

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Тепловые электрические станции

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Влияние на экологические и энергетические характеристики ГТУ впрыска экологического и энергетического пара в камеру сгорания</b>

УДК 621.438.038.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Б6А1	Чунарев Тимофей Федорович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Н.Н. Галашов	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Т.Б. Якимова	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	О.А. Антоневиц	к.б.н., доцент		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	М.А. Вагнер	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	А.М. Антонова	к.т.н., доцент		

Томск – 2021 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата, указанными в ФГОС ВПО по направлению**

**13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Универсальные компетенции</i>
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов,

	соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами на основе АСУТП; использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
	<i>Специальные профессиональные</i>
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Тепловые электрические станции

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
А.С. Матвеев

\_\_\_\_\_

(Подпись)

(Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**бакалаврской работы**

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Б6А1	Чунареву Тимофею Федорович

Тема работы:

**Влияние на экологические и энергетические характеристики ГТУ впрыска  
экологического и энергетического пара в камеру сгорания**

Утверждена приказом директора (директора) (дата,  
номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т.д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т.д.).

Объект исследования: газотурбинные установки с впрыском пара в камеру сгорания

Цель исследования: изучить имеющийся отечественный и мировой опыт построения ГТУ установок «контактного» типа, в частности, с впрыском водяного пара в камеру сгорания. Построить расчетную математическую модель камеры сгорания ГТУ и получить зависимость основных энергетических характеристик установки от количества впрыскиваемого пара. Исследовать влияние впрыска на энергетические и экологические характеристики ГТУ на основе полученных расчетных результатов и имеющихся литературных источников.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Провести обзор научно-технической литературы по теме ВКР.</li> <li>2. Исследовать схемы ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания.</li> <li>3. Исследовать влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические и экологические характеристики ГТУ</li> <li>4. Разработать расчетную математическую модель камеры сгорания ГТУ с впрыском пара.</li> <li>5. Изучить характеристики ГТУ с впрыском пара на основании полученных расчетных результатов и имеющихся литературных источников.</li> </ol>
---	--

<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>
--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
1. Все технические разделы ВКР	Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ Галашов Н.Н.
2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН Якимова Т.Б.
3. Социальная ответственность	Доцент ООД Антоневиц О.А.

**Название разделов, которые должны быть написаны на русском языке:**

Введение
1. Обзор литературных источников по теме ВКР.
2. Схемы ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания. Контактные ГТУ.
3. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на экологические характеристики ГТУ.
4. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические характеристики ГТУ.
5. Разработка расчетной математической модели камеры сгорания ГТУ с впрыском пара.
6. Характеристики ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
8. Социальная ответственность
Заключение по исследовательской работе

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ Галашов Н.Н.	Галашов Н.Н	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Б6А1	Чунарев Тимофей Федорович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 101 страница, 27 рисунков, 17 таблиц, 34 источника.

ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ, ГТУ ВП, ГТУ-STIG, ГТУ С ВПРЫСКОМ ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ, КОНТАКТНЫЕ ГТУ, ГПУ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВПРЫСК, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВПРЫСК, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТУ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТУ.

Задача выпускной квалификационной работы – в учебно-исследовательской части провести обзор имеющихся литературных источников по газотурбинным установкам с впрыском пара в камеру сгорания, описать схемы таких установок, исследовать влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические и экологические показатели газотурбинной установки. В расчетной части была разработана расчетная математическая модель камеры сгорания, были выбраны начальные параметры для расчета и составлены зависимости основных энергетических показателей газотурбинной установки от количества впрыскиваемого пара в камеру сгорания.

Пояснительная записка выполнена в текстовом редакторе MS Word 2020. Расчеты произведены в среде Mathcad 14 с использованием функций для расчета термодинамических характеристик газов и газовых смесей из пакета WaterSteamPro 6.5.

## Оглавление

Введение.....	9
1. Обзор литературных источников .....	11
2. Схемы ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания. Контактные ГТУ .....	18
2.1. ГТУ с впрыском пара открытого типа .....	18
2.2. ГТУ с впрыском пара и предвключенной паровой турбиной.....	19
2.3. ГТУ с впрыском пара и конденсацией водяных паров.....	21
2.4. НАТ - цикл.....	23
2.5. LOTNECO - цикл .....	24
3. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на экологические характеристики ГТУ .....	26
4. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические характеристики ГТУ .....	34
5. Разработка расчетной математической модели камеры сгорания ГТУ с впрыском пара .....	38
5.1. Определение состава и свойств сухого воздуха.....	39
5.2. Расчет свойств окружающего влажного воздуха.....	42
5.3. Расчет теоретических объемов продуктов сгорания .....	43
5.4. Расчет теоретических продуктов сгорания 1 кг топлива .....	47
5.5. Расчет компрессора .....	48
5.6. Расчет камеры сгорания.....	50
5.7. Расчет смешения с паром на охлаждения .....	53
5.8. Расчет расширения газопаровой смеси в ГТ .....	54
5.9. Расчет энергетических показателей ГТУ при заданном расходе воздуха.....	55
6. Характеристики ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания .....	57
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	61
Введение к разделу .....	61
7.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	62
7.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	62
7.3. Планирование работ и оценка времени их выполнения .....	64
7.4. Смета затрат на проектирование .....	66

7.4.1 Материальные затраты .....	66
7.4.2 Амортизация основных фондов и нематериальных активов .....	66
7.4.3 Затраты на заработную плату .....	67
7.4.4 Затраты на социальные отчисления.....	68
7.4.5 Накладные расходы .....	68
Выводы по разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	70
8. Социальная ответственность .....	72
Введение к разделу .....	72
8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	72
8.2. Производственная безопасность .....	79
8.3. Экологическая безопасность .....	87
8.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Предупреждение аварий и взрывов технологического оборудования .....	91
Вывод по разделу социальная ответственность .....	95
Заключение по исследовательской работе .....	96
Список литературы: .....	98



## Введение

Электроэнергетическая отрасль представляет из себя одну из основ экономики нации. На производство электроэнергии для поддержания деятельности и устойчивого развития государства тратится огромное количество ресурсов, как финансовых, так и ископаемых. По этой причине новейшие разработки и исследования в области электроэнергетики одной из основных своих целей ставят повышение общей экономичности производства электроэнергии, где даже сравнительно небольшое повышение общей экономичности энергетической установки в масштабах производства и во времени превращается в весьма значительную экономию ресурсов.

Помимо повышения общей экономичности выработки электроэнергии одной из основных задач современной электроэнергетики, как и любой области промышленности по всему миру, является повышение экологичности производственных процессов. В отношении газотурбинных установок (ГТУ) это означает понижение образования вредных выбросов в процессе горения топлива, которые поступают в атмосферу с продуктами сгорания.

Современное общество стремится снизить негативное влияние, оказываемое на окружающую среду в результате деятельности человека. В 2016 году 195 стран включая страны Европейского Союза подписали так называемое «Парижское соглашение», направленное на уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу. Основной целью этой долгосрочной программы является удержания роста глобальной средней температуры окружающей среды в 21 веке ниже 2 °С. Добиться такого результата планируется путем уменьшения будущих совокупных выбросов парниковых газов. На фоне подобных грандиозных объединений под зеленым флагом повышения экологичности деятельности человека неуклонно растут требования к характеристикам производства электроэнергии, оказывающим наиболее пагубное влияние на экологию, таким как содержание вредных

веществ в продуктах сгорания, выбрасываемых в атмосферу на электростанциях, в том числе газотурбинных.

Одним из перспективных способов решения вышеперечисленных задач в современной энергетике является создание контактных газотурбинных установок с впрыском водяного пара (ГТУ ВП) в камеру сгорания (КС) и исследование влияния впрыска на энергетические и экологические характеристики ГТУ. Известно, что подача в КС повышает общую эффективность ГТУ, а также снижает эмиссию вредных выбросов  $\text{NO}_x$ , а учитывая повысившуюся в последние годы заинтересованность в сохранении окружающей среды и уменьшении выбросов вредных веществ в атмосферу, эти обстоятельства определяют актуальность данного исследования.

Целью данной исследовательской работы является: обзор имеющихся схемных решений, использующий впрыск воды/водяного пара в газовый тракт ГТУ; разработка расчетной математической модели камеры сгорания ГТУ и получение расчетным путем энергетических характеристик установки с впрыском пара в КС; оценка влияния впрыска пара в КС на энергетические и экологические характеристики ГТУ на основании полученных расчетных данных и имеющихся исследований.

Таким образом, для исследования характеристик ГТУ с впрыском пара потребуется:

1. Провести обзор имеющейся по данной теме литературы;
2. Разработать расчетную математическую модель КС ГТУ с впрыском пара для определения основных характеристик установки;
3. Исследовать влияние впрыска водяного пара в КС на экологические и энергетические характеристики ГТУ.

## 1. Обзор литературных источников

Газотурбинные установки обладают многочисленными положительными качествами, в числе которых: быстрота запуска, простота запуска, обширный диапазон единичных мощностей от нескольких десятков киловатт до сотен мегаватт, компактность и экологичность. Современные разработки в материаловедении, улучшение технических показателей агрегатов, входящих в состав ГТУ, и прогресс в расчетах проходящих в них процессов, позволяют получить КПД выработки электроэнергии свыше 60%. Благодаря этому на ГТУ все чаще падает выбор при вводе новых мощностей или переоборудовании старых энергоблоков.

Улучшить эффективность простого цикла ГТУ позволяет инжекция дополнительного рабочего тела. Такие установки со смешением продуктов сгорания с водой или водяным паром в различных научных трудах, затрагивающих эту тему, именуют по-разному: «контактные» ГТУ, ГТУ ВП, «монарные» ГТУ, ГТУ смешения, газопаровые установки (ГПУ), ГТУ-STIG. Все эти наименования скрывают за собой газотурбинные установки, в которых происходит смешение рабочего тела с водяным паром или водой. В наше время такие установки получили широкое распространение и используются в основном в качестве энергетических установок малой и средней мощности, режим работы которых рассматривается как переменный режим работы обычных ГТУ.

История ГТУ «контактного» типа берет свое начало с французского физика и математика Сади Карно (1796-1883 гг.), который был первым, кто провел теоретические исследования по использованию смеси продуктов сгорания и водяного пара и оценил экономическую целесообразность её использования в цикле энергетической установки для производства работы [1]. В 1824 г. он опубликовал свою работу «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в которой описал схему установки, которая практически повторяет современные парогазовые

установки (ПГУ): воздух сжимается в «пневматической машине» после чего под давлением поступает в горелку, в горелке происходит сгорание топлива, далее полученные продукты сгорания используются для выработки полезной работы, после получения работы оставшееся тепло продуктов сгорания используется для генерации пара, который далее отработывает в паровом двигателе. Конечно, во времена Карно технические возможности не позволяли создать подобную установку, его исследования опередили своё время практически на целый век.

Первую попытку по созданию ГТУ «контактного» типа осуществил инженер русского флота П.Д. Кузьминский в 1892-1900 гг. Установка П.Д. Кузьминского состояла из воздушного компрессора, камеры сгорания и радиальной турбины. Вода при давлении 5 МПа воспринимала тепло сгорания топлива, которым в установке Кузьминского был керосин [2]. В предложенной инженером установке продукты сгорания непосредственно смешивались с водяным паром. Парообразование происходило в спиральных змеевиках, расположенных между корпусом и внутренним цилиндром камеры сгорания, в результате чего реализовывалось охлаждение КС. Образовавшийся пар смешивался с продуктами сгорания и поступал в радиальную турбину. Тот факт, что на подачу воды насосом требовалось незначительное количество мощности, повышал общую полезную работу установки. Однако в XIX в. температуры газов перед газовой турбиной (ГТ) были сильно ограничены характеристиками материалов, а КПД проточной части турбомашин был очень низок. Эти обстоятельства обрекли на неудачу всякие попытки применить в турбоустановке газовый цикл. Говоря о недостатках установки П.Д. Кузьминского следует отменить парообразование в змеевиках от теплоты газов перед газовой турбиной, в современных ГТУ «контактного» типа пар образуется в котле-утилизаторе (КУ) за счет теплоты уходящих газов после ГТ. К сожалению, в связи со смертью изобретателя испытания установки так и не были завершены. Тем не менее попытка П.Д. Кузьминского ярко проиллюстрировала преимущества воды перед воздухом при необходимости

создания избыточного давления рабочего тела. Тот факт, что для сжатия воды требуется затратить куда меньше энергии, чем на сжатие воздуха, является основным преимуществом ГТУ «контактного» типа, который приводит к увеличению полезной мощности установки.

В дальнейшем идеи газовых установок с смешением продуктов сгорания с водяным паром развил академик С.А. Христианович во время работы в основанном им же Новосибирском институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР (1957-1965 гг.). При Сергее Александровиче деятельность института, помимо прочего, была направлена по пути создания мощной энергетической, а также экологически чистой парогазовой установки (ПГУ), которая обладала перспективой стать основой экологически чистых электростанций в СССР. Изначально предполагалось применение впрыска водяного пара в газовый тракт установки для уменьшения выбросов оксидов азота, в дальнейшем поступило предложение подавать большее количество водяного пара для увеличения мощности турбины [3, 4, 5].

За рубежом в отношении «контактных» ГТУ применяется аббревиатура STIG («Steam Injection Gas turbine»). В цикле ГТУ-STIG водяной пар образуется в котле-утилизаторе за счет теплоты отработавших в газовой турбине газов. Образовавшийся пар смешивается с продуктами сгорания в камере сгорания или же газовой турбине и в составе газопаровой смеси совершает дополнительную работу в ГТ. В 1978 году был запатентован оптимизированный цикл STIG, который называется цикл Ченга [7]. Первая установка полного цикла STIG на базе газогенератора LM-5000 была введена в эксплуатацию на одном из производств американской фирмы Simpson Paper Company [6].

Наибольшего успеха в промышленном производстве ГТУ-STIG добилась американская фирма General Electric (GE) в своей серии газовых турбин LM на базе авиационных двигателей, модифицированных для применения в промышленности и на море. Фирма GE имеет более чем 50-ти

летний опыт успешной эксплуатации серии турбин LM в энергетике, нефтегазовой отрасли и общей промышленности. Следующие установки фирмы GE на базе машин серии LM и LMS допускают впрыск пара в газовый тракт: GE LM5000 STIG (Мощность с впрыском пара и без впрыска составляет соответственно 50,7 МВт; 32,6 МВт), GE LM2500 STIG (26,4 МВт; 19,2 МВт), GE LM1600 STIG (17 МВт; 13 МВт), а в установке LMS100 впрыск позволяет повысить КПД до 50%, а мощность до 113 МВт. Фирма General Electric использует технологию STIG в своих установках малой и средней мощности для снижения вредных выбросов оксидов азота NO<sub>x</sub> в уходящих газах до отметки 25 ppm и повышения мощности установки. Аббревиатура STIG является зарегистрированной торговой маркой фирмы GE.

В нашей стране тоже накоплена качественная база исследований ГТУ с впрыском пара «контактного» типа. Экспериментальной работой и исследованиями таких установок у нас занимались в Московском Энергетическом Институте (МЭИ), НПО «Машпроект» совместно с исследовательскими лабораториями КПИ, НКИ [8], ОАО «Мосэнерго» совместно с институтом высоких температур РАН (ИВТ РАН) [9], в котором были широко исследованы ключевые характеристики ГТУ с впрыском пара в газовый тракт и проработаны теоретические и практические основы использования таких установок [9, 11], на АО «Рыбинские моторы» выполнялись разработки ПГУ большой мощности (ПГУ-180, ПГУ-300) с впрыском пара в КС и паровым охлаждением [2, 12].

В НПО «Машпроект» совместно с исследовательскими лабораториями НКИ и КПИ начиная с 1985 г. проводили теоретические исследования по улавливанию влаги из потока уходящих газов после ГТ, а в 1991 г. начали экспериментальные работы по впрыску пара в проточную часть натурального корабельного ГТУ [8]. Это позволило накопить экспериментальные и теоретические результаты послужившие для обоснования проекта по разработке сложной комбинированной газопаротурбинной установки (ГПУ) с впрыском пара мощностью 25 МВт, в которой после утилизации теплоты

уходящих газов в теплоутилизационном контуре удалось реализовать практически полную регенерацию влаги в контактном конденсаторе (КК). Этот образец ПГУ-STIG получил название «Водолей». Для охлаждения газопарового потока установка предусматривает систему впрыска охлаждающей воды в конденсатор, систему сбора смеси сконденсировавшейся и охлаждающей воды, систему охлаждения получившейся смеси до требуемой температуры с последующим впрыском части этой смеси обратно в конденсатор.

