2. Индивидуализация обучения. Учет индивидуальных особенностей студентов, их способностей и интересов при разработке учебных планов и программ.
3. Компетентностный подход. Фокус на развитие компетенций, необходимых для успешной профессиональной деятельности, таких как умения работать в команде, аналитическое мышление, креативность, а также осваивание смежных специальностей и их навыков.
4. Использование современных образовательных технологий. Внедрение информационных технологий, интерактивных методик обучения, онлайн-курсов и дистанционного обучения, прохождение практики на ранних курсах обучения, участие в практических работах и проектах на реальных кейсах от предприятий.
5. Непрерывность образования. Создание условий для постоянного обновления знаний и навыков специалистов в процессе всей их профессиональной деятельности.

Инженерное образование играет ключевую роль в развитии экономики и технологических инноваций. В условиях быстрого технологического прогресса и изменяющихся потребностей рынка труда, инженерные программы должны постоянно совершенствоваться и адаптироваться к новым требованиям.

В нынешних реалиях в условиях нехватки квалифицированных кадров инженерному образованию в России необходимо развивать:

1. Проектно-ориентированное обучение. Включение студентов в реальные инженерные проекты, что позволяет им применять полученные знания на практике. Эта практика уже сейчас применяется во многих вузах России, уже со 2 курса, студент начинает работу над проектами компании либо университета совместно с преподавателем и начинает получать зарплату [2].
2. Междисциплинарное обучение. Сотрудничество различных инженерных специальностей для решения комплексных задач, что способствует развитию системного мышления. Также междисциплинарное обучение является одним из способов для борьбы с нехваткой кадров в отрасли, что сейчас крайне актуально для России [3].
3. Интеграция индустрии в учебный процесс. Сотрудничество с предприятиями и организациями для проведения стажировок, мастер-классов и лекций от практикующих специали-

стов. Данная программа позволяет уже с первых курсов бакалавриата студентов работать над определенными задачами на предприятии, тем самым получая рабочую практику и денежное вознаграждение за проделанную работу. Для предприятий же это крайне эффективный способ покрытия задач внутри рабочего процесса, связанных с нехваткой кадров, а также дальнейшего привлечения сотрудников на предприятия, уже с опытом работы и пониманием корпоративной культуры.

4. Активное использование симуляторов и виртуальных лабораторий для проведения практических занятий.

5. Развитие soft skills. Уделение внимания развитию мягких навыков, таких как коммуникация, лидерство, управление временем, достижения максимального эффекта синергии при работе в команде и т. д. [4].

Актуальность внедрения новых идей и решений в процесс обучения и планирования в инженерном образовании обусловлена современными вызовами, а именно структурные изменения в отечественной экономике, изменение логистики и национальных приоритетов и нехватка рабочих мест, которая ограничивает рост экономики России. Для решения данных задач, выделены следующие рекомендации:

1. Изменение методов партнерства с индустрией, применение больше масштабной занятости студентов на практике и проектах на предприятиях.

2. Включение в учебный процесс систем целеполагания и мотивации как для студентов, так и для преподавателей.

3. Расширение междисциплинарного обучения и междисциплинарных коммуникаций, путем проведения совместной работы студентами над обширными проектами.

4. Проведение мероприятий по популяризации инженерных профессий, активное развитие у школьников интереса к техническим наукам.

5. Улучшение престижа профессии инженера путем привлечения популярный лидеров общественного мнения.

6. Привлечение экспертов из промышленности для совмещенной преподавательской работы.

7. Проведение анализа потенциала для будущих исследований в области инженерного образования и формирование новых планов и бюджетных мест на основании проведенного исследования.

8. Адаптация инженерного образования к требованиям цифровой экономики. Развитие компетенций в области Интернета вещей, искусственного интеллекта и кибербезопасности [5].

Принципы планирования и новации в инженерном образовании играют важную роль в формировании качественной подготовки специалистов, способных решать сложные технические задачи и вносить инновации в различные отрасли промышленности. Постоянное развитие и совершенствование учебных программ и методик обучения является ключевым фактором успешного развития инженерного образования. Крайне важно понимать важность инвестирования в инженерное образование для безопасности России и достижение всех стратегических и экономических целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самосадова Е.В. Профессиональное целеполагание как фактор академической успеваемости студентов // Проблемы современного педагогического образования. –2022. – № 77 (4). – С. 408–410.
2. Савельева Н.Н., Минин М.Г. Опыт практико-ориентированной подготовки инженерных кадров в техническом вузе // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. –№ 2 (128). – С. 23.
3. Шипунова О.Д., Васильева О.И., Кузнецов Д.И., Березовская И.П. Проектированный метод междисциплинарной интеграции в инженерном образовании // Социально-гуманитарные знания. – 2023. – №. 6. – С. 86–89.
4. Агапов О.Д., Агапова Э.И. Совмещение несовместимого или вопрос о синергии образовательных стратегий // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Философия. Психология. Педагогика. – 2023. – № 3 (23). – С. 244–248.
5. Караева З.С., Ашырмырадова М.Г. Современные образовательные технологии в подготовке специалистов будущего // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – №. 4-2 (79). – С. 200–204.

3D-ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЦИФРОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В РАЗВИТИИ РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ: АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Н. Заббаров, И.Ф. Камалов

Казанский государственный энергетический университет,
ИТЭ, АТЭС, Т-2-22

Научный руководитель: В.А. Рукавишников д.пед.н., профессор каф. ИГ, КГЭУ

Цифровая революция охватывает различные аспекты нашей жизни, включая инженерное проектирование и промышленность. В данной статье мы рассмотрим, как 3D-проектирование и цифровые технологии влияют на развитие ременных передач, и почему эта тема является актуальной и перспективной.

Ременные передачи широко используются в механизмах и машинах для передачи мощности и движения. Они играют ключевую роль в различных отраслях, таких как автомобильная, энергетическая, производственная и другие. Однако, с развитием цифровых технологий, возникают новые возможности для оптимизации и улучшения конструкции ременных передач.

В современном мире технологии 3D-печати и 3D-моделирования играют важную роль. Они применяются в таких отраслях как машиностроение, судостроение, строительство и архитектура, энергетика (в том числе ядерная), медицина, нефтегазовая промышленность [1].

Данные технологии медленно, но, верно, сменяют традиционную технологию черчения. 3D-моделирование дает наглядное представление о будущем изделии, и даже позволяют измерить его необходимые характеристики, такие как прочность, вес, предельная нагрузка. Многообразие технологий 3D-печати позволяет подобрать наиболее оптимальный метод под конкретную отрасль производства так, чтобы получившиеся изделия не только не уступали изделиям, произведенным обычными способами, но и по некоторым характеристикам даже превосходили их.

Основная проблема, которая мешает большему внедрению таких технологий развитию их потенциала, это отсутствие квалифицированных специалистов и необходимых условий для их обучения [2].

Решение данной проблемы необходимо начинать с внедрения в учебную программу высших учебных заведений соответствующей дисциплины. К примеру, В ФГБОУ ВО КГЭУ для технических специальностей предлагается изучение дисциплины «Инженерное геометрическое моделирование», которая направлена на развитие проектно-конструкторских навыков у студентов. Целью этой дисциплины является формирование компетенции специалистов, способных создавать и использовать в своей работе проектно-конструкторские документы, такие как электронные чертежи и геометрические модели, соответствующие требованиям современных высокотехнологичных предприятий и соответствующие уровню развития науки, техники и требованиям ЕСКД. Однако подобная дисциплина есть далеко не в каждом вузе, что и является первопричиной отсутствия у людей мотивации работать в сфере 3D-технологий [3–4].

3D-проектирование позволяет создавать виртуальные модели передач, которые точно отражают их физические свойства и поведение. Это дает инженерам возможность более эффективно и точно проектировать, и оптимизировать передачи до их физической реализации. Использование 3D-моделей также упрощает визуализацию и анализ работы передачи, что помогает предотвращать ошибки и улучшать ее характеристики.

Цифровые технологии, такие как симуляции и анализ методом конечных элементов (МКЭ), позволяют проводить более точные расчеты нагрузок, деформаций и износа ремен-

ных передач. Это помогает оптимизировать конструкцию передачи, увеличивая ее надежность, эффективность и срок службы. Кроме того, цифровые технологии позволяют проводить виртуальное тестирование передачи на различные условия эксплуатации, что снижает затраты на физическое тестирование и ускоряет процесс разработки.

Использование ременных передач берет свое начало с древних цивилизаций. В период промышленной революции ременные передачи получили широкое распространение в машиностроении, служили для передачи мощности паровых машин к различным механизмам.

С развитием новых материалов и технологий, ременные передачи становятся более прочными, эффективными, надежными и легкими, что позволяют им оставаться важной частью многих технических систем и делает их более привлекательными для применения в таких областях, как промышленность, автомобилестроение и энергетика. Вместе с тем, ременные передачи постоянно совершенствуются и находят новые области применения [5].

Ременные передачи имеют некоторый ряд преимуществ:

1. Эффективность – по сравнению с другими видами передач, такими как цепи и зубчатые ремни, благодаря наименьшей потере энергии из-за трения.

2. Низкий уровень шума – работают плавно, что делает их привлекательными для применения в областях, где шум может быть проблемой.

3. Гибкость – легко настраиваемые и заменяемые без необходимости изменения конструкции механизма, что делает их удобными в использовании и обслуживании.

4. Меньший вес – являются приоритетными в использовании в автомобильной промышленности.

5. Экономичность – ремни стоят довольно дешево, и их замена не требует больших затрат, часто обновлять ремни и шкивы нет необходимости.

Существует различные виды ременных передач, каждые из них имеют свои преимущества и недостатки. Выбор конкретного типа зависит от конкретных требований и условий применения.

Конструкции ременных передач может определяется в зависимости от их типа и назначения, но общие конструкции элементов включают в себя следующие компоненты: ремень, шкивы, натяжные устройства, валы, корпус и опоры. Коэффициент полезного действия ременных передач зависит от многих факторов, включая тип ремня, натяжение, угол обхвата, скорость, состояние компонентов и другие параметры. Важно отметить, что правильное обслуживание, смазка и регулярная замена ремней могут повлиять на их КПД и продолжительность службы [5].

При выборе ременных передач для конкретной энергоустановки необходимо учитывать требования по передаче мощности, скорости, точности и другие технические характеристики, чтобы обеспечить оптимальную эффективность и долговечность работы системы.

Для увеличения КПД ременных передач применяют современные материалы и корд с высоким модулем упругости. Ошибки в обслуживании и неправильная регулировка могут привести к потере до 10 % механической энергии и, следовательно, электроэнергии. Зубчатоременная передача обеспечивает постоянный КПД более 98 %, поэтому она часто используется. Путем устранения потерь и правильного обслуживания можно повысить КПД и продолжительность службы передачи [7].

С развитием 3D-проектирования и цифровых технологий ожидается появление новых инновационных решений в области ременных передач. Например, использование материалов с улучшенными характеристиками, разработка новых профилей ремней или оптимизация геометрии передачи. Также предполагается, что цифровые технологии будут активно применяться для мониторинга состояния передачи в режиме реального времени, что позволит проводить профилактическое обслуживание и предотвращать отказы.

3D-проектирование и цифровая революция имеют значительный потенциал для развития ременных передач. Они позволяют инженерам создавать более эффективные и надежные передачи, а также сокращать время и затраты на их разработку. В будущем, с использованием новых материалов и технологий, ременные передачи будут становиться еще более эффективными и долговечными, способствуя развитию промышленности и повышению производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные 3D-технологии в архитектуре и строительстве [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://moluch.ru/archive/412/90636/ (дата обращения: 10.011.2023).
2. Лавриков В.А. Современные технологии 3D моделирования: проблемы, решения и перспективы / В.А. Лавриков, В.В. Титенков // Тинчуринские чтения – 2023 Энергетика и цифровая трансформация: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 г. ; под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. Т. 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 313–316.
3. Хамитова Д.В. Инженерное геометрическое моделирование – внедрение в жизнь / Д.В. Хамитова, К.В. Николаев // КОГРАФ-2019 : сб. материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам, Нижний Новгород, 15–18 апреля 2019 г. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 79–83.
4. Рукавишников, В. А. Особенности подготовки специалистов для цифрового проектирования / В.А. Рукавишников, М.А. Прец // Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы: национальная (с международным участием) научно-практическая конференция, Казань, 19–20 мая 2022 г. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 220–223.
5. Основы проектирования / Г.Н. Вахнина, В.В. Стасюк, Р.Г. Боровиков и др. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. – 146 с.
6. Исследование, расчёт параметров и конструирование зубчато-ременных передач / М.О. Арбузов, А.Я. Некрасов, А.Н. Соболев, А.В. Ривкин. – Москва: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 2018. – 164 с. – ISBN 978-5-7028-0548-7.
7. Куликов И.М., Синявский И.М. Повышение кпд ременных передач // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 138–138. – URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=27152 (дата обращения: 10.11.2023).

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

Н.А. Шипиловских, Н.А. Щербенев

Казанский государственный энергетический университет,
ИЭЭ, ТОЭ, ЦСА-2-22

Научный руководитель: Ю.Н. Ерашова, ст. преподаватель ТОЭ ИЭЭ КГЭУ

Современное общество все больше осознает важность инженерного образования в контексте развития и прогресса. С ростом технологических вызовов и необходимостью постоянной адаптации к быстро меняющемуся миру, методы преподавания в инженерном образовании активно эволюционируют. Одной из главных целей этих изменений является повышение качества обучения и внедрение новых методик и подходов, которые позволят выпускникам инженерных специальностей успешно справляться с будущими вызовами и реализовывать инновационные идеи.

Кроме того, инновации в инженерном образовании также включают в себя использование онлайн-платформ для обратной связи и самооценки, индивидуальных учебных планов и наставничества, а также создание междисциплинарных проектов и командных работ, чтобы

учащиеся могли развивать свои коммуникационные навыки. Также стоит отметить значимость международного сотрудничества и обмена опытом в инженерном образовании. Студенты имеют возможность принимать участие в международных проектах и программных обменах, что позволяет им расширить свои горизонты и получить опыт работы в других культурах и с другими технологиями. Главная задача инженерного образования – обеспечить студентов навыками и знаниями, полученные при изучении базовых и профессиональных дисциплин, а также необходимых для успешной карьеры в современном мире. Они включают в себя не только технические навыки, но и гибкость мышления, умение работать в команде, проблемное мышление, а также знание социальных и экологических аспектов инженерного дела.

В процессе работы над реальными проектами, студенты учатся анализировать и решать сложные задачи, а также применять свои знания на практике. Многие университеты и колледжи предлагают студентам возможность проходить стажировку в компаниях и организациях, что даёт им ценный опыт работы. Это позволяет студентам развивать профессиональную коммуникабельность и прокладывать путь будущей карьеры. Переход от специализированных образовательных программ к междисциплинарным дает возможность студентам получить широкий круг знаний, что увеличит скорость и качество решения современных проблем и вызов. Например, курс «Наука о материалах» может включать в себя изучение свойств материалов, методов их производства, а также их применение в различных областях, таких как энергетика, медицина и строительство. В целом, практическое и междисциплинарное обучение играют важную роль в подготовке студентов к современным вызовам и требованиям рынка труда. Они позволяют студентам развить не только технические навыки, но и творческие и аналитические способности, что является ключевым для успешной карьеры в инженерной сфере.

Также можно выделить значимое применение проектной работы и внедрение новых важных дисциплин в учебный процесс. Студенты смогут объединяться в команды, в которых присутствуют представители разных специализаций, чтобы решать сложные задачи. Обмен знаниями и умение применять их в нетрадиционных ситуациях будут способствовать развитию командных навыков и креативного мышления, соответствуя современным требованиям. Важно отметить, что в современном образовании необходимо осознавать важность самообразования и постоянного обучения на протяжении всей жизни. С быстро меняющимися технологиями, инженерам очень важно постоянно обновлять свои навыки и знания, чтобы успешно адаптироваться к новым вызовам. Развитие инженерного образования неразрывно связано с продвижением партнёрства между университетами, промышленностью. В последнее время наблюдается усиление этого сотрудничества, которое известно под названием «тройной геликс» или инновационное сотрудничество. Оно предполагает совместные усилия вузов, компаний и государства для проведения взаимовыгодных научных исследований. Одним из важных факторов, способствующих такому сотрудничеству, является потребность промышленности в новых прорывных решениях и технологиях. Важно отметить, что передовые дисциплины в инженерном образовании предлагают ряд замечательных возможностей. В основном, использование интерактивных симуляторов, виртуальной реальности и 3D-моделирования позволяет студентам значительно улучшить свои навыки работы с инженерными системами, без доступа к физическому оборудованию. Такой подход обеспечивает эффективное обучение и помогает студентам лучше понять и применять инженерные концепции на практике.

