

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



ДЕМИНА Юлия Эрнестовна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ОТВОДА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ
КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В АТМОСФЕРУ ЧЕРЕЗ
ВЫТЯЖНУЮ БАШНЮ ГРАДИРНИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГОЙ
И ЕЕ ЗАЩИТЫ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Кудинов Анатолий Александрович

Самара – 2023

Реферат

Диссертация 176 стр., 65 рис., 40 табл., 141 библ.

Паротурбинная тепловая электростанция, парогазовая установка, котел-утилизатор, уходящие газы, башенная градирня, охлаждение, льдообразование, надежность, численная модель.

Объектом исследования являются башенные градирни паротурбинных и парогазовых тепловых электростанций.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и научном обосновании технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность работы паротурбинных ТЭС за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и создания защитного пограничного слоя на внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни с естественной тягой.

Выполнен аналитический обзор опубликованных данных о способах отвода уходящих газов котлоагрегатов паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни и существующих методов защиты от обледенения башенных градирен. Предложены новые научно обоснованные технические решения по совершенствованию работы паротурбинной тепловой электрической станции путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни и по защите внутренней поверхности верхней части (устья) вытяжной башни градирни с естественной тягой от обмерзания. Разработаны математическая модель и программа расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена газовой смеси. Выполнено численное моделирование распределения температур и скоростей газовой смеси в объеме вытяжной башни градирни в среде OpenFOAM. Дана оценка экологического воздействия на окружающую среду. Разработана математическая модель и выполнено численное моделирование защитного пограничного слоя в модели турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST. Получены аналитические зависимости для расчета защитного пограничного слоя.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. Обзор и анализ современного состояния проблем в области отвода уходящих газов энергетических установок в атмосферу.....	12
1.1. Отвод уходящих газов энергетических установок как средство защиты атмосферы от вредных выбросов.....	12
1.2. Анализ состояния проблемы и обоснование возможности отвода уходящих газов котлоагрегатов паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни.....	20
1.3. Анализ проблемы обмерзания элементов башенных градирен в холодный период года.....	26
1.4. Анализ существующих методов борьбы с обледенением башенных градирен.....	30
1.5. Выводы по первой главе.....	34
1.6. Постановка цели и задач исследования	35
ГЛАВА 2. Отвод уходящих газов котлоагрегатов ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой.....	36
2.1. Разработка конструкций газоотводящих устройств.....	36
2.2. Расчет газового тракта.....	63
2.3. Расчет тепло- и массообменных процессов при движении газовой воздушной смеси в вытяжной башне градирни	66
2.4. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена при движении газовой воздушной смеси в вытяжной башне градирни.....	73
2.5. Оценка вероятности выпадения конденсата из уходящих газов..	80
2.6. Расчет экономической эффективности.....	82
2.7. Выводы по второй главе	93
ГЛАВА 3. Расчет рассеивания загрязняющих веществ при отводе уходящих газов энергетических установок ТЭС через дымовую трубу и вытяжную башню градирни.....	96
3.1. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ	

в атмосферном воздухе.....	96
3.2. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе от энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ, установленных на Самарской ТЭЦ.....	97
3.3. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе от газотурбинных установок PG6111FA, установленных на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ.....	104
3.4. Выводы по третьей главе	109
ГЛАВА 4. Защита верхней части вытяжной башни градирни от обледенения за счет создания газоздушного пограничного слоя.....	110
4.1. Способы защиты верхней части градирни от обмерзания.....	110
4.2. Математическая модель защитного пограничного слоя.....	111
4.3. Численное моделирование системы защиты верхней части градирни от обледенения.....	113
4.3.1. Формирование расчетной области.....	113
4.3.2. Построение расчетной сетки.....	115
4.3.3. Термодинамические параметры.....	116
4.3.4. Граничные условия.....	118
4.4. Результаты моделирования.....	121
4.4.1. Общие положения.....	121
4.4.2. Результаты моделирования градирни.....	122
4.4.3. Влияние расхода дутьевого воздуха на толщину защитного пограничного слоя.....	126
4.5. Верификация результатов моделирования.....	128
4.5.1. Сеточная сходимость.....	128
4.5.2. Стабилизация контрольных параметров.....	130
4.5.3. Контроль невязок.....	132
4.6. Аналитическая обработка результатов моделирования.....	133
4.6.1. Влияние основных режимных параметров.....	134
4.6.2. Влияние расхода воздуха, подаваемого в защитный слой.....	137

4.7. Оптимизации режимных параметров системы защиты от обледенения устья градирни.....	139
4.8. Выводы по четвертой главе.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	159
Приложение А Локальные ресурсные сметные расчеты	159
Приложение Б Документы, подтверждающие практическую реализацию результатов работы.....	169
Приложение В Объекты интеллектуальной собственности.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Приоритетным направлением отечественной энергетики на современном этапе развития является энергосбережение и повышение эффективности использования энергетических ресурсов, снижение удельных топливно-энергетических затрат на производство единицы продукции. Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 г. в области теплоэнергетики предусматривается введение необходимого объема мощностей преимущественно на базе использования новых технологий и оборудования с сохранением приоритета выработки электрической и тепловой энергии в комбинированном режиме, достижение высокой степени обеспечения теплоэнергетической отрасли преимущественно отечественным оборудованием.

Достаточно капиталоемкими сооружениями, значительно влияющими на эффективность работы тепловой электростанции, являются системы отвода отработавших в котельных установках газов и системы оборотного технического водоснабжения. Повышение эффективности работы этих систем обуславливает актуальность темы настоящей диссертационной работы.

Степень разработанности темы диссертации. Вопросам совершенствования оборотных систем технического водоснабжения тепловых электрических станций (ТЭС) с башенными градирнями посвящено большое количество научных работ российских и зарубежных ученых. Математическому моделированию и экспериментальным исследованиям процессов охлаждения нагретой в конденсаторах паровых турбин воды при непосредственном контакте с воздухом в вытяжной башне градирни посвящены работы Л.Д. Бермана, В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьева, В.П. Алексеева, В.М. Брауна, F. Merkel, R. Billet, Б.С. Фаворского, В.А. Гладкова, В.Л. Федяева, Ф.Б. Мазо, А.Б. Голованчикова, А.Г. Лаптева, Г.В. Ледуховского, В.И. Аксенова, В.С. Галустова, А.В. Дмитриева, С.К. Зиганшиной, М.Г. Лагуткина, С.П. Иванова, А.В. Линника и других ученых. В настоящем исследовании реализуется новая концепция совершенствования работы тепловых электрических станций путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни и исследуются научно-технические решения

по предотвращению обмерзания выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой газоздушного потока.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и научном обосновании технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность работы паротурбинных ТЭС за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и создания защитного пограничного слоя на внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни с естественной тягой.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

– проведение анализа существующих разработок отечественных и зарубежных ученых по вопросам совершенствования работы ТЭС путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни и предотвращения обледенения внутренней поверхности выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой воздушного потока;

– разработка модуля расчета на ЭВМ процессов движения и тепломассообмена газоздушной смеси в вытяжной башне градирни с естественной тягой с учетом отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни;

– исследование влияния процессов отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни на эффективность работы паротурбинных и парогазовых ТЭС с оценкой воздействия вредных выбросов на окружающую среду;

– разработка математической модели, выполнено численное моделирование защитного воздушного пограничного слоя по предотвращению обмерзания внутренней поверхности выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой воздушного потока и получена многофакторная аппроксимирующая функция зависимости толщины защитного слоя от основных режимных параметров работы градирни;

– разработка конструкции газораспределителей системы отвода уходящих газов котельных установок паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через

вытяжную башню градирни и системы защиты от обмерзания внутренней поверхности выходной части башни градирни с естественной тягой.

Научная новизна:

1. Предложены новые научно обоснованные технические решения по совершенствованию работы паротурбинной тепловой электрической станции путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой газовоздушного потока.

2. Получены результаты расчетов системы оборотного циркуляционного водоснабжения паротурбинной и парогазовой ТЭС при отводе уходящих газов котельных установок в окружающую среду через вытяжную башню градирни в зависимости от теплофизических параметров, температур и расходов уходящих газов и наружного воздуха, геометрических характеристик системы отвода газовоздушной смеси в атмосферу с оценкой воздействия вредных выбросов на окружающую среду.

3. Разработаны научно обоснованные технические решения по предотвращению обледенения выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой путем создания защитного воздушного пограничного слоя на ее внутренней поверхности, обеспечивающие повышение эффективности работы системы оборотного циркуляционного водоснабжения тепловой электростанции.

4. Разработаны методики расчета и проектирования системы отвода газовоздушной смеси через вытяжную башню градирни и воздухораспределительного устройства по предотвращению обмерзания выходной части вытяжной башни градирни тепловой электрической станции.

Теоретическая значимость работы:

– разработана усовершенствованная схема отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни, которая позволяет повысить эффективность работы тепловой электрической станции и снизить капитальные затраты за счет отказа от строительства дымовой трубы;

– предложена схема защиты конструкций градирни от образования наледи, путем создания пограничного слоя на внутренней поверхности устья вытяжной башни;

– предложены математические модели, позволяющие применять численное моделирование для разработки системы защиты верхней части вытяжной башни градирни от обледенения;

– выполнено численное моделирование и разработано конструктивное исполнение системы защиты вытяжной башни градирни от обледенения.

Практическая значимость результатов заключается в том, что в диссертации разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности работы паротурбинных ТЭС за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и создания защитного пограничного слоя на внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни с естественной тягой.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается применением апробированных методов расчетов, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики, теории тепло- и массообмена, математического моделирования и сертифицированного программного обеспечения; сходимостью результатов экспериментального обследования и данных расчета.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы вычислительной математики, математического моделирования, обработки, визуализации и анализа, технической термодинамики, теории тепло- и массообмена, технико-экономических расчетов в энергетике.

Положения, выносимые на защиту:

1. Программа расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена газовой смеси, движущейся в вытяжной башне градирни, с учетом отвода через нее уходящих газов котельных установок ТЭС.

2. Решения по конструктивному исполнению системы отвода уходящих газов котельных установок ТЭС через вытяжную башню градирни с естественной тягой.

3. Способ защиты вытяжной башни градирни с естественной тягой воздушного потока от образования наледи в ее верхней части.

4. Результаты математического исследования защитного воздушного пограничного слоя для предотвращения образования наледи в верхней части вытяжной

башни градирни с естественной тягой.

5. Аналитические зависимости для расчета защитного воздушного пограничного слоя.

6. Система защиты устья вытяжной башни градирни от обледенения путем создания защитного воздушного пограничного слоя.

Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения и проведена по следующим направлениям:

1. Техническое решение по повышению эффективности работы паротурбинных ТЭС за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и создания защитного пограничного слоя на внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни с естественной тягой рекомендуются к внедрению в филиале «Самарский» ПАО «Т Плюс».

2. Методика и модуль расчета на ЭВМ процессов движения и тепломассообмена газовой смеси в вытяжной башне градирни с учетом отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни; методика расчета кольцевого газораспределителя для отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни; запатентованные технические решения по совершенствованию конструкций системы циркуляционного водоснабжения внедрены в учебный процесс на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в определении цели и задач исследования; в сборе, анализе и обработке экспериментальных данных; разработке программы расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена паровоздушной смеси в вытяжной башне градирни с учетом отвода через нее уходящих газов котлоагрегатов ТЭС; разработке методики расчета и конструкций газораспределителей системы отвода уходящих газов в атмосферу через вытяжную башню градирни и системы защиты от обмерзания внутренней поверхности башни градирни; разработке и реализации в среде OpenFOAM математической модели и выполнении расчета защитного погра-

ничного слоя по предотвращению обмерзания внутренней поверхности башни градирни; получении и анализе многофакторной аппроксимирующей зависимости толщины пограничного слоя от основных режимных параметров работы градирни; подготовке публикаций по тематике исследования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: 77-й, 78-й, 79-й, 80-й Всероссийских научно-технических конференциях «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (Самара, СамГТУ, 2020, 2021, 2022, 2023 гг.); IV международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (Белгород, БГТУ, 2019 г.); XV, XVII Международных научно-технических конференциях «Совершенствование энергетических систем и тепло-энергетических комплексов» (Саратов, СГТУ, 2020, 2022 гг.); IV, V и VI Всероссийских научно-практических конференциях «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, Кузбасский технический университет, 2018, 2020, 2021 гг.); Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной году науки и технологии в России «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, НГТУ, 2021 г.); I Всероссийской с международным участием молодежной конференции (Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики, 2021 г.); I, II Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием (Ульяновск, УлГТУ, 2021, 2022 гг.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, индексируемом в международной базе данных цитирования Scopus, 1 статья в других изданиях, 14 полных текстов докладов конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 патента на изобретения РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 141 наименование. Изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 40 таблиц и 3 приложения.

Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ОТВОДА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В АТМОСФЕРУ

1.1. Отвод уходящих газов энергетических установок как средство защиты атмосферы от вредных выбросов

Совершенствование технологий использования органического топлива в промышленности (в том числе энергетической отрасли) является важнейшим фактором развития общества в целом, повышения благосостояния народа. Однако отрицательной стороной расширения использования в промышленности органического топлива является постоянный рост загрязнения окружающей среды. Данные о выбросах вредных веществ в атмосферу в мировом масштабе в целом, а также в результате деятельности человека приведены в таблице 1.1 [1; 2; 3].

Таблица 1.1 – Выбросы загрязняющих веществ

Вещество	Загрязняющие выбросы			
	суммарные, Гт/год	в том числе антропогенные		
		всего		в том числе от энергетики
		%	Гт/год	
Твердые частицы	3–5,5	15–50	1–2,6	0,1–0,5
Оксиды серы	0,25–0,35	25–55	0,1–0,15	0,01–0,1
Оксиды азота	1,2–1,5	3–6	0,04–0,08	0,015–0,025
Оксид углерода	0,3–0,38	60–90	0,2–0,35	0,02–0,04
Диоксид углерода	70–150	15–30	15–25	1–5

Как показано в таблице 1.1, антропогенные выбросы большинства веществ (твердых частиц, серы и оксидов углерода) происходят пропорционально естественным выбросам соответствующих веществ и в некоторых случаях превышают их. При этом суммарные антропогенные выбросы от энергетики составляют около 20–30 % [1; 2; 4].

Тепловые электрические станции оказывают непосредственное влияние на состояние воздушного бассейна в районе своего расположения. Выбросы атомных электростанций невелики при нормальном использовании, однако серьезную озабоченность вызывает удаление, транспортировка и захоронение

радиоактивных отходов и радиоактивных выбросов в аварийных ситуациях. Ключевые источники выбросов вредных веществ, воздействующие на состояние воздушного бассейна в регионе, где расположена ТЭС, показаны на рисунке 1.1. При сжигании органического топлива в теплогенерирующих установках (ТГУ) окружающий воздух через газоотводящие трубы отводится отработавший в ТГУ продукт сгорания, в состав которых в общем случае входят оксиды углерода CO_x , сернистый ангидрид SO_2 , оксиды азота NO_x , водяные пары H_2O , кислород O_2 , летучая зола и др. [5–8].

Большая часть углерода выбрасывается в составе CO_2 , который не является токсичным компонентом продуктов сгорания, но влияет на состояние атмосферы и климатические параметры. Оксид углерода CO – токсичное вещество, при нормальном режиме эксплуатации, организованном процессе горения его выбросы минимальны.