ОАО «Мосэнерго» совместно с ИВТ РАН в 2001 г. в рамках исследования энергетических технологий, которые планировалось внедрять в системе «Мосэнерго», провели технико-экономический анализ перспективных на тот момент энергетических установок [9]. Анализ проводился по степени готовности технологии к массовой практической реализации, а также по экономической эффективности. Результаты анализа показали перспективность использования ПГУ-STIG с применением контактного конденсатора и теплонасосной установки (ТНУ) для отпуска тепла внешнему потребителю в системе «Мосэнерго». В период с 2001-2002 гг. на испытательном стенде электростанции-полигона ТЭЦ 28 была проведена отработка новой перспективной установки ПГУ-МЭС-60 мощностью 60 МВт с впрыском пара, КК и ТНУ, изготовленной Московским машиностроительным производственным предприятием «Салют» (ММП «Салют»). В результате анализа работы ПГУ-МЭС-60 [10] было показано, что данная теплофикационная установка имеет высокие показатели производства электроэнергии.

Впрыск пара в камеру сгорания принято различать на «экологический» впрыск, направлен на снижение эмиссии оксидов азота NO<sub>x</sub> и температуры в зоне горения, он составляет 5 % от расхода воздуха, и «энергетический» впрыск, который составляет 10-25 % от расхода воздуха [27] и применяется для повышения энергетических характеристик установки (удельной мощности, КПД).

В зону активного горения пар поступает по наружному каналу топливной форсунки, в то время как топливо (природный газ) поступает по ее внутреннему каналу [5].

Имеется достаточно большое количество исследовательских данных, раскрывающих преимущества ГТУ «контактного» типа [2, 4, 8-12], коротко они заключаются в следующем: существенное повышение удельной мощности установки отнесенной к кг воздуха в результате увеличения объема рабочего тела, проходящего через турбину; улучшение охлаждения высокотемпературных элементов проточной части (лопаточного аппарата) за счет большей теплоемкости воды в сравнении с паром, что позволяет повысить температуру рабочего тела (газопаровой смеси) перед турбиной и приводит к увеличению КПД, применение водяного охлаждения так же приводит к экономии мощности на сжатие охлаждающего агента, поскольку на сжатие воды требуется затратить значительно меньшее количество энергии, чем на сжатие воздуха, доли которого могут достигать 15 – 20 % от общего расхода воздуха [4]; простота конструкции по сравнению с ПГУ «бинарного» типа в следствии отсутствия в схеме ГТУ-STIG оборудования, входящего в состав цикла паротурбинной установки (паровой турбины, конденсатора и т.д.), что приводит к значительному сокращению капитальных затрат, понижению стоимости выработки электроэнергии, следовательно и к уменьшению сроков возврата инвестиций; снижение эмиссии вредных оксидов азота  $NO_x$  в уходящих газах, что в современных реалиях является весомым преимуществом.

К недостаткам ГТУ-STIG следует отнести расходы на систему водоподготовки большого количества обессоленной воды, которая в простейшей схеме такой установки полностью выбрасывается в атмосферу в составе газопаровой смеси после КУ. Однако при использовании в схеме ГТУ-STIG контактного конденсатора появляется возможность улавливать и возвращать обратно в цикл (в виде конденсата) практически весь объем впрыскиваемого пара, включая то количество  $H_2O$ , которое образуется в



результате сгорания топлива [8]. Естественно подобное схемное решение приводит к усложнению установки.

Все же не всегда экономически целесообразно вводить в схему КК для улавливания водяных паров из уходящих газов. Во многих, в частности, водообильных континентальных районах, затраты на систему конденсации и сопутствующую ей систему охлаждения становятся выше дополнительных затрат на химводоочистку. К тому же при сравнении общих потерь воды как субстанции оказывается, что в ПГУ с паросиловым циклом они выше, чем на установки «открытого» типа STIG, поскольку в схеме последней отсутствуют потери испарением и капельным уносом охлаждаемой циркуляционной воды в градирнях [11].

Помимо прочего может возникнуть необходимость в увеличении проходного сечения проточной части газовой турбины с увеличением количества впрыскиваемого пара. Альтернативным решением является увеличение скорости рабочего тела в проточной части ГТУ, следствием чего станет уменьшение КПД [5].

Таким образом, цикл ГТУ-STIG обладает рядом достоинств, как по удельным показателям мощности и стоимости выработки электроэнергии, так и по экологическим показателям и эффективности преобразования тепловой энергии топлива в электроэнергию.

## **2. Схемы ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания. Контактные ГТУ**

В простой схем газотурбинной установки повышение полезной удельной работы в основном достигается путем повышения температуры газов после турбины и поиска оптимальной степени сжатия воздуха в компрессоре, что сокращает затраты на работу сжатия. Модернизированный цикл такой ГТУ был предложен и запатентован в 1978 г. профессором из университета Санта-Клары (США) Д.Ю. Ченгом и за рубежом называется по имени автора (Cheng Cycle). Цикл Ченга предполагает использование теплоты уходящих газов после ГТ в КУ для генерации пара двух давлений: пар высокого давления в КС и пар низкого давления, который подается в ГТ. Такое решение позволило повысить КПД и мощность ГТУ. Принято считать [13], что для достижения максимальной эффективности, впрыск пара следует использовать в установках малой и средней мощности (до 50 МВт), а также в системах с совместной выработкой электроэнергии и тепла (когенерацией).

### **2.1. ГТУ с впрыском пара открытого типа**

На рисунке 1 приведена схема ГТУ с впрыском пара открытого типа. Основными элементами такой схемы является ГТУ и КУ. ГТУ состоит из компрессора, камеры сгорания и газовой турбины. В компрессор подается воздух при атмосферном давлении и наружной температуре, там он сжимается и под давлением несколько выше давления газовой смеси перед ГТ подается в КС, где осуществляется процесс горения. Образовавшиеся в процессе горения топлива горячие газы смешиваются в КС с паром, который поступает из КУ, затем получившаяся газопаровая смесь совершает работу в ГТ, после чего поступает в КУ, где охлаждается на поверхностях нагрева котла-утилизатора. В перегревателе (ПЕ) генерируется впрыскиваемый в КС пар, в дальнейшем смесь выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу. Потери всего количество впрыскиваемого пара с уходящими в атмосферу газами является основным недостатком данного схемного решения.

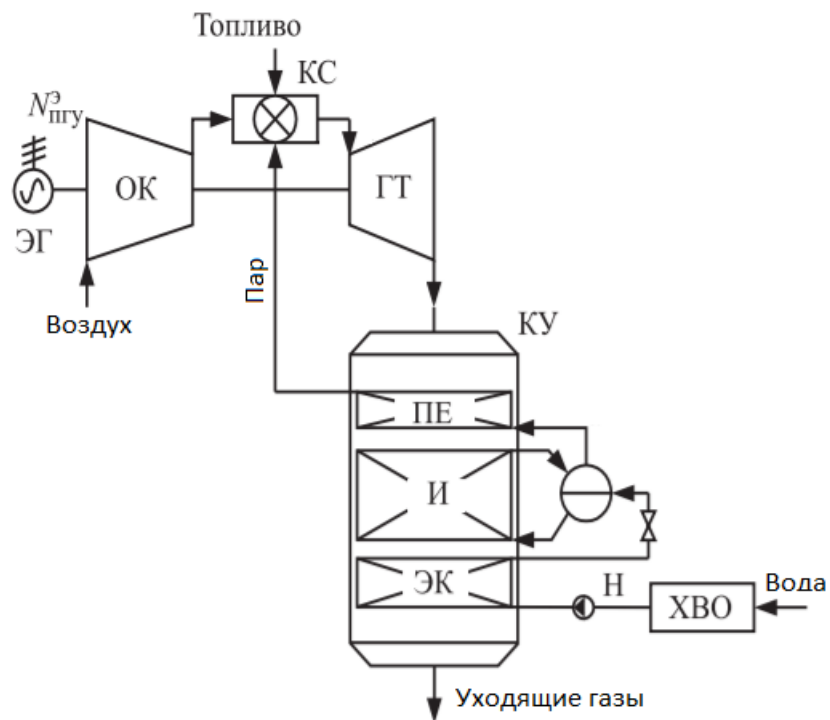


Рисунок 1 – Тепловые схемы ПГУ с впрыском пара открытого типа [10]:  
 ЭГ – электрогенератор; ОК – осевой компрессор; КС – камера сгорания; ГТ –  
 газовая турбина; КУ – котел утилизатор; ПЕ – пароперегреватель; И –  
 испаритель; ЭК – экономайзер; Н – насос; ХВО – химическая водоочистка

В ГТ поток поступает в равновесном состоянии, представляя из себя однородную смесь продуктов сгорания топлива, воздуха и водяного пара. При этом условно принимается, что массообмен и энергообмен между фазами полностью завершен.

## 2.2. ГТУ с впрыском пара и предвключенной паровой турбиной

Повысить мощность и экономичность схемы открытого типа можно за счет добавления предвключенной паровой турбины (ПТ) в цикл. Тепловая схема такой установки изображена на рисунке 2. Здесь пар, образовавшийся в ПЕ, сперва отработывает в предвключенной противодавленческой паровой турбине, являющейся приводом дополнительного генератора, после чего

снова подогревается в промежуточном перегревателе (ПП) КУ и только после этого впрыскивается в КС ГТУ.

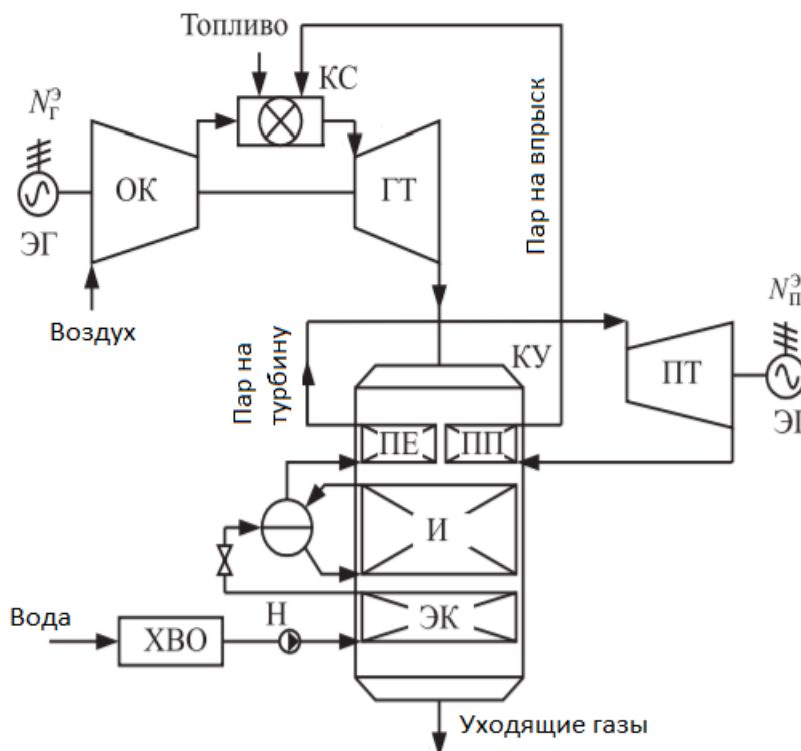


Рисунок 2 – Тепловые схемы ПГУ с впрыском пара открытого типа с предвключенной паровой турбиной [10]: ЭГ – электрогенератор; ОК – осевой компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; КУ – котел утилизатор; ПЕ – пароперегреватель; ПП – промежуточный подогреватель; ПТ – паровая турбина; И – испаритель; ЭК – экономайзер; Н – насос; ХВО – химическая водоочистка

При таком схемном варианте в КУ производится пар большего давления (около 13-17 МПа) [11], чем это необходимо для впрыска в КС. Предвключенная паровая турбину может также использоваться для привода конденсатора низкого давления (КНД). Такое решение, конечно, приводит к усложнению тепловой схемы (появляется новый объект регулирования, увеличивается стоимость производства пара и подготовки воды из-за перехода к более высокому давлению и температуре пара на выходе КУ), но и несет в себе дополнительные плюсы: примерно на 5 % относительных

снижается удельный расход топлива, а использование паровой турбины для привода КНД позволяет упростить конструкцию высокотемпературной ГТ (уменьшить температуру охлаждающего пара, снизить число валов).

### **2.3. ГТУ с впрыском пара и конденсацией водяных паров**

Как уже было сказано, одним из ключевых недостатков ГТУ с впрыском пара открытого типа является необходимость подготовки большого количества высококачественной технической воды, которая полностью теряется вместе с уходящими газами. В связи с этим с 1980 г. в исследовательских институтах КПИ и НКИ и с 1985 г. в НПО «Машпроект» проводились теоретические и экспериментальные исследования по улавливанию воды из парогазового потока на выходе установки типа STIG [8]. В результате этих исследований возможность улавливания практически всего количества воды из парогазовой смеси была подтверждена экспериментально. Так появилась новая схема установки ГТУ-STIG с конденсацией водяных паров. Разработкой и тестированием подобной схемы занимались в ИВТ РАН совместно с ОАО «Мосэнерго» и ММПП «Салют» [9]. На электростанции-полигоне ТЭЦ-28 установили комплексную ПГУ-STIG МЭС-60 с конденсацией водяных паров в КК, ТНУ и предвключенной ПТ. Схема установки МЭС-60 представлена на рисунке 3.



## 2.4. НАТ - цикл

Очередным усовершенствованием схемы ГТУ-STIG является технология НАТ-цикла («Humid Air Turbine») [10, 14, 15], схема которого представлена на рисунке 4.

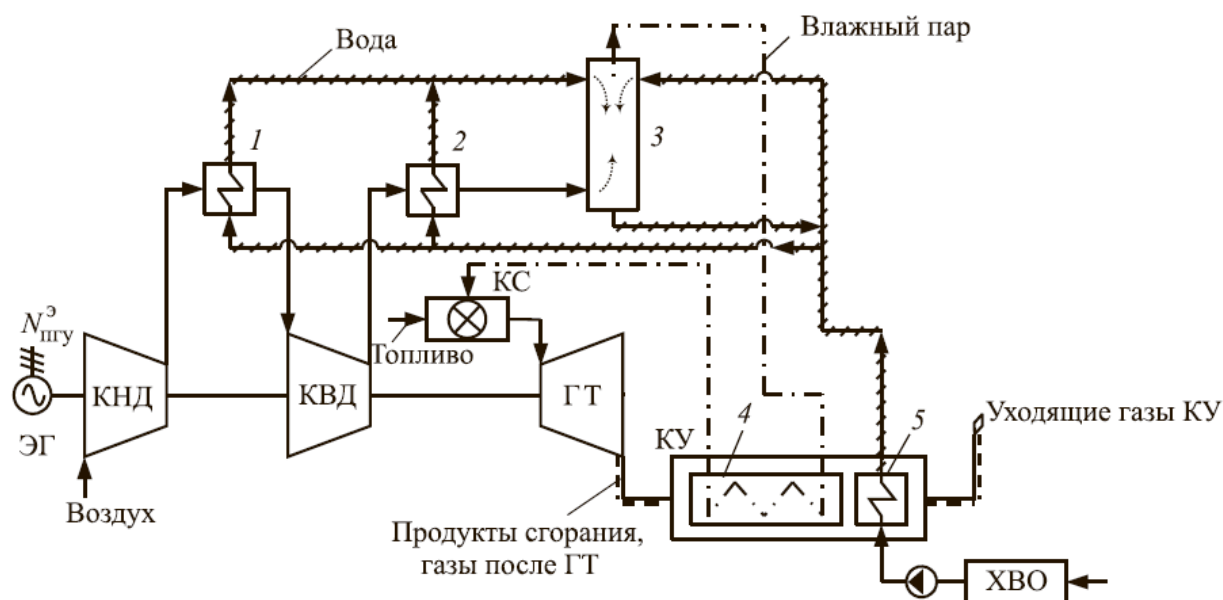


Рисунок 4 – Тепловая схема ПГУ с впрыском пара открытого типа (НАТ – цикл) [10]: ЭГ – электрогенератор; КНД – компрессор низкого давления; КВД – компрессор высокого давления; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ХВО – химическая водоочистка; 1 – промежуточный охладитель воздуха; 2 – переохладитель воздуха; 3 – увлажнитель воздуха; 4 – теплообменник; 5 – водяной экономайзер

При таком схемном исполнении сжатие воздуха сперва происходит в компрессоре низкого давления (КНД), после этого циркулирующая вода, которая подается из водяного экономайзера при давлении 4 – 6 МПа, забирает часть тепла у сжатого воздуха в промежуточном охладителе воздуха (1). Далее охлажденный воздух поступает в компрессор высокого давления (КВД), где дожимается до необходимых параметров. После воздух снова охлаждается в переохладителе воздуха (2), нагревая воду до температуры близкой к температуре насыщения (250 – 275 °С), и направляется в

увлажнитель воздуха (3), где контактирует с нагретой в 1 и 2 химически очищенной водой. В увлажнителе происходит испарение влаги и образуется влажный пар. Влажный пар подается в теплообменник (4), где нагревается потоком газопаровой смеси из ГТ после чего направляется на впрыск в КС. Смешивание воздуха с водой увеличивает удельную теплоемкость и массу потока, что приводит к выработке дополнительной мощности, отсутствие паровой турбины (подобно циклу STIG) уменьшает удельные капиталовложения, а КПД использования тепла топлива приближается к единице в следствии более полного использования энергии.