К примеру, в Белорусском национальном техническом университете 7 декабря 2021 г. состоялось открытие X Форума вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства. В стенах БНТУ собрались более 200 представителей разных вузов, которые представили свои научные работы в шести секциях по разным направлениям инженерных наук: «Мо-

бильные машины и мобильные технологии», «Инженерная экология в современном мире», «Перспективные технологии, материалы, оборудование и системы», «Цифровые технологии в инженерном образовании», «Молодежное инновационное предпринимательство», «Университет – современный мир и национальные интересы». Мы посетили четвертую секцию «Цифровые технологии в инженерном образовании», в рамках которой проходили обсуждение практики цифровых технологий для подготовки инженерных кадров и обмен знаниями и опыта в цифровом обучении инженеров. В данной секции выступающими были рассмотрены новые цифровые инструменты, открытые онлайн-курсы, тренды современного инженерного образования, владение цифровыми навыками и выдвинуты методы использования цифровых технологий в инженерном образовании. Так, известно, что на кафедре «Информационно-измерительная техника и технологии» приборостроительного факультета БНТУ планируется создание умной аудитории. Также было подробно рассмотрено оснащение аудитории и основное оборудование, которые включают: систему отображения информации, интерактивную трибуну, антивандальный стол-сейф, система видеоконференции, система телевизионного наблюдения умной аудитории на основе Smart AcuSense-видеокамер (smart-функция видеонаблюдения, smart-слежение), система интеграционного управления, система управления освещением, таймер обратного отсчета, система контроля освещенности на рабочих местах, система контроля степени внимания, система озвучивания, система синхронного перевода, система отображения 3D. Надеемся, что уже скоро идея будет воплощена в жизнь, и студенты вместе с преподавателями смогут погрузиться в обучение с повышенным уровнем комфорта и удобства, а также благодаря использованию современных мультимедийный и коммуникационный возможностей умной аудитории достигнут повышения качества образования.

Гибкие образовательные программы также приводят к некоторым очевидным преимуществам. Они дают студентам возможность выбирать из широкого спектра предметов и специализаций, что в свою очередь позволяет им более точно сориентироваться в выборе образовательной программы, исходя из их интересов и целей. Такой подход стимулирует студентов к более глубокому изучению определённых областей инженерии и развитию их профессиональных навыков.

В современных проектах все чаще требуется сотрудничество различных специалистов для достижения успеха. Инженерам приходится работать с дизайнерами, биологами, юристами и другими профессионалами, чтобы создать инновационные и экологически устойчивые решения. Поэтому интеграция других дисциплин в инженерное образование обеспечивает не только развитие технических навыков, но и способность работы в команде и решения проблем в различных сферах знаний. Важно отметить, что ультразвуковая диагностика становится все более актуальной в инженерии. Эта технология позволяет инженерам не только обнаруживать дефекты и повреждения в материалах и конструкциях, но и оценивать их воздействие на общую прочность и долговечность изделий. Такая диагностика может быть особенно полезна в областях, где безопасность играет важную роль, таких как авиация, медицина и энергетика. Благодаря ультразвуковой диагностике инженеры имеют возможность проводить более точные и надёжные проверки, что в конечном итоге приводит к созданию более безопасных и надёжных инженерных решений.

Развитие и подготовка успешных инженеров сильно зависят от инноваций в техническом образовании. Инновации помогают выпускникам эффективно решать сложные задачи, развивать креативное и адаптивное мышление, а также заниматься научными исследованиями и разработками. Важно, чтобы инженерное образование было гибким и динамичным, чтобы соответствовать современным требованиям и изменениям в мире. Только так выпускники смогут быть конкурентоспособными на международном уровне и расширять инновационное мышление и предпринимательские навыки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обрсоюз. – URL:https://obr.so/news/razvitie-inzhenernogo-obrazovaniya-o/ (дата обращения: 25.10.23).
2. Молодой учёный. – URL:https://moluch.ru/archive/13/1034/?ysclid=lofpjio6w6437784548 (дата обращения: 28.10.23).
3. Cyberleninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernoe-obrazovanie-v-kontekste-novoy-tehnologicheskoy-paradigmy-obschestvennogo-razvitiya (дата обращения: 29.10.23).
4. Интуит. – URL: https://intuit.ru/studies/courses/17144/1291/lecture/25030 (дата обращения: 31.10.23).
5. Times.bntu.by. – URL:https://bntu.by/be/news/9973-cifrovye-tehnologii-v-inzhenernom-obrazovanii (дата обращения 31.10.23).

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАЗОВЫХ ЦИКЛОВ ПТУ

Н.М. Худяков

Ивановский государственный энергетический университет,
ТЭФ, ТОТ, гр. 1-4м

Научные руководители: Д.В. Ракутина, к.т.н., доцент ТОТ ИГЭУ,
И.М. Чухин, к.т.н., доцент ТОТ ИГЭУ

Повышение тепловой экономичности циклов паротурбинных установок (ПТУ) невозможно без глубокого понимания основ процессов, происходящих в них. Для создания новых и совершенствования уже существующих схем выработки тепловой и электрической энергии необходимо хорошо ориентироваться в тонкостях расчета и анализа термодинамической эффективности базовых циклов ПТУ.

На кафедре «Теоретические основы теплотехники» ИГЭУ в рамках изучения курса «Техническая термодинамика» студенты выполняют курсовую работу по анализу тепловой экономичности основных циклов ПТУ [1, 2]. В задания включены пять циклов ПТУ: простой цикл, цикл ПТУ с вторичным пароперегревателем, регенеративный цикл, теплофикационный цикл и цикл ПТУ на насыщенном водяном паре для АЭС.

В данной работе разработана компьютерная программа для расчета и анализа базовых циклов паротурбинных установок в среде Microsoft Excel. Программа позволяет выполнить расчет всех характеристик тепловой экономичности циклов ПТУ, а также найти оптимальное значение заданного параметра. Исходные данные для расчета вводятся на вкладке «Задания». Результаты расчета отображаются на вкладке «Расчет циклов ПТУ».

С целью автоматизации расчета предварительно были оцифрованы таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара с помощью программы ABBYY FineReader и созданы несколько модулей автоматического поиска термодинамических параметров воды и водяного пара. В зависимости от требуемых данных модуль может находить, например, энтальпию воды и водяного пара по давлению и температуре, или по давлению и энтропии и т. п. При этом выполняется анализ в каком фазовом состоянии находится вода и в зависимости от этого корректируется методика поиска. Предусмотрено различное сочетание исходных данных для поиска термодинамических параметров.

Для наглядного представления результатов расчета для каждого цикла создана отдельная вкладка с тепловой схемой и h-s – диаграммой, на которых синхронно с расчетом отображаются исходные данные и результаты расчета (рис. 1–5).

На рис. 1 показана схема простого цикла ПТУ (цикла Ренкина) и h-s–диаграмма с результатами расчета в среде Microsoft Excel. В качестве исходных данных задаются давление p_o и

температура пара перед турбиной t_o, давление пара в конденсаторе турбины $p_к$, внутренний относительный КПД турбины η_{oi}, адиабатный коэффициент насоса $\eta_н$, механический КПД $\eta_м$ и КПД электрического генератора $\eta_г$, электрическая мощность ПТУ $W_э$. Расчет выполняется для обратимого и необратимого циклов. В результате расчета определяем удельную теплоту подведенную q_{1i} и отведенную q_{2i} от рабочего тела в цикле, удельную техническую работу турбины ℓ_{ti}, насоса ℓ_{ni} и всего цикла ПТУ ℓ_i, термический η_t и внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ η_i, электрический КПД цикла ПТУ $\eta_э$, удельный расход пара $d_э$ и теплоты $q_э$ на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ, расход пара D на паровую турбину при заданной электрической мощности.

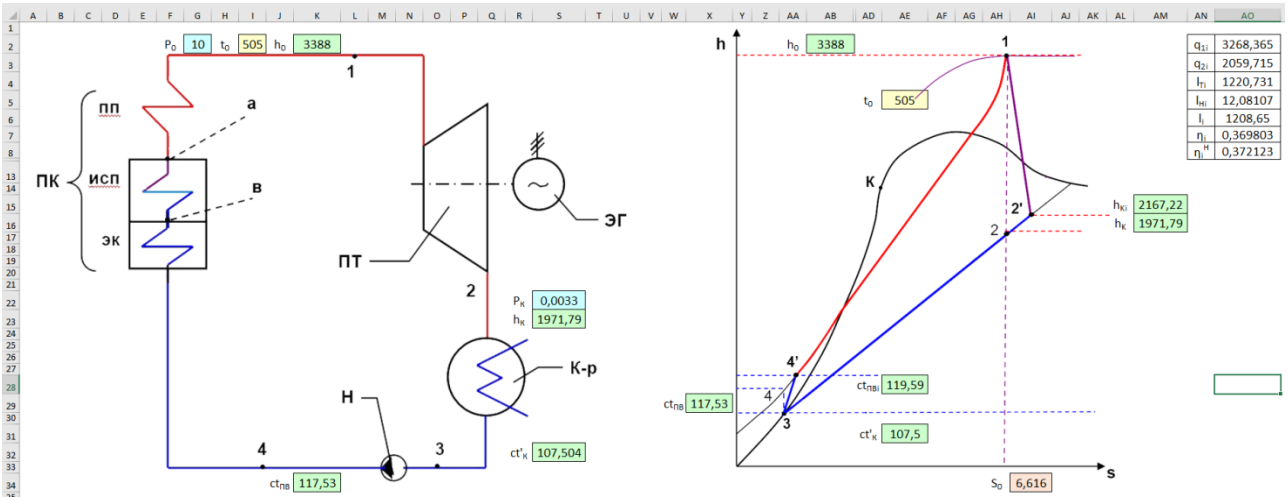


Рис. 1. Схема простого цикла ПТУ и h-s – диаграмма с выводом расчетных термодинамических параметров в среде Microsoft Excel

Оптимизация простого цикла ПТУ выполняется с целью поиска оптимального значения давления пара перед турбиной $p_o^{опт}$. Расчет ведется в виде таблицы при разных значениях давления p_o. В результате расчета определяем два давления: первое соответствует максимальному значению КПД цикла, второе – допустимому значению конечной степени сухости пара на выходе из турбины 0,88.

Расчет цикла ПТУ с вторичным перегревом пара (ВПП) является продолжением расчета простого цикла. В качестве исходных данных вводим давление $p_{вп}$ и температуру $t_{вп}$ пара во вторичном пароперегревателе, а также внутренний относительный КПД части высокого давления турбины (ЧВД) $\eta_{oi}^{ЧВД}$ и части низкого давления турбины (ЧНД) $\eta_{oi}^{ЧНД}$. Расчет выполняется для обратимого и необратимого циклов. Пример результатов расчета в среде Microsoft Excel цикла ПТУ с ВПП представлен на рис. 2.

Далее выполняется поиск оптимального значения давления во вторичном пароперегревателе $p_{вп}$ методом вариантных расчетов. Оптимальное давление выбирается по максимуму термического КПД цикла ПТУ.

Расчет регенеративного цикла ПТУ выполняется для двух или трех смешивающих подогревателей. Исходные данные такие же как в простом цикле ПТУ. На рис. 3 показаны результатами расчета в среде Microsoft Excel регенеративного цикла ПТУ с тремя смешивающими подогревателями.

Оптимизация давления отбора пара из турбины выполняется для регенеративного цикла ПТУ с одним смешивающим подогревателем. Для этого рассчитываются термические КПД при семи значениях температуры питательной воды в диапазоне, соответствующих давлениям от p_o до $p_к$. Оптимальное давление отбора пара из турбины на подогреватель определяется по максимальному значению КПД цикла.

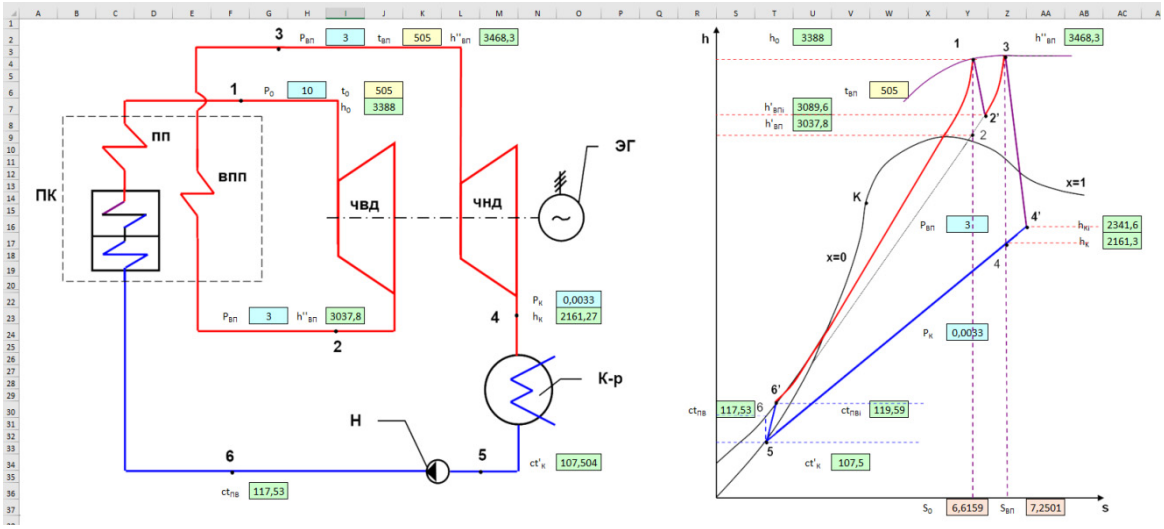


Рис. 2. Схема цикла ПТУ с ВПП и h-s – диаграмма с выводом расчетных термодинамических параметров в среде Microsoft Excel

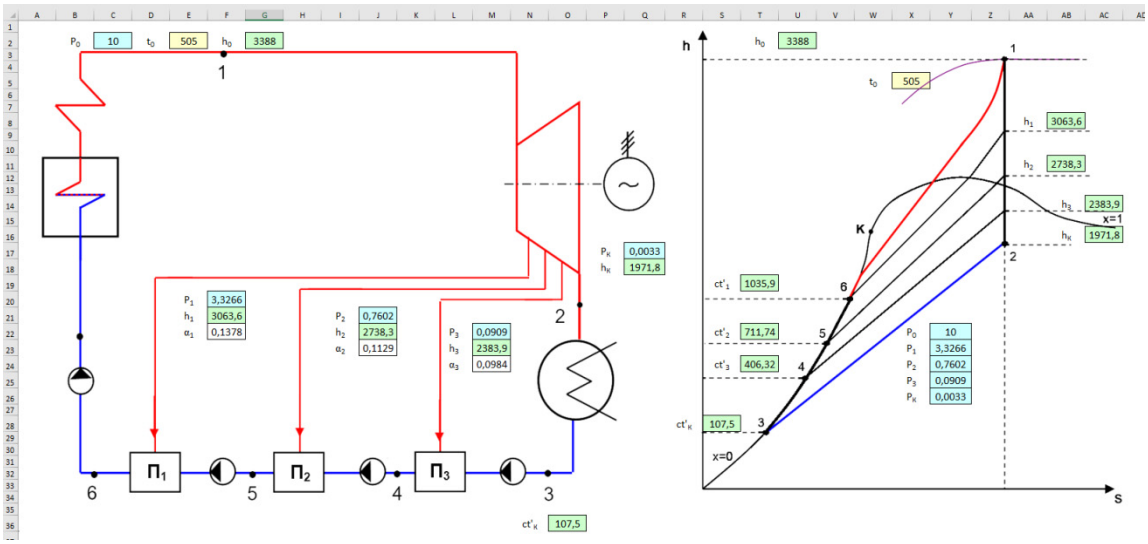


Рис. 3. Схема регенеративного цикла ПТУ с тремя смешивающими подогревателями и h-s – диаграмма с выводом расчетных термодинамических параметров в среде Microsoft Excel

Затем выполняется расчет теплофикационного цикла ПТУ (рис. 4). В цикле имеется два отбора пара из части высокого давления турбины для смешивающего подогревателя системы регенерации турбины и из части низкого давления турбины, предназначенного для снабжения теплотой потребителя. В качестве исходных данных задается тепловая мощность потребителя теплоты и температура возврата конденсата от теплового потребителя. Для оценки тепловой экономичности теплофикационного цикла ПТУ кроме внутреннего абсолютного КПД цикла ПТУ рассчитывается коэффициент использования теплоты топлива и коэффициент выработки электрической энергии на тепловом потреблении.

Отдельно выполняется термодинамический расчет цикла ПТУ атомной электрической станции (АЭС) на насыщенном водяном паре (рис. 5). Сначала выполняется расчет обратимого и необратимого циклов АЭС для заданного значения давления пара, идущего на сепаратор и пароперегреватель $p_{пп}$. Далее методом вариантных расчетов находят оптимальное давления пара $p_{пп}^{опт}$ при котором обеспечивается допустимая влажность пара на выходе из турбины и максимальное значение термического КПД цикла.