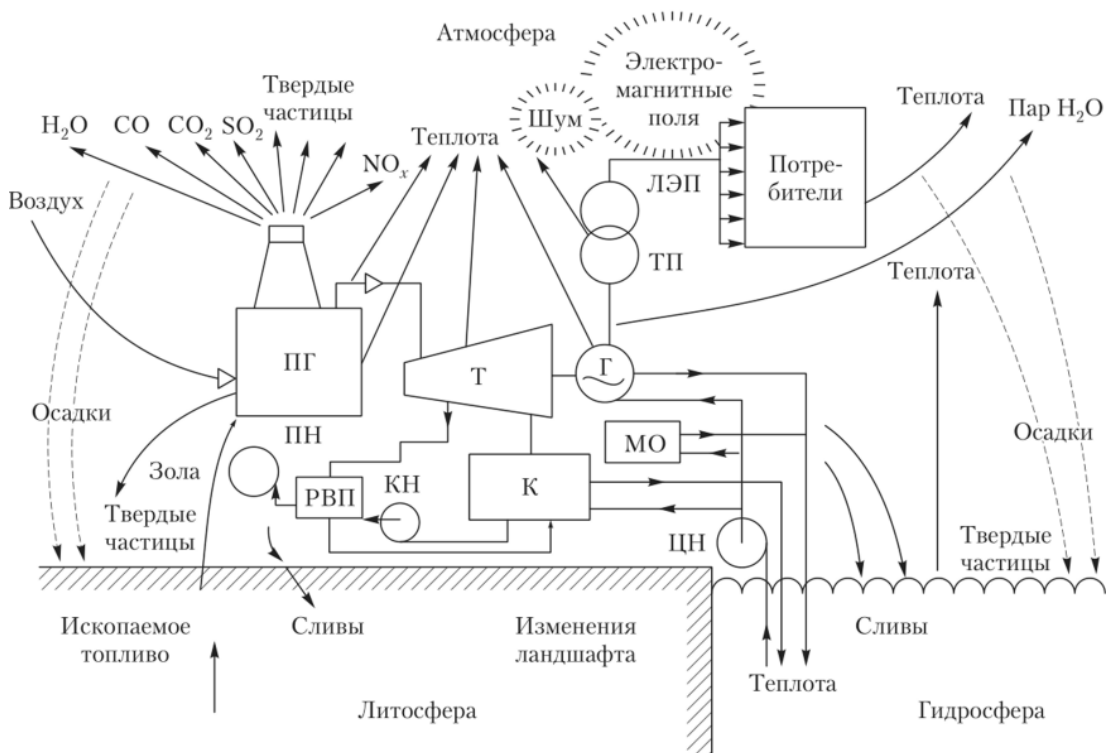


Рисунок 1.1 – Схема взаимодействия ТЭС с атмосферой

Основные компоненты, которые определяют загрязнение воздуха в районе тепловой электростанции: сернистый ангидрид SO_2 и оксиды азота NO и NO_2 . При этом основным компонентом, образующимся в топке котла, является монооксид азота. В связи с частичным доокислением монооксида азота в

атмосфере, расчет вредных выбросов производят по самому токсичному компоненту – диоксиду азота [9; 10].

К следующим значимым компонентам, загрязняющим воздух в районе, где работает ТЭС, на которой сжигается твердое топливо, относятся летучая зола и шлак. Улавливаемые зола и шлак хранятся на золоотвалах, на которые отводится значительная часть полезных площадей станции. Некоторая часть золы попадает в атмосферный воздух из-за несовершенства систем золоулавливания, а также уноса во время хранения. Также пыль со складов хранения твердого топлива может попадать в атмосферу.

При работе ТЭС и у потребителей энергии часть теплоты, вырабатываемой в процессе горения органического топлива, попадает в атмосферу. Устройства охлаждения циркуляционной воды являются главным источником отвода основной части теплоты сжигаемого топлива (приблизительно 50 %) в атмосферу. Теплота с циркуляционной водой отводится в водоемы при прямоточной системе водоснабжения; 6–8 % теплоты органического топлива отводится в атмосферу с газами через дымовые трубы.

В месте, где располагается мощная ТЭС, шумы, источники которых находятся в основном на открытом воздухе, поступают в воздушный бассейн. К ним относятся звуки от работы предохранительных клапанов, шум от повышающих трансформаторов и градирен. Особенно вредными являются шумы, возникающие при работе дымососов, которые распространяются от устья дымовой трубы на большое расстояние.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе, практически безвредных для человека, животных и растений, приведены в таблице 1.2 [9]. Максимальная разовая концентрация предполагает 20-минутное время отбора проб, среднесуточная – 24 часа. Поскольку перемещение максимальных концентраций вредных веществ зависит от направления ветра, стратификации (состояния) атмосферы, а максимальная величина зависит от режима работы установок, погодных условий и других факторов, то средние значения концентраций часто бывают меньше максимальных разовых в несколько раз.

Таблица 1.2 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосферном воздухе

Вещество	Предельно допустимая концентрация, мг/м ³	
	Максимальная разовая	Среднесуточная
Пыль нетоксичная	0,50	0,15
Сера диоксид	0,50	0,05
Азота диоксид	0,2	0,1
Оксид углерода	5,0	3,0
диВанадий пентоксид (пыль) (Ванадиевый ангидрид)	–	$2 \cdot 10^{-3}$
Бенз(а)пирен	–	$1 \cdot 10^{-6}$

Важнейшим показателем воздействия объекта энергетики на окружающую среду является выброс вредного компонента в атмосферу [10].

Для того, чтобы осуществлять процесс сжигания органического топлива, в топку котельного агрегата подается атмосферный воздух. При сжигании органического топлива образуются продукты сгорания (уходящие газы), нагретые до высокой температуры, которые охлаждаются в процессе лучистого и конвективного теплообмена в топке и в основном при конвективном теплообмене в газовом тракте котла, охлажденные газы отводятся в атмосферу через дымовые (газоотводящие) трубы.

Первоначально газоотводящие трубы рассматривались только как строительные сооружения, создающие тягу для отвода уходящих продуктов сгорания и летучей золы. С появлением крупных котельных установок, ужесточением требований к качеству атмосферного воздуха дымовые трубы стали все более приобретать характеристики технологического элемента ТЭС, оптимальные параметры которого: высота, диаметр, температура уходящих газов – должны выбираться во взаимосвязи с параметрами котла и, более того, электростанции в целом. Надежная работа газоотводящей трубы в значительной мере определяется уровнем возникающих в ней термических напряжений, которые, в свою очередь, зависят от температур газовой и воздушной сред, физико-механических свойств материалов и конструктивных особенностей трубы.

В настоящее время для отвода отработавших в ТГУ газов применяются следующие основные типы дымовых труб [11–17]:

– **железобетонные трубы с кирпичной футеровкой.** Согласно нормативным требованиям, температура внутренней поверхности железобетонного ствола не должна превышать 100 °С. Большое значение для надежной работы железобетонной трубы с кирпичной прижимной футеровкой имеет статическое давление в газоотводящем стволе трубы. При работе дымовой трубы с прижимной футеровкой должно выполняться требование обязательного разрежения в газоотводящем стволе, что является важнейшим с точки зрения обеспечения надежной эксплуатации трубы;

– **железобетонные трубы с монолитной футеровкой.** Железобетонные дымовые трубы с монолитной футеровкой с воздушным зазором начали строить с 1970 г. К тому времени в связи с экологическими условиями и отсутствием эффективных способов очистки дымовых газов от оксидов серы и азота на многих объектах потребовалось возводить газоотводящие трубы высотой 250, 320, 370 и 420 м;

– **трубы с металлическими газоотводящими стволами (МГС).** Высокие темпы ввода новых энергетических мощностей на тепловых электростанциях в 70-ые годы прошлого века были разработаны принципиально новые типы дымовых труб, внедрение которых привело к сокращению трудозатрат и сроков возведения труб, повышения их надежности и долговечности. Железобетонные трубы с внутренними металлическими стволами (МГС) позволяют решить задачи повышения ресурса их работы с максимальной эффективностью. В отличие от кирпичной футеровки, которая не обеспечивает защиту железобетонного ствола от воздействия агрессивных сернистых соединений и гидратной коррозии из-за газопроницаемости футеровки, металлические газоотводящие стволы, не имеют перечисленных недостатков;

– **композитные газоотводящие трубы.** Композитные газоотводящие трубы в настоящее время получают все большее распространение, в частности, при реконструкции железобетонных и кирпичных труб. Установка внутреннего стекло-

пластикового или стеклофаолитового ствола, обладающего незначительной массой и полностью исключаящего воздействия на кирпичный или железобетонный ствол парогазовой среды позволяет предотвратить дальнейшее снижение несущей способности ствола трубы и продлить его эксплуатационный ресурс. По сравнению с металлическими внутренними стволами газоотводящих труб стволы труб из композитных материалов не нуждаются в наружной тепловой изоляции;

– **кирпичные дымовые трубы.** Наиболее распространенными на практике являются кирпичные дымовые трубы, большинство из которых имеют высоту до 60 м, устанавливаемые в небольших котельных установках. Необходимая долговечность кирпичных дымовых труб может быть обеспечена только при правильном их конструктивном решении, при соблюдении установленных требований к материалам и выполнению строительных работ. Материалы, применяемые для ствола трубы, толщина футеровки и тепловой изоляции должны соответствовать температурному режиму отводимых в атмосферу газов. При агрессивных дымовых газах в конструкции трубы предусматриваются кислотостойкая футеровка и противокоррозионная защита ствола. Несоблюдение этих требований может привести к серьезным повреждениям и разрушениям труб.

Применение того или иного типа труб зависит от многих факторов, одним из которых является состав уходящих газов. При слабоагрессивных и неагрессивных дымовых газах применяются, как правило, необслуживаемые дымовые трубы с коническим стволом и с вентилируемым воздушным зазором или без него. При сжигании жидкого или твердого топлива, образующего агрессивные дымовые газы, целесообразна установка обслуживаемых дымовых труб с газоотводящим стволом постоянного сечения из стали или кислотоупорного материала.

Дымовые трубы с отдельными газоотводящими стволами могут выполняться одноствольными и многоствольными. В железобетонной оболочке многоствольной трубы может размещаться несколько металлических стволов с наружной теплоизоляцией.

Однако в процессе перевода промышленных котельных на газовое топливо обнаружилось, что кирпичная кладка отдельных дымовых труб стала интенсивно

разрушаться, и через 3–4 года эти трубы приходили в аварийное состояние [11; 13]. В процессе анализа было выявлено, что дымовые газы в котельных с газовым топливом, поступают в дымовую трубу при достаточно низкой температуре (до 100 °С) и низкой скорости (до 6 м/с). Анализ проведенных тепловых расчетов при данных параметрах отводимых дымовых газов, показал, что температура внутренней поверхности трубы становится ниже температуры точки росы водяных паров, находящихся в газах. Поэтому в зимний период происходит замерзание влаги, что вызывает разрушение ствола трубы [11; 14].

Таким образом, эксплуатационная надежность дымовых труб обуславливается следующими основными условиями [18–20]:

- необходима кислотостойкая футеровка и противокоррозионная защита ствола, так как при отводе агрессивных дымовых газов конструкция дымовой трубы подвержена коррозионному воздействию;

- температура внутренней поверхности футеровки дымовой трубы должна быть выше температуры точки росы водяных или серноокислых паров в дымовых газах на 10–15 °С для исключения конденсации этих паров на поверхности трубы;

- необходимо поддерживать температуру внутренней поверхности железобетонного ствола ниже 100 °С, что должно учитываться при выборе материалов футеровки.

При отводе продуктов сгорания твердого топлива на внутренней поверхности дымовой трубы образуются агрессивные золотые отложения, кирпичная кладка (футеровка) под ними сульфатизируется и подвержена разрушению, что вызывает необходимость борьбы с данным явлением.

Вышеприведенные факторы обуславливают как увеличение капитальных затрат на строительство труб либо за счет дополнительных средств (футеровка, устройство воздушного зазора и т.п.), либо за счет выбора более дорогого решения (например, устройства коррозионностойких дымовых труб, в том числе, композитных), так и увеличение эксплуатационных затрат на дорогостоящие обследования, текущие и капитальные ремонты.

Таким образом, дымовая труба ТЭС представляет собой сложное и дорогостоящее сооружение. Ее конструкция зависит от высоты, агрессивности дымовых газов, мощности электростанции, способа золоулавливания. В течение всего срока эксплуатации (30–50 лет) дымовая труба должна обеспечивать работу ТЭС без проведения ремонта. Такая надежность достигается в том случае, когда дымовая труба отвечает всем требованиям, предъявляемым к расчету, проектированию и строительству труб, с учетом теплового, агрессивного и механического воздействия уходящих газов и окружающей среды.

Минимально допустимая высота дымовой трубы определяется в соответствии с санитарными нормами. Диаметр трубы определяется в зависимости от скорости, с которой удаляются газы при максимальной паропроизводительности всех котлов, газоходы которых соединены с дымовой трубой. При естественной тяге скорость движения газов в трубе должна составлять 6–10 м/с (не менее 4 м/с), чтобы не допустить нарушения тяги из-за воздействия ветра (задувание трубы). При искусственной тяге скорость выхода уходящих газов из устья дымовой трубы рассчитывается в зависимости от ее высоты и может составлять 20–30 м/с и более [12; 15; 21; 22].

Более качественное рассеивание вредных веществ в окружающем воздухе получается при отводе дымовых газов всех котлоагрегатов электростанции через одну дымовую трубу. Однако в этом случае в целом снижается надежность работы ТЭС, и увеличиваются длины газовых трактов котлов. Исходя из соображений надежности на тепловой электрической станции устанавливаются не менее двух дымовых труб, подключенных к независимым газоходам.

Для того, чтобы оценить влияние выбросов вредных веществ, содержащихся в дымовых газах на окружающую среду, проводится расчет рассеивания выбросов вредных веществ, т.е. их приземных концентраций на различных расстояниях от источника [4; 12; 23–26]. В настоящей работе проводился сравнительный анализ расчетных концентраций вредных веществ (на примере диоксида азота, образующегося при сжигании органического топлива, т.к. к ПДК [9] данного вещества предъявляются наиболее жесткие требования (ограничения). Расчет

приземных концентраций выполняется в соответствии с Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [27] для двух вариантов на базе унифицированного программного комплекса УПРЗА «ЭКО центр»:

- а) с учетом только вклада предприятия;
- б) с учетом вклада предприятия и фоновых концентраций [28] в зоне действия ТЭЦ (предприятия нефтехимического комплекса, автомобильный и железнодорожный транспорт).

1.2. Анализ состояния проблемы и обоснование возможности отвода уходящих газов котлоагрегатов паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни

В настоящее время все более актуальным становится вопрос о более полном использовании энергии. Выброс теплоты в атмосферу не только создает дополнительное отрицательное воздействие на окружающую среду, но и снижает количество полезно используемой теплоты сгорания топлива в ТГУ.

Экономика Российской Федерации несет достаточно существенные потери от низкой эффективности топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является проблемой государственной важности. При этом повышение энергоэффективности напрямую связано с решением сопутствующей задачи улучшения экологической ситуации в нашей стране. Поэтому эффективному использованию ТЭР и защите окружающей природной среды от загрязнения придается приоритетное значение [29].

В соответствии с [30; 31] под энергосбережением понимают реализацию организационных, технических, технологических, научных и других мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов. Потеря теплоты с уходящими газами среди тепловых потерь котла составляет 5–12 % вырабаты-

емой теплоты. Температуру дымовых газов можно снизить за счет применения методов утилизации теплоты [32; 33], в результате чего их теплота будет полезно использована. Дополнительно к этому может быть использована теплота конденсации водяных паров, которые образуются в продуктах сгорания при сжигании органического топлива. Современные технологии позволяют более полно использовать теплоту уходящих газов и увеличить КПД установки [34–44].

Одной из подобных технологий является отвод уходящих газов через вытяжную башню градирни, являющейся составной частью системы оборотного водоснабжения. Система оборотного водоснабжения, применяемая для охлаждения циркуляционной воды, наряду с дымовыми трубами является одной из самых капиталоемких составляющих вспомогательного оборудования тепловой электростанции [15; 16; 45; 46].

Градирни разделяются: по способу перемещения воздуха на башенные, вентиляторные и открытые; по способу образования поверхности охлаждения на пленочные, капельные, брызгальные; от направления движения воды и воздуха на противоточные, поперечноточные и смешанного типа). В башенных градирнях движение воздуха создается вытяжной башней, в вентиляторных – вентилятором, а в открытых – естественным движением воздуха.

Для энергетики Российской Федерации характерно применение пленочных башенных градирен с естественной тягой. Интенсивность охлаждения циркуляционной воды в пленочной градирне по сравнению с капельной в 1,5–2 раза выше. Вытяжные башни современных градирен выполняются из монолитного железобетона или металла. Воздух поступает в нижнюю часть башни через окна высотой 3–12 м, расположенные по ее периметру. Оросительные щиты выполняются высотой 120 и 250 см, ширина щитов составляет 1,6 м, толщина 5–6 см, расстояние между щитами 2,5 см.

На ТЭЦ применяются крупные градирни площадью оросительного устройства (в горизонтальном сечении) 4000–6500 м² и 9000 м². Их производительность определяется по летнему режиму при расчетных теплофикационных параметрах пара. В зимнее время температура охлажденной в градирне воды не должна быть

ниже 10–12 °С. Схема системы оборотного водоснабжения с градирнями представлена на рисунке 1.2.