## 2.5. LOTNECO - цикл

Еще одна перспективная технология ПГУ с впрыском пара является проектом V-ой рамочной программы Европейского Союза [10], тепловая схема низкопотенциального комбинированного цикла LOTNECO представлена на рисунке 5.

В рассматриваемом цикле LOTNECO влага поступает в испаритель до КС, где воспринимает теплоту нагретого компрессором воздуха и испаряется при парциальном давлении водяного пара при температуре 100 – 170 °С. Паровоздушная смесь заменяет собой избыток воздуха в цикле. Основной идеей цикла является использование при сжигании топлива только стехеометрического количества воздуха.



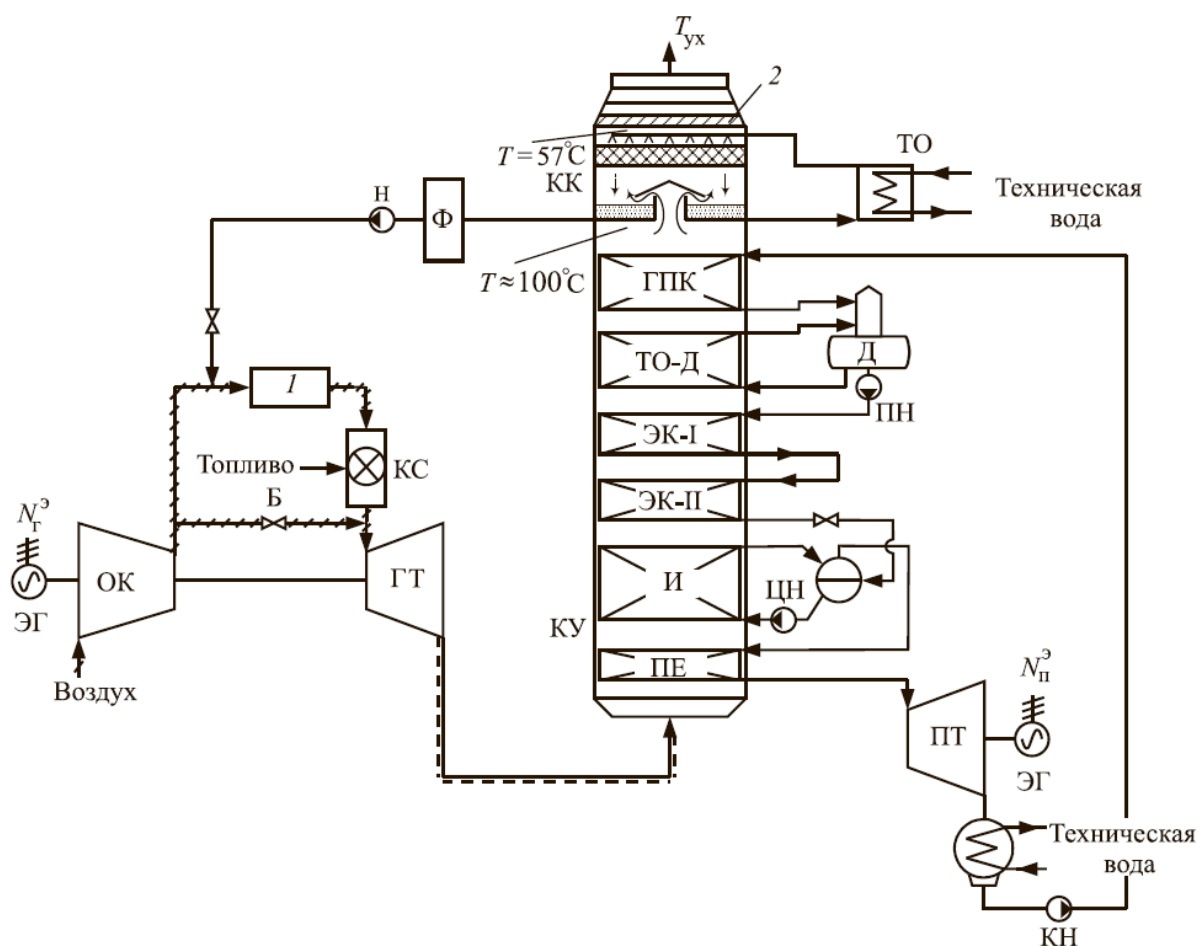


Рисунок 5 – Тепловая схема установки, работающей на цикле LOTNESCO: ЭГ – электрогенератор; ОК – осевой компрессор; ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания (сжигание природного газа при использовании 50% топлива и 50% водяного пара); Б – воздушный байпас; Н – насос; Ф – фильтрующая установка; КК – контактный конденсатор водяных паров; КУ – котел-утилизатор; ПЕ – пароперегреватель; И – испаритель; ЭК-I, ЭК-II – экономайзеры; ТО-Д – теплообменник деаэратора питательной воды; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; КН – конденсатный насос; ТО – теплообменник; 1 – испаритель в потоке сжатого воздуха; 2 – жалюзийный сепаратор

### 3. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на экологические характеристики ГТУ

Основное положительное влияние впрыска пара в КС на экологические характеристики ГТУ в основном заключается в снижении образования оксидов азота  $NO_x$  в процессе горения топлива.

Влияния впрыска пара на образования  $NO_x$  в КС газотурбинных установках экспериментально исследовалось на протяжении нескольких десятилетий в работах советских и зарубежных авторов [16, 17].

Снижение эмиссии  $NO_x$  при впрыске водяного пара в зону горения КС объясняется преимущественно двумя факторами: впрыск понижает максимальную температуру в зоне горения, а также за счет интенсификации процессов горения добавочным количеством гидроксильных радикалов (ОН) уменьшает время нахождения в зоне горения [17]. Таким образом основными параметрами, которые позволяют влиять на образования оксидов азота в процессе горения углеводородных топлива в КС ГТУ являются температура, коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{КС}$  и время пребывания в зоне горения.

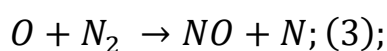
Впервые общие принципы подавления оксидов азота в процессе горения, в частности, природного газа, были сформулированы авторами [19] на основании кинетических расчетов, которые позволили разработать технологию ступенчатого сжигания природного газа, отработанную на промышленных котлах. В результате исследований были сформированы следующие принципы подавления  $NO_x$ : снижение температуры горения путем впрыска воды, пара или другого хладагента; сокращение пребывания продуктов сгорания в зоне максимальных температур.

Ограничение количества выбросов оксидов азота для ГТУ были впервые введены в США в начале 70-х годов и с того момента неумолимо ужесточались [18]. Компания General Electric разработала в начала 90-х годов малоэмиссионную камеру сгорания с приведенной концентрацией оксидов азота в сухом объеме 22 ppm (при концентрации кислорода 15%).

В России для ГТУ, вводимых в эксплуатацию после января 1995 г., действуют ограничения по содержанию токсичных  $NO_x$  в выбросах согласно ГОСТ 29328-92 «Установки газотурбинные для приводов электрогенераторов». Этот документ устанавливает максимальные выбросы оксидов азота в отработавших газах вновь вводимых ГТУ при работе на газообразном топливе до  $50 \text{ мг/м}^3$ . Значение концентрации определяется в осушенной пробе отработанного газа при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , давлении  $P = 0.1013 \text{ МПа}$  и условной объемной концентрации кислорода 15% (При пересчете на  $NO_x$ ).

Ключевой вклад в образование оксидов азота дают термические  $NO_x$  (механизм Я.Б. Зельдовича [20]). Их формирование в основном происходит в зонах повышенных температур в КС ГТУ, расположенных в зонах фронта и рециркуляции пламени. Основная масса термических оксидов азота формируется в условиях высоких температур после завершения горения при максимальной концентрации гидроксильных радикалов (ОН) и атомарного кислорода (О). Большая часть этих зон располагается в факеле первичного горения, который вытягивается от форсунок до ближайших отверстий в жаровой трубе, через которые подается сжатый в компрессоре воздух для охлаждения пламени. Основная наработка оксидов азота происходит пока сохраняется высокая температура газов, в то время как газовая смесь перемещается от основания факела к его концу (от форсунок до отверстий). Их концентрация зависит от газодинамических характеристик и размеров КС.

Суть механизма образования термических оксидов азота Я.Б. Зельдовича [20] при сгорании газа сводится к протеканию в КС следующих реакций:

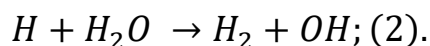
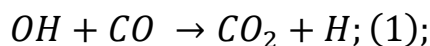


По причине чрезвычайной прочности межатомных связей молекулы азота (энергия ее разрыва  $\approx 225$  ккал/моль [22]) первая реакция имеет высокую энергию активации ( $E \approx 75$  ккал/моль). Молекулы кислорода, необходимые для протекания этой реакции возникают в результате сильно эндотермического процесса ( $\approx 118$  ккал/моль) диссоциации молекулярного кислорода. В следствии этих факторов скорость наработки монооксида азота становится крайне чувствительна к повышению температуры, настолько, что даже относительно небольшое понижение температуры (на  $100$  °C) приводит к уменьшению скорости генерации оксидов азота в шесть-восемь [23].

В зонах высоких температур соотношение топлива к воздуху близко к стехиометрическому, что обеспечивает более быстрое протекание реакции горения, чем в других зонах. Наличие в смеси избыточного воздуха или водяного пара играет роль «балласта», снижающего адиабатическую температуру и замедляющего эмиссию  $NO_x$ .

Добавления «балласта» в зону горения для уменьшения температуры – известный прием снижения концентрации  $NO_x$  в уходящих газах ГТУ. Так на рисунке 6 из работы [21] хорошо видно, что при увеличении доли избыточного воздуха в смеси концентрация  $NO_x$  уменьшается, но, если слишком сильно понизить температуру наблюдается сильный «недожог» и в результате концентрация угарного газа (CO) в выбросах становится недопустимой.

Окисление CO проходит по цепному механизму:



Контролировать эмиссию CO возможно благодаря реакции (1), энергия активации которой составляет  $E \approx 21$  ккал/моль. Но для быстрого протекания этой реакции требуются большие концентрации водяных паров и высокие температуры, которые приводят к увеличению образования оксидов азота  $NO_x$ .

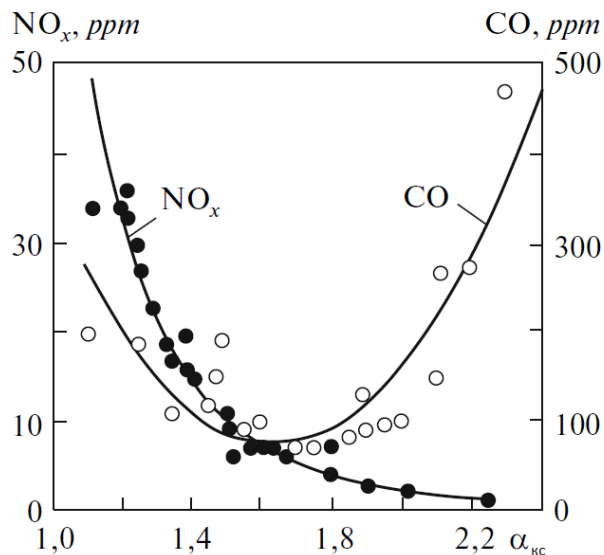


Рисунок 6 – Зависимость концентрации  $NO_x$  и  $CO$  от коэффициента избытка воздуха при горении предварительно подготовленной топливовоздушной смеси в ГТУ [21]

В случае цикла ГТУ-STIG с впрыском пара роль «балласта» берет на себя водяной пар. В результате впрыска концентрация  $NO_x$  в продуктах сгорания уменьшается из-за понижения температуры горения газового топлива. Однако результатом чрезмерно высокого соотношения доли пара к топливу также является понижение полноты сгорания газа, что приводит к невозможности бесконечно наращивать долю пара из-за роста эмиссии  $CO$ . По этой причине многие исследования по снижению вредных выбросов ГТУ направлены на определение весьма узкого диапазона значений количества впрыскиваемого пара, при которых возможно одновременно снизить концентрацию оксидов азота  $NO_x$  и концентрацию  $CO$  [24]. Результаты натурных экспериментов, приведенные в работах [25, 26], демонстрируют возможность достижения крайне низких одновременных концентраций  $CO$  и  $NO_x$ , путем сжигания предварительно перемешанной смеси метана с водяным паром при соотношении пар-метан вплоть до 4:1.

Для расчетов концентрации  $NO_x$  могут быть использованы численные модели, описывающие процессы горения газообразных углеводородных топлив. В таких моделях применяются системы химических реакций и

компонентов, описывающие стадии горения. Это позволяет учитывать изменение состава за счет химических превращений, происходящих в системе, поглощение и выделение тепла в результате химических реакций. Реакции отбираются исходя из конкретной специфики рассматриваемого процесса.

В работе [18] была использована система из 667 реакций и 103 компонентов для кинетического расчета горения предварительно подготовленной обедненной смеси метана, воздуха и водяного пара. Теплотери через стенки КС ГТУ и радиальные потери с фронта пламени не учитывались. Температура смеси составляла 427 °С, давление 50 бар. Давление и температура принимались постоянными. В рассматриваемой задаче решалась система обыкновенных дифференциальных уравнений для концентрации компонентов.

На рисунке 7 представлены значения адиабатической температуры сгорания смеси метана, воздуха и водяных паров от соотношения расхода пара с воздухом при нескольких значениях коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{кс}$  при давлении смеси 50 бар.

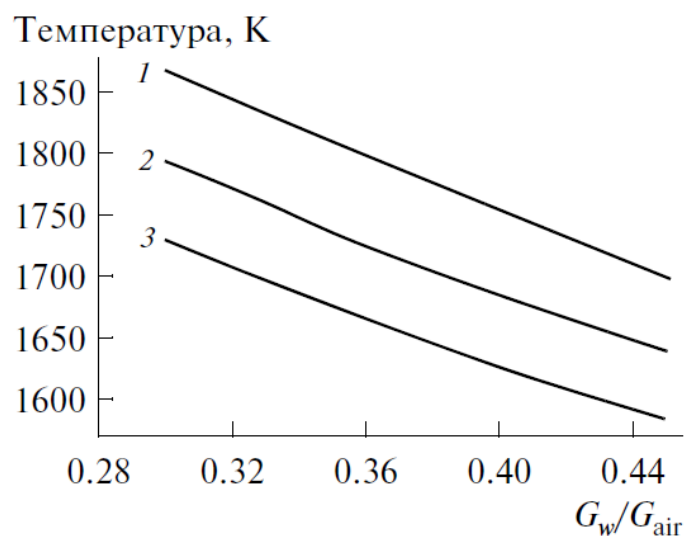


Рисунок 7 – Зависимость адиабатической температуры сгорания смеси от соотношения расхода пара  $G_w$  и воздуха  $G_{air}$  при  $P = 50$  бар: 1 –  $\alpha_{кс} = 1.2$ , 2 – 1.3, 3 – 1.4 [18]

Зависимость образования NO от времени прибытия в зоне горения при сжигании смеси метана с воздухом представлена на рисунке 8. Полученные в работе [18] результаты показывают, что концентрации NO менее 10 ppm можно достичь при соотношении расхода пара к расходу воздуха  $\frac{G_w}{G_{air}} = 0.35$  и выше при времени прибытия в зоне горения КС 0.7 с.