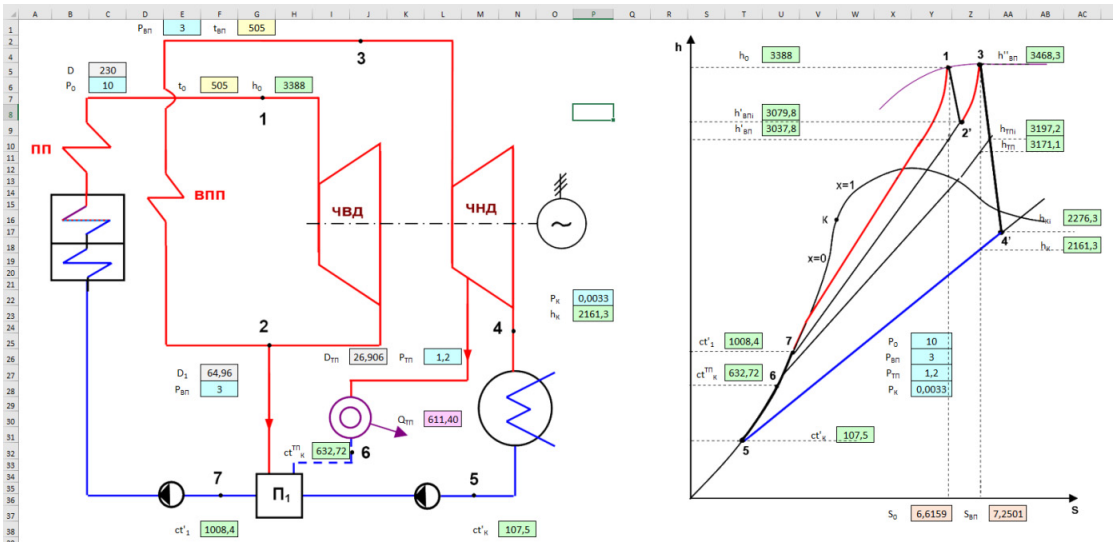


Рис. 4. Схема теплофикационного цикла ПТУ и h-s – диаграмма с выводом расчетных термодинамических параметров в среде Microsoft Excel

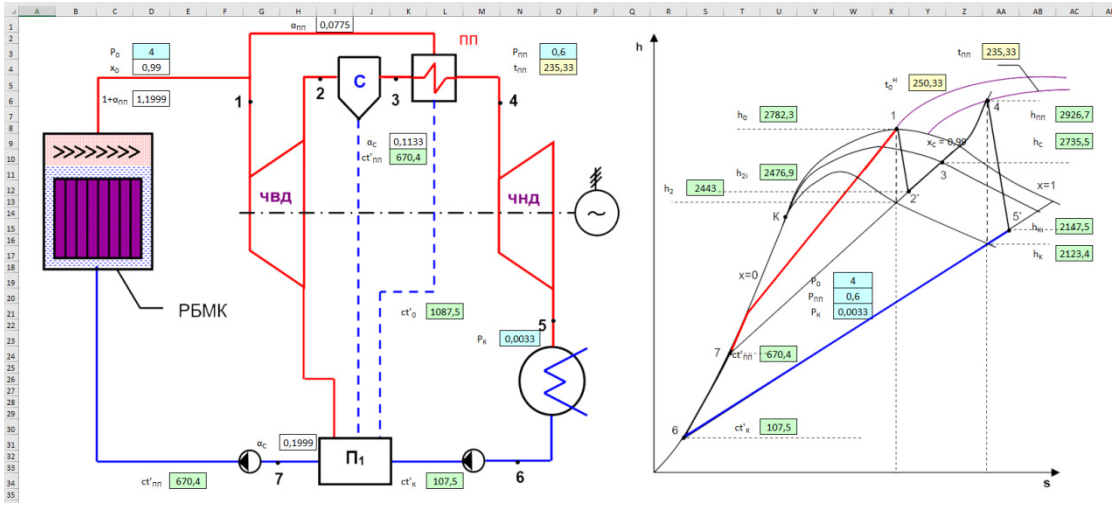


Рис. 5. Схема цикла АЭС на насыщенном паре и h-s – диаграмма с выводом расчетных термодинамических параметров в среде Microsoft Excel

Таким образом, разработанная компьютерная программа позволяет выполнить расчет более 1000 вариантов, заданных пользователем и проводить оптимизационные исследования циклов паротурбинных установок. Программа будет полезна как преподавателям для составления заданий и проверки курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика», так и студентам для проведения исследований экономичности циклов ПТУ. Разработанная программа внедрена в учебный процесс кафедры ТОТ ИГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чухин И.М., Ракутина Д.В. Анализ тепловой экономичности циклов ПТУ: метод. указания и задания для выполнения курсовой работы. – Иваново, 2021. – 48 с.
2. Чухин И.М. Расчет термодинамической эффективности циклов паротурбинных установок: метод. указания и задания для выполнения курсовой работы. – Иваново, 2015. – 56 с.

Секция 8
Твой первый шаг в энергетику

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА И ВЫДАЧИ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.И. Ронжин, А.Т. Кульков

АНО ДО ДТ «Кванториум»

Научный руководитель: А.В. Бывшенко, педагог ДО

Суть работы заключается в создании макета устройства, способного упорядоченно выдавать электромонтажное оборудование и обеспечить качественный и количественный контроль выдачи с отражением операций в ресурсной базе на основе «Excel» [1]. Внедрение устройства способно принести значительный экономический эффект зачёт значительного снижения необоснованных потерь оборудования. По сути, это начало внедрения технологии «Бережливого производства» [2].

Актуальность нашего проекта обусловлена отсутствием системы автоматизированного учёта и хранения оборудования на производстве, что затрудняет их поиск и выдачу исполнителям. В том числе отсутствует контроль их выдачи, что приводит к необоснованным потерям, а также отсутствует общая ресурсная база оборудования, что усложняет ведение учета экономической составляющей при выполнении рабочих задач. Для решения указанных проблем разрабатывается устройство, обеспечивающее снижение потерь электромонтажного оборудования при реализации работ, и как итог, снижение их себестоимости.

Основной целью является: создать прототип устройства, который сможет упорядоченно выдавать оборудование, обеспечивая качественный и количественный контроль выдачи с внесением информации об имеющимся и выданном оборудовании в ресурсную базу.

В результате работы над проектом были решены следующие задачи:

- проведен обзор аналогов и разработана структурная схема;
- определен внешний вид устройства;
- сделана 3D-модель устройства;
- разработана структурная схема устройства;
- разработана программа устройства;
- собран действующий макет устройства.

В современном производстве используется значительное число различного оборудования, которое необходимо для создания различных проектов, таким образом наше устройство может быть применено во многих отраслях производства.

Внешний вид разрабатываемого устройства представляет собой систему хранения с ящиками различных размеров. Посередине находится дисплей и сканер RFID-карт [3]. Пользователи могут отсканировать свою карту и на дисплее выведутся доступное ему оборудование. Пользователь может выбрать оборудование и его количество, после этого система сама откроет нужные ему ящики. Таким образом, проведение операции является элементом СКУД [4] (системы контроля и управления доступом).

На рис. 1 представлена 3D-модель устройства.

Структурная схема устройства стала основой инженерного решения проекта. Главным органом управления является микроконтроллер, он отдает команды исполнительному органу, которым является система открытия ящиков, собирает информацию о количестве взятого и имеющегося оборудования в ящиках с помощью системы количественного контроля. Также благодаря сканеру RFID устройство идентифицирует пользователя и передает информацию в базу данных, после этого система сама откроет нужные ему ящики. Структурная схема изображена на рис. 2.

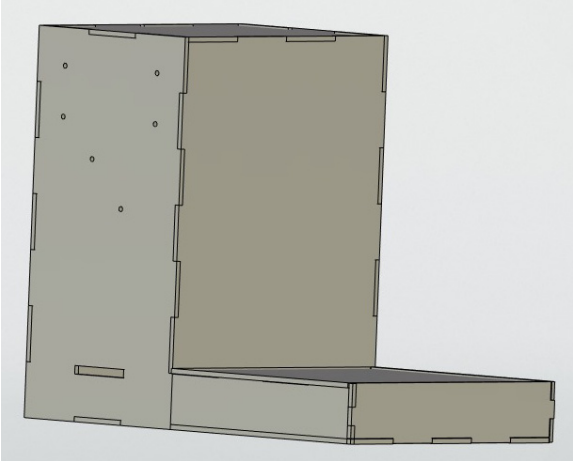


Рис. 1. 3D-модель устройства

Рис. 2. Структурная схема устройства

Когда пользователь выбрал доступное ему оборудование необходимо выбрать определенное его количество. Далее программа найдёт нужное оборудование и откроет замок ящика, где оно лежит. Затем пользователь берет нужное количество и закрывает ящик. Если пользователь взял большее количество программа с помощью тензодатчика определит количество взятых единиц и запишет на счёт пользователя.

Таким образом введение устройства на энергетическое производство обеспечит его снижением ресурсных и временных затрат, а также улучшит условия труда электромонтёрам и снизит уровень травматизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microsoft Excel. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Excel (дата обращения: 15.10.23 г.)
2. Бережливое производство. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бережливое_производство (дата обращения: 15.10.23 г.)
3. RFID. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID (дата обращения: 15.10.23 г.)
4. СКУД. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_контроля_и_управления_доступом (дата обращения: 15.10.23 г.)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И УСТРОЙСТВ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

И.А. Миськов, А.П. Червоненко, А.Д. Шишкин

МАОУ Вторая Новосибирская Гимназия

В практике эксплуатации энергосистем достаточно часто происходят события, которые приводят к значительным изменениям величины и формы напряжения, отклонению его параметров от номинальных значений.

Провалы напряжения, например, обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки. Провал напряжения, как правило, связан с возникновением короткого замыкания или иного возмущения, приводящего к резкому возрастанию тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети.

Предполагаемые научные подходы к разработке позволят обеспечить безостановочность технологических процессов и производств.

Целью данной работы является разработка варианта устройства и алгоритма работы автоматического ввода резерва, заключающегося в переводе нагрузки в случае возникновения аварийных ситуаций, собрать соответствующий имитационный стенд.

Решение поставленной первичной задачи по разработке и исследованию имитационной модели позволит выстроить концепцию дальнейших исследований. А именно решить главные задачи разработки устройств компенсации провалов: повышение быстродействия их работы и учет момента подключения к резервной линии.

Нужно отметить, что исследуемая проблема находит отклик среди разных исследователей. Обзор литературы по данной теме условно разделен на несколько отличающихся друг от друга блоков, перечисленных ниже.

В зарубежных источниках исследуемый вопрос таже является актуальным [1, 2].

Анализ литературы показывает, что и другие исследователи уделяют внимание разработке имитационных моделей, связанных с изучением данного вопроса, например, работа Зацепиной В.И. «Моделирование провалов напряжения в системах электроснабжения металлургических производств» [3].

Также хотелось бы отметить, что в журнале «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ» данная тема рассматривается многими авторами, например, Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. «Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии» [4].

В настоящее время существуют разные варианты систем, призванных компенсировать провалы напряжения и производить перевод нагрузки в случае возникновения аварии. Данные системы отличаются сложностью реализации и, как следствие, качеством конечного результата.

Проведенный анализ накопителей показывает, что наиболее актуальным для предотвращения провалов напряжения становится использование суперконденсаторов. Использование суперконденсаторных систем накопления энергии для обеспечения комфортного электропитания потребителей путем компенсации провалов напряжения позволяет экономить значительные материальные ресурсы.

Применение суперконденсаторов может быть наиболее перспективным методом для развития технологий накопления электроэнергии для решения проблемы с провалами напряжения.

Возможная обобщенная электрическая схема объекта исследования представлена на рис. 1.

Далее перечислено оборудование создаваемого имитационного стенда.

Пуск и наладка (непрограммируемые функции):

- Вкл. QF1 => нет КЗ (имитация трансформатора основной линии 100кВ/6кВ);
- Вкл. QF2 => нет КЗ (имитация трансформатора резервной линии 100кВ/6кВ);
- Вкл. KK1 => нет КЗ (имитация трансформатора основной линии 6кВ/0,4кВ);
- Вкл. KK2 => нет КЗ (имитация трансформатора резервной линии 6кВ/0,4кВ);
- Вкл. QF3 => нет КЗ, вкл. PLR;
- Вкл. SF1 => нет КЗ, напряжение на XS3;

Имитация технологического процесса «Перевод нагрузки на резервную питающую линию с помощью программируемого логического реле»:

- SB1 – кнопка запуска системы;
- SB2 – кнопка остановки системы;
- SB3 – кнопка аварийного отключения;
- SB4 – кнопка имитации аварии в основной линии;
- HL1 – индикатор состояния выключателя основной сети;
- HL2 – индикатор состояния выключателя резервной сети;
- HL3 – индикатор состояния секционного выключателя;

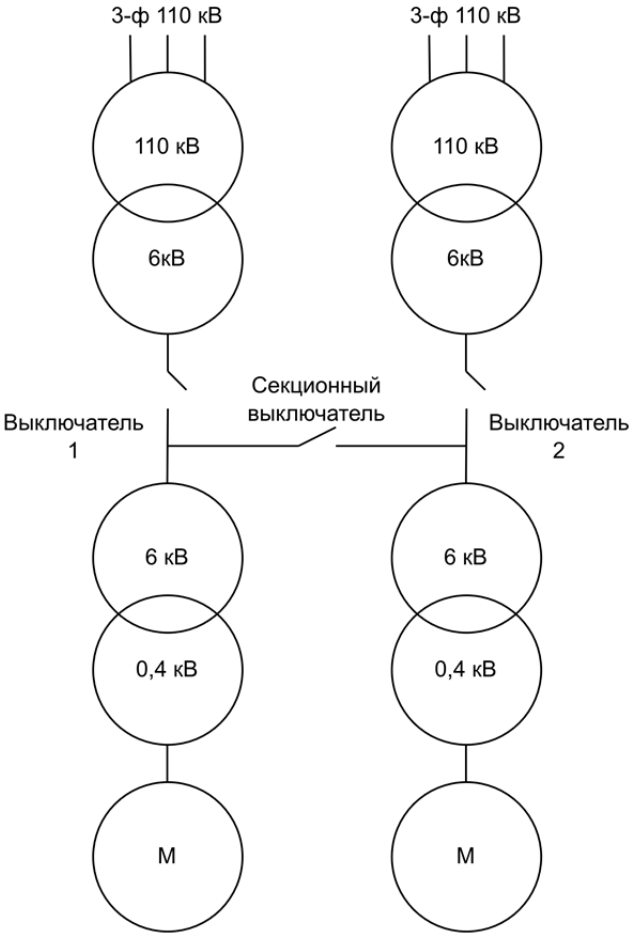


Рис. 1. Обобщённая электрическая схема объекта исследования

Нажатие кнопки SB1 запускает электродвигатели M1 и M2 через 2 секунды. Работу основной и резервной линий сопровождает непрерывная работа ламп HL1 и HL2.

Через некоторое время (определенное оператором стенда) происходит имитация аварийного отключения основной линии нажатием на кнопку SB4. После нажатия на кнопку лампа HL1 мигает на протяжении 4 секунд с частотой 1 Гц, далее отключается выключатель KM1 и лампа HL1. Через временную задержку в 1 с происходит включение секционного выключателя – включается KM3 и лампа HL3, работа M1 возобновляется.

Через некоторое время (определенное оператором стенда) происходит имитация прекращения аварийной ситуации на основной линии, это осуществляется нажатием кнопки SB4. После нажатия SB4 лампа HL3 мигает на протяжении 4 с с частотой 1 Гц, далее отключается выключатель KM3 и лампа HL3. Через временную задержку в 1 с происходит включение выключателя основной сети, а именно – включается KM1 и лампа HL1, работа M1 возобновляется.

Повторное нажатие SB4 вызывает повторение событий и цикл начинается снова.

Остановка работы системы возможна нажатием кнопок SB2 и SB3 в любой момент времени, а именно:

- после нажатия SB2 система прекращает работу, возможен повторный запуск электроустановки;
- после нажатия SB3 система прекращает работу, нажатие SB1 и SB2 не вызывают реакции системы. После отпускания (приведения в первоначальное состояние) аварийной кнопки SB3 возможен повторный запуск электроустановки.

Электроустановка в собранном варианте изображена на рис. 2.

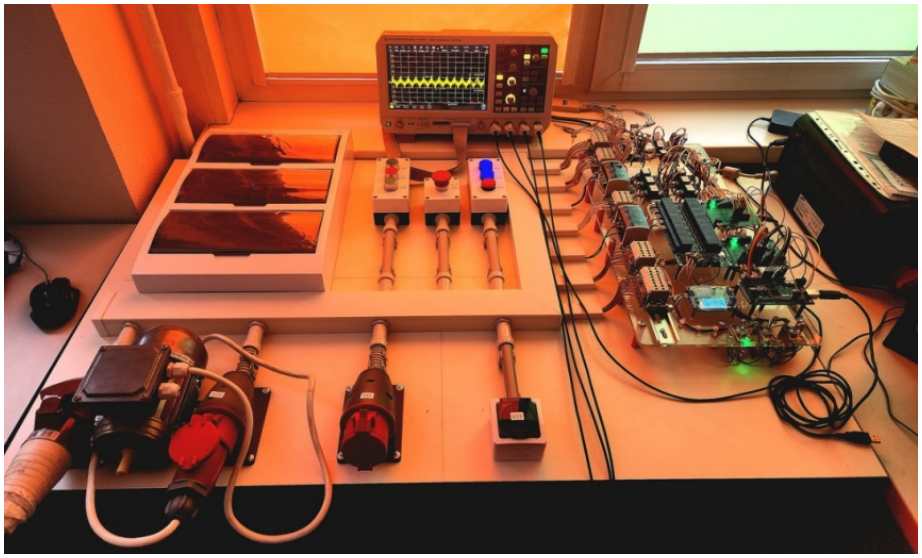


Рис. 2. Готовая электроустановка

Разработанный подход является удовлетворительным для потребителей электроэнергии, которые не предъявляют высоких требований подключения к резервной сети (например, потребители малой мощности). Нужно отметить, что для данной категории потребителей на рынке можно найти достаточно широкий спектр предложений готовых устройств. Авторы обращают внимание на то, что первостепенной задачей для дальнейших исследований является разработка алгоритмов и устройств, способных организовать бесперебойную работу потребителей электроэнергии, которые зависели бы от момента включения к резервному источнику электроэнергии, то есть предъявлял повышенные требования к резервной сети.