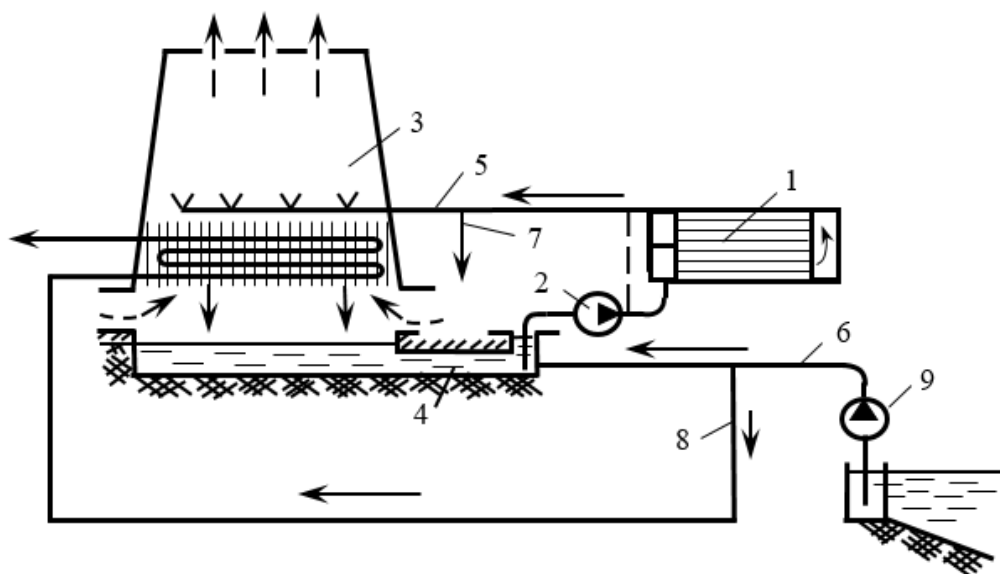


Рисунок 1.2 – Схема системы оборотного водоснабжения электростанции с градирней:

- 1 – конденсатор; 2 – циркуляционный насос; 3 – градирня; 4 – самотечный водовод к циркуляционному насосу; 5 – сливной напорный трубопровод к градирне;
6 – трубопровод подпитки; 7 – трубопровод продувки и подачи воды в систему гидрозолоудаления; 8 – трубопровод подачи воды на водоподготовку; 9 – насос добавочной воды

Способ подачи очищенных дымовых газов в дымовую трубу градирни с естественной тягой был предложен относительно недавно. Первые идеи подобного рода предлагались в России (СССР) в конце 80-х начале 90-х годов прошлого века [47–50] рисунке 1.3. Дымовая труба 1 устанавливается по оси вытяжной башни градирни 2. При этом в вытяжной башне градирни создается дополнительное разрежение за счет того, что уходящие дымовые газы, подводимые по газоходу 8, имеют большую скорость по отношению к скорости потока воздуха над оросителем 4, что обуславливает увеличение самотяги и повышает эффект охлаждения циркуляционной воды за счет интенсификации процессов тепло- и массообмена между водой и воздухом, движущимися противоточно.

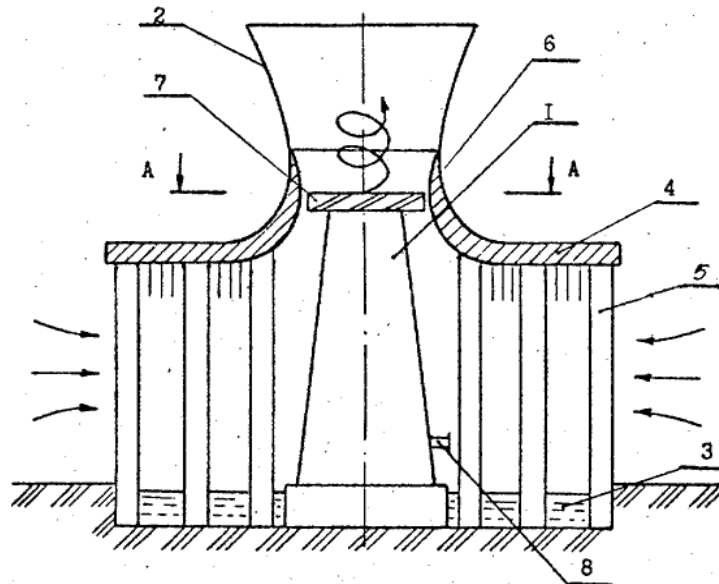


Рисунок 1.3 – Дымовая труба-градирня [47]:

1 – корпус дымовой трубы; 2 – вытяжная башня градирни;
 3 – водосборный бассейн; 4 – купол оросительного устройства;
 5 – стойки; 6 – ускоритель выброса газового потока; 7 – наклонные направляющие лопасти; 8 – трубопровод для подвода продуктов сгорания к дымовой трубе

Отвод очищенных дымовых газов через вытяжную башню градирни рассматривается в работах [51; 52] см. рисунки 1.4 и 1.5.

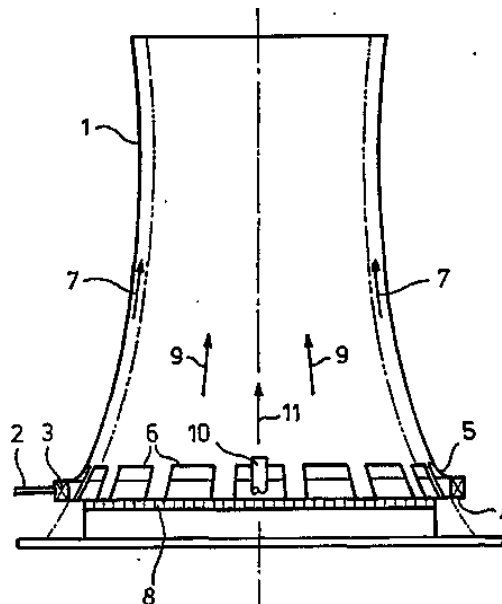


Рисунок 1.4 – Градирня с естественной тягой и отводом дымовых газов [51]:

1 – вытяжная башня градирни; 2 – подающий трубопровод охлаждаемой воды; 3 – кольцевой канал; 4 – нижняя стенка кольцевого канала; 5 – верхняя стенка кольцевого канала; 6 – сквозные отверстия; 7 – сухой подогретый воздух; 8 – ороситель;
 9 – влажный воздух градирни; 10 – газораспределитель для подачи дымовых газов; 11 – очищенные дымовые газы

Данное предложение по отводу уходящих газов котлоагрегатов аналогично предыдущему, при этом вместо дымовой трубы устанавливается газораспределитель 10 для подачи дымовых газов по центру вытяжной башни градирни с естественной тягой.



Рисунок 1.5 – Вид башенной градирни, совмещенной с системой отвода дымовых газов (показан подводящий газоход)

По данным Mcilvaine R. немецкой энергетической компанией Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk установлено, что дооснащение градирен с естественной тягой установками для отвода дымовых газов на 14 градирнях тепловых электростанций позволило сэкономить около 300 миллионов немецких марок [53; 54]. Градирни оснащались системой отвода дымовых газов с трубчатыми газораспределителями (рисунок 1.6), работы были выполнены в 1980 гг.



Рисунок 1.6 – Трубчатый газораспределитель для отвода уходящих газов, размещенный внутри башни градирни

В диссертационной работе С.К. Зиганшиной предложены научно-технические решения по совершенствованию парогазовой ТЭС путем отвода уходящих газов, отработавших в котле-утилизаторе (КУ) газотурбинной установки (ГТУ) в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой [55].

В процессе эксплуатации показанных выше систем выявлялись различные проблемы, в числе которых неравномерное распределение потока уходящих газов по площади градирни, агрессивность газов по отношению к конструкциям градирни и др. [56–58], вследствие чего возникали новые предложения по улучшению характеристик таких систем, в частности применение различных конструкций газораспределителей [59; 60] рисунок 1.7.

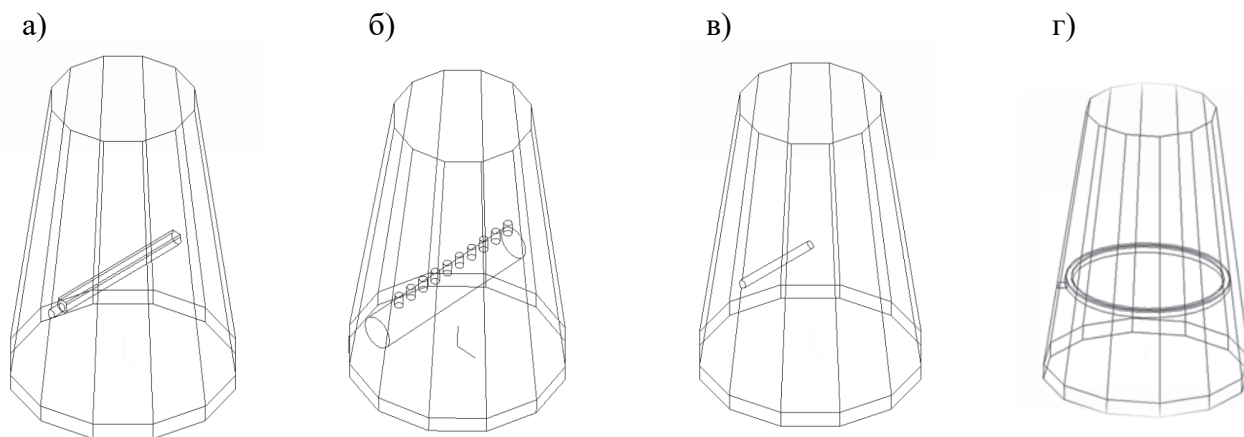


Рисунок 1.7 – Конструкции газораспределителей [60]

В качестве одного из решений на базе кафедры теплоэнергетических установок ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», Н.Н. Случаниновым были разработаны математические модели для расчета характеристик различных вариантов компоновки системы отвода уходящих газов: а – трубчатый газораспределитель с выходом через продольное сечение (см. рисунок 1.6), б – трубчатый газораспределитель с выходными соплами, в – трубчатый газораспределитель с выходом из боковой грани (см. рисунок 1.4), г – система с кольцевым газораспределителем. Анализ результатов моделирования различных технических решений системы удаления продуктов сгорания через вытяжную башню градирни показал, что наиболее оптимальным решением с технической точки зрения является отвод уходящих газов ТГУ посредством кольцевого коллектора.

1.3. Анализ проблемы обмерзания элементов башенных градирен в холодный период года

Градирня – устройство [15; 61–68] для охлаждения подогретой в теплообменных аппаратах различного назначения воды направленным потоком атмосферного воздуха. В настоящее время градирни большой производительности применяются в системах оборотного водоснабжения циркуляционной воды на тепловых и атомных электрических станциях, и технической воды на промышленных предприятиях. В гражданском строительстве градирни используются, например, для охлаждения теплоносителей в холодильных установках, при кондиционировании воздуха и т.п. Наибольшее распространение градирни получили в промышленности для охлаждения в основном воды, подогретой в разного рода технологическом оборудовании, при химической очистке веществ, часто в связке с системой местных очистных сооружений (МОС). Градирни широко применяются на предприятиях ВПК, энергетической, судостроительной, авиационной, химической отраслей промышленности, в металлургии, машиностроении, и пищевом производстве.

В развитие теории и практики совершенствования работы градирен значительный вклад внесли отечественные ученые – Б.С. Фарворский, Т.С. Ямпольский, Л.Д. Берман, А.Г. Аверкиев, Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко, А.Г. Лаптев и др. [61–67].

На ТЭС России основным типом используемых градирен являются пленочные башенные градирни с противоточным движением воздуха и охлаждаемой воды (рисунок 1.8) [61–63; 67; 69].

Процесс охлаждения, в так называемых «мокрых» градирнях, происходит в основном за счёт испарения части воды при стекании её под действием силы тяжести тонкой плёнкой или каплями по специальному оросителю, вдоль которого в противоположном направлении движется поток воздуха. В оросителе происходит тепло- и массообмен между водой и воздухом (вода охлаждается, а воздух нагревается), при этом часть воды испаряется, за счет чего воздух увлажняется. В ин-

новационных эжекционных градирнях охлаждение происходит за счёт создания среды, приближённой к условиям вакуума специальными форсунками и особенностями конструкции. При испарении 1 % воды температура оставшейся массы воды понижается на 5,48 °С, а в случае с описанным эжекционным принципом охлаждения температура оставшейся массы воды понижается в среднем на 7,23 °С.

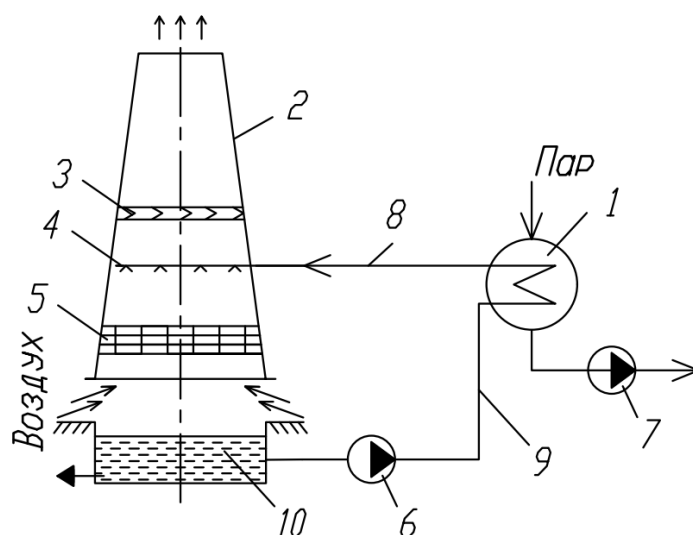


Рисунок 1.8 – Схема системы оборотного водоснабжения электростанции с градирней:
 1 – конденсатор паровой турбины; 2 – вытяжная башня градирни; 3 – каплеотделитель; 4 – водораспределительное устройство; 5 – ороситель;
 6, 7 – циркуляционный и конденсатный насосы;
 8 – сливной напорный трубопровод к градирне;
 9 – напорный трубопровод к конденсатору паровой турбины; 10 – водосборный бассейн

Однако градирни также имеют и определенные недостатки. Так поступление в градирни холодного атмосферного воздуха даже с температурой близкой к 0 °С, приводит, как правило, к обледенению их конструктивных элементов, что значительно усложняет эксплуатацию.

Особенно интенсивно в зимний период времени происходит обмерзание входных окон градирен. В ряде случаев наледи распространяются внутрь градирен, что приводит к поломкам, а иногда и к обрушению оросителя.

При отрицательных температурах окружающей среды влажный воздух на выходе из градирни контактирует с холодными поверхностями конструкции вы-

тяжной башни градирни [61; 69–71]. При этом температура воздуха в пристеночном слое может опуститься ниже точки росы. Это приводит к конденсации паров воды на внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни, что при отрицательных температурах наружного воздуха способствует образованию наледи [72]. При повышении температуры наружного воздуха происходит отделение наледи от конструкций вытяжной башни градирни в виде крупных кусков льда. Куски льда падают на конструктивные элементы градирни, что может привести к их разрушению.

Обмерзанию подвергаются следующие элементы градирен [61; 69; 71]: поддон, подводящие трубопроводы, вентиляторы (в вентиляторных градирнях), ороситель и воздухозаборные окна (рисунок 1.9), замерзание воды в теплообменнике закрытой градирни, поверхности внутренней стенки устья (верхнего опорного кольца) (рисунок 1.10).