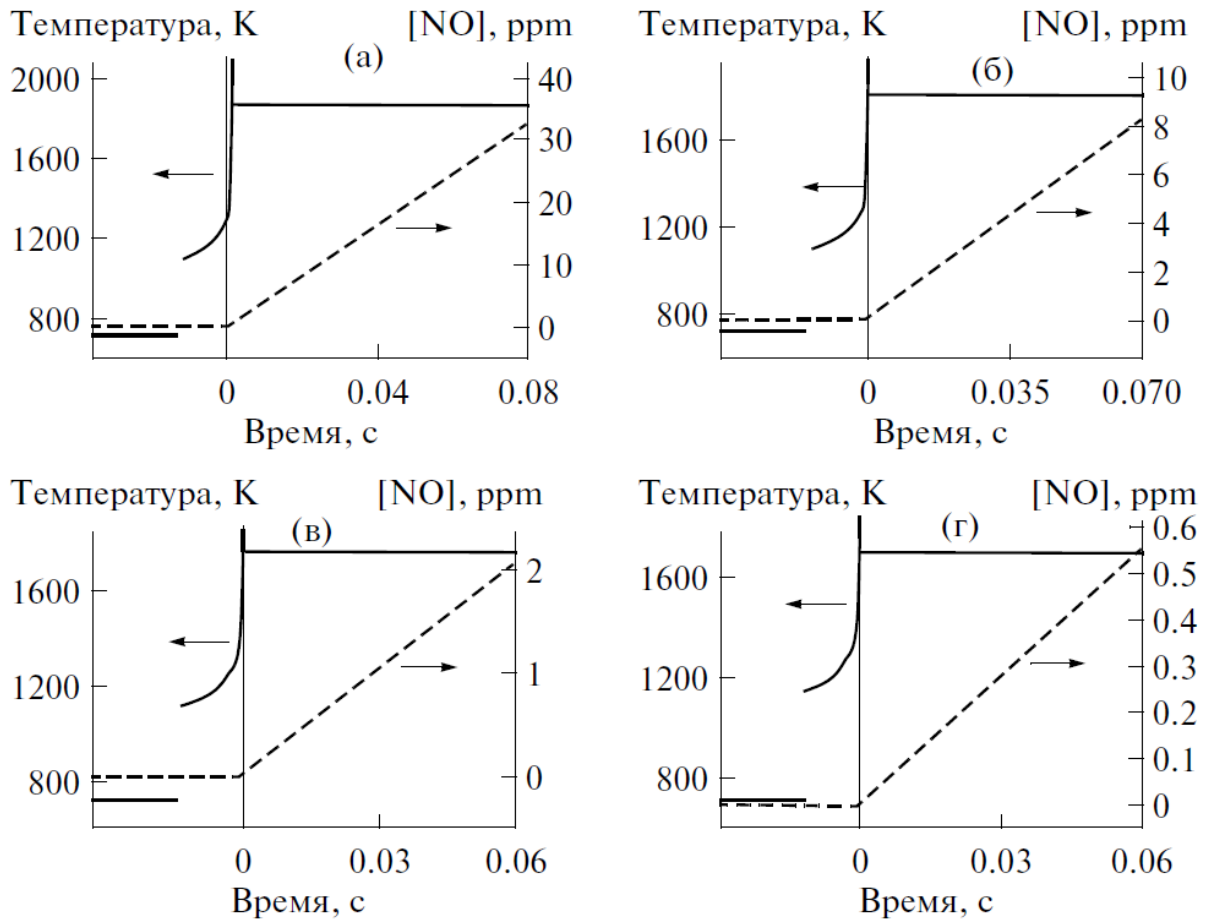


Рисунок 8 – Зависимость температуры и концентрации NO от времени при сжигании смеси метана с воздухом для разных соотношений расхода пара  $G_w$  и воздуха  $G_{air}$  при  $P = 50$  бар,  $T_0 = 700$  К,  $\alpha_{КС} = 1.2$ : (а) –  $\frac{G_w}{G_{air}} = 0.3$ , (б) – 0.35, (в) – 0.4, (г) – 0.45 [18]

По рисунку 9 можно оценить влияние  $\frac{G_w}{G_{air}}$  на возможные концентрации NO в продуктах сгорания метана при значениях  $\alpha_{КС} = 1.2$  и 1.4 и различных временах прибытия в зоне горения КС. Результаты расчета

[18] показали, что для  $\alpha_{\text{КС}} = 1.2$  количество образующегося NO значительно больше, нежели чем для  $\alpha_{\text{КС}} = 1.4$ , а зависимость NO от времени прибывания в КС при  $\frac{G_w}{G_{\text{air}}} \geq 0.4$  практически отсутствует.

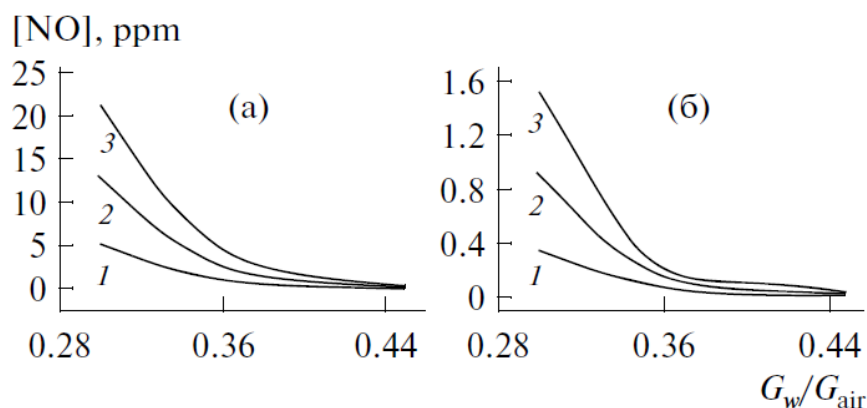


Рисунок 9 – Зависимость концентрации NO от соотношений расхода пара  $G_w$  и воздуха  $G_{\text{air}}$  для  $\alpha_{\text{КС}} = 1.2$ (а) и  $\alpha_{\text{КС}} = 1.4$ (б) и различных времен прибывания продуктов сгорания в КС при  $P = 50$  бар: 1 –  $t = 0.01$  с, 2 – 0.03, 3 – 0.05 [18]

По зависимостям на рисунке 10 можно проследить влияние значения соотношения расхода пара и воздуха на образование NO для различных временных значений прибывания в зоне горения КС ГТУ и разных  $\alpha_{\text{КС}}$ . Отчетливо видна экспоненциальная зависимость значений NO от расхода пара, что фактически связано с линейной зависимостью температуры продуктов сгорания от расхода пара (рис. 7).



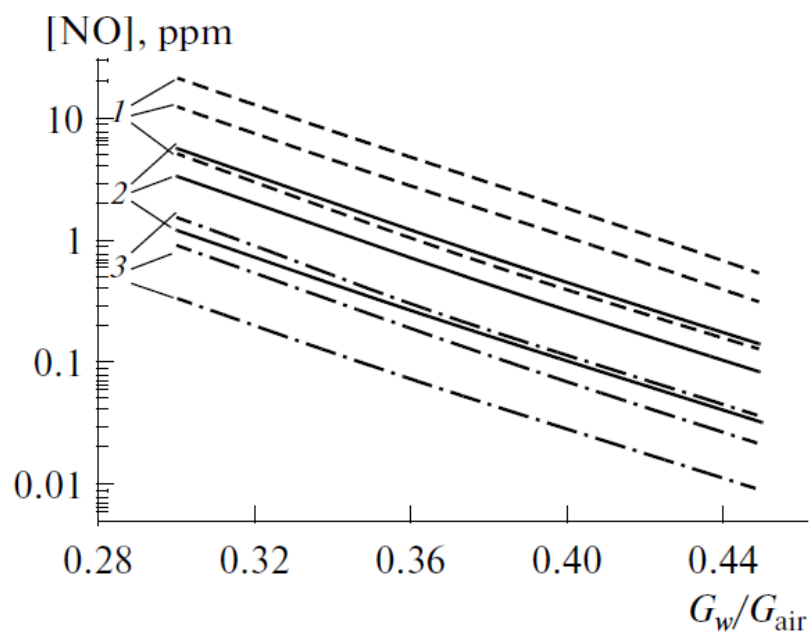


Рисунок 10 – Зависимость NO от соотношений расхода пара  $G_w$  и воздуха  $G_{air}$  для разных  $\alpha_{KC}$  и различных времен прибывания продуктов сгорания в КС при  $P = 50$  бар: 1 –  $\alpha_{KC} = 1.2$ , 2 – 1.3, 3 – 1.4; нижняя кривая в группе –  $t = 0.01$  с, средняя – 0.03, верхняя – 0.05 [18]

#### 4. Влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические характеристики ГТУ

Увеличить значение удельной работы, отнесенной к кг воздуха, в простом цикле ГТУ возможно за счет введения в цикл установки дополнительного рабочего тела. «Энергетический» впрыск в камеру сгорания ГТУ составляет 10 – 25 % от расхода воздуха в компрессор установки и заменяет собой часть избыточного воздуха, идущего на охлаждение лопаточного аппарата. На сжатие воздуха затрачивается значительно большее количество энергии, чем на сжатие воды, которая характеризуется относительно малой работой сжатия. Таким образом рост удельной работы в цикле ГТУ с впрыском пара тем значительнее, чем меньше работа, затрачиваемая на сжатие дополнительного рабочего тела (водяного пара). Так же увеличение работы ГТУ при впрыске водяного пара обусловлено увеличением расхода рабочего тела через ГТ. «Энергетический» впрыск водяного пара в КС ГТУ является мощным средством повышения удельной работы установки.

В таблице 1 приведены сравнительные данные по установкам с впрыском пара фирмы General Electric, имеющей значительный многолетний опыт производства ГТУ-STIG.

Таблица 1 - ПГУ-STIG фирмы General Electric и их базовые ГТУ

Тип ПГУ	Год начала выпуска	Мощность, МВт	КПД, %	Температура, °С		Степень сжатия	Расход рабочего тела, кг/с			Выпуск к 1993 г., штук
				на входе	на выходе		всего	газ	пар	
LM 1600 PA	1988	14.0	37.2	1260	505	22.2	45.5	45.4	-	6
LM 1600 PB STIG	1889	17.2	41.1	1244	442	22.2	54.4	51.8	2.65	3
LM 2500 PE	1980	21.6	35.7	1244	541	19.	67.3	67.3	-	116
LM 2500 PH	1983	27.0	41.0	1188	487	19.7	73.0	67.2	5.8	10
LM 5000 PC	1984	34.2	36.5	1240	446	30.1	122.6	122.6	-	23
LM 5000 PD STIG	1986	52.4	43.0	1125	383	32.2	1402	122.4	17.8	31

Как видно из таблицы 1, добавление в схему обычной ГТУ впрыска пара в КС приводит к увеличению мощности, КПД и расхода рабочего тела через ГТ.

На рисунке 11 показано влияние впрыска пара на ГТУ фирмы General Electric типа MS7001 EA.

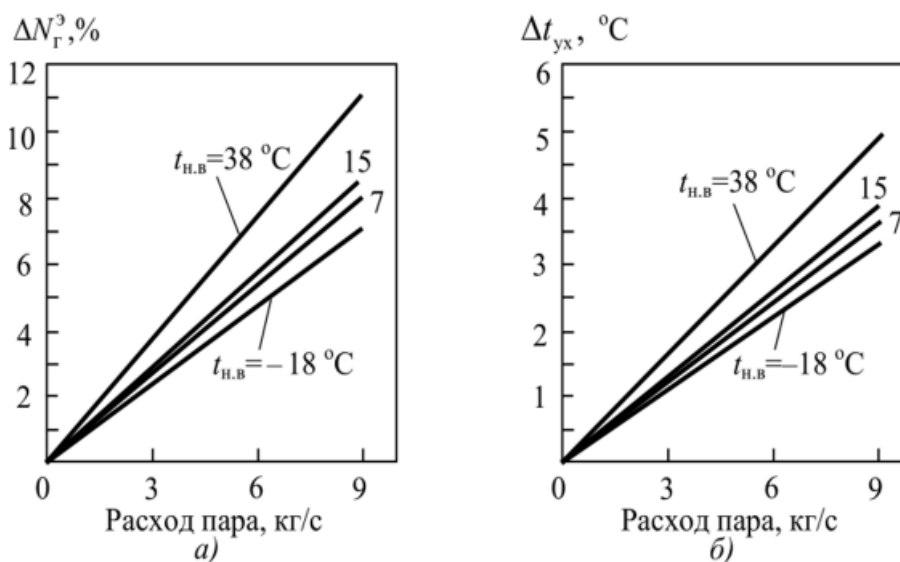


Рисунок 11 – Влияние впрыска пара в КС ГТУ типа MS7001 EA (General Electric) на электрическую мощность  $\Delta N_{\text{э}}$  (а) и температуру выходных газов  $\Delta t_{\text{yx}}$  (б)

В работе [28] исследовалось влияние впрыска воды и водяного пара на базе ГТУ ГТЭ-65 производства ОАО «Силовые машины». Установка выполнена по простой схеме в виде одновального двухпорного турбокомпрессора с частотой вращения ротора 5441 об/мин, с приводом электрогенератора, реализованном через редуктор.

Для исследования составлялась математическая модель на базе модели ГТЭ-65 с учетом всех технических характеристик ГТУ. Исследование впрыска воды и подвода пара производилось с помощью программного комплекса «ГРАД ЭУ».

Результаты исследования представлены на рисунках 12-14 в виде зависимостей часового расхода топлива от количества впрыскиваемого пара, КПД и мощности ГТУ.

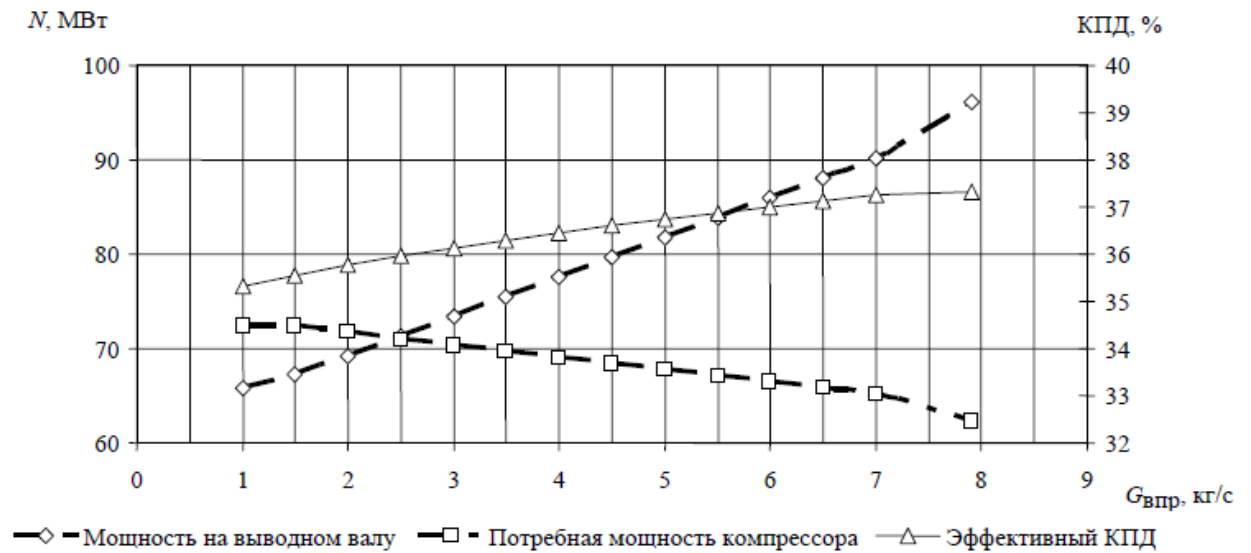


Рисунок 12 – Изменение параметров ГТЭ-65 при впрыске воды во входное устройство [28]

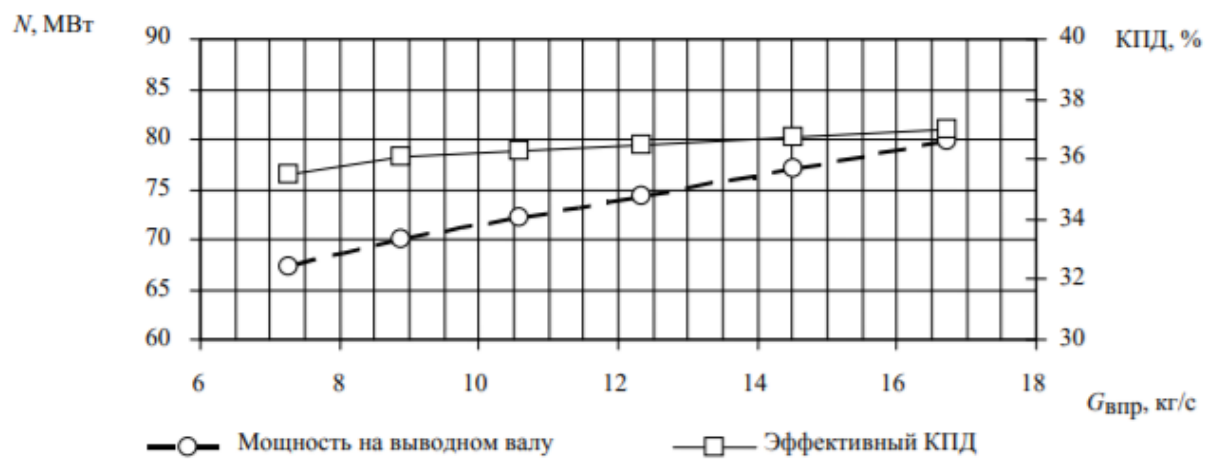


Рисунок 13 – Изменение параметров ГТЭ-65 при подводе пара в зону горения с поддержанием температуры газа перед турбиной, равной 1553,15 К [28]