В качестве примера потребителя электроэнергии, предъявляющего повышенные требования к резервной сети, может выступать работа ТЭЦ.

В связи с перечисленной выше информацией можно констатировать актуальность задачи разработки и исследования технических устройств и алгоритмов управления ими, которые позволили бы компенсировать возмущающие воздействия в системе электроснабжения предприятия, повысить надежность электромеханических систем за счет их безостановочной работы. Предполагаемые научные подходы к разработке позволят обеспечить безостановочность технологических процессов и производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Santis M., Noce C., Varilone P. et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks // Electric Power Systems Research. – 2018. – V. 154. – P. 391–400.
2. Gomez J.C., Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of volt-age sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment // Conf. Rec. – IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc. – 2001. – Vol. 2, no. C. – P. 1196–1199.
3. Зацепина В.И. Моделирование провалов напряжения в системах электроснабжения металлургических производств / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 247–251.
4. Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 43–50.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ВАН ДЕ ГРААФА

А.Н. Хмелькова

МОУ Лицей № 1, г. Ачинск

Руководитель: Т.Н. Протасов, учитель физики МОУ Лицей № 1

Для научных и технических целей (например, в ядерной физике, радиобиологии, рентгенотерапии и пр.) необходимы устройства, позволяющие получать напряжения в несколько миллионов вольт. Такими устройствами являются электростатические генераторы высокого напряжения [1].

В настоящее время большое количество разнообразных моделей таких генераторов используются для физических экспериментов, или в качестве аттракциона для развлечений и демонстраций действия статического электричества [2].

Генераторы высокого напряжения

Электромагнитные: катушка Румкорфа и трансформатор Тесла.

Электронные: генератор Маркса и генератор Кокрофта – Уолтона.

Электростатические: генератор Ван де Граафа и капельница Кельвина.

Электростатические (индукционные) машины – источники малых токов и высокого напряжения, в которых материальные носители электричества попарно заряжаются с помощью электростатической индукции или с помощью трибоэлектрического эффекта (появление электрических зарядов в материале в результате механического воздействия). Совершённая при этом механическая работа против действия электрических сил по разделению зарядов в пространстве преобразуется в энергию электрического поля, которая и создает разность потенциалов.

Наиболее известен из них генератор Ван де Граафа, который создал в 1929-м году американский физик Роберт Ван де Грааф.

Проанализировав информацию в сети Интернет, касающуюся высокого напряжения и способов его генерации, мы решили в условиях школьной лаборатории своими руками из подручных средств изготовить модель электростатического генератора Ван де Граафа, по своим характеристикам не уступающую коммерческим образцам.

В качестве двух высоких колон из изолирующего материала мы использовали две трубы ПВХ, на которых будут располагаться металлические сферы.

Необходимо было сделать нижний и верхний ролики, которые бы обеспечивали натяжение ленты и раскручивали ее. В среде онлайн – сервиса «Tinkercad» были созданы 3D модели необходимых деталей. При помощи 3D-принтера модели были напечатаны из ABS пластика.

Далее мы распилили металлический стержень на несколько частей. Две части нам нужны, чтобы закрепить ролики в трубе, а две другие понадобятся нам позже. Просверлили в колоне несколько отверстий, установили ролики.

Изучив информацию в интернете, мы сделали вывод, что наиболее подходящей диэлектрической лентой будет бинт Мартенса. Для того, чтобы бинт превратить в замкнутое кольцо, мы обезжирили концы и склеили клеем с небольшим нахлестом.

Необходимо было придумать механизм, который вращал нижний ролик и приводил в движение всю систему. Для этого из школьной лаборатории физики были взяты моторчик и несколько шестеренок, соединили все зубчатым ремнем.

Немалую роль в постройке генератора играет материал роликов. Нижний мы покрыли алюминиевым скотчем. К верхнему ролику был приклеен отрезок полиэтилена.

Следующая часть генератора – щётки. Они были сделаны из отрезка многожильного медного провода, который оголяется от изоляции, распушается и припаивается к металлическим стержням (при помощи ортофосфорной кислоты). Нижняя и верхняя щетки будут соединяться с противоположными сферами. Прикрепить щётки нужно возле роликов вверху и внизу, лента не должна их касаться.

Мы приобрели по две миски из нержавеющей стали разного диаметра. По краям мисок были сделаны отверстия, после запаяны с использованием ортофосфорной кислоты и припоя. Далее необходимо было сделать отверстия под диаметр трубы, которые мы вырезали с помощью дремеля. Готовые сферы мы закрепили на изолирующих колонах алюминиевым скотчем.

Устройство было протестировано в одном из кабинетов нашего Лицея. Длина искры между сферами составила 2–3 см, что указывает на напряжение около 25 кВ. Также мы заметили, что получаемое напряжение на генераторе, а также мощность и длина искры во многом зависит от влажности воздуха в помещении.

К преимуществам устройства можно отнести: низкую стоимость материалов для его изготовления (около 4300 рублей), простоту в изготовлении и достаточную эффективность, в сравнении с промышленными образцами подобных устройств.

Существенными недостатками являются ограничения по величине получаемых напряжений и разрядов, а также повышенные требования к пробойному напряжению колонны и ленты.

Работа по изучению материала, касающегося высокого напряжения и способов его генерации, модернизации данного устройства продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Херб Р. Ускорители Ван де Граафа. – 1962. – 80 с.
2. Казанжи К.К. Статическое электричество // Новое в жизни, науке, технике. – 1965.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЯ В КОНЦЕПЦИИ «УМНЫЙ ГОРОД»

А.С. Ванюшкин, Р.Л. Горбунов, А.Д. Шишкин

МАОУ Вторая Новосибирская Гимназия

По прогнозам аналитиков и экспертов к 2030 году доля крупных городов в суммарном балансе энергопотребления достигнет 75 % [1, 2]. В связи с этим на концепцию «Умный город» возлагаются особые надежды по снижению объема и выравниванию профиля ежесуточного потребления электроэнергии в городской инфраструктуре посредством рациональной организации режимов работы электрооборудования [3].

Присущая концепции «умного» города высокая степень интеграции информационно-коммуникационных технологий со сбором и обработкой в режиме реального времени больших объемов данных создает почву для поиска оптимальных стратегий управления энергоемким оборудованием городской инфраструктуры [4]. Однако, внедрение подобных новшеств без предварительной верификации и отладки недопустимо, т. к. в любой момент с катастрофическими последствиями может нарушиться функционирование городских служб. В тоже время отладка на физическом оборудовании крайне проблематична, т. к. оборудование повседневно задействовано в городской инфраструктуре. Более того, подобного рода эксперименты несут риски повреждения оборудования и повышенную опасность для жизни и здоровья горожан.

Вместо проведения экспериментов на действующем электрооборудовании городской инфраструктуры предлагается создавать и использовать цифровые двойники. Под цифровым двойником понимается виртуальная модель, реализованная на аппаратной платформе, способная адекватно целевой задаче воспроизводить, прогнозировать и предсказывать характеристики энергопотребления моделируемого физического электрооборудования в зависимости от факторов, принятых в качестве внешних независимых, а также от задаваемых оператором стратегий управления. Двойник создается на основе накопленных и поступающих в реальном времени данных об энергопотреблении функционирующего физического электрооборудования. Таким образом, предлагаемые оптимальные стратегии управления становится возможным апробировать на цифровом двойнике и уже отлаженный вариант внедрять в действующее городское оборудование. Предлагаемая технология гармонично вливается в концепцию «умного» города – двойник создается на основе данных, уже собираемых информационной системой «умного» города в режиме реального времени, необходимо лишь разработать технологию создания.

Среди современных подходов к созданию таких моделей наиболее популярны методы машинного обучения – многомерная регрессия и искусственные нейронные сети, подразумевающие настройку (обучение) модели по реальным данным, получаемым с объекта моделирования в ходе его повседневной эксплуатации [5]. Наряду с повышенной точностью результатов моделирования главным достоинством такого типа моделей является возможность актуализировать параметры даже на стадии непосредственного функционирования, т. е. адаптивно подстраиваться под текущее состояние/конфигурацию моделируемого физического объекта с целью максимально адекватно прогнозировать его поведение на протяжении всего жизненного цикла. Иными словами, даже если моделируемый объект модернизируется уже после создания двойника, двойник подстроится и сможет адекватно воспроизводить поведение объекта благодаря обучению по вновь поступающим данным.

Таким образом, принимая во внимание тот факт, что концепция «Умный город» по своей сущности основана на сборе и накоплении данных, настройка цифровых моделей на реаль-

ных данных гармонично вписывается в концепцию и поэтому выбрана в качестве главного методического инструментария в данной работе.

В качестве объекта моделирования в данной работе принят электропривод. Выбор объекта моделирования обусловлен тем, что в городской инфраструктуре электроприводы относятся к одним из наиболее распространенных энергоемких потребителей. Электроприводы используются в насосных станциях городских служб и частных хозяйств, системах вентиляции и кондиционирования, лифтах и эскалаторах, трамваях и троллейбусах, исполнительных механизмах дверей и шлагбаумов, а также в иных приложениях.

Входные переменные модели: полезная мощность нагрузки (P, Вт), напряжение питания (U, В), частота (скорость) вращения вала (n, об/мин) электропривода.

Выходные переменные модели: ток (I, А), потребляемый электроприводом, – в режиме U = const отображает суммарное энергопотребление ($U \cdot I$, Вт).

Главной отличительной особенностью представленного проекта является его направленность на решение проблем в русле оптимизации энергопотребления оборудования «умного» города.

В целях решения поставленных задач собран макет электропривода мощностью 37 Вт. Силовой каскад состоит из стабилизированного регулируемого источника напряжения 2–12 В, электродвигателя постоянного тока модели 775 (6000 об/мин, 12 В) с датчиком скорости, электрогенератора постоянного тока и потребителя электрической мощности. Макет представлен на рис. 1.

Регрессионная модель на аппаратной платформе создавалась поэтапно. В первую очередь создана виртуальная версия модели в переменных «вход-выход» в форме полиномиальных функций порядка K.

В ходе имитационного моделирования электропривода сгенерированы эталонные данные в объеме 3680x4 числовых значений, соответствующих 46 значениям питающего напряжения электродвигателя из диапазона 2–11 В. Из этого массива данных в обучающий набор выделены данные размером 3520x4, соответствующие 44-м (из 46) значениям питающего напряжения, а именно, все данные, кроме соответствующим U_1=8 В и U_4=11 В. Оставшиеся 160x4 выделены в контрольную выборку и использованы в целях верификации [6].

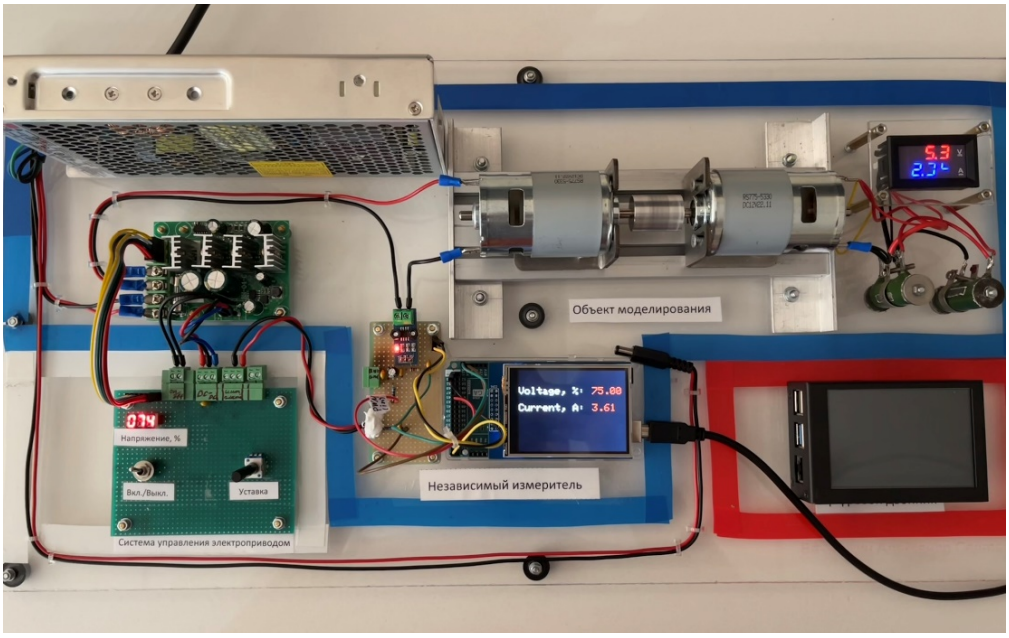


Рис. 1. Макет электропривода

Верификация и числовая оценка адекватности модели выполнена путем сравнения прогнозируемых значений потребляемого электроприводом тока с эталонными значениями из контрольной выборки (рис. 2).

В качестве числового показателя степени отклонения принята среднеквадратическая ошибка (табл. 1, рис. 3):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{y_n - \tilde{y}_n}{y_n}\right)}, \quad (1)$$

где y – эталонное значение тока; $\tilde{y}$ – значение тока, прогнозируемое цифровым двойником; N – количество сравниваемых числовых значений.

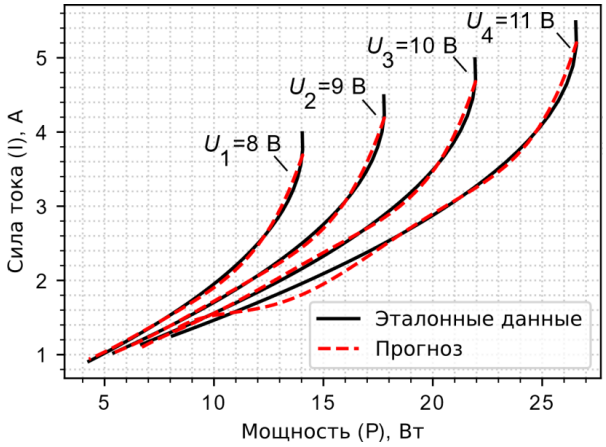


Рис. 2. Семейство графиков зависимости силы тока, потребляемой электроприводом, от мощности потребителя (регрессия порядка K=5)

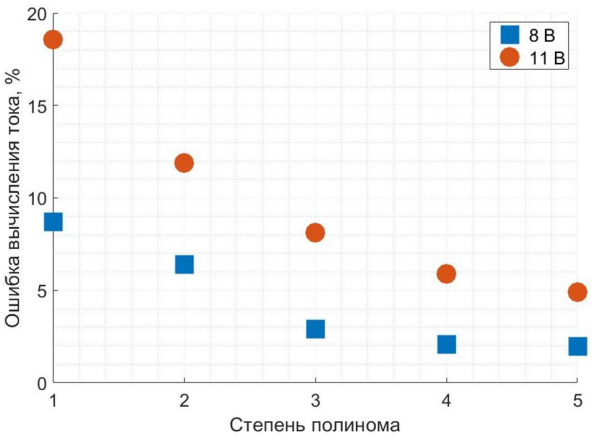


Рис. 3. Семейство графиков зависимости силы тока, потребляемой электроприводом, от мощности потребителя (регрессия порядка K=5)

Таблица 1. Среднеквадратическая ошибка (%) предсказания силы тока, потребляемой электроприводом, посредством полиномиальной модели порядка K

K	1	2	3	4	5	Примечание
U_1 = 8 В	8,70	6,38	2,91	2,08	1,98	Контрольная выборка
U_2 = 9 В	7,70	5,05	3,67	2,14	1,38	Обучающий набор
U_3 = 10 В	11,58	4,54	2,53	2,04	1,79	
U_4 = 11 В	18,57	11,89	8,12	5,89	4,90	Контрольная выборка

В качестве критерия выбора степени полинома задана допустимая ошибка моделирования до 5 %, которой соответствует степень полинома K = 5.

Нейросетевая модель создана в среде Python на основе библиотеки PyTorch. Принята трехслойная структура сети по типу FeedForward, содержащая 1 скрытый слой и динамические связи. Нейросеть настроена под обучение методом «Обучение с учителем» и апробирована на тестовых данных.

В результате создан аппаратный цифровой двойник электропривода постоянного тока. Двойник воспроизводит энергопотребление электропривода (в виде силы потребляемого тока) в зависимости от факторов, принятых в качестве внешних независимых переменных, характеризующих его режим работы в составе оборудования инфраструктуры «умного» города.

Ошибка воспроизведения цифровым двойником энергопотребления электропривода на обучающем наборе данных не превышает 2 %, а на контрольной выборке – до 5 %.

Отработана и алгоритмизирована процедура автоматической перенастройки цифрового двойника, обеспечивающая в том числе возможность актуализации модели по вновь поступающим данным с реального физического объекта.