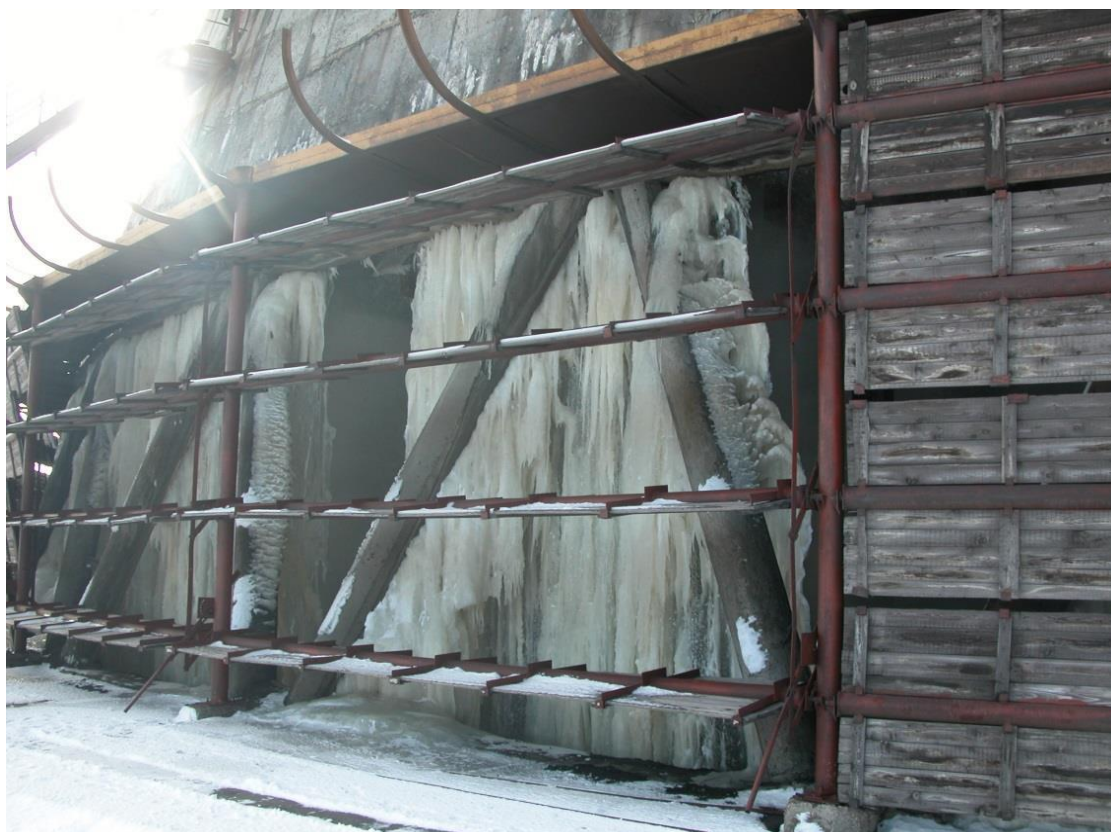


Рисунок 1.9 – Образование льда на воздухозаборных окнах градирни [72]



Рисунок 1.10 – Обмерзание верхнего опорного кольца вытяжной башни градирни [72]

Обмерзание поддона происходит в том случае, когда в определённый момент времени со стороны потребителя (источник нагрева, теплоноситель которого охлаждается в градирне) отсутствует тепловая нагрузка. В результате, находящаяся в бассейне градирни вода постепенно охлаждается из-за низкой температуры на улице. Избежать замерзания воды в поддоне позволяют следующие решения: установка в тёплом помещении ёмкости достаточного объёма, в которую самотёком будет сливаться вода из бассейна градирни; устройство в бассейне градирни местного подогревателя (греющие элементы могут быть как электрическими (ТЭНы), так и паровыми/водяными); слив воды в канализацию [61].

Замерзание воды в напорных и сливных трубопроводах соответственно к конденсатору паровой турбины и к градирне может происходить как на участках трубопроводов входа/выхода охлаждаемой воды, так и в трубопроводе подпиточной воды. На практике для предотвращения замерзания воды в трубопроводах осуществляют постоянную циркуляцию воды в системе и байпас в поддон или подогрев воды в трубопроводе греющим электрическим кабелем; использование в качестве теплоносителя антифриза (например, раствора гликоля); применение закрытых градирен.

При обмерзании оросителя и воздухозаборных окон (в случае поперечноточных градирен – воздух поступает в вытяжную башню градирни через оросите-

ли) происходит уменьшение расхода воздуха через вытяжную башню градирни, вплоть до его полной остановки. Есть разные варианты решения этой задачи: устанавливать отбойники, смещающие падение воды с оросителя дальше от воздухозаборных окон; использовать выносную ёмкость, устанавливаемую в тёплом помещении; использовать жалюзи на входе воздуха в градирню; не допускать рециркуляции (повторное засасывание воздуха, который уже прошёл через градирню); устанавливать в градирнях ветрозащитные перегородки; использовать подогрев воздухозаборных окон электрическим кабелем, проложенным по периметру окон; отключение на зимний период крайних рядов форсунок и закрытие верхнего ряда жалюзи и др. [73].

Замерзание воды в теплообменнике закрытой градирни. В закрытой градирне используется трубчатый теплообменник – то есть, «поверхностный». Если зимой охлаждать в такой градирне воду, то с большой долей вероятности – при простом и отсутствии тепловой нагрузки вода в трубопроводах замерзнет.

1.4. Анализ существующих методов борьбы с обледенением башенных градирен

Снижение эффективности охлаждения циркуляционной воды в башенных градирнях чаще всего бывает вследствие нарушения нормальной работы водораспределительной системы, а в зимнее время, кроме того, по причине обледенения градирен. Опорожнение водосборного бассейна градирни в зимнее время не допускается; поэтому если отключение градирни для ремонта производится зимой, то надо обеспечить на период отключения градирни циркуляцию теплой воды в водосборном резервуаре.

Для выявления просадки в водораспределительной системе периодически производят нивелировку желобов. Обледенение градирни в зимнее время приводит не только к ухудшению ее работы, но и может явиться причиной поломок отдельных элементов градирни. При сильном обледенении эффективность охлажде-

ния воды резко снижается. Большие глыбы льда создают дополнительные нагрузки на конструктивные элементы градирни, а при падении могут вызвать поломки.

Обледенению прежде всего подвергается периферийная часть вытяжной башни градирни в местах подвода воздуха (рисунок 1.11). Для предотвращения обледенения вытяжной башни градирни необходимо регулировать поступление холодного воздуха в градирню [72] и с учетом конструктивных особенностей градирни организовывать режимы её работы так, чтобы плотность орошения по периферии оросителя была бы больше, чем в центральной части [62; 74]. Увеличение плотности орошения по периферии оросителя уменьшает обледенение входных окон и оросителя.



Рисунок 1.11 – Обмерзание входных окон и воздухорегулирующие устройства на них

Эффективной мерой борьбы с обледенением является устройство брызгальной установки, расположенной по периметру градирни [75]. Вода к брызгальной установке подводится от напорных водоводов. Устройство брызгал у градирен, например, на Челябинской и Кировской ТЭЦ позволило значительно улучшить условия работы градирен в зимний период. При работе брызгальных установок уменьшилось обледенение оросителя и входных окон и снизилась температура

охлажденной воды на 3–4 °С. Кроме того, уменьшение обледенения сказалось на удлинении межремонтного срока службы градирен.

Если на градирнях не предусмотрены устройства для предотвращения обмерзания верха вытяжной башни, то необходимо периодически устраивать там сколку льда, что технически достаточно сложно. Для предотвращения обледенения применяют различные способы:

– подачу сухого холодного воздуха по периметру верхней части башенной градирни с помощью вентиляторов [76];

– подачу сухого холодного воздуха через дополнительные воздухоходные окна рисунки 1.12, 1.13 [77];

– установку по периметру в верхней части вытяжной башни градирни щитов, с расположенными на них шипами, исключающими падение намерзающего на них в зимнее время льда до полного его таяния [78];

– установку козырьков в верхней части вытяжной башни градирни (рисунок 1.14) [72].

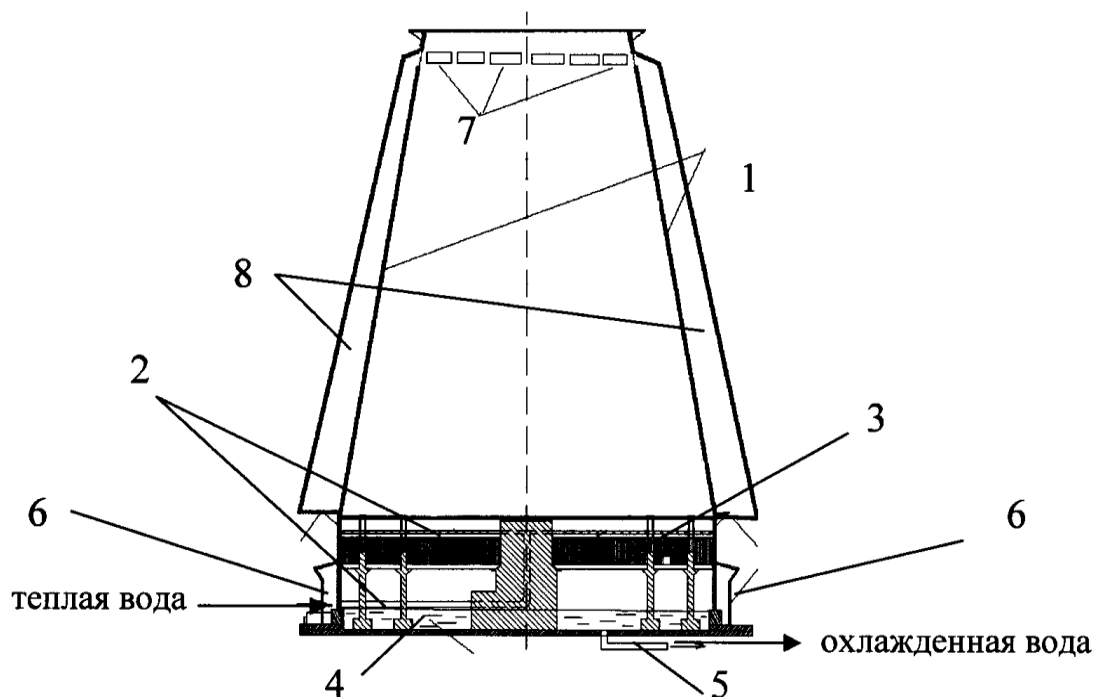


Рисунок 1.12 – Башенная градирня с естественной тягой

1 – башня градирни; 2 – водораспределительная система; 3 – испаритель; 4 – водозаборный бассейн, 5 – трубопровод отвода охлажденной воды; 6 – нижние воздухоходные окна; 7 – дополнительные верхние воздухоходные окна; 8 – газоплотные короба для подвода холодного и сухого воздуха окружающей среды к дополнительным верхним воздухоходным окнам [77]

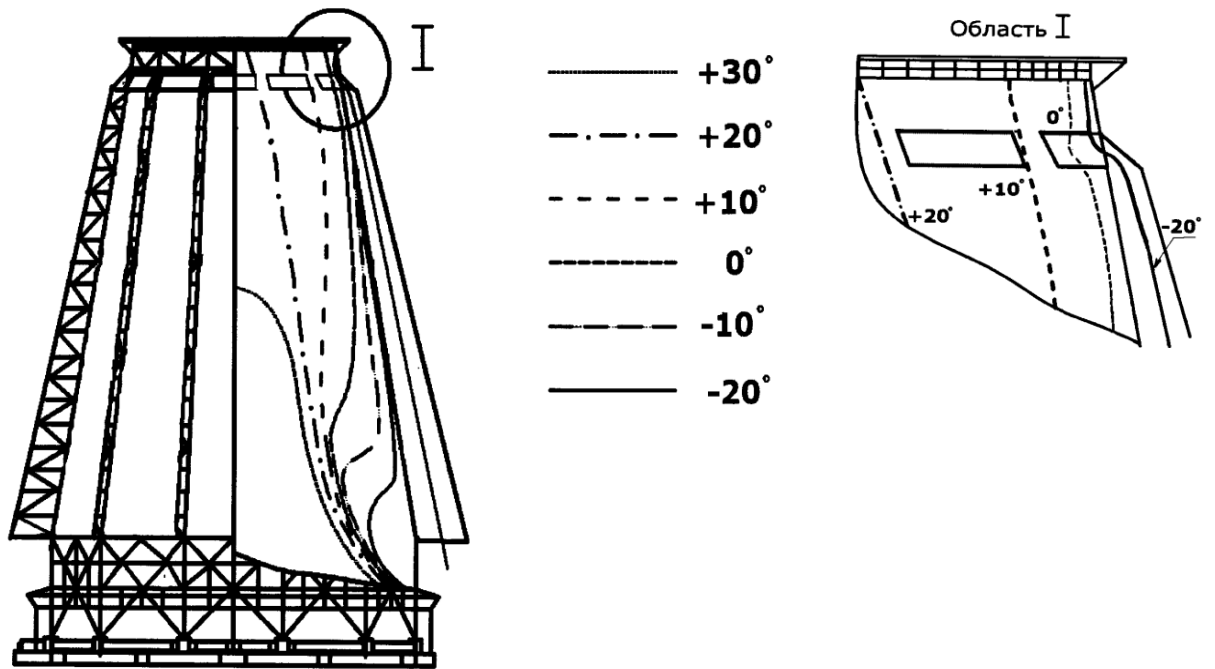


Рисунок 1.13 – Распределение температуры в градирне в зимнее время года с дополнительными верхними воздухоходными окнами [77]

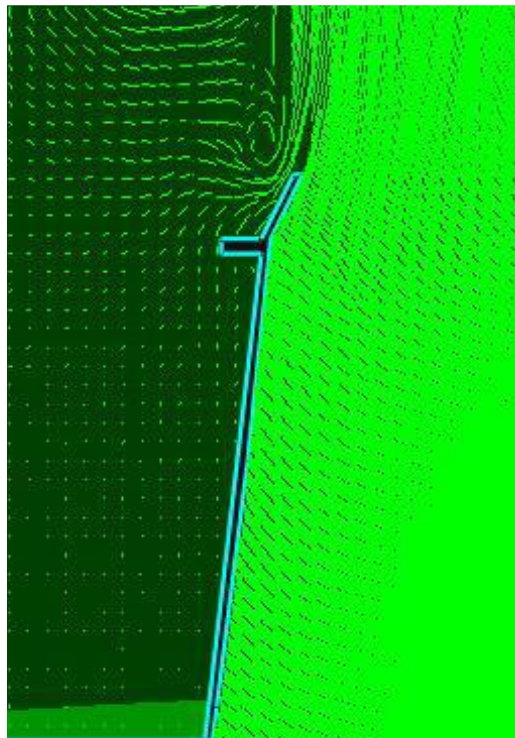


Рисунок 1.14 – Распределение потока воздуха при использовании козырька в верхней части градирни [72]

Анализ результатов исследований отечественных и зарубежных ученых показал, что наименее разработанной и наиболее актуальной, и технически сложной задачей предотвращения обледенения градирни является защита устья ее вытяж-

ной башни. В диссертации предложены два способа защиты верхней части градирни от обледенения:

1. Подача подогретого (или холодного) воздуха посредством вентиляторной установки и воздухораспределительного устройства настилающими струями на внутреннюю поверхность верхней части вытяжной башни градирни;

2. Подача уходящих продуктов сгорания котельной установки (парогазовой или паротурбинной ТЭС) при температуре 100–125 °С посредством газораспределительного устройства настилающими струями на внутреннюю поверхность верхней части вытяжной башни градирни.

1.5. Выводы по первой главе

1. Рассмотрены способы отвода уходящих газов энергоустановок через дымовые трубы. Проанализированы основные типы дымовых труб, показаны области их применения, требования к ним, достоинства и недостатки, рассматривая дымовые трубы как средство защиты окружающей среды от вредных выбросов.

2. Выполнен анализ состояния проблемы отвода уходящих газов котлоагрегатов паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни. Установлено, что наиболее оптимальным решением с технической точки зрения является отвод уходящих газов ТГУ посредством кольцевого коллектора.

3. Анализ проблемы обмерзания элементов башенных градирен в холодный период года показал, что обмерзанию подвергаются следующие элементы градирен: поддон, подводные трубопроводы, вентиляторы (в вентиляторных градирнях), ороситель и воздухозаборные окна, замерзание воды в теплообменнике закрытой градирни, поверхности внутренней стенки устья (верхнего опорного кольца).

4. Рассмотрены существующие методы борьбы с обледенением башенных градирен. Анализ результатов исследований отечественных и зарубежных ученых показал, что наименее разработанной и наиболее актуальной, и технически сложной задачей предотвращения обледенения градирни является защита устья ее вытяжной башни.

1.6. Постановка цели и задач исследования

Проведенный анализ современного состояния проблем в области отвода уходящих газов энергетических установок в атмосферу позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и научном обосновании технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность работы паротурбинных ТЭС за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и создания защитного пограничного слоя на внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни с естественной тягой.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе должны быть решены следующие **задачи**:

- проведение анализа существующих разработок отечественных и зарубежных ученых по вопросам совершенствования работы ТЭС путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни и предотвращения обледенения внутренней поверхности выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой воздушного потока;

- разработка модуля расчета на ЭВМ процессов движения и теплообмена газовой смеси в вытяжной башне градирни с естественной тягой с учетом отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни;

- исследование влияния процессов отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни на эффективность работы паротурбинных и парогазовых ТЭС с оценкой воздействия вредных выбросов на окружающую среду;

- разработка математической модели, выполнено численное моделирование защитного воздушного пограничного слоя по предотвращению обмерзания внутренней поверхности выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой воздушного потока и получена многофакторная аппроксимирующая функция зависимости толщины защитного слоя от основных режимных параметров работы градирни;

- разработка конструкции газораспределителей системы отвода уходящих газов котельных установок паротурбинных и парогазовых ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни и системы защиты от обмерзания внутренней поверхности выходной части башни градирни с естественной тягой.