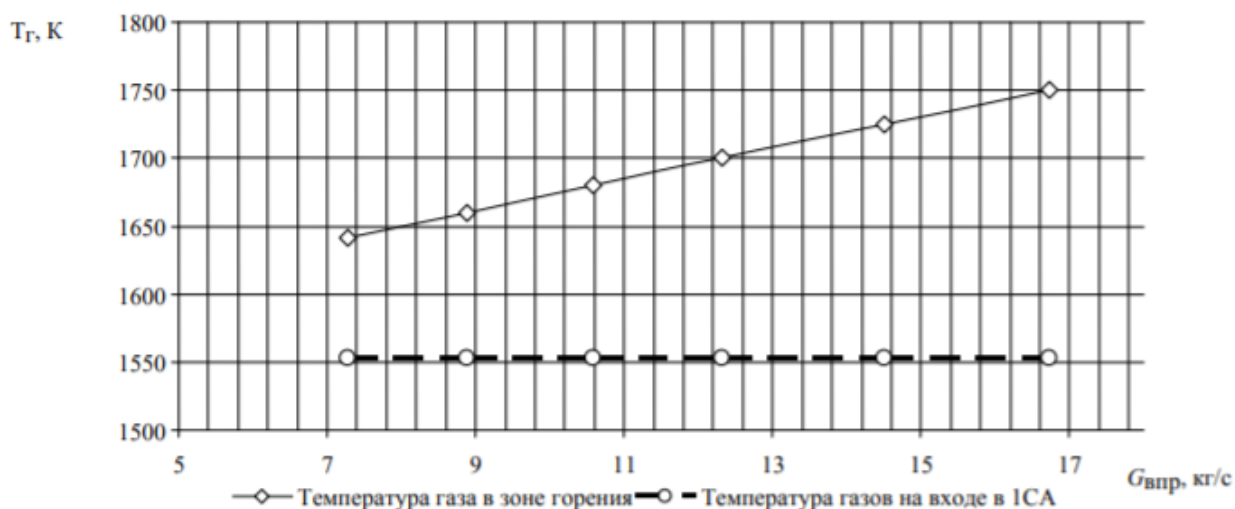


Рисунок 14 – Изменение температуры газа в камере сгорания ГТЭ-65, с подводом пара в зону горения при постоянной температуре газа перед турбиной [28]

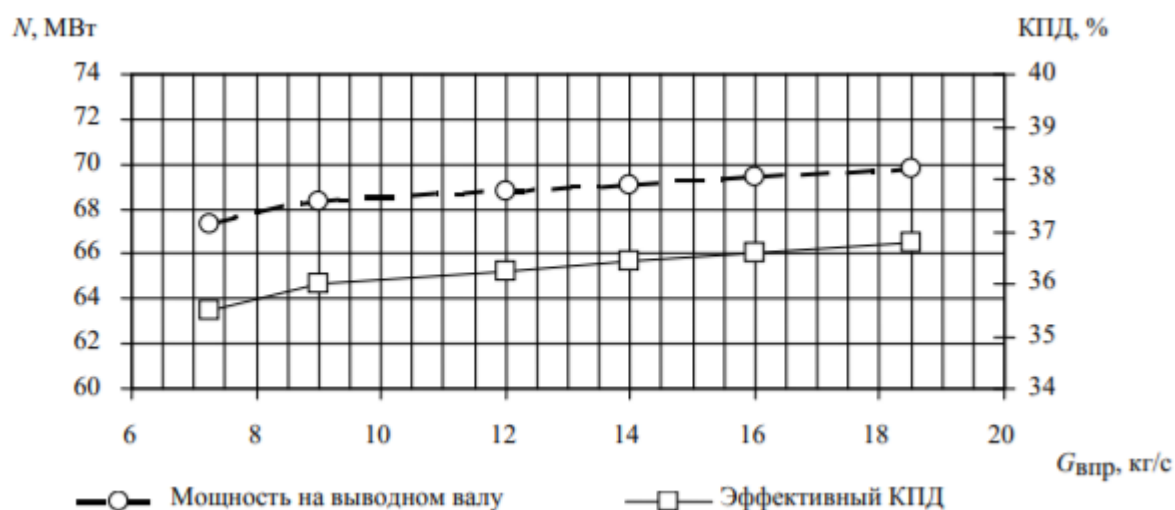


Рисунок 15 – Изменение параметров ГТЭ-65 при подводе пара перед турбиной [28]

Анализ результатов в работе [28] показывает, что подвод пара в зону горения приводит к повышению мощности ГТЭ-65 с 65 до 79,8 МВт, КПД увеличивается до 36,9% (при условии поддержания температуры газов перед турбиной 1553 К) (рис. 14, 15). Максимально возможный впрыск (7,91 кг/с) позволяет повысить КПД на 3,56 % по сравнению с базовым двигателем, мощность установки увеличивается до 96,13 МВт (рис. 12) в результате снижения мощности, необходимой на сжатие воздуха в компрессоре.

## 6. Характеристики ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания

Для получения зависимостей энергетических характеристик ГТУ при заданном расходе воздуха от количества впрыскиваемого пара необходимо провести некоторое количество дополнительных расчетов при этом изменяя расход впрыскиваемого в камеру сгорания пара. Минимальное количество впрыска – 5% от расхода воздуха в компрессор. Полученные данные сведем в таблицу 7.

Таблица 7 – Характеристики ГТУ с впрыском пара в КС при различных значениях впрыска:  $d_B$  – расход впрыска в %;  $D_B$  – расход впрыска в  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;  $N_{ГТ}$ , МВт – мощность ГТ,  $N_{ГТУ}$ , МВт – полезная мощность ГТУ;  $\eta_{ГТУ}$  – КПД ГТУ;  $\alpha_{КС}$  – коэффициент избытка воздуха;  $B_T$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$  – расход топлива.

№ расчета	$d_B$ , %	$D_B$ , $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$N_{ГТ}$ , МВт	$N_{ГТУ}$ , МВт	$\eta_{ГТУ}$	$\alpha_{КС}$	$B_T$ , $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$
1	0	0	123,045	65,933	0,442	2,45	3,2
2	5	6	133,748	76,636	0,468	2,235	3,508
3	7	8,4	138,001	80,889	0,477	2,159	3,63
4	9	10,8	142,479	85,367	0,486	2,085	3,76
5	11	13,2	146,527	89,415	0,494	2,022	3,887
6	13	15,6	150,832	93,72	0,502	1,959	4,002
7	15	18	155,135	98,023	0,509	1,9	4,126
8	17	20,4	159,311	102,199	0,516	1,845	4,247
9	19	22,8	163,63	106,519	0,522	1,792	4,337
10	21	25,2	167,879	110,761	0,528	1,743	4,496
11	23	27,6	172,123	115,011	0,533	1,697	4,619
12	25	30	176,361	119,249	0,539	1,653	4,743

Полученные зависимости энергетических характеристик от расхода впрыскиваемого пара представлены на рисунках 18 – 19.

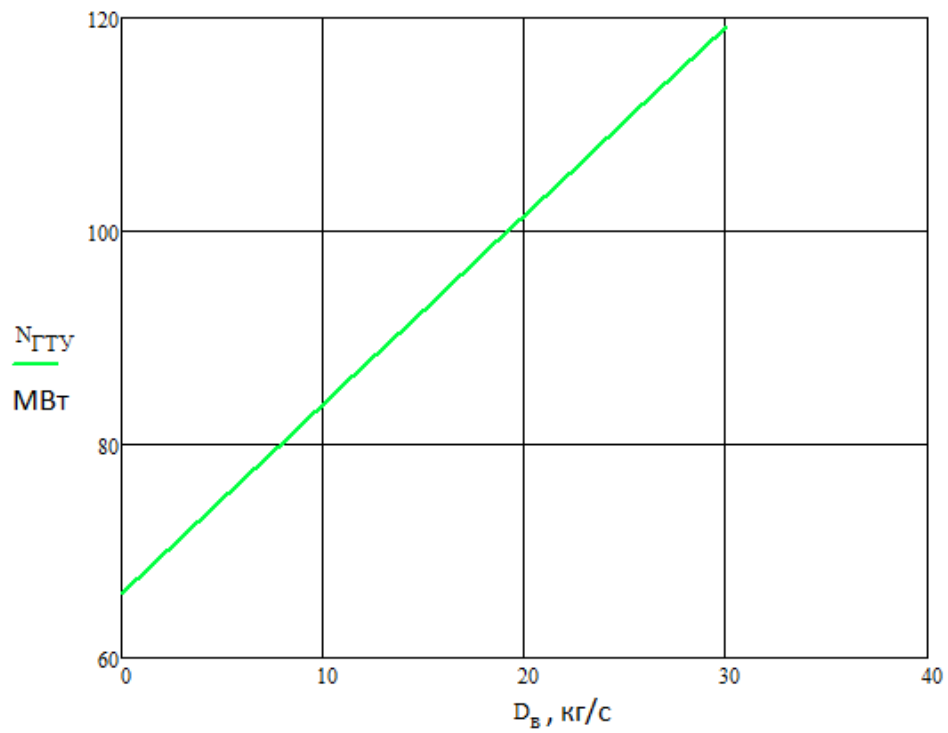


Рисунок 18 – График зависимость полезной мощности ГТУ  $N_{\text{ГТУ}}$  от расхода впрыскиваемого пара  $D_B$

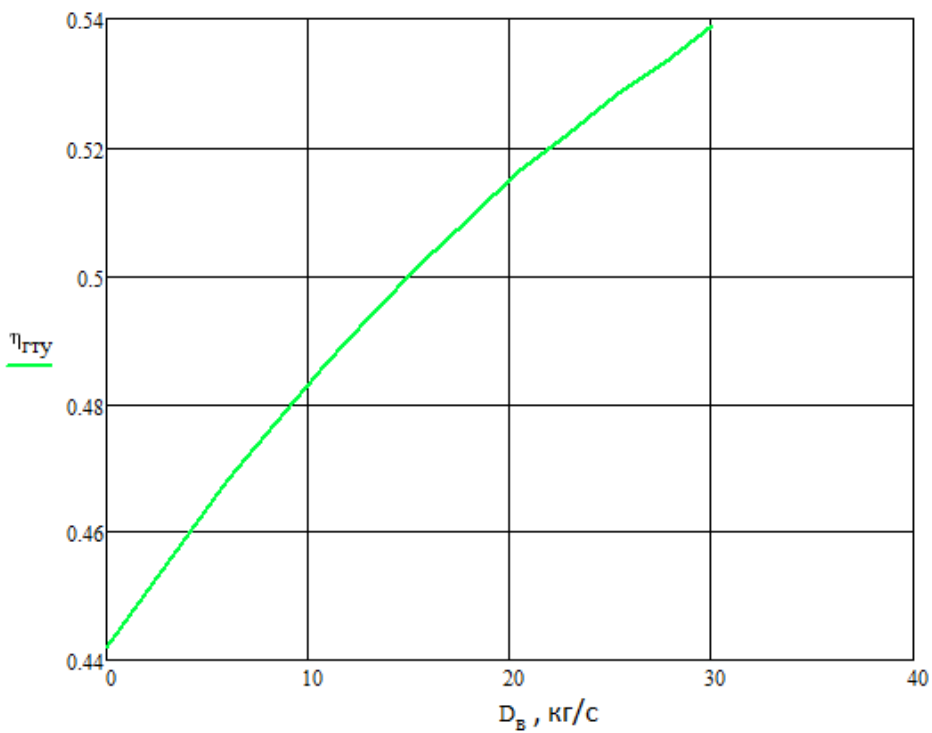


Рисунок 19 – График зависимость КПД ГТУ  $\eta_{\text{ГТУ}}$  от расхода впрыскиваемого пара  $D_B$

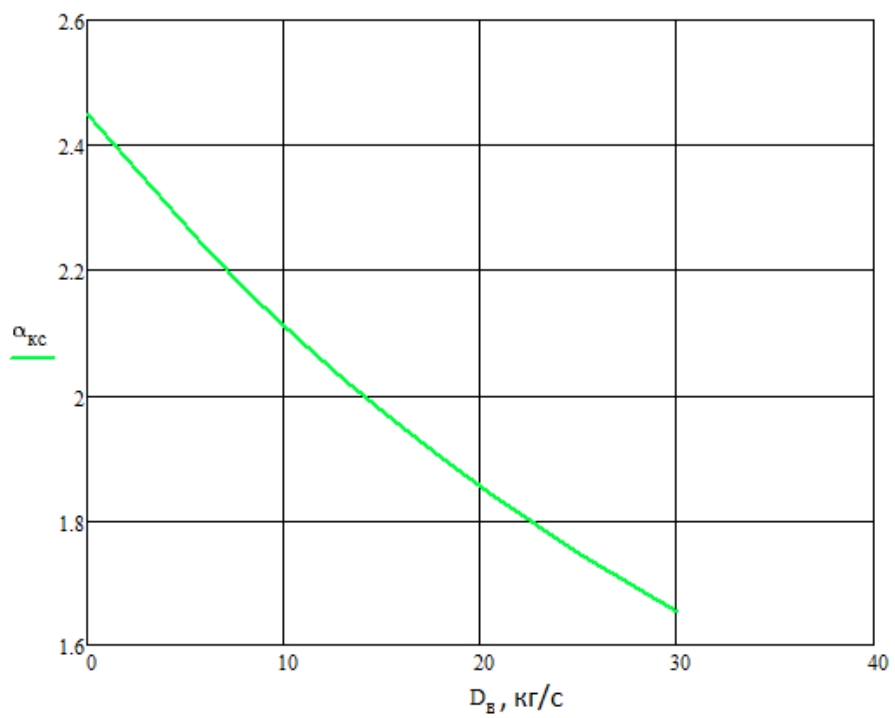


Рисунок 20 – График зависимость коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{KC}$  от расхода впрыскиваемого пара  $D_B$



**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Б6А1	Чунареву Тимофею Федоровичу

Инженерная школа энергетики		Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.01Теплоэнергетика и теплотехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Должностной оклад инженера 18000 р Должностной оклад руководителя 35120 р
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизации основных фондов: 20 %
3. Социальные отчисления	Социальные отчисления-30% от ФЗП

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений.
2. Планирование и формирование бюджета исследований	Планирование работ. Разработка диаграммы Ганта. Формирование сметы затрат на исследование.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Описание потенциального эффекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений с учетом корректировки
2. Диаграмма Ганта проведения исследования
3. Смета затрат на исследование

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2021
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	канд. эконом. наук		01.03.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Б6А1	Чунарев Тимофей Федорович		01.03.2021

## **7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение к разделу**

Целью раздела является оценка исследования на тему «Влияние на экологические и энергетические характеристики ГТУ впрыска экологического и энергетического пара в камеру сгорания» с точки зрения финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи: выявление потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентоспособности цикла ГТУ-STIG с впрыском пара, планирование работ в рамках проводимого исследования, а также расчет бюджета исследования.

## **7.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В данной ВКР на тему «Влияние на экологические и энергетические характеристики ГТУ экологического и энергетического впрыска пара в камеру сгорания» основной целью является получение зависимостей энергетических и экологических показателей ГТУ от объема впрыска пара в камеру сгорания для оценки влияния впрыска.

Данное исследование представляет особый интерес для рынка электрической энергии, а именно для сегмента промышленных и бытовых потребителей.

## **7.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направление для ее будущего повышения. Данный анализ будем проводить для циклов газотурбинных установок: ГТУ простого цикла, ГТУ-STIG, ГТУ с впрыском воды.

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных

технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub> (ГТУ-STIG)	Б <sub>к1</sub> (ГТУ с впрыском воды)	Б <sub>к2</sub> (ГТУ простого цикла)	К <sub>ф</sub> (ГТУ-STIG)	К <sub>к1</sub> (ГТУ с впрыском воды)	К <sub>к2</sub> (ГТУ простого цикла)
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Экологичность	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
2. Надежность	0,15	3	3	4	0,45	0,45	0,6
3. КПД	0,15	4	4	3	0,6	0,6	0,45
4. Мощность	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
2. Цена	0,1	3	3	4	0,3	0,3	0,4
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
4. Финансирование научной разработки	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>29</b>	<b>4,0</b>	<b>3,55</b>	<b>3,35</b>

Из анализа оценочной карты хорошо видно, что основные слабые позиции конкурентных циклов заключаются в экологичности и мощности ГТУ, отсюда можно сделать вывод, что разработка ГТУ с применением технологии впрыска пара (STIG) имеет преимущество, так как многие страны стремятся к как можно большему снижению воздействия на окружающую среду. Так же данная ГТУ имеет большую мощность и относительную дешевизну, что способствует расширению энергетического потенциала.

### 7.3. Планирование работ и оценка времени их выполнения

Для выполнения работы, составляется план. В нем подсчитывается по пунктам трудоемкость работ, количество исполнителей, участвующих в проекте, расходы и текущие затраты: заработная плата, социальные отчисления.

Поэтапный список работ, работающие исполнители, оценка объема трудоемкости отдельных видов работ сведена в таблице 9.