В ближайших планах решаются задачи по повышению точности и адаптивности цифрового двойника посредством нейросетевой модели и расширение его области применения. Результаты работы имеют широкие перспективы применения не только в решении задач «умного» города, но и в качестве самостоятельной сквозной технологии в сфере авиационного, космического и автомобильного приборостроения, энергетике и многих других отраслях, активно трансформирующихся в направлении цифровизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Dwyer E., Pan I., Acha S., Shah N. Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions // Applied Energy. – 2019. – Vol. 237. – P. 581–597. – ISSN 0306-2619.
2. Cities will account for 75% of world energy consumption and 80% of greenhouse gas emissions in 2030. – URL: https://www.fundacionnaturgy.org/en/cities-will-account-for-75-of-world-energy-consumption-and-80-of-greenhouse-gas-emissions-in-2030/
3. Almihat M.G.M., Kahn M.T.E., Aboalez K., Almaktoof A.M. Energy and Sustainable Development in Smart Cities: An Overview // Smart Cities. – 2022. – Vol. 5. – P. 1389–1408.
4. Humayun M., Alsaqer M.S., Jhanjhi N. Energy Optimization for Smart Cities Using IoT // Applied Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 36 (1). – P. 2037255, DOI: 10.1080/08839514.2022.2037255.
5. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – 1-е изд., испр. и доп. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
6. Ванюшкин А.С. Цифровая модель электропривода постоянного тока на основе машинного обучения / А.С. Ванюшкин, Р.Л. Горбунов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 11-ти частях, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 года / под ред. А.С. Казьминой. Ч. 6. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. – С. 13–16. – EDN XVYZIJ.

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ ТЕРМО-ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ И УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ТЕПЛА

А.А. Зволь

ученик 9 класса МБОУ СОШ № 2, г. Саяногорск, Республика Хакасия

Научный руководитель: Н.Г. Канаш, учитель физики, МБОУ СОШ № 2,
г. Саяногорск, Республика Хакасия

Одна из главных проблем при производстве электроэнергии на ТЭС способом преобразования тепла – это его потери в процессе производства. При преобразовании часть тепла уходит во время его транспортировки от нагревателя до генератора, остальная – во время самого процесса. Другой проблемой является не полное использование потенциала производимой энергии. Моя задача – решить эту проблему и улучшить эффективность генераторов.

Пар от котла, проходя по трубам, отдает тепло воздуху, уменьшая количество энергии, получаемое в итоге из-за уменьшения температуры пара и впоследствии уменьшения его давления. Одним из простых решений этой проблемы является покрытие труб теплоотражающими экранами, которые состоят из вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой. Но этот способ достаточно дорогостоящий и не самый эффективный.

Для уменьшения потерь энергии я предлагаю делать двухслойные трубы с прочным каркасом (рис. 1). По внутреннему диаметру трубы будет проходить пар, внутри внешнего диа-

метра будет откачан воздух и создан вакуум. Тепло от пара не сможет уйти из трубы благодаря вакууму. Так же можно сделать внешний слой из достаточно прочного полимера, плохо проводящего тепло и способного выдерживать атмосферное давление.

Каркасные перегородки используются для укрепления конструкции и придания достаточной прочности, способной выдержать атмосферное давление.

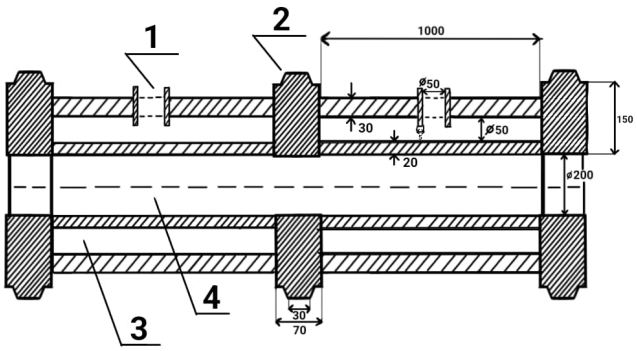


Рис. 1. Чертеж трубы с вакуумной теплоизоляцией в разрезе:
1 – техническое отверстие для запирающего клапана;
2 – каркасная створка; 3 – полость для вакуума; 4 – полость для пара

Трубы длиной 2 метра, соединяются с помощью каркасных створок и свариваются между собой.

Для второй проблемы было так же найдено решение. Пар, проходя через турбину, охлаждается, и тепло, полученное во время его нагрева, просто уходит без пользы. Моим предложением является – на выходе устанавливать генераторы Стирлинга (рис. 2), расходующие тепло для производства дополнительной электроэнергии. Это хоть и незначительно, но повысит КПД тепло- и электростанций.

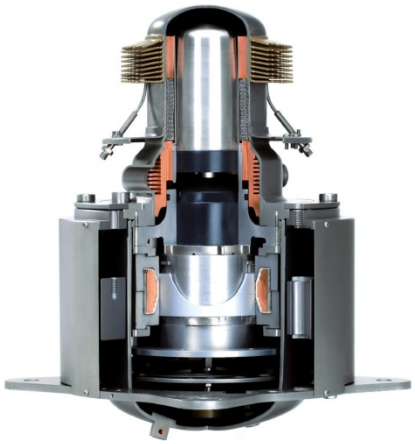


Рис. 2. Генератор Стирлинга

Генераторы Стирлинга можно установить на выходе из турбины, где пар имеет достаточно высокую температуру. Пар, пройдя через генераторы, охладится и стечёт конденсатом, переходя в новый цикл. Электроэнергию, которая будет выработана в итоге, будет использована для питания магнитных подшипников. Также эту энергию можно использовать как вспомогательную при резком увеличении потребления электроэнергии, что повысит стабильность в электросети.

Другая причина потерь энергии – это трение на подшипнике винта турбины. Пару требуется дополнительное усилие для преодоления этого трения во время вращения. Предлагается использовать магнитные подшипники (рис. 3). Их трение практически нулевое и срок службы дольше из-за меньшего износа, так как части ротора не касаются друг друга, и требуется менять только магнитные элементы конструкции.

Рис. 3. магнитный подшипник

Основным преимуществом магнитного подшипника является способность развивать большую скорость оборотов. В рамках паровой турбины, это очень полезное свойство. Также такие подшипники имеют высокую устойчивость к

неблагоприятной среде. Они не теряют своих рабочих качеств при высокой влажности, в вакууме и при наличии химических веществ в зоне работы. На ТЭС достаточно суровые условия для техники и такие подшипники идеально подходят для таких испытаний. Ещё одним преимуществом, является его прочность и устойчивость к механическим воздействиям, с возможностью менять жесткость подшипника.

Станции с такими новшествами позволят строить новые города с большей скоростью, так как количество электроэнергии от одной станции будет больше. Ещё можно выделить уменьшение количества выбросов от станции. Такие станции будут использовать меньше ресурсов, чем обычные, оборудование будет реже изнашиваться, соответственно, будет меньше отходов.

В заключение могу сказать, что станции с новой конструкцией, в теории, имеют большую эффективность и оптимизацию производства энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности и особенности магнитных подшипников // Промзапчасть. – https://promzapshast.ru/novosty/magnitnye-podshipniki (дата обращения 16.11.2023)
2. Двигатель Стирлинга и газовый котел Vitotwin 300 w // Profik. – https://profik.com.ua/dvigatel-stirlinga-i-gazovyj-kotyol-vitotwin-300-w-alternativnyj-istochnik-elektroenergii-poluchenie-elektrichestva-iz-gaza-samyj-luchshij-gazovyj-generator/ (дата обращения 16.11.2023)

ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР

Н.Л. Корляков

МОУ СОШ № 4, г. Стрежевой

Введение

За последние 5 лет с развитием электрических приборов возросла зависимость потребляемой энергии на 1,79 % (по источнику сайта conomy.ru).

Тут появляется главные вопросы: «Что делать если села батарейка?», «Как получить энергию практически в любом месте?».

Идея мне пришла, когда мы семьёй по весне убирали снег на даче (снег в любой момент мог начать таять, и затопить территорию). На улице и в самом доме было прохладно, свет на дачах зимой отключают, включают только на летний сезон. Телефон на морозе начал садиться, и я зашел в дом. Сидя за столом в холодном доме, пил чай из термоса, рядом горела свеча. Тогда-то я и задумался, возможно ли получить электричество из тепла свечи? Оказалось, такая возможность есть! Термоэлектрогенератор – устройство, которое из тепла свечи, вырабатывает электричество.

Таким образом, идея моего проекта – это создание действующей модели термоэлектрогенератора с размерами 20×20×40 см, используя подручные средства и модули Пельтье, получить из обычной свечи электроэнергию для питания электрический техники.

Создание действующей модели термоэлектрогенератора, которую можно использовать в любых условиях, позволит расширить возможности использования электрических приборов для любого человека. Но, как я выяснил, *этот прибор будет актуален и для профессий, чья работа связана с нахождением в труднодоступных местах без цивилизации и, естественно, электричества.*

Прикладной характер проекта: созданная модель термоэлектрогенератора можно использовать в условиях отсутствия электричества (серийное производство), а также на уроках физики в 10 и 11 классах при изучение тепловых и электрических явлений.

Анализируя ресурсы и риски проекта, я пришел к выводу, что при большом усердии и старании, поддержке педагогов-наставников, использовании специальных устройств, можно самостоятельно сделать модель термоэлектрогенератора.

Описание алгоритма

Для реализации проекта был составлен план работы.

На первом этапе:

- изучить литературу по данной теме;
- нарисовать схему термоэлектрогенератора;
- подготовить необходимый материал.

На втором этапе:

- собрать действующую модель термоэлектрогенератора;
- провести испытание работы термоэлектрогенератора.

На третьем этапе продемонстрировать работу термоэлектрогенератора на уроке, представить проект на заключительном этапе проекта «Большие вызовы».

Рассчитал смету и бюджет проекта. В результате создания термоэлектрогенератора необходимо потратить 5535,82 рублей. В данный момент все необходимое оборудование заказано и есть в наличии.

Суть портативного термоэлектрогенератора заключается в преобразовании тепловой энергии в электрическую. В результате нагревания одной стороны элемента Пельтье и охлаждения другой, мы может получить электричество.

Схему устройства рисовал согласно заданным размерам необходимым для сборки.

Принцип работы термоэлектрогенератора. Свеча нагревает металлическую трубу в центре конструкции, на которой закреплены элементы Пельтье. Модуль Пельтье – это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье – возникновении разности температур при протекании электрического тока. Количество теплоты пропорционально току, проходящему через проводники. Полученный электрический ток передается на понижающую плату, которая конвертирует ток в USB подключатель.

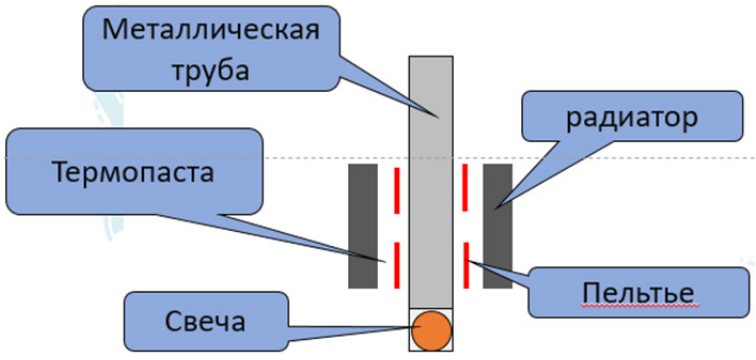


Рис. 1. Схема проекта

Приступил к сборке термоэлектрогенератора. Сварил каркас из металла, с размером 20×20×40 см. Основной элемент (металлическая труба 40×40 мм и высотой 40 см) расположил в центре. Процесс сварки и обработки конструкции после сварки болгаркой, по времени заняло около 2-х дней. Предоставил ангар и помогал мне в сварке – мой дядя Титаренко Сергей Владимирович.

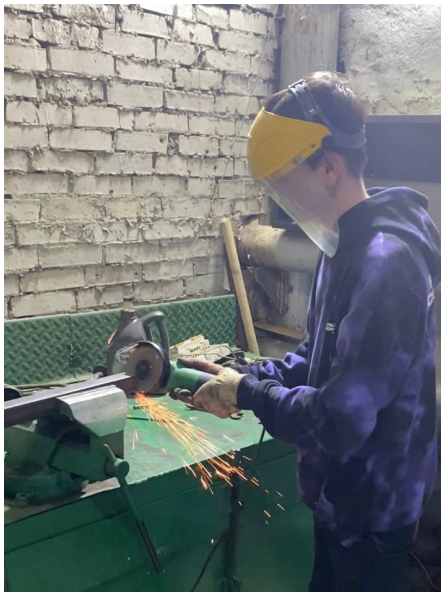


Рис. 2. Подготовка конструкции

Рис. 3. Обработка конструкции

Рис. 4. Готовый вид конструкции

Внизу центральной трубы сделал отверстие для свечи. Которая будет разогревать трубу для нужной температуры.

Выглядит красиво и надёжно, остаётся только одно из самых и интересных – электроника. На центральной трубе закрепил элементы Пельтье. На элементы Пельтье наложил термопасту и сверху алюминиевые радиаторы. За счёт высокой температуры трубы и низкой температуры радиаторов (радиаторы рассеивают тепло), Пельтье вырабатывает электричество. Элементы Пельтье между собой соединены клеммовыми колодками последовательно, что позволяет нам получить общий ток со всех элементов сразу без потерь. Соединяем с USB преобразователем.

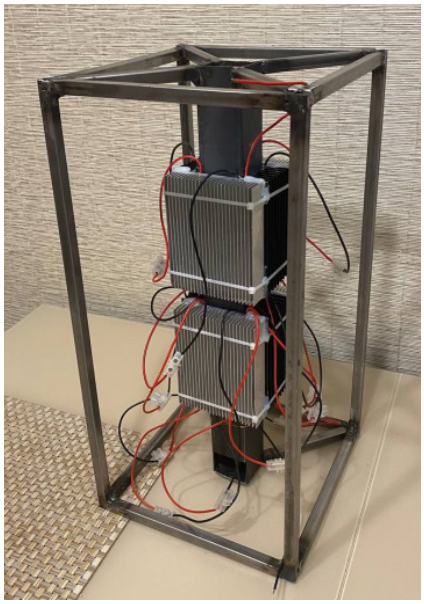


Рис. 5. Готовый проект

Проверка на работоспособность

Проверять буду на USB фонарике, кольцевой лампе и зарядке для телефона.

Поставил свечу для запуска, труба проекта нагрелась до 75 °С, придел элементов Пельтье – 80 °С, всё получилось, как я и задумывал. Замерил напряжение на проводах цепи, оказалось всего 2В, так не должно быть, хотя этого напряжения хватило для USB фонарика, кольцевой лампы и слабой зарядки телефона. Внимательно несколько раз проверил схему последовательного соединения, всё хорошо. Обратился к сети Интернет и в одном из форумов мне посоветовали между трубой и элементом Пельтье, положить медный лист, толщиной не более 1 мм для того, чтобы тепло с трубы расходилось равномерно на элемент. Значит термоэлектрогенератор требует доработки. На данный момент листы меди толщиной 0,5 мм нашел и заказал. Через месяц планирую провести проверку устройства. В итоге, панируется достичь за счёт медного листа 3В, что позволит улучшить устройство.

Заключение

Проект считаю завершённым, но не до конца. В блажащие время, ищу способы поднять напряжение в своём проекте.