Глава 2. ОТВОД УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЭС В АТМОСФЕРУ ЧЕРЕЗ ВЫТЯЖНУЮ БАШНЮ ГРАДИРНИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГОЙ

2.1. Разработка конструкций газоотводящих устройств

В целях повышения экономичности тепловых электрических станций предлагается осуществлять отвод уходящих газов в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой воздушного потока. В работах [55; 59; 79–81] рассматривается возможность использования вытяжной башни градирни с естественной тягой для отвода отработавших в котле-утилизаторе (КУ) газотурбинной установки (ГТУ) газов (рисунок 2.1). Предложенное техническое решение позволяет отказаться от строительства и эксплуатации дымовой трубы и дополнительно уменьшить температуру циркуляционной воды на выходе из градирни на 1,31 °С [82].

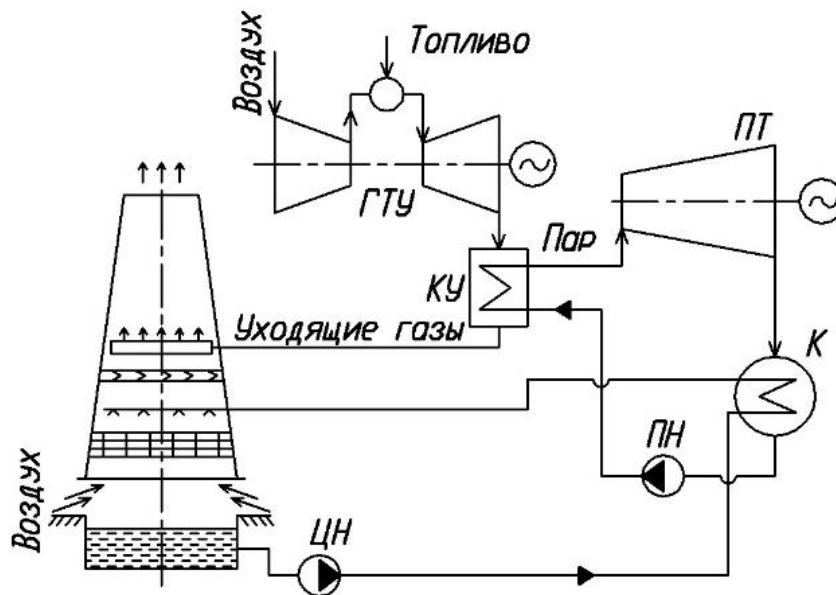


Рисунок 2.1 – Принципиальная тепловая схема ТЭС с отводом уходящих газов через градирню от котла-утилизатора ПГУ

В данной работе предлагается осуществлять отвод уходящих продуктов сгорания от энергетических котлов через вытяжную башню градирни (рисунок 2.2). Возможность осуществления предложенного технического решения в диссертации рассмотрена на примере котлоагрегатов и башенных градирен ТЭЦ

ЗИГМ (заводское исполнение газомазутной ТЭЦ). Одной из таких станций является Самарская ТЭЦ (филиал «Самарский» ПАО «Т Плюс»). На Самарской ТЭЦ установлены две башенные градирни типа БГ-2600.

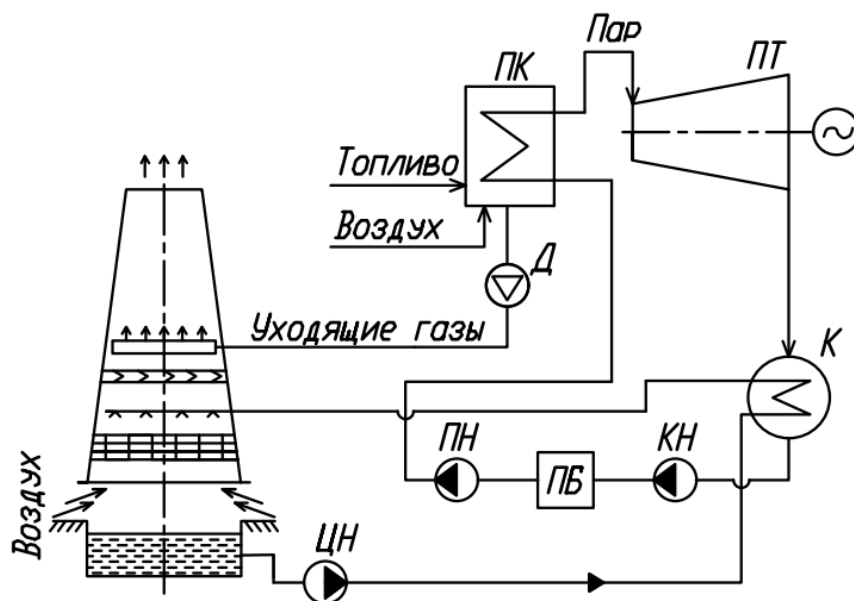


Рисунок 2.2 – Принципиальная тепловая схема ТЭС с отводом уходящих газов через вытяжную башню градирни от энергетического котла

Рассматривается вариант отвода уходящих газов от трех энергетических котлов типа БКЗ-420-140 НГМ через одну башенную градирню БГ-2600. Расчеты башенной градирни БГ-2600 выполнены для двух режимов ее работы: без отвода уходящих газов и с применением отвода уходящих газов от трех котлов БКЗ-420-140 НГМ.

Конструктивное исполнение системы удаления уходящих газов энергетических установок через вытяжную башню градирни может иметь различные варианты [47–51; 59; 60]: дымовая труба-градирня; трубчатые газораспределители с различными типами выходных отверстий (щелевое отверстие, отверстие в боковой грани, отверстия с выходными соплами); с кольцевым газораспределителем (см. рисунок 1.7).

Оценка эффективности различных способов отвода уходящих продуктов сгорания через вытяжную башню градирни проводилась Н.Н. Случаниновым, Н. Fichtner, А. Katzmann, А.А. Кудиновым, В.Д. Куликовым, и другими учёными. Анализ проведенных исследований показал, что наиболее оптимальной из

представленных вариантов является система газоудаления с кольцевым распределителем, установленным в вытяжной башне градирни [47–60; 83].

Соответственно, возникает необходимость разработки методики расчета системы отвода уходящих газов энергетических установок через вытяжную башню градирни с кольцевым газораспределителем (коллектором). Выполнен расчет на базе предлагаемых конструктивных решений (рисунки 2.1, 2.2).

Ниже приведена методика расчета конструктивных параметров системы распределения уходящих газов котельных установок внутри вытяжной башни градирни. Основой методики является теория расчета аэродинамики воздухопроводов равномерной раздачи, разработанная российскими учеными: К.К. Баулиным, И.А. Шепелевым, А.А. Чистовым, В.Н. Талиевым, Г.П. Иванцовым, В.Н. Посохиным. [84–88].

Точное решение данной задачи является достаточно сложным и трудно применимым на практике в инженерных расчетах. В настоящей работе рассматривается приближенное решение поставленной задачи, основой которого является равномерная раздача газа (воздуха) по выходным отверстиям (соплам) газораспределительного коллектора. При этом неравномерность расхода воздуха определяется наибольшим отклонением, не превышающим r_{\max} , % [84; 85], соответствующим принятой наибольшей погрешности расчета. Решение данной задачи заключается в следующем. Рассматривается воздухопровод переменного поперечного сечения (площадь поперечного сечения в начале воздухопровода F_n , в конце – F_0). В воздуховоде имеется щель постоянной ширины δ (рисунок 2.3). Расход воздуха в начале воздухопроводителя L_n .

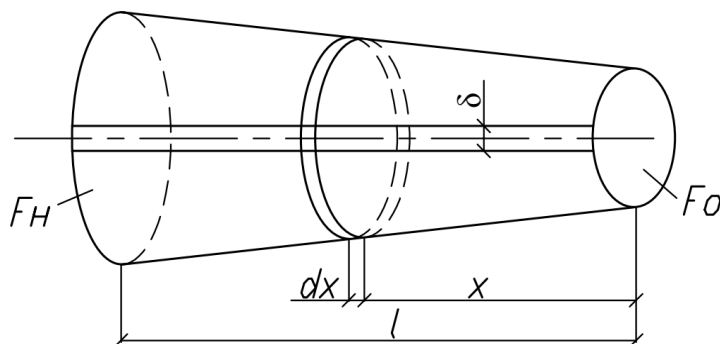


Рисунок 2.3 – Воздуховод переменного поперечного сечения с щелью постоянной ширины

Проведем два поперечных сечения воздуховода:

- на расстоянии x от торца воздуховода (сечение x);
- непосредственно на торце воздуховода (сечение 0).

Для данных сечений уравнение Бернулли запишем в следующем виде [89–96]:

$$\rho_x g Z_x + \Delta p_x + \frac{\rho w_x^2}{2} = \rho_0 g Z_0 + \frac{\rho w_0^2}{2} + \Delta p_0 + \Delta p_{\text{тр}}^{x-0}, \quad (2.1)$$

где Δp_x и Δp_0 – избыточные статические давления в сечениях x и 0; ρ – плотность воздуха; w_x – средняя скорость потока в поперечном сечении x воздуховода; $\Delta p_{\text{тр}}^{x-0}$ – потери давления на трение на участке воздуховода между сечениями x и 0.

Определим избыточное статическое давление в сечении $x+\Delta x$ (см. рисунок 2.3). Расход воздуха в сечении x составит L_x , а в сечении $x+\Delta x$ – $L_x+\Delta L_x$. Величина ΔL_x является приращением расхода на рассматриваемом участке, а также – расходом воздуха в щели между сечениями x и $x+\Delta x$:

$$\Delta L_x = v_x \delta \frac{\Delta x}{\cos \alpha}, \quad (2.2)$$

где v_x – скорость воздуха на выходе из щели в сечении x ; α – угол раскрытия; δ – ширина щели.

Сближая сечения x и $x+\Delta x$ бесконечно близко друг к другу, получаем:

$$dL_x = v_x \delta \frac{dx}{\cos \alpha}. \quad (2.3)$$

Скорость воздуха в щели определяется по формуле:

$$v_x = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_x}, \quad (2.4)$$

где μ – коэффициент расхода выходного отверстия струи [89; 91; 96].

С учетом выражений (2.3) и (2.4) избыточные статические давления в сечениях x и 0 определяются по формулам:

$$\Delta p_x = \frac{\rho}{2} \left(\frac{dL_x}{dx} \right)^2 \frac{1}{\mu^2 \delta^2} \cos^2 \alpha; \quad (2.5)$$

$$\Delta p_0 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{dL_0}{dx} \right)^2 \frac{1}{\mu^2 \delta^2} \cos^2 \alpha. \quad (2.6)$$

Средняя скорость воздуха в сечении x воздуховода равна:

$$w_x = \frac{L_x}{F_x}, \quad (2.7)$$

где F_x – площадь воздуховода в поперечном сечении x .

Потери давления на трение на участке воздуховода длиной x находят по выражению:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \int_0^x \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot \frac{dS_x}{F_x}, \quad (2.8)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; S_x – боковая поверхность участка воздуховода между сечениями x и 0.

С учетом (2.5), (2.6) и (2.8) уравнение Бернулли (2.1) примет вид:

$$\left(\frac{l}{\mu f} \right)^2 \left(\frac{dL_x}{dx} \right)^2 + \left(\frac{L_x}{F_x} \right)^2 = \left(\frac{l}{\mu f} \right)^2 \left(\frac{dL_0}{dx} \right)^2 + \int_0^x \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{L_x^2}{F_x^3} dS, \quad (2.9)$$

где f – площадь щели, l – длина щели.

Площадь щели определяется по формуле:

$$f = \frac{\delta l}{\cos \alpha}. \quad (2.10)$$

Для упрощения задачи в дальнейшем будем рассматривать воздуховод постоянного сечения с щелями постоянной ширины [85].

При расчете воздуховода постоянного сечения диаметром d ($F_H = F$, $\alpha = 0$, $S_x = \frac{\pi d_x^2}{4}$) с учетом выражений (2.2) и (2.7) получаем:

$$F dw_x = \nu_x \delta dx; \quad (2.11)$$

$$\frac{dw_x}{dx} = \frac{\delta}{F} \nu_x. \quad (2.12)$$

Выражая статическое давление через скорость воздуха в воздуховоде с учетом (2.4) и (2.12), получаем:

$$\Delta p_x = \frac{\rho F^2}{2\mu^2 \delta^2} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2; \quad (2.13)$$

$$\frac{d\Delta p_x}{dx} = \frac{\rho F^2}{\mu^2 \delta^2} \cdot \frac{dw_x}{dx} \cdot \frac{d^2 w_x}{dx^2}. \quad (2.14)$$

Переходя к производным и подставляя в уравнение (2.1) величину $\frac{d\Delta p_x}{dx}$ и умножая на $\mu^2 \delta^2 / \rho F^2$ после преобразований будем иметь:

$$\frac{dw_x}{dx} \cdot \frac{d^2 w_x}{dx^2} + \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \cdot \frac{dw_x}{dx} w_x - 0,5 \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \cdot \frac{\lambda}{d} w_x^2. \quad (2.15)$$

Обозначим

$$\bar{w}_x = w_x / w_H; \quad \bar{x} = x / l,$$

где w_H – скорость воздуха в начале воздуховода.

Тогда

$$w_x = w_H \bar{w}_x; \quad x = l \bar{x};$$

$$\frac{dw_x}{dx} = \frac{w_H}{l} \cdot \frac{d\bar{w}_x}{d\bar{x}};$$

$$\frac{d^2 w_x}{dx^2} = \frac{w_H}{l} \cdot \frac{d^2 \bar{w}_x}{d\bar{x}^2}.$$

Подставляя найденные значения в уравнение (2.15) и сокращая на w_H^2 / l^3 , получаем:

$$\frac{d^2 \bar{w}_x}{d\bar{x}^2} \cdot \frac{d\bar{w}_x}{d\bar{x}} + A \frac{d\bar{w}_x}{d\bar{x}} \bar{w}_x + B \bar{w}_x^2 = 0, \quad (2.16)$$

где

$$A = \mu^2 \bar{f}^2; \quad B = -0,5 \mu^2 \bar{f}^2 \lambda \bar{l};$$

$$\bar{f} = f / F = \delta l F; \quad \bar{l} = l / d.$$

Величину $\mu \bar{f}$ называют параметром щели, а $\lambda \bar{l}$ – параметром воздуховода. Инженерные расчеты воздухопроводов равномерной раздачи производят с учетом параметров $\mu \bar{f}$ и $\lambda \bar{l}$.

Относительная скорость истечения воздуха из щели составит:

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_{cp}} = \frac{dw_x}{dx} \cdot \frac{F}{\delta v_{cp}} = \frac{F w_n}{\delta l v_{cp}} \cdot \frac{d\bar{w}_x}{dx} = \frac{d\bar{w}_x}{dx}, \quad (2.17)$$

где v_{cp} – средняя скорость движения воздуха на выходе из щели.

При равномерной раздаче относительная скорость воздуха в продольной щели равна 1. Вследствие этого отклонение неравномерной раздачи воздуха от равномерной составит [84; 85]:

$$r_x = \bar{v}_x - 1. \quad (2.18)$$

Полное сопротивление (потери давления) воздухораспределителя равно полному давлению в начале воздуховода рассчитывается по формуле:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w_n^2}{2}, \quad (2.19)$$

где

$$\zeta = \frac{v_n^2}{\mu^2 w_n^2} + 1 = \frac{v_n^2 F^2}{\mu^2 f^2 v_{cp}^2} + 1 = \frac{\bar{v}_n^2}{\mu^2 \bar{f}^2} + 1 = \frac{(1 + r_n)^2}{\mu^2 \bar{f}^2} + 1. \quad (2.20)$$

Расчетная ширина щели:

$$\delta = \frac{(\mu \bar{f}) F}{\mu l}. \quad (2.21)$$

Так как устройство щели по всей длине воздуховода (газового коллектора) большой протяженности криволинейной формы конструктивно сложно, то используют ряд отверстий одинаковой площади. В этом случае результатом расчета является не ширина щели, а площадь единичного отверстия σ , которая определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{(\mu \bar{f}) F}{\mu n}, \quad (2.22)$$

где n – количество отверстий.