Таблица 9 – Планирование работ и оценка времени их выполнения

№	Наименование работ	Исполнитель	Продолжительность, дней
1	Выдача и получение задания	Научный руководитель	3
2	Изучение литературы и сбор исходных материалов для проектирования	Инженер	21
3	Анализ объекта исследования (ГТУ с впрыском экологического и энергетического пара)	Инженер	10
4	Анализ тепловых схем ГТУ с впрыском пара	Инженер	7
5	Разработка расчетно-математической модели ГТУ с впрыском пара	Инженер	14
6	Расчет тепловой схемы ГТУ при различных значениях впрыска пара	Инженер	10
7	Расчет выбросов ГТУ	Инженер	7
8	Анализ полученных результатов	Научный руководитель	3
		Инженер	3
9	Оформление работы по стандартам ТПУ	Инженер	3
10	Утверждение ВКР руководителем	Научный руководитель	1
		Инженер	1
11	Выдача и получение задания Изучение литературы и сбор исходных материалов для проектирования	Научный руководитель	3
		Инженер	21

### Диаграмма Ганта

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ										
				март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Выдача и получение задания	Руководитель	3	■										
2	Изучение литературы и сбор исходных материалов для проектирования	Инженер	21	■	■	■								
3	Анализ объекта исследования (ГТУ с впрыском энергетического и экологического пара)	Инженер	10			■	■							
4	Анализ тепловых схем ГТУ с впрыском пара	Инженер	7				■	■						
5	Разработка расчетно-математической модели	Инженер	14					■	■	■				
6	Расчет тепловой схемы ГТУ при различных значениях впрыска пара	Инженер	10							■	■			
7	Расчет выбросов ГТУ	Инженер	7								■	■		
11	Анализ полученных результатов	Руководитель, инженер	3									■	■	
12	Оформление работы по стандартам ТПУ	Инженер	3										■	
13	Утверждение ВКР руководителем	Руководитель, инженер	1											■

■ – Инженер      ■ – Руководитель

## 7.4. Смета затрат на проектирование

Капитальные вложения в проект определяются по следующей формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{зп}} + K_{\text{со}} + K_{\text{нр}} \text{ руб.},$$

где  $K_{\text{мат}}$  – материальные затраты, руб.;

$K_{\text{ам}}$  – амортизация компьютерной техники, руб.;

$K_{\text{зп}}$  – затраты на заработную плату, руб.;

$K_{\text{со}}$  – затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$  – прочие затраты, руб.;

$K_{\text{нр}}$  – накладные расходы, руб.

### 7.4.1 Материальные затраты

К материальным затратам относятся затраты на приобретение канцелярских товаров, принимаются в размере 3000 руб.

### 7.4.2 Амортизация основных фондов и нематериальных активов

При разработке проекта использовалась компьютерная техника, в связи с этим необходимо рассчитать амортизацию от её использования.

Таблица 10 – Основные фонды при выполнении проекта

Вид техники	Количество, ед.	Стоимость, руб.	Норма амортизации, %
Ноутбук	1	74990	20
Принтер	1	7690	20

Затраты на амортизацию основных фондов рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб.},$$

где  $T_{\text{исп.кт}}$  – время использования компьютерной техники,  $T_{\text{исп.кт}} = 77$  дней;

$T_{\text{кал}}$  – календарное время, (365 дней);

$C_{\text{кт.}}$  – стоимость компьютерной техники, (74990) руб.;

$T_{\text{сл}}$  – срок службы компьютерной техники, 5 лет;

$$K_{\text{ам.ком.}} = \frac{77}{365} \cdot 74990 \cdot \frac{1}{5} = 3164 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{ам.прин.}} = \frac{10}{365} \cdot 7690 \cdot \frac{1}{5} = 42,1 \text{ руб.}$$

Сумма амортизационных отчислений по основным фондам:

$$K_{\text{ам.}} = K_{\text{ам.комп.}} + K_{\text{ам.прин.}} = 3163 + 42,1 = 3206,1 \text{ руб.}$$

### 7.4.3 Затраты на заработную плату

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненные работы, исходя из должностных окладов в соответствии с принятыми на предприятии нормами и системами оплаты труда;
- выплаты, обусловленные районным регулированием оплаты труда;
- оплата в соответствии с действующим законодательством очередных и дополнительных отпусков;

Общая заработная плата рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{зп}} = \text{ЗП}_{\text{рук.}} + \text{ЗП}_{\text{инж.}}, \text{ руб.},$$

где  $\text{ЗП}_{\text{рук.}}$  – заработная плата научного руководителя;

$\text{ЗП}_{\text{инж.}}$  – заработная плата инженера.

Месячная заработная плата:

$$\text{ЗП}_{\text{мес.}} = \text{ЗП}_0 \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ руб.},$$

где  $\text{ЗП}_0$  – месячный оклад: научного руководителя  $\text{ЗП}_{\text{рук.}} = 35120$  руб.; инженера  $\text{ЗП}_{\text{инж.}} = 18000$ руб.;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск,  $K_1 = 10\%$ ;

$K_2$  – районный коэффициент, для города Томска  $K_2 = 30\%$ .

Месячная заработная плата научного руководителя:

$$\text{ЗП}_{\text{мес}} = 35120 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 50221,6 \text{ руб.}$$



Месячная заработная плата инженера:

$$ЗП_{\text{мес}} = 18000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 25740 \text{ руб.}$$

Расчет дневных ставок:

$$ЗП_{\text{дн}} = \frac{ЗП_{\text{мес}}}{Д}, \text{ руб.},$$

где Д – количество рабочих дней в месяце, (21 день).

Дневная ставка научного руководителя:

$$ЗП_{\text{дн}} = \frac{50221,6}{21} = 2391,5 \text{ руб.}$$

Дневная ставка инженера:

$$ЗП_{\text{дн}} = \frac{25740}{21} = 1225,7 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы согласно затраченному времени на выполнение ВКР:

$$ЗП_{\text{рук.}} = 2391,5 \cdot 7 = 16740,5 \text{ руб.};$$

$$ЗП_{\text{инж.}} = 1225,7 \cdot 77 = 94380 \text{ руб.}$$

Затраты на общую заработную плату:

$$К_{ЗП} = 16740,5 + 94380 = 111120,5 \text{ руб.}$$

#### **7.4.4 Затраты на социальные отчисления**

Данная статья отражает обязательные отчисления по установленным законодательным нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования. Затраты на социальные нужды рассчитываются как доля 30% от затрат на оплату труда:

$$К_{СО} = 0,3 \cdot К_{ЗП}, \text{ руб.},$$

$$К_{СО} = 0,3 \cdot 111120,5 = 33336,2 \text{ руб.}$$

#### **7.4.5 Накладные расходы**

В стоимости проекта учитываются накладные расходы, включающие в себя затраты на аренду помещений, оплату тепловой и электрической энергии,

затраты на ремонт зданий и сооружений, заработную плату административных сотрудников и т.д. Накладные расходы рассчитываются как 16% от затрат на оплату труда:

$$K_{\text{нр}} = 0,16 \cdot (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам.}} + K_{\text{зп}} + K_{\text{со}}), \text{ руб.},$$

$$K_{\text{нр}} = 0,16 \cdot (3000 + 3206,1 + 111120,5 + 33336,2) = 24106 \text{ руб.}$$

Общие капитальные вложения в проект составит:

$$K_{\text{пр}} = 3000 + 3206,1 + 111120,5 + 33336,2 + 24106 = \\ 174768,8 \text{ руб.}$$

Полученные данные сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Смета затрат на проектирование

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты, $K_{\text{мат}}$	3000
Амортизация компьютерной техники, $K_{\text{ам}}$	3206,1
Затраты на заработную плату, инженера и научного руководителя, $K_{\text{зп}}$	111120,5
Затраты на социальные нужды, $K_{\text{со}}$	33336,2
Накладные расходы, $K_{\text{нр}}$	24106
Итого, $K_{\text{пр}}$	174768,8

## **Выводы по разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В результате выполнения раздела было определено, что разработка ГТУ с применением технологии впрыска пара (STIG) представляет особый интерес для рынка электрической энергии, а именно для сегмента промышленных и бытовых потребителей. Так же был произведен анализ конкурентных технических решений, из которого можно сделать вывод, что данная разработка имеет ряд технологических и экономических преимуществ. К технологическим относятся более высокий электрический КПД ГТУ и низких показателях выбросов  $NO$ ,  $NO_x$ ,  $CO_x$ . С точки зрения экономических показателей, ГТУ с применением технологии впрыска пара (STIG) имеет преимущество перед конкурентами за счет меньших капиталовложений и пониженного уровня выбросов вредных веществ, что обеспечивает повышенную конкурентоспособность этой технологии в современных реалиях.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
3-5Б6А1		Чунареву Тимофею Федоровичу	
<b>Школа</b>	ИШЭ	<b>Отделение (НОЦ)</b>	И. Н. Бутакова
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

«Влияние на экологические и энергетические показатели ГТУ впрыска экологического и энергетического пара в камеру сгорания»	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	Объект исследования: ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания. Рабочее место оператора ПГУ, которое располагается в турбинном цехе. Область применения: энергетическая – для привода электрогенератора.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – ГОСТ 12.0.006.02. Управление охраны труда в организации.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов; 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия.	Вредные факторы: – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень инфракрасного излучения; – повышенный уровень электромагнитных излучений; Опасные факторы: – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; – движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– воздействия объекта на атмосферу: выбросы в атмосферу оксидов азота $NO_x$ , оксидов серы $SO_x$ , углекислого газа $CO_2$ . – воздействия объекта на гидросферу: загрязнение водоемов сточными водами. – воздействие объекта на литосферу: осаждение на поверхности литосферы вредных соединений, содержащихся в выбросах.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– пожары и взрывы.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	Кандидат биолог. наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5Б6А1	Чунарев Тимофей Федорович		

## **8. Социальная ответственность**

### **Введение к разделу**

Газотурбинная установка (ГТУ) с впрыском пара состоит из совокупности связанных между собой газотурбинной установки (ГТУ), котла-утилизатора (КУ), системы химической водоочистки и вспомогательного оборудования. К вспомогательному оборудованию относятся трубопроводы и регулирующая арматура. Продукты сгорания ГТУ поступают в котел-утилизатор (КУ) для выработки пара высокого давления. Получаемый пар из КУ поступает в камеру сгорания (КС), где смешивается с продуктами сгорания, оказывая положительный эффект на энергетические и экологические показатели установки. После котла утилизатора прошедший цикл пар вместе с продуктами сгорания выбрасывается в атмосферу.

Рабочее место оператора ГТУ располагается в непосредственной близости от ГТУ, поэтому необходимо провести исследование на выявления вредных и опасных факторов в процессе эксплуатации этого оборудования. Данное исследование поможет в разработке как должностной инструкции, так и для составления раздела техники безопасности

#### **8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Трудовая деятельность оператора ГТУ регулируется трудовым кодексом Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

Статья 91 «Понятие рабочего времени. Нормальная продолжительность рабочего времени» определяет положения, связанные со временем, которые работник затрачивает на свою трудовую деятельность.

Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Оператор ГТУ работает по сменному графику. Согласно статье 103 ТК РФ сменная работа - работа в две, три или четыре смены - вводится в тех случаях, когда длительность производственного процесса превышает допустимую продолжительность ежедневной работы, а также в целях более эффективного использования оборудования, увеличения объема выпускаемой продукции или оказываемых услуг. При сменной работе каждая группа работников должна производить работу в течение установленной продолжительности рабочего времени в соответствии с графиком сменности.

При составлении графиков сменности работодатель учитывает мнение представительного органа работников в порядке, установленном статьей 372 настоящего Кодекса для принятия локальных нормативных актов.

Графики сменности, как правило, являются приложением к коллективному договору. Графики сменности доводятся до сведения работников не позднее чем за один месяц до введения их в действие. Работа в течение двух смен подряд запрещается. Статья 108 ТК РФ определяет положения, связанные с перерывами на отдых и питание в течении рабочей смены оператора. В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Правилами внутреннего трудового распорядка или трудовым договором может быть предусмотрено, что указанный перерыв может не предоставляться работнику, если установленная для него продолжительность ежедневной работы (смены) не превышает четырех часов.

Время предоставления перерыва и его конкретная продолжительность устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка или по соглашению между работником и работодателем.

На работах, где по условиям производства (работы) предоставление перерыва для отдыха и питания невозможно, работодатель обязан обеспечить работнику возможность отдыха и приема пищи в рабочее время. Перечень

таких работ, а также места для отдыха и приема пищи устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка.

Согласно статье 160 ТК РФ нормы труда - нормы выработки, времени, нормативы численности и другие нормы - устанавливаются в соответствии с достигнутым уровнем техники, технологии, организации производства и труда.

Нормы труда могут быть пересмотрены по мере совершенствования или внедрения новой техники, технологии и проведения организационных либо иных мероприятий, обеспечивающих рост производительности труда, а также в случае использования физически и морально устаревшего оборудования.

Достижение высокого уровня выработки продукции (оказания услуг) отдельными работниками за счет применения по их инициативе новых приемов труда и совершенствования рабочих мест не является основанием для пересмотра ранее установленных норм труда.

Рабочее время оператора ГТУ проходит в основном в положении сидя. Согласно нормам по ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ:

1. Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы;

2. Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов, технических условий и (или) методических указаний по безопасности труда.

Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях для средних размеров тела человека приведены на рисунках 21 и 22.

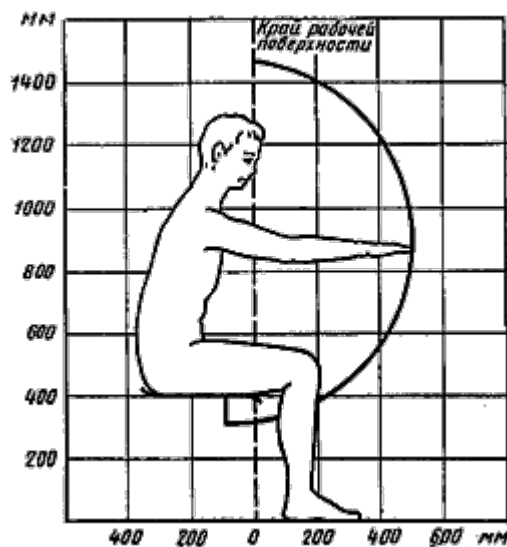


Рисунок 21 – Зона досягаемости моторного поля в вертикальной плоскости

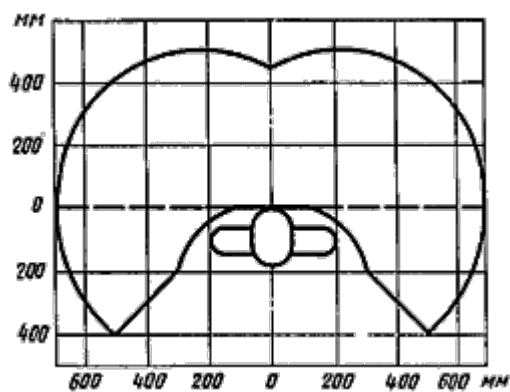


Рисунок 22 – Зона досягаемости моторного поля в горизонтальной плоскости при высоте рабочей поверхности над полом 725 мм

Выполнение трудовых операций "часто" и "очень часто" должно быть обеспечено в пределах зоны легкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля, приведенных на рисунке 23.



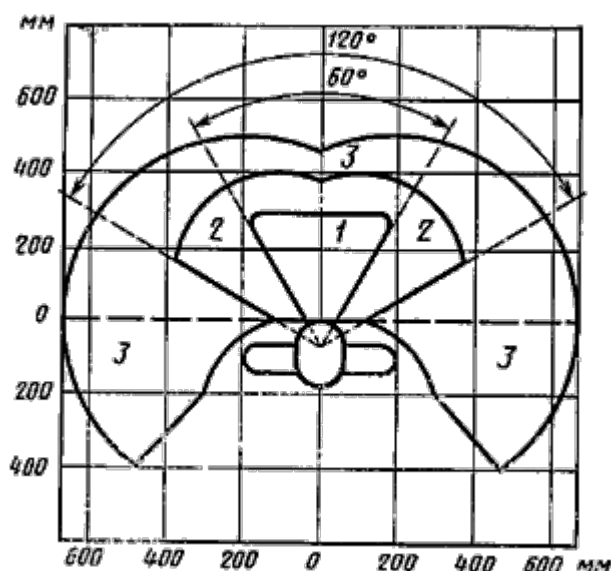


Рисунок 23— Зоны для выполнения ручных операций и размещения органов управления: 1 - зона для размещения наиболее важных и очень часто используемых органов управления (оптимальная зона моторного поля); 2 - зона для размещения часто используемых органов управления (зона легкой досягаемости моторного поля); 3 - зона для размещения редко используемых органов управления (зона досягаемости моторного поля)

При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели женщин (если работают только женщины) и мужчин (если работают только мужчины); если оборудование обслуживают женщины и мужчины - общие средние показатели женщин и мужчин.

Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием:

1. высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног. Регулируемые параметры следует выбирать по номограмме, приведенной на рисунке 24;

2. высоты сиденья и подставки для ног (при нерегулируемой высоте рабочей поверхности). В этом случае высоту рабочей поверхности устанавливают по номограмме (рисунок 24) для работающего ростом 1800 мм. Оптимальная рабочая поза для работающих более низкого роста достигается

за счет увеличения высоты рабочего сиденья и подставки для ног на величину, равную разности между высотой рабочей поверхности для работающего ростом 1800 мм и высотой рабочей поверхности, оптимальной для роста данного работающего.