Сборка и изучение материалов, мне доставила не забываемые эмоции. Получил опыт и свой эксклюзивный термоэлектрогенератор, который не купишь в магазине и не найдёшь вовсе. Данный проект частичка меня, именно в него я вложил свою душу и свои силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термоэлектрогенерадор // Википедия. – https://ru.wikipedia.org/wiki/Термоэлектрогенератор
2. Элемент Пельтье // Википедия. – https://ru.wikipedia.org/wiki/Элемент_Пельтье
3. Термоэлектрический генератор (ТЭГ) на модулях Пельтье. – https://pikabu.ru/story/termoyelektricheskiy_generatortyeg_na_modulyakh_pelte_7179187
4. Элемент Пельтье. Он же генератор, он же холодильник, он же подогреватель. – https://dzen.ru/a/Xasbpe11ACyIwej
5. Термогенератор Пельтье своими руками. – https://tutankanara.livejournal.com/420783.html
6. Элемент Пельтье как генератор электроэнергии. – https://crosna-electra.ru/poleznoe/pelte-generator.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F
7. Термоэлектрический генератор ТЭГ 1 Свеча. Термоэлектричество. Элемент Пельтье. – https://youtu.be/zs_zRaEqsoA?si=zFCumRzzgDzUbggS
8. Электричество из огня. На что хватит энергии одной свечи? – https://youtu.be/nGTyDiVd8SU?si=BfwgsoyXdTJeudsW
9. Как сделать термогенератор своими руками. – https://youtu.be/7smnYYZu9MU?si=ZeFn1xNB0z-ZE92V
10. Электро-Генератор ХАЛЯВЫ в действии. ФактоРеальность на кухне. Пельтье на батарею. – https://youtu.be/PzrdeM3e_Jo?si=mhWZa1Sh-Uwj8ItE
11. Компактный термоэлектрогенератор. – https://youtu.be/bt2StYH6tEY?si=RRjWvS0Cs7GtrXYK
12. Термоэлектрический генератор на модулях Пельтье. – https://youtu.be/uYkJrv8lcGE?si=z3auQAAD29snyEIG
13. Модуль для зарядки MH KC24 (понижающий преобразователь Quick Charge) . – https://youtu.be/VTaqU2CR3Vs?si=_B72hqiDkFlm7US9
14. Термогенератор на элементе Пельтье. – https://youtu.be/9YcYki1PZgo?si=a4C2ZjUMPDj27Lnk
15. Элемент Пельтье TEC1-12706. Тест на охлаждение и получение электроэнергии. – https://youtu.be/PScbY7EsrpE?si=8QnKRQbv8cAnqOhN
16. Термоэлектрогенератор походный . – https://youtu.be/3fDF8zH6WK8?si=1rLpCV2YBpaC1mHI
17. Галилео. Эксперимент. Элемент Пельтье. Peltier Element // https://youtu.be/Ot6YbQ5cw74?si=benGFibOVbahjCmq
18. Что такое элемент пельтье и как его использовать. – https://youtu.be/ez4bOyfROmg?si=XTIBIeSt3eGCP9td
19. Проверка исправности элемента Пельтье. – https://youtu.be/RCbJXyfxyHs?si=BVxAVUe3G6WrbKUt
20. Революционный прорыв в энергетике от Алексея Иванченко! Новый тип Элемента Пельтье! Игорь Белецкий. – https://youtu.be/NMNdXEH3Lxg?si=3D0gRgsHdSds7o9v
21. Эксперимент по постройке термоэлектрического генератора на основе элементов Пельтье. – https://habr.com/ru/articles/376285/
22. Термоэлектрический генератор своими руками: видео, фото, инструкция. – https://sam-electrik.blogspot.com/2021/03/blog-post_78.html
23. Термоэлектрический генератор. – https://elquanta.ru/generatory/termoehlektricheskijj-generator.html
24. Как получить электричество из тепла – использование элемента Пельтье для выработки энергии, сборка термогенератора. – https://masterclub.online/topic/16048-termoelektricheskii-generator
25. Элементы пельтье или бесплатное электричество от костра. Термогенератор пельтье своими руками Пластины пельтье для выработки электричества от печи. – https://ladomspb.ru/tools/elementy-pelte-ili-besplatnoe-elektrichestvo-ot-kostra-termogenerator/
26. Элемент Пельтье. – https://vashtehnik.ru/enciklopediya/element-pelte.html
27. Сопротивление элемента пельтье. Модуль Пельтье: технические характеристики. – https://sosedi-fp.ru/types-of-wireless-networks/soprotivlenie-elementa-pelte-modul-pelte-tehnicheskie-harakteristiki-element-pelte-chto-eto.html

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ПОРТАТИВНОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ПУТЕШЕСТВЕННИКОВ ИЛИ ЖИТЕЛЕЙ ОТДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

М.Н. Трушников

МАОУ Гимназия № 12, 10 класс, г. Новосибирск

Научный руководитель: Н.М. Чиляева, учитель физики высшей квалификационной категории

Сегодня мир стоит перед множеством энергетических и экологических вызовов. Одним из наиболее серьезных из них является необходимость перехода к чистым источникам энергии. Ископаемые топлива, такие как нефть и уголь, которые долгое время были основными источниками энергии, оказывают разрушительное воздействие на окружающую среду, вызывая изменение климата и загрязнение воздушных и водных ресурсов. Это приводит к росту интереса к альтернативным источникам энергии, которые могли бы удовлетворить наши энергетические потребности, не вредя окружающей среде.

Гидроэнергия, основанная на движении воды, давно используется для производства электроэнергии. Она является одним из наиболее чистых источников энергии, не выбрасывая в атмосферу парниковые газы и не загрязняя водные ресурсы. Однако гидроэлектростанции представляют собой огромные строения, на постройку которых уходят десятки лет. В мире существует множество отдаленных населенных пунктов, к каждому из этих пунктов невозможно построить гидроэлектростанцию. В этом контексте портативная гидроэлектростанция представляет собой интересное решение. Портативная мини гидроэлектростанция представляет из себя переносной альтернативный источник энергии, который можно как взять с собой в путешествие, так и при опреде ленном подборе комплектующих при ее помощи обеспечить небольшой населенный пункт. Мы же разработали портативную гидроэлектростанцию, которую можно брать с собой в путешествие. Так как мы создали лишь макет мини ГЭС будет выдавать небольшое количество тока, но задача добиться того, чтобы при помощи нашей мини гидроэлектростанции можно было зарядить телефон, или, например, зажечь ряд светодиодных лампочек.

При создании нашей портативной гидроэлектростанции было уделено отдельное внимание простоте конструкции, для того чтобы в будущем была возможность создания пособия для создания данной мини ГЭС, либо для возможности разбора портативной ГЭС для более удобного хранения и транспортировки, так же для этого будет создана инструкция по сбору данного продукта.

Портативная гидроэлектростанция, изготовленная нами, представляет собой аксессуар для путешествий, но при установке нескольких более мощных генераторов и больших винтов при помощи данного прибора можно будет снабжать электроэнергией небольшой населенный пункт.

Для создания модели портативной мини гидроэлектростанции мы использовали материалы из строительного магазина, поэтому конструкция получилась проста.

Для того, чтобы преобразовывать энергию течения реки в электроэнергию нам необходимо преобразовать поступательное движение во вращательное, а затем передать вращательное движение на генератор, который преобразует эту энергию в электроэнергию. В качестве винта, который преобразует поступательное движение во вращательное мы использовали винт от вентиляции диаметром 120 мм (цена: 3000 рублей).

В качестве генератора, который преобразовывает механическую энергию в электроэнергию мы использовали мотор от ручной дрели от фирмы Dewalt (цена: 6000 рублей).

Для повышения эффективности мотор от ручной дрели заменен на ручной генератор, который способен вырабатывать ток мощностью 20 Вт и напряжением 5–24V (цена: 1500 рублей), и по сравнению с мотором от ручной дрели требует меньшую скорость вращения для вырабатывания электрического тока. Также для более высокой эффективности при создании были учтены компоненты, способствующие уменьшению сопротивления воды с некоторыми компонентами конструкции. От генератора был выведен USB-разъем для возможности подключения разных приборов.

Портативная мини ГЭС предусмотрена для разного рода дна реки. Таким образом, были изготовлены ножки, которые регулируются по высоте, а также веревок, при помощи которых мини ГЭС крепиться в случае твердого дна, в том случае установка может быть закреплена путем вдавливания ножек в дно реки.

По окончании создания мы получили портативную мини гидроэлектростанцию (общая цена: 6000), которая может вырабатывать небольшой переменный ток, а именно ток мощностью в 20 Вт, напряжением до 24V. При помощи данной мини ГЭС можно освещать небольшой палаточный лагерь. Тест в домашних условиях показал, что данная модель мини ГЭС требует не больших оборотов, так как при переизбытке оборотов в минуту генератор, которым оснащена мини ГЭС может перегореть. При испытании портативной гидроэлектростанции при помощи ручной дрели нам удалось зажечь цепь светодиодных ламп, при этом винт модели не требовал к себе сильных усилий, что является хорошим показателем. Продукт нуждается в испытания на горной реке. На выходе из USB-разъема мы получаем ток напряжением 12 V и силой тока в 2,1 А. Путем подбора правильного отношения передаточного числа с ведущего на ведомый вал можно добиться более быстрых оборот генератора, но в таком случае модели будет нуждаться в регуляторе напряжения. Эта мини ГЭС адаптивна к разным видам дна реки. Данный продукт склонен к усовершенствованию.

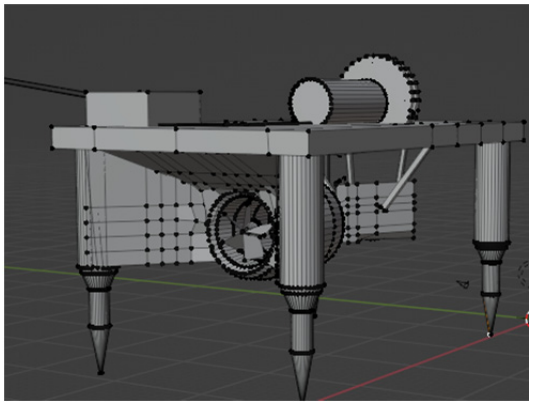


Рис. 1. 3D-моедль портативной мини ГЭС

Рис. 2. Генератор

Рис. 3. Конечный вид продукта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова А.И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – 2001.
2. Авакян А.Б., Шарапов В.А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. – М.: Энергия, 1977.

3. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. – М: Энергия, 1977.
4. Аршеневский Н.Н., Поспелов Б.Б. Переходные процессы крупных насосных станций. – М.: Энергия, 1980.
5. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Бабурин Б.Л., Файн И.И. Экономическое обоснование гидроэнергостроительства. – М.: Энергия, 1975.
7. Братская ГЭС вмени 50-летия Великого Октября, т. I. Основные сооружения. Проектирование и эксплуатация. – М.: Энергия, 1974.
8. Василевский А.Г., Штерн Б П. Опыт повышения эффективности эксплуатации гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1978.

ПЬЕЗОГЕНЕРАТОР – КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

А.А. Маслов

МОУ Лицей № 1, г. Ачинск

Научный руководитель: И.П. Нерода, учитель физики, МОУ Лицей № 1, г. Ачинск

Актуальность темы

Потребление энергии считается неотъемлемой частью жизни людей. Из литературы [1] я узнал, что множество городов России имеют проблему с экологией, так уже целых два города Красноярского края (Красноярск и Норильск) входят в десятку самых грязных городов России. В нашем городе достаточно высокие показатели загрязнения воздуха, воды и почвы. Поэтому мне стало интересно, как можно вырабатывать электрическую энергию, при этом, не загрязняя нашу планету, а также может ли это быть менее затратно и более эффективно, чем существующие способы получения электроэнергии. Люди в последнее время пытаются найти разные способы получения энергии, которые смогут хоть как-то сохранить природу нашего мира. Поэтому актуальность поиска различных альтернативных источников энергии важна, в частности чтобы сделать этот мир лучше и чище.

Постановка и формулировка проблемы

В последнее время из-за вредного воздействия на экологию различных заводов, автомобилей, в том числе и электростанций люди чаще болеют. Поэтому возникает проблема: как совместить хорошую экологическую обстановку и достаточное количество электрической энергии.

Разработанность исследуемой проблемы

Получить электроэнергию можно разными способами и даже в домашних условиях: с помощью бензинового, дизельного, газового генераторов. Но ведь газ, нефть, уголь и другие виды топлива, из которых мы получаем, кстати, 80–90 % всей энергии, относятся, как я узнал из литературы [2], к невозобновляемым источникам. Поэтому использование таких источников не бесконечно и не экологично. Эта ситуация заставляет задуматься и выдвинуть еще одну проблему: в любой день может наступить тот самый день энергетического кризиса, поэтому мы начинаем размышлять какими ещё способами мы можем получать электроэнергию. Решение заключается в том, чтобы использовать энергию солнца и ветра, не только являющимися источниками электроэнергии, но и производящими крайне малое влияние на окружающую среду. Конечно же, у всех способов получения альтернативной энергии есть свои минусы, но можно точно сказать, что они намного лучше, чем те же самые электростанции, вырабатывающие энергию с помощью невозобновляемых источников. К тому же

запасы ветра и солнца безграничны и бесплатны. Виды альтернативных источников: солнечная энергетика, ветроэнергетика, биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергетика, водородная энергетика, пьезоэлектричество.

Чтобы поближе познакомиться с пьезогенератором я использовал множество литературы. Мы видим, что пьезогенераторы уже применяются, они совершено безвредны, таким образом, данный способ получения энергии может быть весьма перспективным, поэтому необходимо продолжать исследования в данном направлении.

В начале исследования выдвинули гипотезу: с помощью пьезогенератора можно получить электричество достаточное для освещения комнаты или зарядки телефона.

Цель исследования: определить наиболее эффективный и экологически чистый способ получения электрической энергии.

Задачи исследования: 1) выяснить из литературы достоинства и недостатки пьезоэлектрического датчика; 2) сконструировать пьезогенератор; 3) оценить возможность эффективного использования пьезогенератора в быту.

Объект исследования: пьезогенератор.

Предмет исследования: оценка возможности эффективного использования пьезогенератора в быту.

Методы исследования: анализ, описание, измерение, сравнение, опыт, конструирование.

Изучив литературу [3], рассмотрели достоинства и недостатки пьезоэлектрического датчика. Несмотря на то, что пьезоэлектрический датчик не загрязняет окружающую среду, является экономичным и простым в обращении, а также имеет довольно долгий срок службы его нельзя назвать источником тока и требует аккуратного обращения.

Посмотрев видео [4] сконструировал пьезогенератор по схеме (рис. 1). Для этого необходимы: светцодиод TM-8223, диодный мост S1WB S60 52, пьезоэлемент FT-27T-4.5B1 (был взят из игрушечного конструктора), провода. Для начала я соединил провода с пьезоэлементом, закрепил их двумя клеммами. Эти провода соединил с помощью пайки с двумя неполярными входами в диодном мосту, а уже другие провода спаял с полярными выходами из моста и спаял со светодиодом, учитывая плюс и минус. Как работает мой пьезогенератор вы можете посмотреть, перейдя по этой ссылке (https://www.youtube.com/watch?v=42Wd1c19qFs).

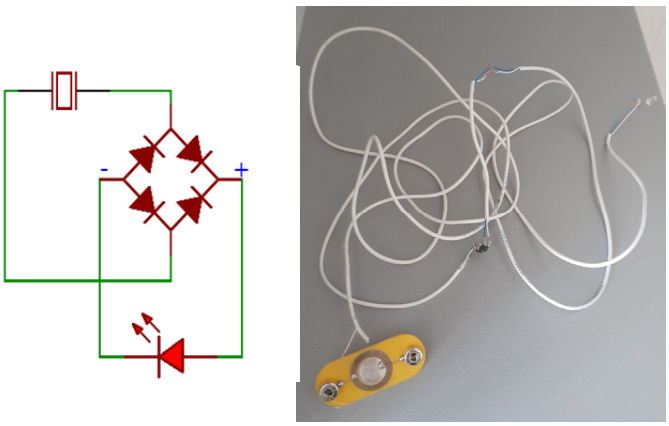


Рис. 1. Схема и фото пьезогенератора

Провел опыты, чтобы выяснить какими способами, используя механическую энергию, можно выработать больше электрической энергии с помощью пьезоэлемента.

В первом опыте воздействовали на пьезоэлемент потоком воздуха (ветром) на расстоянии 10 см от фена мощностью 1750–2100 Вт, имеющего две скорости. Чтобы измерить полученное напряжение при первой и второй скорости я использовал цифровой мультиметр и провел по пять опытов на каждой скорости, а потом вычислил среднее арифметическое значение

напряжения. Выяснили, что при увеличении скорости потока воздуха увеличивается напряжение, вырабатываемое пьезоэлементом.

Во втором опыте в качестве источника механического воздействия на пьезоэлемент я использовал воду, льющуюся под напором из душа (оставив в насадке одно отверстие) и рассматривал зависимость создаваемого напряжения от высоты, с которой льётся вода на пьезоэлемент. Для герметичности я использовал обычный полиэтиленовый пакет, прикреплённый скотчем к проводу. Провел по пять опытов падения воды с разной высоты, измерял напряжение цифровым мультиметром а потом вычислил среднее арифметическое значение напряжения.

Такой же опыт как предыдущий я повторил, но с бутылкой, в которой была проделано отверстие, уже из которого лилась вода.

Итак, при увеличении высоты, с которой льётся поток воды, увеличивается напряжение, вырабатываемое пьезоэлементом; сравнивая результаты двух опытов, видим, из-за различного напора струи воды напряжение во втором опыте уменьшилось 4,8 раза, следовательно, чем сильнее воздействуем на пьезоэлемент, тем больше получаем выходное напряжение.

Третий опыт был проведен с тремя шариками разной массы: 1, 5, 10 г. Каждый из них бросался с трёх разных высот на пьезоэлектрический датчик. Выяснили, что напряжение, вырабатываемое пьезодатчиком, зависит от высоты, а также и от массы тел.

Для последнего эксперимента я использовал обычный удар пальцем. Так как мне руководитель сказал, что такой опыт не совсем научный, я сравнил напряжение, полученное при «низкой силе удара» и «высокой силе удара» с напряжением при падении шариков. «Низкая сила удара» соответствует силе в 0,05 Н, «Высокая сила удара» – 0,1 Н. Мы видим, что, воздействуя на пьезодатчик небольшими силами, мы можем получить выходное напряжение для работы светодиода в 1 В.

Так как пьезоэлемент по большей степени преобразователь механической энергии в электрическую, то логично, что при большей механической энергии мы можем получить большую электрическую. Так, с помощью воды, к примеру, падающей с водосборной трубы во время дождя можно получить напряжение, которого будет достаточно для зарядки мобильных устройств (~5 вольт). Для зарядки телефона можно использовать преобразователь напряжения 0,9–5 В до 5 В 600 mA DC с usb-модулем. Так же напряжения будет хватать для освещения небольших участков, к примеру, отлично подойдет для чтения книг, если мы соединим светодиоды параллельно. И это при том, что получить напряжение можно всего лишь из обычной воды, ветра или различной другой механической энергии, создаваемой человеком в повседневной жизни.

Экономическая составляющая: пьезоэлемент FT-27T-4.5B1–б/у (10 рублей – 1 штука); провод длиной 1,5 м – 75 р.; светодиод – 20 р.; диодный мост S1WB S60 52 – 130 р. Итого: 225 р.