После преобразований получим:

$$\sigma = \frac{(\mu \bar{\sigma}) F}{\mu}, \quad (2.23)$$

где $\bar{\mu \sigma}$ – безразмерный параметр отверстия.

Исходными данными для расчетов газовых коллекторов постоянного сечения с рядом боковых отверстий одинаковой площади являются: расход продуктов сгорания L_T , м³/ч; длина коллектора l , м; скорость продуктов сгорания w_H , м/с; коэффициент расхода отверстия μ ; максимально возможное отклонение расхода газов в отверстиях от среднего принимается равным 0,05 ($r_{\max}=0,05$).

В качестве основных характеристик, определяющих конструктивные особенности кольцевых газораспределителей, используются диаметр коллектора и количество коллекторов, а также количество и площадь отверстий [84–87; 97].

Площадь поперечного сечения F , м², и диаметр коллектора d , м, рассчитываются по стандартным формулам, затем принимается действительный диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м. Значения площади сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м², и скорости уходящих газов $w_{\text{факт}}$, м/с приводятся к фактическим геометрическим характеристикам:

$$F = \frac{L_T}{3600w_H}; \quad (2.24)$$

$$d = \sqrt{\frac{F \cdot 4}{\pi}}; \quad (2.25)$$

$$F_{\text{факт}} = \frac{\pi d_{\text{факт}}^2}{4}; \quad (2.26)$$

$$w_{\text{факт}} = \frac{L_T}{3600F_{\text{факт}}}. \quad (2.27)$$

Для определения режима течения потока вычисляется величина безразмерного критерия Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{w_{\text{факт}} d}{\nu_{\text{кин}}}, \quad (2.28)$$

где $\nu_{\text{кин}}$ – кинематический коэффициент вязкости продуктов сгорания, м²/с.

Коэффициент гидравлического трения коллектора для турбулентного течения жидкости рассчитывается по формуле А. Альтшуля:

$$\lambda = 0,114 \sqrt{\frac{k_{\varepsilon}}{d} + \frac{68}{Re}}, \quad (2.29)$$

где k_3 – эквивалентная шероховатость (для листовой стали $k_3=0,1$ мм).

Согласно методике [85; 97; 98] находим безразмерный параметр газохода:

$$\lambda \bar{l} = \frac{\lambda l}{d}. \quad (2.30)$$

Затем вычисляется значение комплекса величин $\frac{2d}{\lambda}$ и сравнивается с длиной коллектора. Если $\frac{2d}{\lambda} \geq l$ расчет продолжают и определяют безразмерный параметр отверстия $\mu \bar{\sigma}$ по двум зависимостям:

$$\mu \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2 \cdot r_{\max}}{0,25 \lambda \bar{l} (n-1)^2 + \frac{0,4(n-1)}{n} - 0,167(4n+1)(n-1)}}; \quad (2.31)$$

$$\mu \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2 \cdot r_{\max}}{0,167(2n+1)(n+1) - 1 - 0,083 \lambda \bar{l} (n^2 - 1) - 0,2(n-1)}}. \quad (2.32)$$

Из полученных значений принимается меньшее значение $\mu \bar{\sigma}$.

На следующем этапе задаются количеством отверстий n и проверяют выполнение условия: $n \mu \bar{\sigma} \leq 1$. Если условие выполняется, то расчет продолжают дальше. При $n \mu \bar{\sigma} > 1$ необходима корректировка исходных данных. Количеством отверстий задаются несколько раз и выбирают оптимальное значение ориентируясь на скорость истечения продуктов сгорания из отверстия.

Задавшись общим количеством отверстий n , определяют площадь единичного отверстия по формуле (2.23):

$$\sigma = \frac{\mu \bar{\sigma} F_{\text{факт}}}{\mu},$$

где коэффициент расхода $\mu=0,62$ – для отверстия с острыми выходными кромками, $\mu=0,98$ – для коноидального насадка (выполненного в форме сжатой струи) [89; 91].

Зная площадь единичного отверстия, принимается соотношение ширины и длины газовыпускного отверстия – щели ($a \times b$). Отверстия в газораспределительном коллекторе устанавливаются из расчета их равномерного распределения

по всей длине газохода. Определяется фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м^2 .

Заключительным этапом расчета является определение скорости уходящих газов на выходе из отверстия

$$v_0 = \frac{L_{\Gamma}}{3600\sigma_{\text{факт}}n}. \quad (2.33)$$

На основании выполненных расчетов определяют потери давления Δp , Па, по формуле (2.19) для дальнейшего подбора тягодутьевого оборудования:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w_{\text{н}}^2}{2},$$

где ζ – безразмерный коэффициент местного сопротивления

$$\zeta = \frac{1 + (\mu\bar{\sigma})^2 [0,25\lambda\bar{l}(n-1)^2 + 0,2(n-1-0,167(4n-1)(n-1))]}{n^2(\mu\bar{\sigma})^2} + 1. \quad (2.34)$$

Для определения оптимальных конструктивных и режимных характеристик систем газораспределения производился многовариантный расчет на основе технических параметров башенных градирен с естественной тягой. Расчеты выполнены для градирен, установленных на Самарской ТЭЦ и на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ [98–100].

На Самарской ТЭЦ предлагается осуществлять отвод уходящих продуктов сгорания от трех энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ через вытяжную башню градирни типа БГ-2600. Суммарный расход дымовых газов от трех энергетических котлов, работающих в номинальном режиме, составляет $1422726 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре $110 \text{ }^\circ\text{C}$. На Сызранской ТЭЦ рассматривается возможность отвода уходящих газов от двух котлов-утилизаторов ПГУ-200 в атмосферу через вытяжную башню градирню типа БГ-2300. Температура газов после котла-утилизатора составляет $115 \text{ }^\circ\text{C}$, расход – $1661922 \text{ м}^3/\text{ч}$. Кольцевой газораспределитель устанавливается над оросителем градирни после каплеотделителя на высоте 20 м от уровня земли (см. рисунки 2.1 и 2.2).

Рассматриваются различные варианты конструктивного исполнения кольцевых газораспределителей: расположение газораспределителей в центре градир-

ни (рисунки 2.4–2.7) и у стенок башни (рисунок 2.8); от 1 до 4 концентрически расположенных газораспределителей. Расчеты выполнены для отверстий с острыми кромками и коноидальных насадков.

Уходящие продукты сгорания поступают по общему газоходу от котлов к градирне. В вытяжной башне градирни к газоходу подключен кольцевой газораспределительный коллектор, который разделен на два полукольца с отверстиями равномерной раздачи продуктов сгорания. Расход газов в каждом полукольце составляет 50 % от общего расхода уходящих продуктов сгорания.

Скорость движения влажного воздуха в свободном сечении вытяжной башни градирни равна 1,1–1,5 м/с, что значительно меньше скорости выхода газов из отверстий газораспределительного коллектора. Поэтому в расчетах газоходов принимается допущение, что истечение газов происходит в свободное пространство.

Расчеты выполнялись для допустимых диапазонов скоростей движения продуктов сгорания в газоходах [5; 14; 16]: 10 м/с, 20 м/с, 30 м/с.

Полученные результаты расчетов системы газораспределения, установленной в башенной градирне БГ-2600 Самарской ТЭЦ, при скорости движения дымовых газов в кольцевом газоходе 10 м/с и расположении газоходов в центре градирни представлены в таблицах 2.1–2.8. Конструктивное исполнение газораспределительного коллектора показано на рисунках 2.4–2.8.

Таблица 2.1 – Результаты расчета единичного газового кольцевого коллектора ($n_r=1$). Длина полукольца коллектора 39,3 м, коэффициент расхода $\mu=0,98$ (коноидальный насадок)

Параметр	Значение
1	2
Расход газов L_r , м ³ /ч	711363
Скорость газов w_n , м/с	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	19,76
Диаметр коллектора d , м	5,02
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м ²	19,63
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м	5,0
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}$, м/с	10,07
Re	2217459
Коэффициент сопротивления трения λ	0,009

Продолжение таблицы 2.1

1	2
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda l}$	0,073
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_1$	0,071
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_2$	0,088
Количество отверстий n	6
Площадь единичного отверстия σ , м ²	1,385
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,8 x 1,7
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	1,36
Скорость газов на выходе из отверстий U_0 , м/с	24,22

Таблица 2.2 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=2$). Длина полукольца коллектора № 1 – 44,8 м, длина полукольца коллектора № 2 – 30,6 м, коэффициент расхода $\mu=0,98$ (коноидальный насадок)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2
Расход газов L_r , м ³ /ч	355682	355682
Скорость газов w_n , м/с	10	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	9,88	9,88
Диаметр коллектора d , м	3,55	3,55
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м ²	9,62	9,62
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м	3,5	3,5
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}$, м/с	10,27	10,27
Re	1583900	1583900
Коэффициент сопротивления трения λ	0,010	0,010
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda l}$	0,129	0,088
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_1$	0,071	0,071
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_2$	0,088	0,088
Количество отверстий n	6	6
Площадь единичного отверстия σ , м ²	0,685	0,680
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,6 x 1,1	0,6 x 1,1
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	0,660	0,660
Скорость газов на выходе из отверстий U_0 , м/с	24,95	24,95

Таблица 2.3 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=3$). Длина полукольца коллектора № 1 – 45,5 м, длина полукольца коллектора № 2 – 33,0 м, длина полукольца коллектора № 3 – 20,4 м, коэффициент расхода $\mu=0,98$ (коноидальный насадок)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3
1	2	3	4
Расход газов L_r , м ³ /ч	237121	237121	237121
Скорость газов w_n , м/с	10	10	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	6,59	6,59	6,59

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Диаметр коллектора d , м	2,90	2,90	2,90
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м ²	7,07	7,07	7,07
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м	3,0	3,0	3,0
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}$, м/с	9,32	9,32	9,32
Re	1231922	1231922	1231922
Коэффициент сопротивления трения λ	0,0107	0,0107	0,0107
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda}$	0,162	0,117	0,073
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_1$	0,072	0,071	0,071
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_2$	0,089	0,088	0,088
Количество отверстий n	6	6	6
Площадь единичного отверстия σ , м ²	0,506	0,502	0,498
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,5 x 1,0	0,5 x 1,0	0,5 x 1,0
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	0,500	0,500	0,500
Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с	21,96	21,96	21,96

Таблица 2.4 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=4$). Длина полукольца коллектора № 1 – 52,6 м, длина полукольца коллектора № 2 – 41,6 м, длина полукольца коллектора № 3 – 30,6 м, длина полукольца коллектора № 4 – 19,6 м, коэффициент расхода $\mu=0,98$ (коноидальный насадок)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3	Коллектор № 4
1	2	3	4	5
Расход газов L_g , м ³ /ч	177841	177841	177841	177841
Скорость газов w_n , м/с	10	10	10	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	4,94	4,94	4,94	4,94
Диаметр коллектора d , м	2,51	2,51	2,51	2,51
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м ²	4,91	4,91	4,91	4,91
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м	2,5	2,5	2,5	2,5
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}$, м/с	10,07	10,07	10,07	10,07
Re	1108730	1108730	1108730	1108730
Коэффициент сопротивления трения λ	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda}$	0,232	0,184	0,135	0,087
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_1$	0,072	0,072	0,071	0,071

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
Количество отверстий n	6	6	6	6
Площадь единичного отверстия σ , м ²	0,355	0,352	0,350	0,247
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	0,350	0,350	0,350	0,350
Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с	23,52	23,52	23,52	23,52

Таблица 2.5 – Результаты расчета единичного газового кольцевого коллектора ($n_r=1$). Длина полукольца коллектора 39,3 м, $\mu=0,62$ (отверстия с острыми кромками)

Параметр	Значение
1	2
Расход газов L_r , м ³ /ч	711363
Скорость газов w_n , м/с	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	19,76
Диаметр коллектора d , м	5,02
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}$, м ²	19,63
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}$, м	5,0
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}$, м/с	10,07
Re	2217459
Коэффициент сопротивления трения λ	0,009
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda l}$	0,073
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_1$	0,041
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu \sigma}_2$	0,053
Количество отверстий n	10
Площадь единичного отверстия σ , м ²	1,338
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,8 x 1,7
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	1,360
Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с	14,53

Таблица 2.6 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=2$). Длина полукольца коллектора № 1 – 44,8 м, длина полукольца коллектора № 2 – 30,6 м, коэффициент расхода $\mu=0,62$ (отверстия с острыми кромками)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2
1	2	3
Расход газов L_r , м ³ /ч	355682	355682
Скорость газов w_n , м/с	10	10
Площадь сечения коллектора F , м ²	9,88	9,88
Диаметр коллектора d , м	3,55	3,55

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}, \text{м}^2$	9,62	9,62
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}, \text{м}$	3,5	3,5
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}, \text{м/с}$	10,27	10,27
Re	1583900	1583900
Коэффициент сопротивления трения λ	0,010	0,010
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda}l$	0,129	0,088
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_1$	0,041	0,041
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_2$	0,054	0,053
Количество отверстий n	10	10
Площадь единичного отверстия $\sigma, \text{м}^2$	0,662	0,657
Размеры отверстия $a \times b, \text{м}$	0,6 x 1,1	0,6 x 1,1
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}, \text{м}^2$	0,660	0,660
Скорость газов на выходе из отверстий $v_0, \text{м/с}$	14,97	14,97

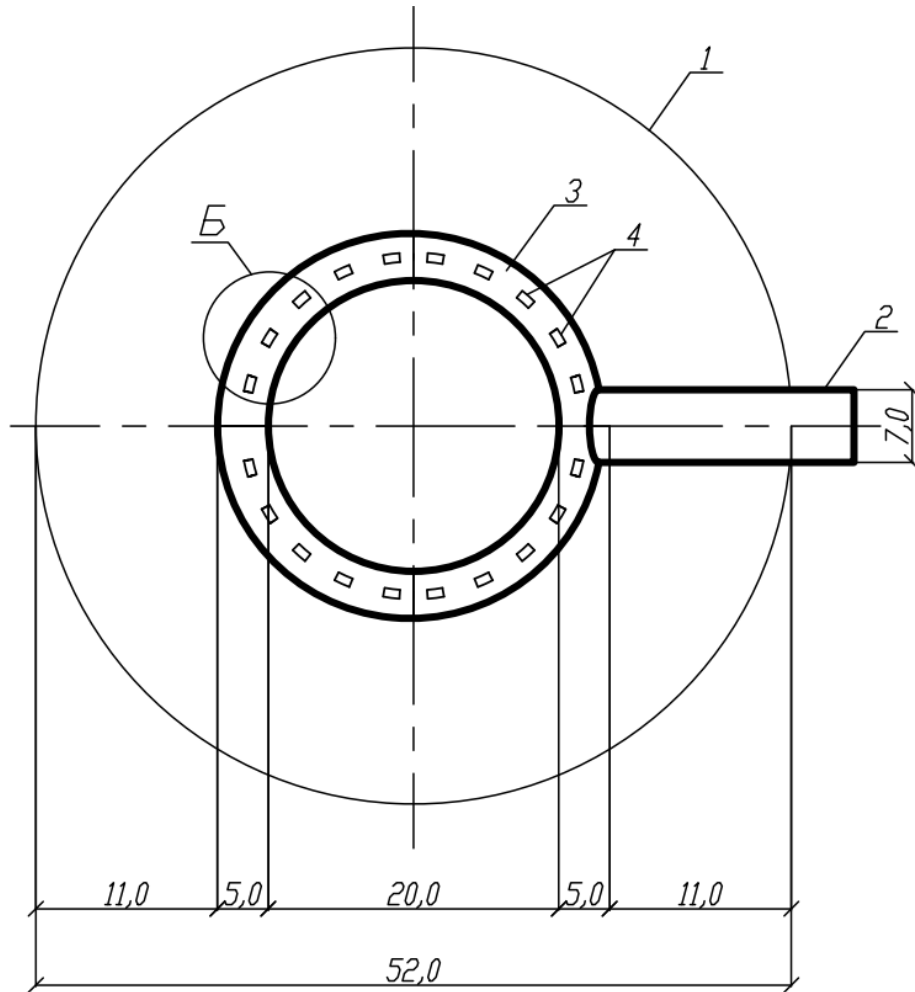
Таблица 2.7 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=3$). Длина полукольца коллектора № 1 – 45,5 м, длина полукольца коллектора № 2 – 33,0 м, длина полукольца коллектора № 3 – 20,4 м, коэффициент расхода $\mu=0,62$ (отверстия с острыми кромками)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3
1	2	3	4
Расход газов $L_r, \text{м}^3/\text{ч}$	237121	237121	237121
Скорость газов $w_n, \text{м/с}$	10	10	10
Площадь сечения коллектора $F, \text{м}^2$	6,59	6,59	6,59
Диаметр коллектора $d, \text{м}$	2,90	2,90	2,90
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}, \text{м}^2$	7,07	7,07	7,07
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}, \text{м}$	3,0	3,0	3,0
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}, \text{м/с}$	9,32	9,32	9,32
Re	1231922	1231922	1231922
Коэффициент сопротивления трения λ	0,0107	0,0107	0,0107
Безразмерный параметр воздуховода $\bar{\lambda}l$	0,162	0,117	0,073
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_1$	0,042	0,041	0,041
Безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\sigma_2$	0,054	0,054	0,053
Количество отверстий n	10	10	10
Площадь единичного отверстия $\sigma, \text{м}^2$	0,489	0,485	0,482
Размеры отверстия $a \times b, \text{м}$	0,6 x 0,8	0,6 x 0,8	0,6 x 0,8
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}, \text{м}^2$	0,480	0,480	0,480
Скорость газов на выходе из отверстий $v_0, \text{м/с}$	13,72	13,72	13,72