Номограмма зависимости высоты рабочей поверхности для разных видов работ (1-4), пространства для ног (5) и высоты рабочего сиденья (6) от роста человека

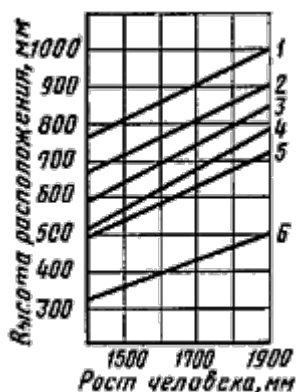


Рисунок 24 – Номограмма

Конструкция регулируемого кресла оператора должна соответствовать требованиям ГОСТ 21889-76.

Общие требования к размещению органов управления оператора ГТУ устанавливаются ГОСТ 22269-76.

1. При работе двумя руками органы управления размещают с таким расчетом, чтобы не было перекрещивания рук.

2. Органы управления на рабочей поверхности в горизонтальной плоскости необходимо размещать с учетом следующих требований:

- Очень часто используемые и наиболее важные органы управления должны быть расположены в зоне 1 (рисунок 23);
- Часто используемые и менее важные органы управления не опускается располагать за пределами зоны 2 (рисунок 23);
- Редко используемые органы управления не допускается располагать за пределами зоны 3 (рисунок 23).

3. Аварийные органы управления следует располагать в зоне досягаемости моторного поля, при этом необходимо предусмотреть специальные средства опознавания и предотвращения их непроизвольного и самопроизвольного включения в соответствии с ГОСТ 12.2.003-91.

4. При необходимости освобождения рук операции, не требующие точности и быстроты выполнения, могут быть переданы ножным органам управления.

Общие требования к размещению средств отображения информации определяются ГОСТ 22269-76:

1. Очень часто используемые средства отображения информации, требующие точного и быстрого считывания показаний, следует располагать в вертикальной плоскости под углом  $\pm 15^\circ$  от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом  $\pm 15^\circ$  от сагиттальной плоскости (рисунки 25 и 26).

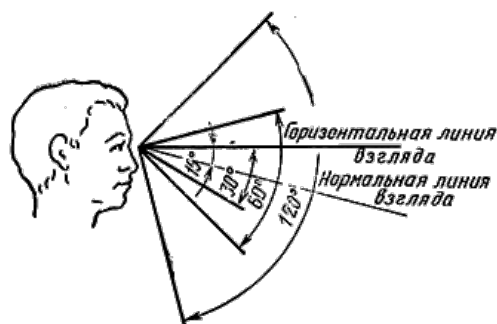


Рисунок 25 – Зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости

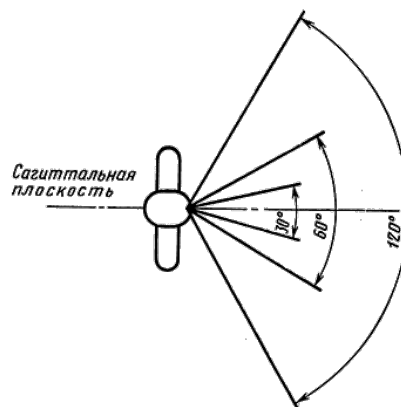


Рисунок 26 – Зоны зрительного наблюдения в горизонтальной плоскости

2. Часто используемые средства отображения информации, требующие менее точного и быстрого считывания показаний, допускается располагать в вертикальной плоскости под углом  $\pm 30^\circ$  от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом  $\pm 30^\circ$  от сагиттальной плоскости.

**Примечание.** Для стрелочных индикаторов допускаемый угол отклонения от нормальной линии взгляда - по ГОСТ 22269-76.

3. Редко используемые средства отображения информации допускается располагать в вертикальной плоскости под углом  $\pm 60^\circ$  от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом  $\pm 60^\circ$  от сагиттальной плоскости (при движении глаз и повороте головы).

## 8.2. Производственная безопасность

Таблица 12 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 30331.8-95 Электроустановки зданий. Требования по обеспечению безопасности. Общие требования по применению мер защиты для обеспечения безопасности. Требования по применению мер защиты от поражения электрическим током
2. Повышенный уровень электромагнитных излучений		+	+	СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях
3. Движущиеся машины и механизмы, подвижные части		+	+	ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Процессы производственные.

производственного оборудования				Общие требования безопасности
4. Повышенный уровень инфракрасного излучения		+	+	ГОСТ 12.4.123-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования
5. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений

### **Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека**

У человека нет органов чувств, которые позволили бы ему видеть слышать или осязать электрический ток (или напряжение). В этом состоит общеизвестная трудность предотвращения опасности поражения электрическим током. Источником данного фактора является электрогенератор, расположенный на одном валу с ГТУ. Кроме того, нельзя исключить возможности случайного прикосновения человека к токоведущим частям электрических устройств или к металлическим корпусам электрических машин и аппаратов.

Воздействия электрического тока на человека чрезвычайно разнообразны. Они зависят от множества факторов. По характеру воздействия различают: термические, биологические, электролитические, химические и механические повреждения.

*Термическое* действие тока проявляется ожогами отдельных участков тела; почернением и обугливанием кожи и мягких тканей; нагревом до высокой температуры органов, расположенных на пути прохождения электрического тока, кровеносных сосудов и нервных волокон, вызывающим в них функциональные расстройства.

*Электролитическое* действие тока проявляется в разложении различных жидкостей организма на ионы, нарушающем их свойства.

*Химическое* действие тока выражается в возникновении химических реакций в крови, лимфе, нервных волокнах с образованием новых веществ, несвойственных организму.

*Биологическое* действие тока проявляется в раздражении и возбуждении тканей организма, возникновении судорог, в остановке дыхания, изменении режима сердечной деятельности.

*Механическое* действие тока приводит к сильным сокращениям мышц, вплоть до их разрыва, к разрывам кожи, кровеносных сосудов, переломам костей, вывихам суставов, расслоению тканей.

Турбинный цех, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), относится к помещению с повышенной опасностью с рабочим напряжением от 0,4 до 10 кВ. Для защиты от поражения электрическим током предусматривается согласно ГОСТ 30331.8-95 «Электроустановки зданий. Требования по обеспечению безопасности. Общие требования по применению мер защиты для обеспечения безопасности. Требования по применению мер защиты от поражения электрическим током»:

- рабочая изоляция;
- недоступность токоведущих частей (используются осадительные средства - кожух, корпус, электрический шкаф, использование блочных схем и т.д.);
- блокировки безопасности (механические, электрические);
- малое напряжение: для локальных светильников (36 В), для особо опасных помещений и вне помещений; 12 В используется во взрывоопасных помещениях;
- предупредительная сигнализация, знаки и плакаты безопасности; меры ориентации (использование маркировок отдельных частей электрического оборудования, надписи, предупредительные знаки, разноцветная изоляция, световая сигнализация);

➤ индивидуальные средства защиты; защитное заземление (применяют в электроустановках до 1 кВ и более переменного тока с изолированной нейтралью или изолированным выводом однофазного тока, а также в электроустановках постоянного тока с изолированной средней точкой при повышенных требованиях безопасности: сырые помещения, передвижные установки, торфяные разработки и т.д.);

➤ зануление (применяют в электроустановках до 1 кВт с глухозаземлённой нейтралью или глухозаземлённым выводом источника однофазного тока, а также глухозаземлённой средней точкой в трехпроводных сетях постоянного тока).

К общей системе заземления подключают все металлические нетоковедущие части оборудования, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус.

### **Повышенный уровень электромагнитных излучений**

К источникам электромагнитных излучений на производстве относятся генераторы электроэнергии, устройства защиты и автоматики и другое оборудование. Перечисленные источники излучения обладают определенной массой и количеством движения, распространяются со скоростью света, заряжая частицы воздуха, при воздействии на человека оказывают отрицательное влияние в виде нагрева, поляризации, ионизации клеток человека. Предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитных полей регламентируют СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях» в зависимости от времени пребывания персонала для условия общего и локального воздействия. Предельно допустимые уровни (ПДУ) напряженности электрических полей регламентируют «СанПиН выполнения работ в условиях воздействия промышленной частоты электрических полей (50 Гц)» в зависимости от времени пребывания.

Таблица 13 – Предельно допустимые уровни (ПДУ) напряженности в условиях воздействия электрических полей 50 Гц

Время пребывания (час)	Допустимые уровни МП, Н [А/м] / В [мкТл] при воздействии.	
	общем	локальном
<= 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Мероприятия по защите от воздействия электромагнитных полей:

- уменьшение составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в зоне индукции, в зоне излучения - уменьшение плотности потока энергии, если позволяет данный технологический процесс или оборудование;
- защита временем (ограничение время пребывания в зоне источника электромагнитного поля); защита расстоянием (60 - 80 мм от экрана);
- метод экранирования рабочего места или источника излучения электромагнитного поля;
- рациональная планировка рабочего места относительно истинного излучения электромагнитного поля; применение средств предупредительной сигнализации; применение средств индивидуальной защиты.

Для рабочего места оператора ПГУ используется метод экранирования источника излучения, а также использование средств индивидуальной защиты, такие как: костюмы, комбинезоны из тканевого волокна в сочетании с экранирующим проводящим слоем; ботинки, полуботинки токопроводящие ТУ 17-06-71-82, ботинки ТУ 17-06-82-83.



## **Движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования**

При эксплуатации узлов и деталей (валов, муфт, осей, шестерен) газотурбинной установки возможно травмирование человека движущимися частями этих механизмов. Причины разнообразны: выход движущихся частей за установленные пределы; биение или неправильная установка узлов; динамическая перегрузка механизмов; несоблюдение инструкций по эксплуатации, или нарушение правил техники безопасности.

К таковым механизмам на ГТУ-ГТЭС относятся: вращающиеся муфты электродвигателей, приводы и исполнительные механизмы, другое оборудование. Для исключения травмирования и возможности случайного попадания человека в опасную зону устанавливаются ограждения, предохранительные устройства, различные блокировки и сигнализации согласно ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Процессы производственные. Общие требования безопасности». ГОСТ 12.2.062-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Оборудование производственное. Ограждения защитные».

### **Повышенный уровень инфракрасного излучения**

В турбинном цехе в результате технологического процесса имеет место тепловое (инфракрасное) излучение от трубопроводов и обмуровки. В соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96 интенсивность облучения (Е0) меньше или равна 100 Вт/м<sup>2</sup>. Время пребывания на рабочих местах при отклонении температуры воздуха от допустимых величин регламентируют СанПиН 2.2.4.548-98. На рабочих местах, связанных с выделением тепла, предусматривается согласно ГОСТ 12.4.123-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования»:

- теплозащитные экраны в районе мест, где наблюдается сильное выделение тепла; тепловая изоляция (температура наружной поверхности не более 45°С);
- охлаждение теплоизлучающих поверхностей;
- сигнальная окраска трубопроводов (соответствует правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды);
- аэрация и воздушное душирование; спецодежда в соответствии с нормами;
- вентиляция.

В таблице приведены допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников в соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96.

Таблица 14 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела, работающих, от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м, не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

Для безопасной эксплуатации ГТУ будут применяться теплозащитные экраны, тепловая изоляция и спецодежда. Так же предусмотрена вентиляция и аэрация.

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным производственным фактором,

который может вызвать ослепленность или привести к быстрому утомлению и снижению работоспособности.

Согласно ГОСТ 12.4.011-89 к средствам нормализации освещенности производственных помещений рабочих мест относятся:

- источники света;
- осветительные приборы;
- световые проемы;
- светозащитные устройства;
- светофильтры.

При эксплуатации и ремонте ГТУ освещение совмещенное. Однако есть места, в которых добиться нормального освещения возможно только искусственным способом. В частности, это относится к ремонту регулирующей арматуры и трубопроводов, которые находятся в местах недоступных для пропуска солнечного света. Для этого применяются переносные осветительные приборы и дополнительные источники искусственного света.

Нормы освещенности для электрических станций согласно СП 52.13330.2016 указаны в таблице 15.

Таблица 15 – Нормы освещенности для производственных помещений

Наименование помещения	$E_{\text{экс}}$ , лк	$U_0$ , не менее	$UGR$ , не более	$R_a$ , не менее	$K_{\text{п}}$ , %, не более
Заводы, поставляющие топливо*	50	0,40	-	20	-
Котельные	100		28	40	
Машинные залы	200		25	80	20
Бойлерные, холодильные, электрощитовые (внутри здания)	200				
Помещения контроля**	500	0,70	16	80	15
* Цвета и знаки безопасности по <a href="#">ГОСТ Р 12.4.026</a> .					
** При наличии мониторов необходимо соблюдать требования 4.9.					

### 8.3. Экологическая безопасность

Процесс горения топлива в КС энергетических ГТУ сложнее, чем в топочных камерах обычных энергетических установок. При относительно невысоких температурах химическая реакция горения протекает достаточно медленно, а потребление кислорода во много раз меньше возможности его доставки к фронту пламени, который отделяет топливовоздушную смесь от продуктов сгорания. Наиболее опасными выбросами ГТУ являются оксиды азота. Содержание оксидов азота определяет токсичность продуктов сгорания природного газа на 90-95%. Кроме того, оксиды азота под воздействием ультрафиолетового излучения активно участвуют в фотохимических реакциях в атмосфере с образованием других вредных газов.

Источником образования оксидов азота служит азот воздуха и топлива. В атмосферном воздухе содержится 78,1% азота по объему. Азот является составной частью рабочей массы топлива. Содержание азота в топливе невелико: до 1 – 1,5% в природном газе и лишь в отдельных месторождениях природный газ содержит до 4% молекулярного азота. По своей распространенности и интенсивности воздействия из многих химических веществ этого типа наибольшее значение имеют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и наиболее активный из них – бенз(а)пирен. Максимальное количество бенз(а)пирена образуется при температуре 700-800 °С в условиях нехватки воздуха для полного сгорания топлива.

Современные малотоксичные ГТУ при базовой нагрузке агрегата характеризуют по эмиссии ЗВ: от 20 до 51 мг/м<sup>3</sup> (10,25 ppm) по NO<sub>x</sub>, 12,5 мг/м<sup>3</sup> (10 ppm) по СО и 3,6 мг/м<sup>3</sup> (5 ppm) по несгоревшим углеводородам.

Согласно ГОСТ 29328-92 «Установки газотурбинные для привода турбогенераторов» содержание оксидов азота в отработавших газах ГТУ при работе с нагрузкой от 0,5 до 1,0 номинальной не должно превышать 150

мг/м<sup>3</sup> на газообразном и жидком топливах, а для вновь создаваемых ГТУ, эксплуатация которых начнется с 1 января 1995 г. - 50 мг/м<sup>3</sup> на газообразном топливе и 100 мг/м<sup>3</sup> на жидком топливе.

### **Мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO<sub>x</sub>**

Существующие технические решения не всегда позволяют добиться удовлетворительных экологических показателей работы КС энергетических ГТУ. В определенных режимах их переводят в так называемый мокрый режим работы, впрыскивая в поток газов определенное количество воды (пара). Это позволяет значительно сократить количество NO<sub>x</sub> в газах.

Побочным явлением такого решения являются:

- сокращение периодов между профилактическим техобслуживанием и уменьшение срока службы;
- дополнительные затраты на подготовку и впрыск воды (пара);
- увеличение эмиссии CO.

### **Снижение выброса соединений серы в атмосферу**

Диоксид серы (SO<sub>2</sub>), содержащийся в дымовых газах, практически не влияет на процесс производства электроэнергии. Триоксид серы (SO<sub>3</sub>) обуславливает сернокислотную точку росы. По ней выбирают температуру уходящих газов котлов, и она является одним из основных факторов эффективной работы газоочистки.

Но практическое отсутствие воздействия SO<sub>2</sub> на процесс производства энергии “компенсируется” активным воздействием этого вещества на окружающую среду: диоксид серы в атмосфере при воздействии озона, образующегося из кислорода воздуха под действием солнечного света, окисляется до триоксида серы SO<sub>3</sub>, который соединяется с водяным паром и образует пары серной кислоты.

Пары серной кислоты в три-четыре раза тяжелее воздуха, под действием гравитации вместе с атмосферными осадками поступают в почву.

В результате пресноводные водоемы и реки закисляются, что приводит к потере части водной флоры и фауны. Наличие в дымовых газах диоксида серы обусловлено постоянным присутствием в твердом и жидком топливе (и в природном газе некоторых месторождений) различных соединений серы – сульфидов и органических соединений. Сокращение выбросов соединений серы на ПГУ может быть осуществлено тремя способами:

- путем очистки топлива от соединений серы до его сжигания;
- связыванием серы в процессе горения;
- в результате очистки дымовых газов.

### **Сокращение выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосферу**

С развитием индустрии и техники установившийся баланс нарушился из-за сжигания биомассы. В результате сжигания ископаемых топлив на земле теперь возникает ежегодный прирост на 15 млрд. тонн CO<sub>2</sub> сверх сбалансированного круговорота, что способствует образованию так называемого парникового эффекта.