Таким образом, в ходе исследования гипотеза подтвердилась. С помощь пьезогенератора можно осветить комнату, хоть и не сильно ярко, а также напряжения вырабатываемое пьезогенератором хватает, чтобы зарядить телефон. Задачи исследования выполнены: выяснены из литературы достоинства и недостатки пьезоэлектрического датчика; составлена схема и сконструирован пьезогенератор; оценена возможность эффективного использования пьезогенератора в быту.

Моя работа имеет практическую значимость, потому что материалы моего исследования и составленные мною рекомендации помогут людям.

Проведя исследовательскую работу, пришли к следующим выводам: пьезоэлектрический эффект уже применяется во многих отраслях, использование пьезоэлектричества в быту широко распространено, к примеру для зарядки мобильных устройств, освещения участков, а также пьезоэлектричество встречается в пьезозажигалке. Исследования в этой области

крайне перспективны; процесс создания пьезогенератора довольно простой, к тому же очень доступный. А значит, что такие устройства для выработки электроэнергии могут использоваться повсюду; пьезоэлектричество не загрязняет окружающую среду, из-за чего его можно назвать «альтернативным»; однако пьезогенераторы производят энергию в малом количестве, по этой причине в данный момент они никак не могут быть единственным источником энергии в индустриальных рамках, но, несмотря, на это они имеют все шансы быть отличным второстепенным добавлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейтинг самых экологически грязных городов России. – URL: https://zuzako.com/reyting-samyh-ekologicheski-gryaznyh-gorodov-rossii/
2. Невозобновляемые источники энергии. – URL: https://lektsii.org/16-83219.html
3. Преимущества и недостатки пьезоэлектрического датчика. – URL: https://sci.house/oftalmologiya-scibook/preimuschestva-nedostatki-pezoelektricheskogo-86821.html
4. Как сделать Пьезогенератор своими руками в домашних условиях. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=FDyleBSqPAw

ЭНЕРГОНЕЗАВИСМОЕ ХОЗЯЙСТВО

Г.О. Волкомуров, Р.Н. Замалдинов, Е.В. Жиляева

ООДЮМЦ ДТ «Кванториум», г. Оренбург, «Энерджиквантум»

Научный руководитель: Е.В. Спиридонов, педагог дополнительного образования

Мы создали модель Энергонезависимого хозяйства, которая демонстрирует, как благодаря замкнутому циклу между сельскохозяйственным производством и выработкой энергии можно организовать хозяйство без выбросов CO_2 или даже с отрицательным уровнем выбросов углерода, получая при этом значительные выгоды.

Проблема надежного и качественного электроснабжения удаленных малонаселенных поселений, рассредоточенных по огромной территории России, остается острой в социальном, техническом и экономическом аспектах.

Проблема надежности энергоснабжения стоит не только в отдаленных поселениях, обслуживаемых источниками малой генерации. Есть необходимость в автономной генерации и в присоединенных к энергетической системе, но отдаленных поселениях с небольшими электрическими нагрузками в целях экономии на обслуживании линий электропередач, дорог и на услугах по доставке топлива.

Тестирование гипотезы о дефиците продукта

По оценкам ЦЭНЭФ (Центр по эффективному использованию энергии РФ), более 50 млрд руб. ежегодно тратится из федерального бюджета для субсидирования тарифов на энергию в изолированных регионах. Аналитический центр при Правительстве РФ оценивает общий объем бюджетных средств и перекрестного субсидирования тепло и электроснабжения по всей России на уровне свыше 70 млрд руб., большая часть которого направляется в северные регионы. Реализация проекта может значительно сократить эти субсидии без ущерба для экономической доступности и надежности энергетических услуг.

Дефицит энергии и ее дороговизна сдерживают развитие местной экономики и ограничивают возможности обеспечения комфортности проживания и освоения новых территорий.

Изучив различные виды альтернативной энергетики мы пришли к идее модели модульного построения энергонезависимого хозяйства. Основные модули: ветряная, солнечная энергоустановки и блок водородных топливных элементов. При этом водород в модели рассматривается и как энергоноситель, и как средство накопления избыточной электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ в периоды активного солнца и ветра, когда ее производство превышает спрос потребителей. В зависимости от потребности пользователя систему можно комплектовать модулем для получения биогаза из отходов жизнедеятельности животных, модулем приливных электростанций, модулем опреснения воды и другими. Также предлагается оснащение машин и механизмов, используемых в хозяйстве, водородными топливными элементами, отказавшись от использования двигателей внутреннего сгорания.

Аналоги

Во многих биоэнергетических деревнях изначально речь шла об отработанном тепле биогазовых установок. Это имело место в Юнде, первой биоэнергетической деревне в Германии, и в Мауэнхайме, первой в Баден-Вюртемберге.

Основной мощностью поселка Фельдхайм является ветряная электростанция в состав станции входят 55 ветряков. Еще одним источником энергообеспечения является солнечная электростанция, она состоит из тысячи солнечных панелей. Также в поселке была построена специальная аккумулирующая станция, которая обеспечивает бесперебойную работу и поддержку частоты электрической сети.

Установили биогазовую установку. Она предоставляет жителям поселка тепловую и электрическую энергию. Биогазовая установка работает на животных отходах и силосе.

В качестве вспомогательного источника тепловой энергии в поселке существует и твердотопливная котельная, функционирующая благодаря отходам от деревообработки и приводящаяся в действие в зимний период.

Если сравнивать с нашим хозяйством, конечно, данный проект намного масштабнее, но это не делает его лучше нашего, ведь наш проект является уникальным за счет внедрения технологии применения водорода в качестве и энергоносителя и средства для хранения энергии.

Крупнейшее в мире производство по преобразованию солнечной энергии в водород запустила китайская нефтегазовая и химическая корпорация Sinopec.

Ее завод укомплектован установками для электролиза воды, производства водорода, хранения и транспортировки водорода. При этом электролизеры питаются от солнечной электростанции и используют энергию ветра.

Проект рассчитан на производство 20 тыс. т зеленого водорода в год и позволяет поддерживать запасы водорода в объеме 210 тыс. кубометров.

Зеленый водород доставляется на нефтеперерабатывающий завод для замены ископаемого топлива. По расчетам, это позволит снизить выбросы углекислого газа на 485 тыс. т в год.

Energy Observer – первое в мире судно, которое использует энергию солнца, ветра и водорода, при этом водород выступает как энергоноситель т. е. батарейка.

В 2017 году судно вышло в кругосветное путешествие. За 6 лет катамаран должен побывать в 50 странах, совершив 101 остановку.

Данный проект поддерживают множество стран, т. к. это очень важно для наших дней, ведь экологическая обстановка в мире ухудшается, и мы должны начать бороться с этим.

В сентябре в России также планируется запуск электрокатамарана, работающего на водороде, но для повсеместного внедрения водородных пассажирских судов нужна развитая сеть заправочных водородных станций. С другой стороны этот перспективный вид водного транспорта не только экологичен, но еще и экономически выгоден судовладельцам.

Целевая аудитория

Наша система ориентирована для корпоративных (B2B) и государственных (B2G) заказчиков. Число децентрализованных систем энергоснабжения с высокими затратами на энергию превышает несколько тысяч, и они обслуживают более 11 млн человек. В Стратегии развития арктической зоны Российской Федерации до 2020 года, затрагивающей интересы 2 млн человек, проживающих в этой зоне, четко говорится о необходимости решать проблемы, связанные с энергоснабжением Арктики. Распределение поселков с децентрализованным энергоснабжением по численности обслуживают около 20 млн чел., которые живут на Крайнем Севере и в Сибири, что составляет около 70 % территории России. Около половины из них присоединены к автономным, но сравнительно крупным электрическим сетям. Более 11 млн чел. проживают в 11680 поселениях с небольшими автономными системами генерации, обслуживающими менее 10000 чел. каждая и использующими в основном дизельное топливо для выработки электроэнергии.

Принцип работы

Наша система работает следующим образом: электроэнергия, полученная от солнечного и ветряного модуля используется для удовлетворения потребностей хозяйства. Излишки идут на накопления в виде электричества в аккумуляторах и для получения водорода методом гидролиза из воды или методом пиролиза из биогаза (биометана), полученного от биомодуля. При этом водород рассматривается и как энергоноситель, и как средство накопления избыточной электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ в периоды активного солнца и ветра, когда ее производство превышает спрос потребителей. Системы топливных элементов, использующие в качестве топлива водород являются экологичной альтернативой дизельным генераторам или аккумуляторным системам. При оснащении транспортных средств и других механизмов ВТЭ отпадает необходимость в закупках дорогостоящих видов топлива – бензина и дизеля.

Наша система предполагает модульное построение, в зависимости от пожелания заказчика. Все модули абсолютно совместимы и позволяют получить единовременно нужную конфигурацию, либо при необходимости дооснастить необходимыми модулями.

В базовую конфигурацию входят:

1. Солнечная электростанция
2. Ветроэлектростанция, основанная на использовании 3–4 ветрогенераторов.
3. Водородный топливный элемент.
4. Система хранения энергии в виде аккумуляторного блока для сохранения электроэнергии и металлогидридных баков для хранения полученного водорода.

Дополнительные модули:

1. Заправочная станция для всей техники, включая автомобили, трактора, комбайны, дроны.
2. Модуль для получения биогаза (при наличии в хозяйстве животноводческого отделения).
3. Модуль опреснения воды (для использования в отдаленных районах, прилегающих к морю).

Статус проекта:

Проработана рабочая модель, включающая в себя 3 основных модуля нашего энергонезависимого хозяйства – солнечный, ветряной и водородный.

Проведены практические исследования.

Планируется исследование модуля получения биогаза в лабораторных условиях Кванториума.

Вывод

В данном проекте мы смогли реализовать нашу задумку, мы создать модель фермы, которую запитали электроэнергией с помощью альтернативных источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Discussion paper. Анализ нынешнего положения изолированных систем энергоснабжения с высокими затратами на энергию
2. Центр по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ) Низкоуглеродные решения для изолированных регионов России с высокими затратами на энергию
3. Wikibrief.org. Биоэнергетическая деревня – Bioenergy village
4. energefficiency.in.ua. Энергонезависимый Фельдхайм
5. Energy Observer
6. Tass.ru. Sitronics сообщил о пробном запуске пассажирского судна на водородном топливе в сентябре

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ДЛЯ ГОНОЧНОЙ АВТОМОДЕЛИ МАСШТАБА 1:10

Д.А. Афрузунова

АНО ДТ «Красноярский Кванториум», Энергетика, 2 группа

Научный руководитель: Ю.А. Шереметьева, М.В. Цыганов, П.А. Булва,
преподаватели АНО ДТ «Красноярский Кванториум»

К 2023 человечество уже истратило огромное количество невозобновляемых природных ресурсов, поэтому необходимо найти альтернативные источники энергии. Внедрение водорода в качестве носителя энергии – отличный способ решения энергетических задач. Уже сейчас существуют системы, которые используют связку водорода и электрического тока. Более того, водородные топливные элементы (далее ТЭ) не выбрасывают в атмосферу вредные побочные продукты, то есть это экологически чистый способ получения электрической энергии.

Автомобили, использующие ТЭ на водороде, серийно производятся уже сейчас. Но чтобы понять, как будет работать машина, стоит сначала разобраться в работе модели. Для этого, была выбрана модель класса pancar, а конкретно: Xray x10 версии 2022 года (рис. 1, 3).

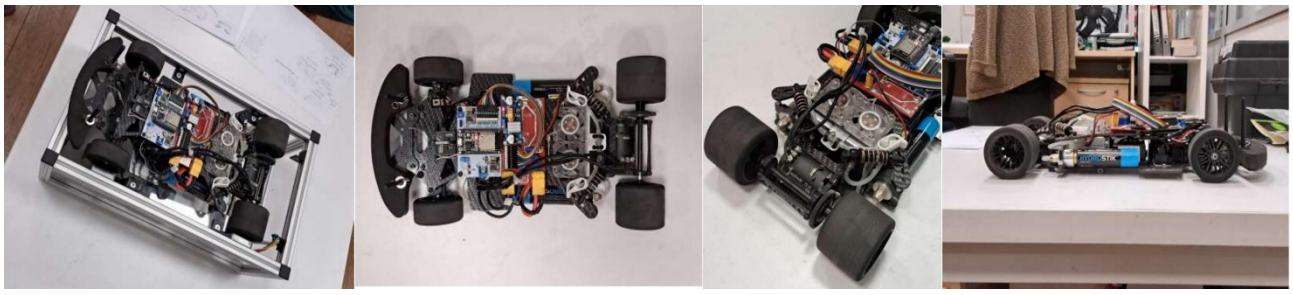


Рис. 1. Фото модели

Кастомные несущие карбоновые элементы придают жёсткость и легкость всему шасси, благодаря чему, вкупе с отличным сцеплением покрышек из пенорезины, болид получился очень маневренным. В качестве силовой установки использована сенсорная бесколлекторная система от hobbywing xerun, что даёт возможность тонко контролировать скорость модели.

Так, в сумме с сервоприводом от muchmore, имеющим усилие в 12,5 кг/см и скорость отклика 0,55 с, получается крайне отзывчивый и управляемый болид, позволяющий полностью раскрыть потенциал пилотов. Кроме того, масляные амортизаторы с регулировкой преднатяга пружины дают возможность настроить работу задней подвески под индивидуальные предпочтения пилотов.

Чтобы проверить модель в работе, было проведено тестирование в рамках Шестого Всероссийского конкурса инженерных юношеских команд «Первый элемент», сутью которого являлось самостоятельно спроектировать и изготовить радиоуправляемую модель гибридного автомобиля на основе топливного элемента, работающего на водороде (рис. 2). Для участия в конкурсе пришлось модифицировать шасси под требования:

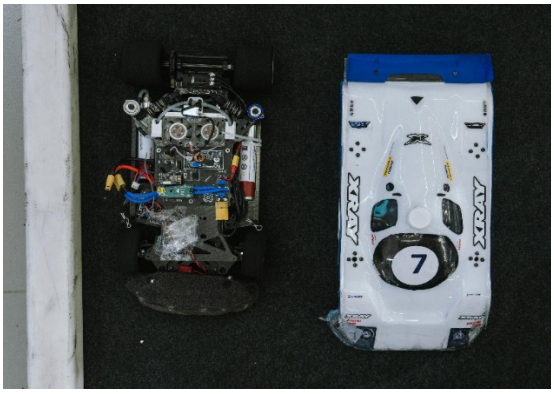


Рис. 2. Фотография после 6-часоаого заезда на «Первом Элементе»

- установлен водородный топливный элемент H-Cell 2.0 30 Вт, в самой задней части нижней деки;
- карбоновые детали силовой конструкции модели изготовлены с нуля, для установки ТЭ H-cell 2.0, и компьютерного блока отслеживающего его параметры;
- конструкция задней подвески серьёзно переработана. Теперь в ней два амортизатора в отличие от одного в штатном исполнении, благодаря чему была проведена комплексная работа по настройке подвески автомобиля, в ходе которой были подобраны оптимальные (для модели с добавленным весом водородной системы) значения жёсткости амортизаторов, схождения, развала, кастора и прочих параметров, благодаря чему была создана наиболее подходящая конфигурация для пилотов команды;
- в систему интегрирован разработанный командой и изготовленный электронный блок управления ТЭ.

Рис. 3. Топливный элемент и модель автомобиля масштаба 1:10

Электронный блок управления ТЭ был изготовлен не случайно. Стандартный блок не удовлетворяет современным требованиям: у него отсутствует телеметрия и возможность управления процессом работы ТЭ в зависимости от количества оставшегося водорода в гидростике и заряда аккумулятора.

Стандартный блок управления, который идет в комплекте с поставляемым ТЭ, имеет ряд некоторых недостатков:

- иностранное производство;
- высокая рыночная стоимость (полная система стоит около 1 млн рублей);
- не передает данные о работе системы оператору телеметрии;
- не имеет функции ручного управления;
- не анализирует многие характеристики (температура и ток двигателя);
- не позволяет перевести систему на снабжение исключительно от ТЭ.

Разработанный блок позволяет ученикам отследить работу полностью и управлять ею. А отсутствие практических навыков сказывается на уровне полученных знаний. Он состоит

из двух плат (контроллера и телеметрии). Возможности мониторинга параметров блока управления довольно большие, по сравнению с прошлой версией: давление водорода в магистрали; температура двигателя; напряжение аккумуляторной батареи и топливного элемента; токи батареи, топливного элемента и их суммарный ток.

Полученные с помощью системы данные можно преобразовать в графики для анализа работы модели автомобиля (рис. 4). Ниже представлены 2 графика. График слева показывает расход двигателем энергии в зависимости от скорости машины и стиля вождения, меняющихся со временем, график справа – количество энергии потраченной двигателем за определенный период времени.