Таблица 2.8 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов ($n_r=4$). Длина полукольца коллектора № 1 – 52,6 м, длина полукольца коллектора № 2 – 41,6 м, длина полукольца коллектора № 3 – 30,6 м, длина полукольца коллектора № 4 – 19,6 м, коэффициент расхода $\mu=0,62$ (отверстия с острыми кромками)

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3	Коллектор № 4
Расход газов $L_r, \text{м}^3/\text{ч}$	177841	177841	177841	177841
Скорость газов $w_n, \text{м/с}$	10	10	10	10
Площадь сечения коллектора $F, \text{м}^2$	4,94	4,94	4,94	4,94
Диаметр коллектора $d, \text{м}$	2,51	2,51	2,51	2,51
Фактическая площадь сечения коллектора $F_{\text{факт}}, \text{м}^2$	4,91	4,91	4,91	4,91
Фактический диаметр коллектора $d_{\text{факт}}, \text{м}$	2,5	2,5	2,5	2,5
Фактическая скорость газов $w_{\text{нфакт}}, \text{м/с}$	10,07	10,07	10,07	10,07
Re	1108730	1108730	1108730	1108730
Коэффициент сопротивления трения λ	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110
Безразмерный параметр воздуховода $\lambda \bar{l}$	0,232	0,184	0,135	0,087
Безразмерный параметр отверстия $\mu \bar{\sigma}_1$	0,042	0,042	0,041	0,041
Безразмерный параметр отверстия $\mu \bar{\sigma}_2$	0,054	0,054	0,054	0,053
Количество отверстий n	10	10	10	10
Площадь единичного отверстия $\sigma, \text{м}^2$	0,344	0,341	0,338	0,335
Размеры отверстия $a \times b, \text{м}$	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7	0,5 x 0,7
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}, \text{м}^2$	0,350	0,350	0,350	0,350
Скорость газов на выходе из отверстий $v_0, \text{м/с}$	14,11	14,11	14,11	14,11

a)



б)

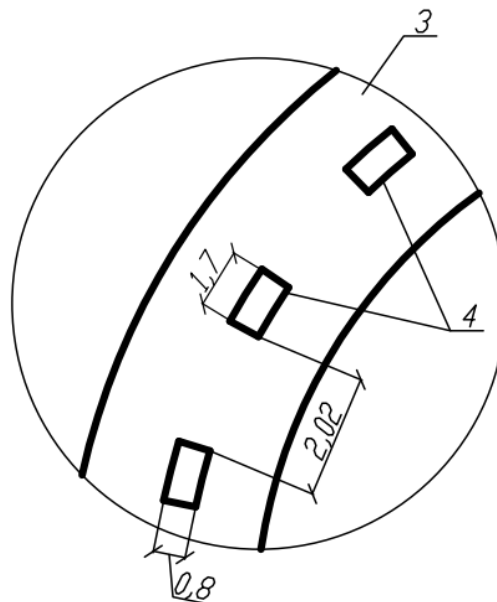
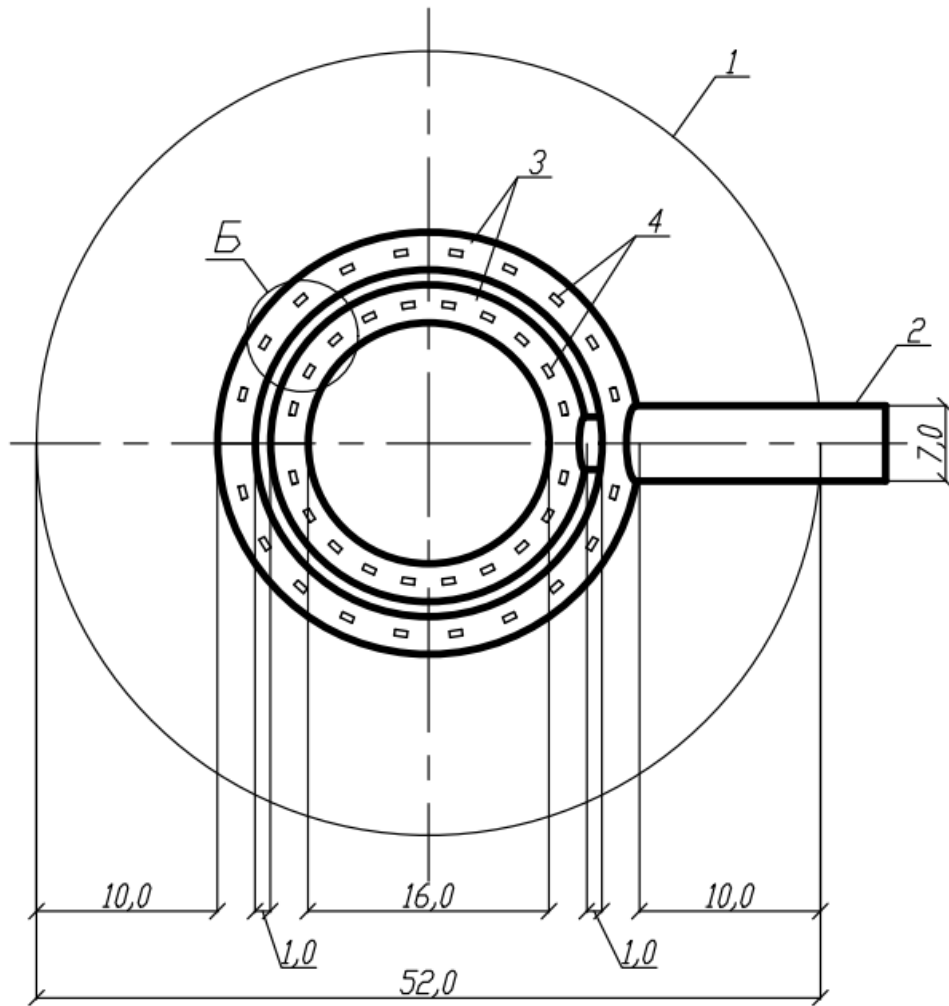


Рисунок 2.4 – Система отвода уходящих газов с одним газовым коллектором:
 а – общий вид, б – коллектор с отверстиями
 1 – стенка башни градирни; 2 – подводящий газопровод;
 3 – кольцевой коллектор диаметром $d_f=5$ м; 4 – отверстия для выхода газов

а)



б)

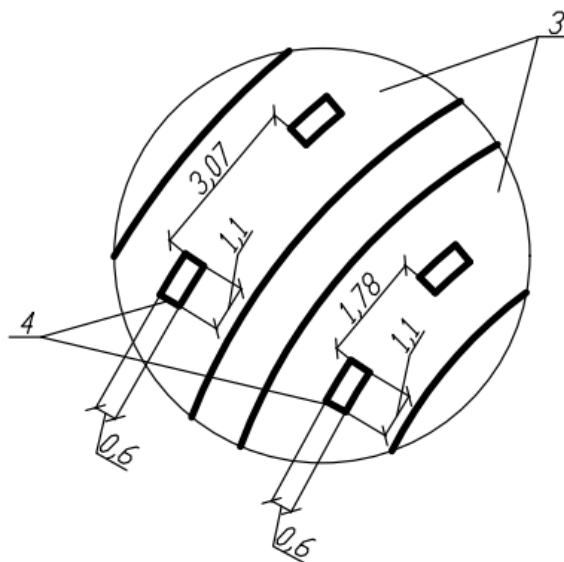
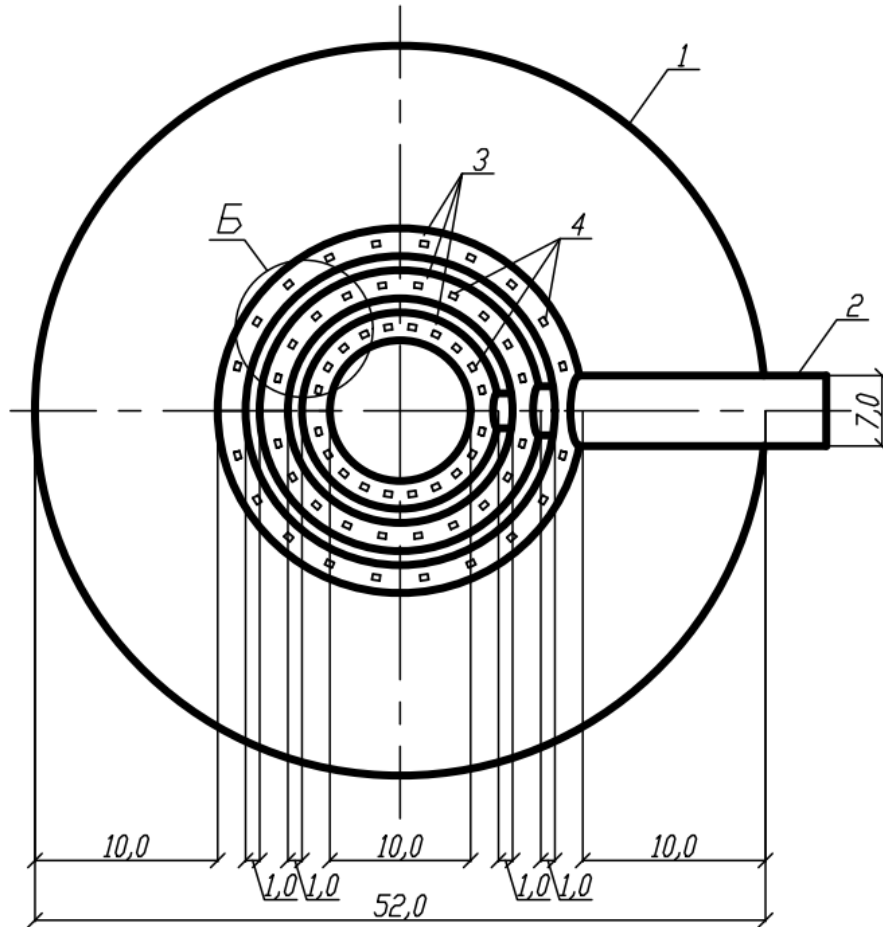


Рисунок 2.5 – Система отвода уходящих газов с двумя газовыми коллекторами:
 а – общий вид, б – коллектор с отверстиями
 1 – стенка башни градирни; 2 – подводящий газоход;
 3 – кольцевой коллектор диаметром $d_T=3,5$ м; 4 – отверстия для выхода газов

а)



б)

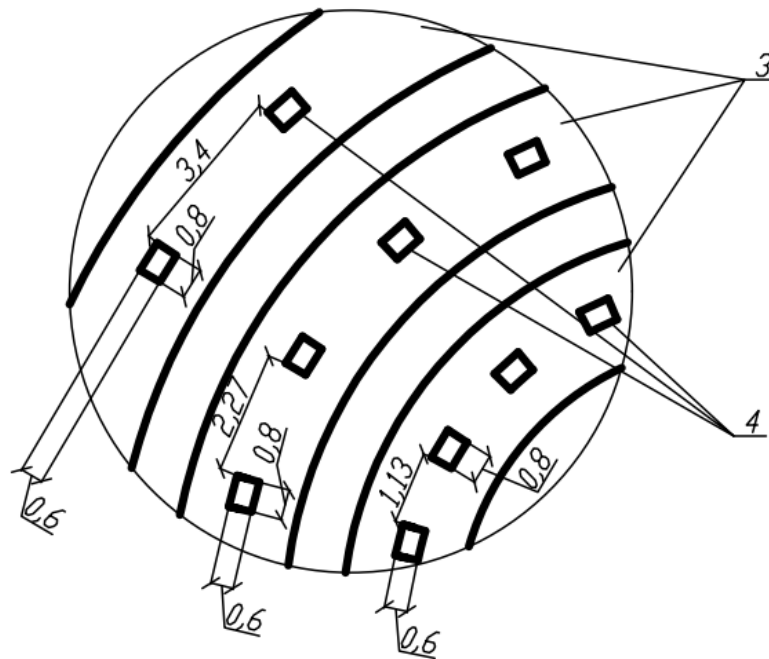


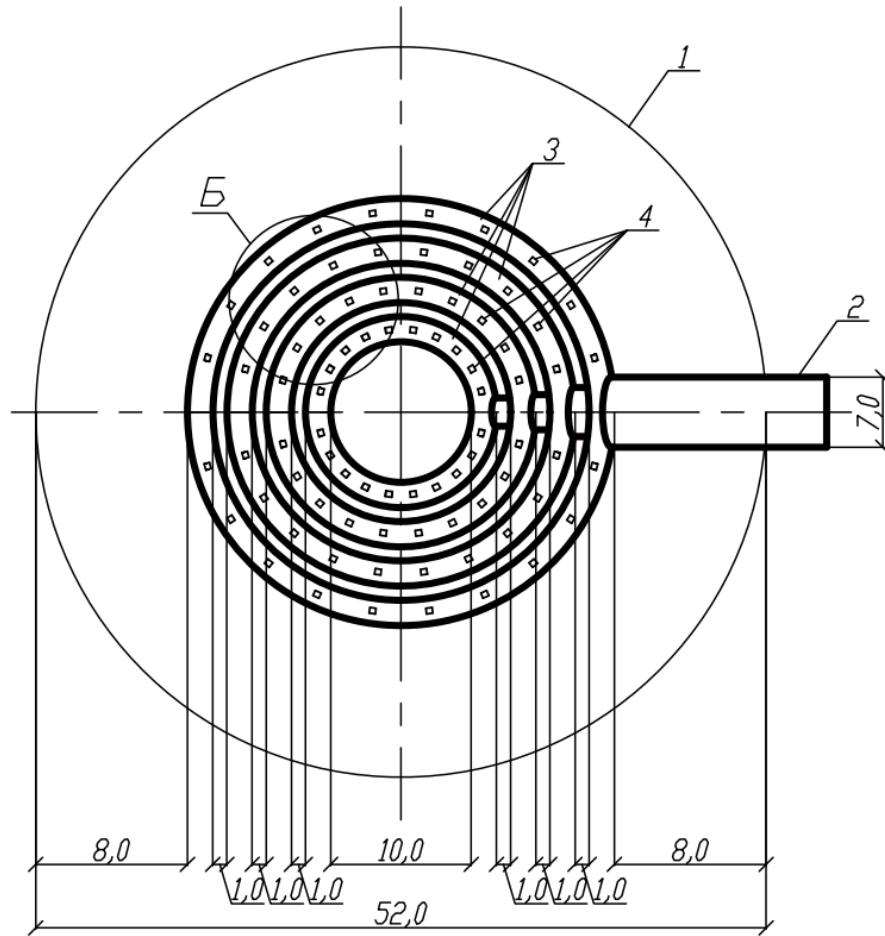
Рисунок 2.6 – Система отвода уходящих газов с тремя газовыми коллекторами:

а – общий вид, а – коллектор с отверстиями

1 – стенка башни градирни; 2 – подводящий газоход;

3 – кольцевой коллектор диаметром $d_r=3$ м; 4 – отверстия для выхода газов

а)



б)