Данные выбросы непосредственно связаны с выбросами NO<sub>x</sub>, поэтому при сгорании топлива в камере сгорания ГТУ при уменьшении выбросов NO<sub>x</sub> возрастают выбросы CO<sub>x</sub>. На рисунке 27 изображена зависимость влияния подачи воды (пара) в камере сгорания (КС) на выход NO<sub>x</sub> и CO<sub>x</sub>. Поэтому они регулируются сложным процессом горения топлива в КС.

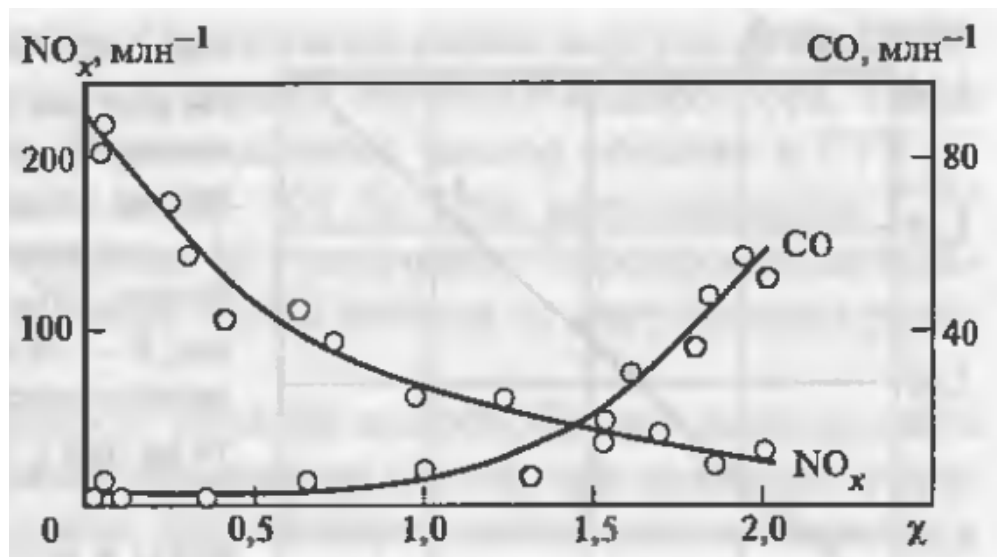


Рисунок 27 – Влияние впрыска воды (пара) в КС на выход  $NO_x$  и  $CO_x$

$$(\chi = B_{\text{воды}} / B_{\text{топл}})$$

В следствии этого уменьшить выбросы  $CO_2$  значительно сложнее, чем выбросы других вредных веществ. Очистка уходящих газов ГТУ от углекислого газа аппаратными средствами (например, с помощью абсорбционной или мембранной технологии) на сегодняшний день исключительно дорога, нецелесообразна и не находит применения. Однако, учитывая необходимость решения данной проблемы, в индустриально развитых странах ведутся работы и в этом направлении.

### Защита водоемов от сточных вод

Эксплуатация тепловых электрических станций связана с использованием большого количества воды. Основная часть воды (больше 90%) расходуется в системах охлаждения различных аппаратов: конденсаторов турбин, масло- и воздухоохладителей, движущихся механизмов. К сточным водам относится любой поток воды, выводимый из цикла электростанции. На любой ПГУ образуются сточные воды, содержащие мазут, который попадает в них из главного корпуса, гаражей, открытых распределительных устройств, маслохозяйств. Для защиты природных вод от загрязнения и рационального использования воды в

народном хозяйстве, предусмотрены следующие технические решения, направленные на сокращение водопотребления и ликвидацию выбросов: обратная система технического водоснабжения; обработки промышленных стоков, загрязненных нефтепродуктами, установка расширителей непрерывной продувки; повторное использование очищающих стоков в цикле ГТУ.

#### **8.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Предупреждение аварий и взрывов технологического оборудования**

Для предупреждения аварий и взрывов технологического оборудования необходимо исключить:

- тепловые и механические перегрузки оборудования (парогенераторов и турбин);
- нарушение режима работы оборудования;
- неисправности контрольно-измерительных приборов и средств диспетчеризации технологического управления.

Данный технологический процесс производства электроэнергии и тепловой энергии должен вестись в строгом соответствии с ПТЭ электростанций и сетей; ПБ 03-576-03 Правилами устройств и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением; ПТБ при эксплуатации тепломеханического оборудования электрических станций и тепловых сетей.

#### **Обеспечение взрывопожарной безопасности**

Для обеспечения пожарной безопасности в машинном зале по СНиП 21-01-97 "Пожарная безопасность зданий и сооружений" предусматривается степень огнестойкости здания II. Максимальные пределы огнестойкости конструкций для II класса огнестойкости представлены в таблице 16.



Таблица 16 – Максимальные пределы огнестойкости конструкций

Степень огнестойкости здания	Максимальные пределы огнестойкости конструкций, минут					
	Несущие элементы	Наружные стены	Перекрытия	Перекрытия безчердачные	Лестничные клетки	
					Площадки, стены	Марши лестниц
II	R45	RE15	REJ45	RE15	REJ90	R45

Источником возникновения пожара может явиться турбинное масло и водород в следствии их нагрева при эксплуатации ГТУ. Данные вещества являются взрывоопасными и легковоспламеняющимися. Их характеристика приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Пожароопасные свойства веществ

Наименование вещества	Пожароопасность	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), %	Верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПР), %	Температура воспламенения, °С
Турбинное масло	ГЖ	-	14,8	15,8	400
Водород	ГГ	0,083	4	75	510

Турбинный цех по пожарной безопасности относится к категории А (НПБ-105-03), по степени огнестойкости II.

Для пожарной безопасности предусматривается согласно ППБ 01-03 ГОСТ 12.1.004-91:

- эвакуационные выходы;
- внутренний и наружный пожарные водопроводы.

**Организационно-технические мероприятия должны включать:**

1. организацию пожарной охраны, организацию ведомственных служб пожарной безопасности в соответствии с законодательством РФ;

2. паспортизацию веществ, материалов, изделий, технологических процессов, зданий и сооружений объектов в части обеспечения пожарной безопасности;
3. привлечение общественности к вопросам обеспечения пожарной безопасности;
4. организацию обучения работающих правилам пожарной безопасности на производстве, а населения - в порядке, установленном правилами пожарной безопасности соответствующих объектов пребывания людей;
5. разработку и реализацию норм и правил пожарной безопасности, инструкций о порядке обращения с пожароопасными веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и действиях людей при возникновении пожара;
6. изготовление и применение средств наглядной агитация для обеспечения пожарной безопасности;
7. порядок хранения веществ и материалов, тушение которых недопустимо одними и теми же средствами, в зависимости от их физико-химических и пожароопасных свойств;
8. нормирование численности людей на объекте по условиям безопасности их при пожаре;
9. разработку мероприятий по действиям администрации, рабочих, служащих и населения на случай возникновения пожара и организацию эвакуации людей;
10. основные виды, количество, размещение и обслуживание пожарной техники.

Применяемая пожарная техника должна обеспечивать эффективное тушение пожара (загорания), быть безопасной для природы и людей. Так же для борьбы с масляными пожарами предусматривается применение огнестойких жидкостей, например, применение масла ОМТИ. В системе смазки и регулирования напорные маслопроводы, находящиеся в зоне

высоких температур, помещаются в специальные защитные короба, выполненные из листовой стали толщиной не менее 3 мм. Все зоны скопления масляных паров вентилируются с помощью эксгаузеров.

В отделении устанавливаются автоматическая дренчерная система пожаротушения и автоматическая система объёмного аэрозольного тушения (САТ) в соответствии с НПБ 110-03. Система оповещения людей о пожаре с автоматическим управлением и возможностью реализации множества вариантов организации эвакуации из каждой зоны оповещения в соответствии с НПБ 104-03. Аварийная вентиляция на случай возникновения пожара. Предусмотрена схема наружного и внутреннего пожарного водоснабжения с двумя независимыми вводами. На всех отметках размещено по несколько пожарных гидрантов. По всей территории на всех отметках установлены щиты с размещением первичных средств пожаротушения ЩП-В, а в местах с токоведущими проводниками ЩП-Е. Все меры пожарной безопасности выполняются в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования», ГОСТ Р-12.3.047-98 ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» и «Правилами пожарной безопасности», ППБ 01-03.

## **Вывод по разделу социальная ответственность**

В выпускной квалификационной работе была исследована газотурбинная установка с впрыском пара, которая имеет большое социальное значение, как для населения и производства, так и для всего экономического сектора страны. ГТУ обеспечивает потребителей бесперебойной подачей электроэнергии, следовательно, необходимо понимать всю социальную ответственность, возложенную на разработку и безаварийную эксплуатацию данной установки. Поэтому в данном разделе были рассмотрены документы нормализующие условия и охрану труда, чтобы каждый работник понимал, что от него требуется в той или иной ситуации и какая ответственность на нем лежит. Рассмотрено влияние ГТУ на окружающую среду и предложены различные способы, которые минимизируют данное влияние. В этом разделе так же был произведен анализ наиболее типичной ЧС, в частности техногенного характера (взрыв технологического оборудования, пожар) и сделано описание взрывоопасной безопасности, а также разработаны организационно-технические мероприятия для их предупреждения.

## Заключение по исследовательской работе

В работе было исследовано влияние «энергетического» и «экологического» впрыска пара в камеру сгорания ГТУ, была составлена расчетная математическая модель ГТУ по которой были проведены расчеты характеристик ГТУ в зависимости от расхода впрыскиваемого пара в КС для разного количества пара (таблица 7).

Результаты показывают, что впрыск пара в КС положительно влияет на ключевые показатели работы ГТУ: КПД ГТУ, полезную удельную мощность. При анализе рассчитанных показателей рассматриваемой схемы (рис.17) видно, что по мере увеличения количества впрыскиваемого пара неуклонно возрастают удельная полезная мощность ГТУ с 65,933 МВт до 119,249 МВт при впрыске 25% пара (рис. 18), и КПД установки с 0,442 до 0,539 при впрыске 25% пара (рис. 19), это связано с увеличением массового расхода рабочего тела через турбину, коэффициент избытка воздуха при этом уменьшается, что сокращает затраты на работу сжатия (рис. 20).

Положительное влияние впрыска на образование вредных оксидов азота также существенно. Полученные в работе [18] результаты показывают, что концентрации NO менее 10 ppm можно достичь при соотношении расхода пара к расходу воздуха  $\frac{G_w}{G_{air}} \geq 0.35$  при времени прибывания в зоне горения КС 0.7 с. Это объясняется понижением температуры горения топлива в камере сгорания, что так же приводит к повышению эмиссии CO в следствии недожога топлива. Однако при определенной оптимизации процесса горения в ГТУ с впрыском пара можно одновременно добиться крайне низких концентраций как  $NO_x$ , так и CO [25, 26] путем сжигания предварительно перемешанной смеси метана с водяным паром при соотношении пар-метан вплоть до 4:1.

Технология впрыска водяного пара в КС, которая за рубежом носит название STIG, является мощным инструментом для улучшения энергетических и экологических характеристик ГТУ. Применение этой

технологии позволяет уменьшить капиталовложения, повысить КПД и удельную полезную мощность установки, а также снизить концентрацию вредных примесей в продуктах сгорания до допустимого уровня, что подтверждает необходимость дополнительных исследований в этом направлении.

## Список литературы:

1. **Карно С.** Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу / Пер. с фр. Бурсиана В.Р., Круткова Ю.А. – Париж, 1824.
2. **Степанов И.Р.** Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы. – Апатиты: изд-во Кольского научного центра РАН, 2000. -169 С.
3. **А.с. 168962 СССР.** Тепловая энергетическая установка на парогазовой смеси / С.А. Христианович, В.М. Масленников и др. // Открытия. Изобретения. 1962. №5.
4. **Батенин В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З., и др.** Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину – перспективное направление развития энергетических установок. // Теплоэнергетика . - 1993 г.. - С. 46-52.
5. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 С.
6. **Колп, Меллер.** Ввод в эксплуатацию первой в мире ГТУ полного цикла STIG на базе газогенератора LM-5000 (фирма Simpson Paper Company) // Современное машиностроение. Сер. А. 1989. №11. С. 1-14.
7. **Digmnarthy R.** Chang-Nati Chang. Cheng-Cicle implementation on small gas turbine engine // Gas Turbine World.- 1984.- №3.-Р.34-37.
8. **Романов В.И., Кривуца В.А.** Комбинированная газопаровая установка мощностью 16...25 МВт с утилизацией тепла уходящих газов и регенерацией воды из парогазового потока // Теплоэнергетика. – 1996. - №4. – С. 27-30.
9. **Фаворский О.Н., Батенин В.М., Зейгарник Ю.А. и др.** Комплексная парогазовая установка с впрыском пара и теплонасосной установкой (ПГУ МЭС-60) для АО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. - 2001 г.. - №9. - стр. 50-58.

10. **Фаворский О.Н., Цанев С.В., Буров В.Д., Карташев Д.В.** Технологические схемы и показатели экономичности ПГУ с прыском пара в газовый тракт // Теплоэнергетика. - 2005 г. - №4. - стр. 28-34.
11. **Стыркович М.А., Фаворский О.Н., Батенин В.М. и др.** Парогазовая установка с впрыском пара: возможности и оптимизация параметров цикла // Теплоэнергетика. – 1995 г. - №10. – С. 52 – 57.
12. **Новиков А.С., Мешков А.С., Миронов Ю.Р. и др.** Разработки АО «Рыбинские моторы» для стационарной энергетики // Теплоэнергетика. – 1999. – №4. – С. 20 – 27.
13. **Korobitsyn M.A.** New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles. - Enschede: Febodruk BV, 1998. – 137 с
14. **Bartlett M.** Developing Humidified Gas Turbine Cycles: doctoral thesis. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. – 91 с.
15. **Dalili F.** Humidification in Evaporative Power Cycles: doctoral thesis. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2003. – 105 с
16. **Сигал И.Я.** Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. М.: Недра, 1988. 312 с.
17. **Correa S.M.** A Review of NO<sub>x</sub> Formation Under Gas Turbine Combustion Conditions // Combust. Sci. Technol. 1992. V. 87. P. 329.
18. **Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А.** Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // Теплофизика высоких температур. – 2013. – том 51 – № 6 – С. 937-944.
19. **Гордин К.А., Масленников В.М.** К вопросу о предотвращении выбросов оксида азота при сжигании органических топлива // ФГВ. 1986. № 1. С. 58.
20. **Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.** Окисление азота при горении, М.: Изд-во АН СССР, 1947.



21. **Туманский А.Г., Гутник М.Н. Васильев В.Д. и др.** Проблемы и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ // Теплоэнергетика. 2006. № 7. С. 22 – 29.
22. **Карапетьяц М.Х., Карапетьяц М.Л.** Основные термодинамические константы неорганических и органических соединений М.: Химия, 1968. 468 С.
23. **Иванов А.А., Ермаков А.Н., Ларин И.К., Шляхов Р.А.** Новые технологии сжигания природного газа для экологически чистой энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 5. С. 115-124.
24. **Иванов А.А. Ермаков А.Н., Шляхов Р.А.** О глубоком подавлении выбросов NO<sub>x</sub> и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия РАН. Энергетика. - 2010 г.. - №3. - стр. 119-128.
25. **Cheng D.Y., Nelson A.L.C.** Chronological development of Cheng cycle steam injected gas turbine during last 25 years // Proc. ASME Turbo Expo 2002. June 3–6, 2002. Amsterdam.
26. **Cheng D.Y.** CLN Development to reduce NO<sub>x</sub> and greenhouse gas // 17 Symp. on Industrial Application of Gas-turbine (IAGT). Banff. Alberta. Canada. October. 2007.
27. **Буланин В.А.** Газотурбинные установки с энергетическим впрыском пара // Иновационные технологии в науке и образовании. – 2019. – УДК: 621.438. – С 33 – 37.
28. **Шишин А.А., Титов А.В., Осипов Б.М., Кривоносова В.В.** Исследование впрыска воды и подвода пара в проточную часть энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65. – 2012 г. – УДК: 621.577 – С. 47-51.
29. **Набор** программ для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара («WaterSteamPro»). А.с. 2000610803 РФ / А.А. Александров, А.В. Очков, В.Ф. Очков, К.А. Орлов.
30. **Орлов К.А.** Программа «WaterSteamPro» // КомпьютерПресс. – 2001. - №4. – С. 2.

31. **Орлов К.А., Александров А.А., Очков В.Ф., Очков А.В.** Программный комплекс «WaterSteamPro» для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара // X Российская Конференция по Теплофизическим Свойствам Веществ: Тез. докл. – Казань, 2002. – С. 187 – 188.
32. **Александров А.А., Очков В.Ф., Орлов К.А.** Уравнения и программа для расчета свойств газов и продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 2005. № 3. С. 48 – 55.
33. **Орлов К.А.** Исследование схем парогазовых установок на основе разработанных прикладных программ по свойствам рабочих тел: Дис. канд. техн. наук: 05.14.14: Москва, 2004 167 с. РГБ, 61:04-5/2893.
34. **Ривкин С.Л.** Термодинамические свойства газов. Справочник. – 4-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.