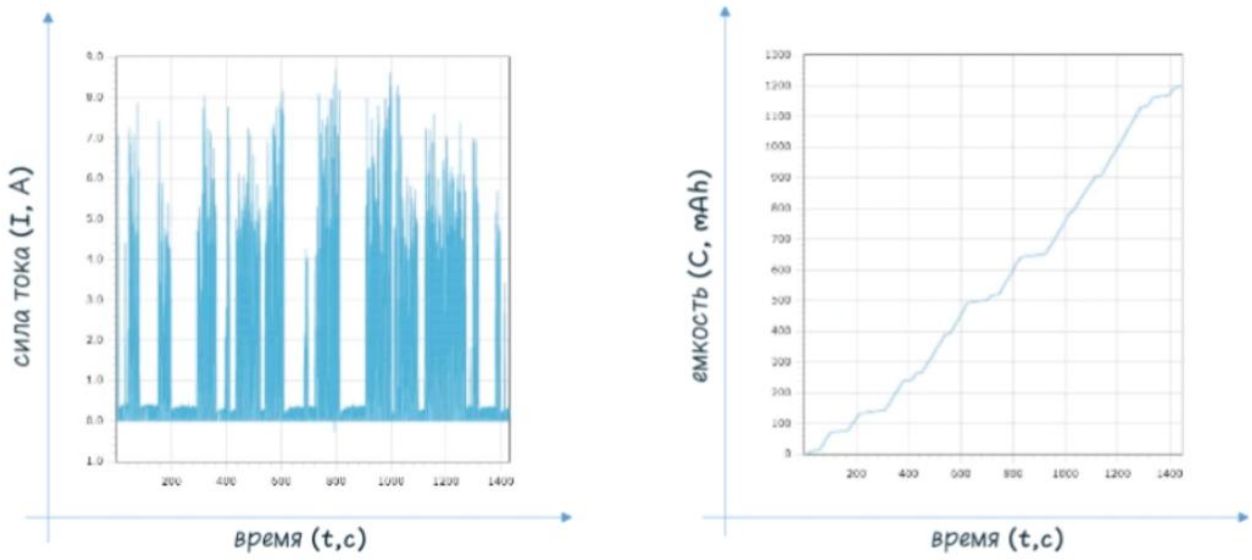


Рис. 4. Графики: а – расхода энергии двигателем в зависимости от скорости машины и стиля вождения, меняющихся со временем; б – количества энергии потраченной двигателем за определенный промежуток времени

Таким образом, можно будет заранее распознать утечку топлива(например, при повреждении шланга) и предотвратить потерю ресурсов. На экране для передачи данных и управления ТЭ (рис. 5) выводится необходимая телеметристу информация, количество экранов сокращено до одного для удобства пользователя, ибраны общий ток, но добавлены функции корректировки работы клапана продувки (периодичность), возможность выставлять границы измерения давления, для последующего пересчета в диапазон от 0 до 100 %.

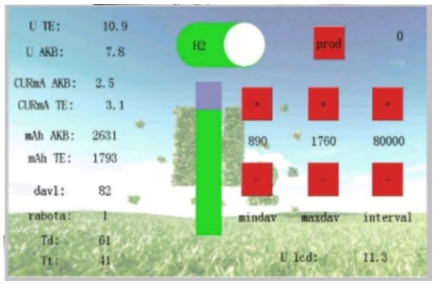


Рис. 5. Экран для передачи данных и управления ТЭ

Одно из достоинств нового блока управления ТЭ – бюджетность. Средний ценовой диапазон колеблется от 15 до 17 тыс. рублей. Вся экономика проекта прописана в таблице, приложенной в виде фотографии (рис. 6).

Одной из мировых проблем на данный момент является ухудшение экологии и ограниченность ресурсов. Исправить ситуацию могут альтернативные виды топлива, такие как водород. Для выработки электричества из водорода был создан специальный топливный элемент, но его современная версия не являлась достаточно эффективной для повсеместного внедрения в транспорт в том числе из-за отсутствия достаточного количества данных в блоке управления, а так же из-за отсутствия телеметрии и возможности удаленного управления.

Особенно остро проблема стояла для моделей, использующих гибридную систему, на которых проходит обучение школьников и студентов. Как непосредственно целевая аудитория, мы с моей командой автомоделистов решили исправить данную ситуацию и создать проект, который был рассмотрен в данном реферате.

№ п/п	Наименование материалов (услуг)	Количество	Ед. измер.	Цена, руб.	Стоимость, руб.
1	Nano V3.0 (CH340G) with USB cable, Программируемый контроллер на базе ATmega328, клон Arduino Nano V3.0 \Китай	3	шт.	675	2025
2	NRF24L01, Радиомодуль 2.4ГГц, скорость передачи до 2 мегабит\Китай	2	шт.	316.67	633.33
3	L7806CV, Микросхема, Стабилизатор напряжения +6В, 1.5А, 4%, (0°С...+125°С), [TO-220]\ST Microelectronics	3	шт.	14.17	42.57
4	ACS712ELCTR-05B-T, Датчик тока\Allegro	3	шт.	250	750
5	MPX5050GP, Датчик давления\Freescale	1	шт.	1 691.67	1691
6	NEXTION 7.0" Intelligent LCD Touch Display Module NX8048P070-011C/R Multifunction HMI Resistive/Capacitive Without Enclosure	1	шт.	~8000	10 557.93
7	Электронные компоненты	-	-	-	1059.97
				итого:	~16 758.87

Рис. 6. Смета по проекту

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квасников Л.А., Тазетдинов Р.Г. Регенеративные топливные элементы. – М., Атомиздат, 1978 г. – 168 с.
2. Ученые нашли способ продлить срок службы водородных топливных элементов // Москва, 10 дек – РИА Новости. URL: https://ria.ru/20201210/tpu-1588428198.html
3. Syvitski Ja.; Waters C.N.; Day J.; et al. Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch // Communications Earth & Environment. – 2020.
4. Нижников С.А. Философия: курс лекций. Лекция 4. Глобальные проблемы современности. – М.: Экзамен», 2006. – 383 с.
5. Пользовательская нструкция к металлогидридному баллону. – Hydrostick PRO.

ЭНЕРГОKIDS

Я.Ю. Агафонова

АНО ДТ «Краноярский «Кванториум», г. Красноярск, Россия

Научный руководитель: Ю.А. Шереметьева, М.В. Цыганов, П.А. Булва,
преподаватели АНО ДТ «Краноярский Кванториум»

Проект представляет собой игровой комплекс для детей младшего возраста, способствующий знакомству с понятием «электроэнергия» и развитию ответственного отношения к ресурсам. Комплекс состоит из трёх комнат с интерактивными площадками, выступающими потребителями и источниками электроэнергии. Благодаря балансу генерации и использования электроэнергии, представленному в игровом формате, происходит развитие познавательной, мотивационной сфер, образного мышления и воображения.

В современном мире нет такой сферы деятельности, которая бы не зависела от электроэнергии. Но трудно отрицать и негативное воздействие этой отрасли на окружающую среду:

1) открытый способ добычи угля нарушает ландшафт (мешают росту растений, ухудшает качество жизни);

2) разлитая при добыче нефть убивает флору и фауну как на суше, так и в воде;

3) ГЭС, строящиеся на реках, вызывают затопление огромных участков земель и лесов;

4) высоковольтные провода, проложенные на пути миграции птиц, приводят к поражению их током [1].

По данным «Коммерсантъ», общий объем потребления электроэнергии в России в 2022 г. вырос на 1,36 % относительно 2021-го. Этот объём составил 1,06 трлн кВт·ч. Соответственно, вырос масштаб генерации электроэнергии и уровень отрицательного воздействия на окружающую среду. И есть только два способа уменьшить ущерб:

1) перейти на экологически чистые способы получения электроэнергии;

2) экономить уже сгенерированное электричество.

Если для первого способа необходимы большие экономические и временные вложения, то со вторым справится даже ребенок.

Проведенный опрос среди родителей города Красноярск показал, что 60 % детей в возрасте от 3 до 8 лет в опрошенных семьях не умеет экономно относиться к электричеству.

Это отрицательно отражается:

1) на экологии (большое потребление электроэнергии приводит к большим потерям невозобновляемых ресурсов;

2) воспитании детей (в детях развивается безответственность).

В связи с вышесказанным была выявлена цель проекта: продемонстрировать детям проблему чрезмерного потребления электроэнергии и научить экономить электричество.

Привычки у людей вырабатываются в детстве. Формирование привычки происходит постепенно при повторении какого-либо действия, ценность которого для человека является неоспоримой. Повторяемое действие должно вызывать приятные чувства и только тогда оно перерастет в привычку и будет совершаться без каких-либо волевых усилий [2].

Был разработан метод того, как разработать у детей привычку экономить электроэнергию, а именно: разработан развлекательный комплекс для детей, в котором есть интерактивные действия с электроприборами. Суть комплекса заключается в том, что прежде чем ребёнок сможет поиграть с интерактивными стендами, ему необходимо выработать[4] электроэнергию на тренажерах.

[4] Ребенок физически не сможет выработать достаточное количество электроэнергии для работы современных электрических приборов, поэтому система имитирует добычу электроэнергии.

На рис. 1 изображено 3 зоны, включая зону с тренажерами («источниками» энергии). Зона № 1 – кухня; зона № 2 – офис/школа; зона № 3 – танцпол (комната отдыха с расчетом на свободное времяпровождение). При наличии энергии электроприборы светятся, открываются, имитируют работу полномасштабных систем.

Рис. 1. Полная визуализация комплекса

Тренажеры – карусель, беговая дорожка, велотренажёр. 5 минут физической работы на тренажерах = 15 минут игры в интерактивных зонах. Причём если ребенок проявит ответственность и отключит ненужные для него электрические приборы, он сможет поиграть в одной зоне 45 минут (суммарно 15*3).

Рис. 2. 3D-модель по принципу работы электроприборов с электричеством

Рис. 3. 3D-модель по принципу работы электроприборов без электричества

Соответственно, когда «заканчивается» накопленная электроэнергия, электроприборы выключаются, закрываются, и с ними невозможно взаимодействовать. Что приводит к необходимости снова проявлять физическую активность, то есть работу, в зоне генерации энергии, и только потом возвращаться к интересной игре.

Для принятия верного решения о выключении неиспользуемой электрической энергии, то есть закрепления привычки экономить ресурсы, вся площадка оборудована экранами, где ребенок может отслеживать уровень электроэнергии

Был создан макет, в котором представлена одна из зон потребителей – кухня, а также тренажер – карусель.

Рис. 4. Наглядный прототип одной из зон

В конце еще раз отмечу, что главным способом познания мира для детей младшего возраста является игра. Именно через нее ребенок получает новые знания, закрепляет положительные или отрицательные привычки. Описанный выше проект выполняет воспитательную цель, проводит знакомство детей с электроэнергией, способствует обучению работе в группе. Во время игры происходит развитие познавательной, мотивационной сфер, образного мышления и воображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические проблемы, связанные с современной энергетикой, и пути их решения. – https://ecologanna.ru/ekologicheskie-problemy/ekologicheskie-problemy-svyazannye-s-sovremennoj-energetikoj // ecologanna URL: https://ecologanna.ru/ekologicheskie-problemy/ekologicheskie-problemy-svyazannye-s-sovremennoj-energetikoj
2. Привычки: как их сформировать. – Изд-во «МИФ» URL: https://blog.mann-ivanov-ferber.ru/2020/12/24/privychki-kak-ix-sformirovat-sovety-psixologa/
3. Урунтаева Г.А. Дошкольная психология: учеб. пособие для студ. сред. пед. учеб. заведений. – 5-е изд., стереотип. – М.: Издательский центр «Академия», 2001 – 336 с.
4. Психологические особенности детей дошкольного возраста. – URL: https://www.b17.ru/article/psi_doshk/

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ В МАКЕТЕ ЧАСТНОГО ДОМА С ЛАНДШАФТНЫМ ДИЗАЙНОМ

А.Н. Давыдова

МБОУ Лицей № 136 им. Героя Российской Федерации Сидорова Р.В., 10 «А» класс

Научный руководитель: Н.В. Захарова, учитель русского языка и литературы

Ландшафтное проектирование – важная архитектурная и градостроительная задача, включающая комплекс мероприятий по озеленению и благоустройству как открытых, так и закрытых пространств. К ним относятся улицы и площади; малые рекреационные территории (скверы, бульвары, набережные, пешеходные улицы); парки различного назначения; жилые территории с разнообразными рекреационными и хозяйственными площадками (детские, для отдыха взрослых, спортивные и другие.), а также интерьеры различных в функциональном отношении помещений. Во всех этих объектах осуществляется задача включения природной среды в формирование того или иного пространства и осуществляется детальная проработка элементов искусственного ландшафта.

Практическая часть

1. Основные растения для территории:
   - липа мелколистная;
   - калина обыкновенная Nanum;
   - растения для клумбы;
   - туя западная Golden Smaragd и туя западная Tiny Tim;
   - лилейник Stella de oro и лилейник гибридный Avery Daily Punch Yellow;
   - можжевельник чешуйчатый Holger;
   - примула Юлии Sneeuwwitje.
2. Использованные в работе материалы:
   - блок питания на 5V;

- соединительные провода красного и черного цвета сечения 0,75 мм в диаметре;
- светодиоды;
- резисторы;
- двухконтактные выключатели;
- трехконтактный выключатель;
- клей для потолочных изделий;
- утеплитель XPS;
- декоративный песок;
- декоративный мох;
- деревянные палочки;
- деревянная доска;
- искусственные листья и цветы;
- бисер.

3. Электромонтажные работы.
4. Разработка схемы участка.

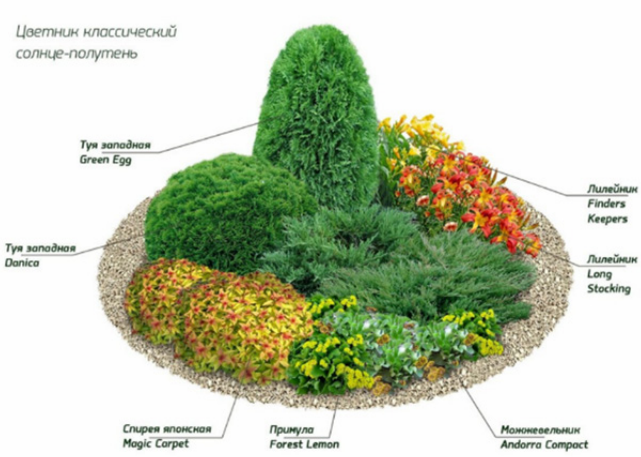


Рис. 1. Расстановка растений в клумбе

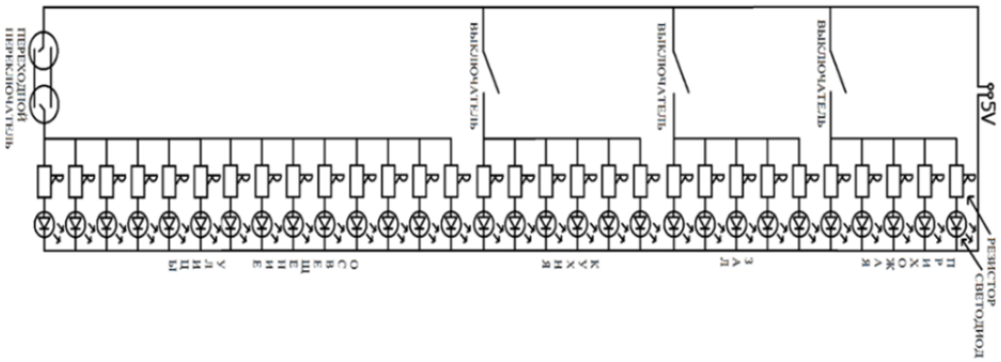


Рис. 2. Схема электрических путей макета дома

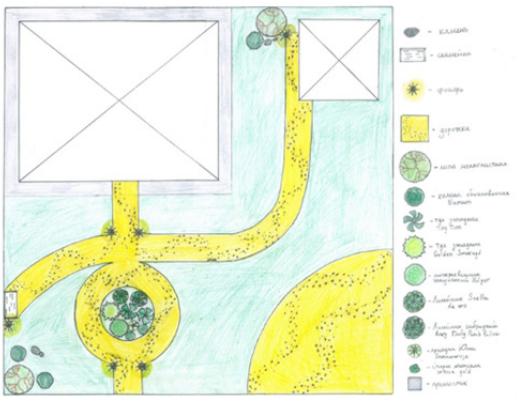


Рис. 3. Схема участка дома с освещением и ландшафтным дизайном

Рис. 4. Итоговый результат

Заключение

Я изучила теорию электрического тока и принципы электромонтажа электрических цепей, а также основы и принципы ландшафтного дизайна.

На основе изученного материала я сделала макет дома с электрическими цепями и ландшафтным дизайном, который можно использовать для экспериментов на уроках физики, а также для дополнительного изучения темы ландшафтного дизайна и для личного пользования слушателей.

Гипотеза была подтверждена ведь макет моего дома включает полноценные электрические цепи, включающие в себя параллельные и последовательные подключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландшафтный_дизайн
2. https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/317854
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/%d0%ad%d0%bb%d0%b5%d0%ba%d1%82%d1%80%d0%b8%d1%87%d0%b5%d1%81%d0%ba%d0%b0%d1%8f_%d1%86%d0%b5%d0%bf%d1%8c
4. https://poisk-ru.ru/s42659t5.html
5. https://studfile.net/preview/8620883/page:4/
6. https://studfile.net/preview/4032413/
7. https://xn----7sbbfb7a7aej.xn--p1ai/technology_tis_07/technology_tis_07_29.html
8. https://studfile.net/preview/9345579/
9. https://studfile.net/preview/9227349/page:3/

Научное издание

БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Сборник статей
III Всероссийской с международным участием
молодёжной конференции

12–14 декабря 2023 г.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*

Зарегистрировано в Издательстве ТПУ

Размещено на корпоративном портале ТПУ
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

Издательство
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