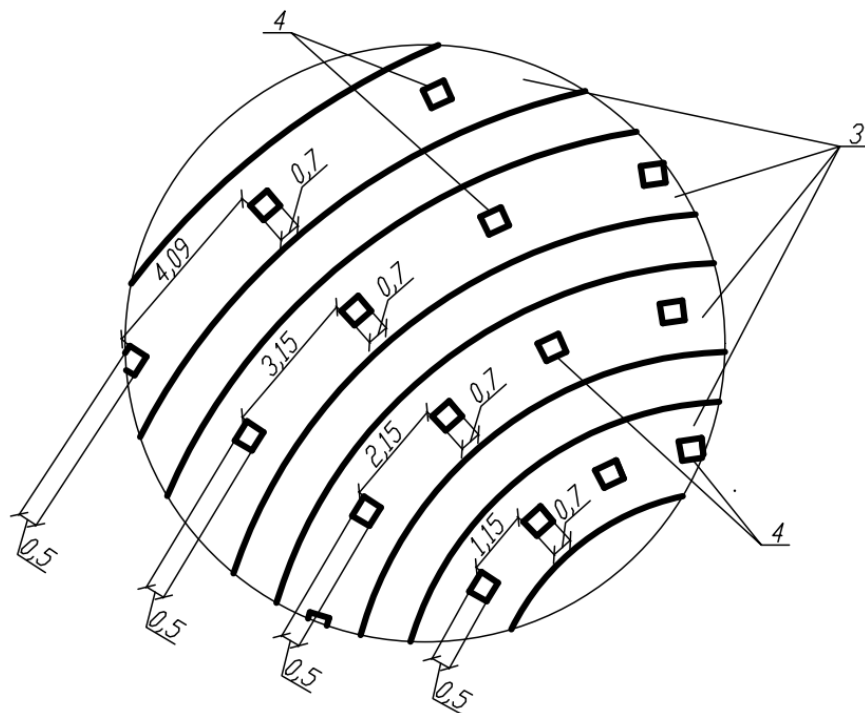
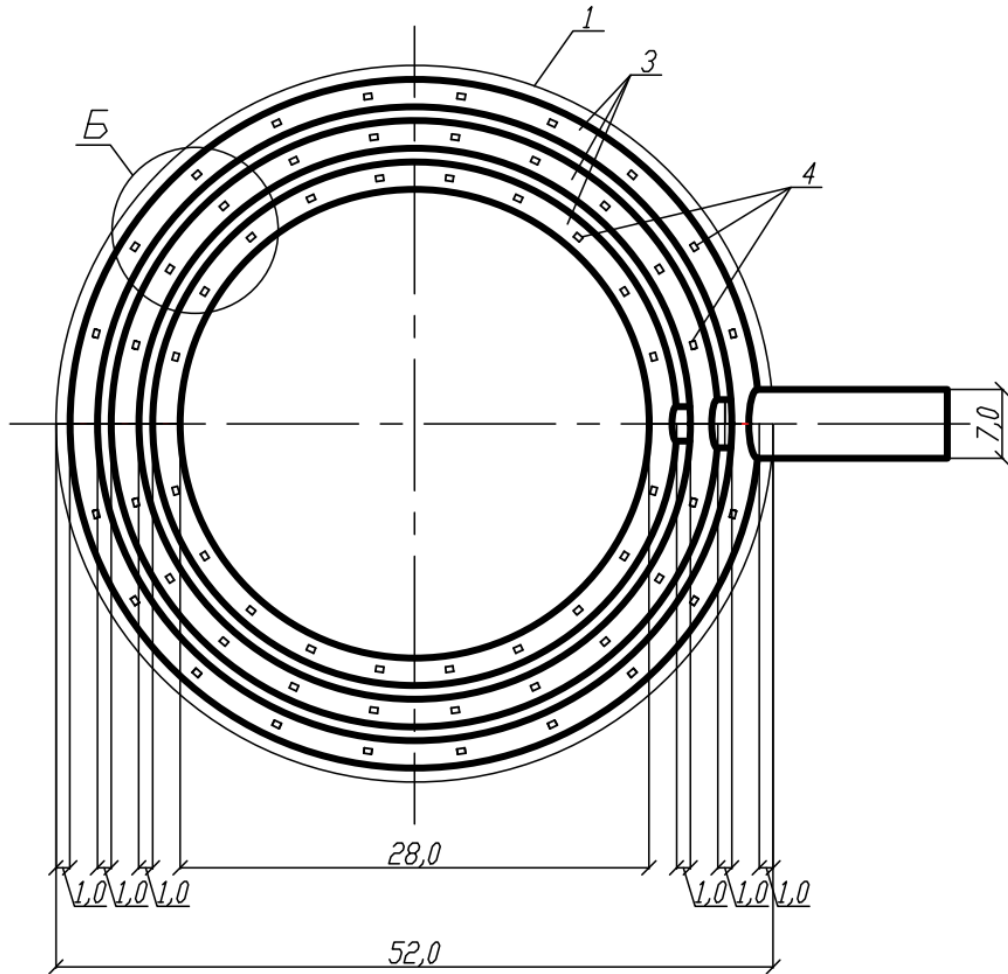


Рисунок 2.7 – Система отвода уходящих газов с четырьмя газовыми коллекторами:
 а – общий вид, б – коллектор с отверстиями
 1 – стенка башни градирни; 2 – подводящий газопровод;
 3 – кольцевой коллектор диаметром $d_T=2,5$ м; 4 – отверстия для выхода газов

а)



б)

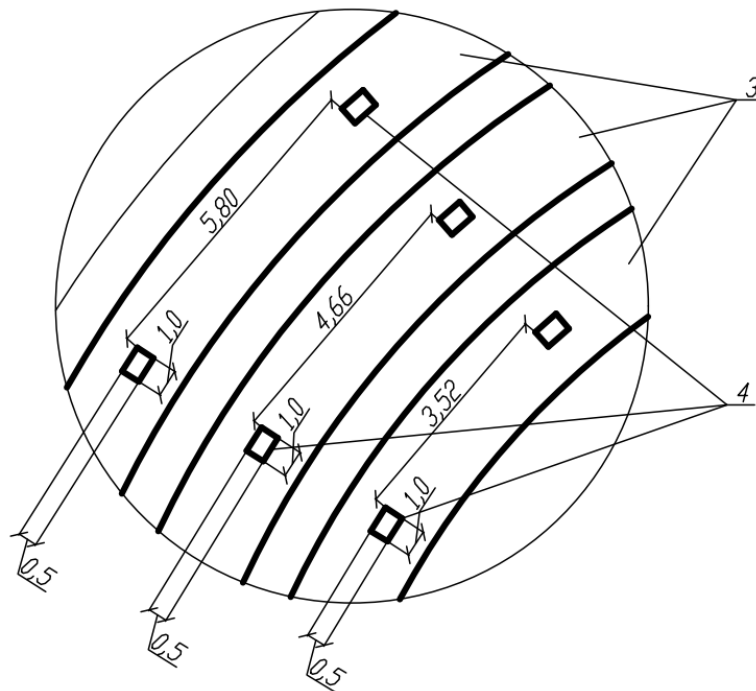


Рисунок 2.8 – Система отвода уходящих газов с тремя газовыми коллекторами:
 а – общий вид, б – коллектор с отверстиями
 1 – стенка башни градирни; 2 – подводящий газоход;
 3 – кольцевой коллектор диаметром $d_T=3,0$ м; 4 – отверстия для выхода газов

Аналогичные расчеты выполнены для градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ при скорости движения дымовых газов в кольцевых коллекторах 20 м/с и 30 м/с и расположении газоходов в центре градирни, а также при расположении газоходов у стенок башни. Основные результаты расчетов представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты расчетов для градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ

1	2	3	4	5	6	Расположение газоходов в центре градирни			Расположение газоходов у стенок градирни				
						7	8	9	10	11	12		
												Длина полукольца коллектора, м	Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²
30	0,98	1	3,00	27,97	6	36,11	0,504	65,34	73,79	0,510	64,58		
		2	2,00	31,47	6	37,68	0,224	73,51	75,36	0,232	70,98		
			2,00	31,47	6	28,26	0,224	73,51	65,94	0,232	70,98		
		3	1,60	32,78	6	34,54	0,146	75,19	75,99	0,152	72,22		
			1,60	32,78	6	26,38	0,144	76,23	67,82	0,152	72,22		
			1,60	32,78	6	18,21	0,142	77,31	59,66	0,150	73,19		
		4	1,40	32,10	6	40,51	0,114	72,22	76,30	0,118	69,77		
			1,40	32,10	6	32,97	0,112	73,51	68,77	0,118	69,77		
			1,40	32,10	6	25,43	0,110	74,85	61,23	0,116	70,98		
			1,40	32,10	6	17,90	0,110	74,85	53,69	0,116	70,98		
		0,62	1	3,00	27,97	6	36,11	0,834	39,49	73,79	0,852	38,65	
			2	2,00	31,47	6	37,68	0,376	43,79	75,36	0,388	42,44	
	2,00			31,47	6	28,26	0,372	44,27	65,94	0,384	42,88		
	3		1,60	32,78	6	34,54	0,244	44,99	75,99	0,256	42,88		
			1,60	32,78	6	26,38	0,240	45,74	67,82	0,252	43,56		
			1,60	32,78	6	18,21	0,240	45,74	59,66	0,248	44,27		
	4		1,40	32,10	6	40,51	0,188	43,79	76,30	0,200	41,17		
			1,40	32,10	6	32,97	0,188	43,79	68,77	0,196	42,01		
			1,40	32,10	6	25,43	0,184	44,75	61,23	0,192	42,88		
			1,40	32,10	6	17,90	0,184	44,75	53,69	0,192	42,88		
	20		0,98	1	3,50	20,55	6	36,90	0,684	48,15	73,01	0,690	47,73
				2	2,50	20,14	6	40,04	0,352	46,78	74,58	0,360	45,74
		2,50			20,14	6	29,05	0,348	47,32	63,59	0,356	46,25	
		3		2,10	19,03	6	38,47	0,248	44,27	75,20	0,256	42,88	
2,10				19,03	6	28,73	0,248	44,27	65,47	0,256	42,88		
2,10				19,03	6	19,00	0,244	49,01	55,74	0,252	43,56		
4		1,80		19,42	6	44,90	0,184	44,75	75,67	0,192	42,88		
		1,80		19,42	6	36,11	0,184	44,75	66,88	0,188	43,79		
		1,80		19,42	6	27,32	0,184	45,75	58,09	0,188	43,79		
		1,80		19,42	6	18,53	0,180	45,74	49,30	0,188	43,79		

Продолжение таблицы 2.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
20	0,62	1	3,50	20,55	10	36,90	0,660	29,94	73,01	0,672	29,40		
		2	2,50	20,14	10	40,04	0,340	29,06	74,58	0,348	28,39		
			2,50	20,14	10	29,05	0,336	29,40	63,59	0,344	28,72		
		3	2,10	19,03	10	38,47	0,240	27,44	75,20	0,248	26,56		
			2,10	19,03	10	28,73	0,240	27,44	65,47	0,248	26,56		
			2,10	19,03	10	19,00	0,240	27,44	55,74	0,244	26,99		
		4	1,80	19,42	10	44,90	0,180	27,44	75,67	0,188	26,28		
			1,80	19,42	10	36,11	0,180	27,44	66,88	0,184	26,85		
			1,80	19,42	10	27,32	0,180	27,44	58,09	0,184	26,85		
			1,80	19,42	10	18,53	0,180	27,44	49,30	0,180	27,44		
		10	0,98	1	5,00	10,07	6	39,25	1,360	24,22	70,65	1,400	23,52
				2	3,50	10,27	6	44,75	0,660	24,95	73,01	0,700	23,52
3,50	10,27				6	30,62	0,660	24,95	58,88	0,700	23,52		
3	3,00			9,32	6	45,53	0,500	21,96	73,79	0,500	21,96		
	3,00			9,32	6	32,97	0,500	21,96	61,23	0,500	21,96		
	3,00			9,32	6	20,41	0,500	21,96	48,67	0,500	21,96		
4	2,50			10,07	6	52,60	0,350	23,52	74,58	0,360	22,87		
	2,50			10,07	6	41,61	0,350	23,52	63,59	0,360	22,87		
	2,50			10,07	6	30,62	0,350	23,52	52,60	0,360	22,87		
	2,50			10,07	6	19,63	0,350	23,52	41,61	0,360	22,87		
0,62	1			5,00	10,07	10	39,25	1,360	14,53	70,65	1,360	14,53	
	2			3,50	10,27	10	44,75	0,660	14,97	73,01	0,660	14,97	
			3,50	10,27	10	30,62	0,660	14,97	58,88	0,660	14,97		
	3		3,00	9,32	10	45,53	0,500	13,72	73,79	0,500	13,17		
			3,00	9,32	10	32,97	0,500	13,72	61,23	0,500	13,17		
			3,00	9,32	10	20,41	0,500	13,72	48,67	0,500	13,17		
	4	2,50	10,07	10	52,60	0,350	14,11	74,58	0,350	14,11			
		2,50	10,07	10	41,61	0,350	14,11	63,59	0,350	14,11			
2,50		10,07	10	30,62	0,350	14,11	52,60	0,350	14,11				
2,50		10,07	10	19,63	0,350	14,11	41,61	0,350	14,11				

По приведенной выше методике также выполнен расчет кольцевых газораспределительных коллекторов для градирни БГ-2300 Сызранской ТЭЦ. Результаты расчетов приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты расчетов для градирни БГ-2300 Сызранской ТЭЦ

Скорость газов в кольцевом коллекторе $w_{нз}$, м/с	Коэффициент расхода μ	Количество коллекторов	Фактический диаметр коллектора $d_{факт}$, м	Фактическая скорость газов в коллекторе $w_{факт}$, м/с	Количество отверстий n	Расположение газоходов в центре градирни			Расположение газоходов у стенок градирни				
						Длина полукольца коллектора, м	Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{факт}$, м ²	Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с	Длина полукольца коллектора, м	Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{факт}$, м ²	Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с		
												7	8
30	0,98	1	3,10	30,60	6	36,27	0,535	71,88	76,46	0,546	70,52		
		2	2,20	30,38	6	38,62	0,272	70,59	77,87	0,281	68,53		
			2,20	30,38	6	28,57	0,271	71,11	67,82	0,279	69,06		
		3	1,80	30,25	6	36,11	0,183	69,90	78,50	0,191	67,01		
			1,80	30,25	6	27,32	0,182	70,48	69,71	0,190	67,62		
			1,80	30,25	6	18,53	0,180	71,06	60,92	0,187	68,42		
		4	1,60	28,71	6	42,70	0,147	65,48	78,81	0,153	62,73		
			1,60	28,71	6	34,54	0,146	66,09	70,65	0,152	63,36		
			1,60	28,71	6	26,38	0,144	66,69	62,49	0,150	64,21		
			1,60	28,71	6	18,21	0,143	67,28	54,32	0,149	64,61		
		0,62	1	3,10	30,60	6	36,27	0,892	43,13	78,46	0,909	42,31	
			2	2,20	30,38	6	38,62	0,454	42,35	77,87	0,468	41,12	
	2,20			30,38	6	28,57	0,451	42,66	67,82	0,464	41,44		
	3		1,80	30,25	6	36,11	0,306	41,94	78,50	0,319	40,21		
			1,80	30,25	6	27,32	0,303	42,29	69,71	0,316	40,57		
			1,80	30,25	6	18,53	0,301	42,64	60,92	0,312	41,05		
	4		1,60	28,71	6	42,70	0,245	39,29	78,81	0,256	37,64		
			1,60	28,71	6	34,54	0,243	39,65	70,65	0,253	38,02		
			1,60	28,71	6	26,38	0,240	40,01	62,49	0,250	38,52		
			1,60	28,71	6	18,21	0,238	40,37	54,32	0,248	38,77		
	20		0,98	1	3,80	20,36	6	37,37	0,802	47,98	75,36	0,814	47,29
				2	2,70	20,17	6	40,98	0,409	47,06	77,09	0,418	46,05
		2,70			20,17	6	29,36	0,406	47,38	65,47	0,415	46,38	
		3		2,25	19,36	6	39,64	0,285	44,94	77,79	0,294	43,64	
2,25				19,36	6	29,44	0,283	45,28	67,59	0,292	43,99		
2,25				19,36	6	19,23	0,281	45,62	57,38	0,289	44,43		
4		1,90		20,36	6	46,00	0,206	46,66	78,34	0,213	45,22		
		1,90		20,36	6	36,90	0,204	47,06	69,24	0,211	45,63		
		1,90	20,36	6	27,79	0,203	47,46	60,13	0,208	46,16			
		1,90	20,36	6	18,68	0,201	47,85	51,03	0,207	46,44			
0,62		1	3,80	20,36	10	37,37	0,775	29,79	75,36	0,787	29,33		
		2	2,70	20,17	10	40,98	0,395	29,20	77,09	0,405	28,51		
	2,70		20,17	10	29,36	0,392	29,41	65,47	0,402	28,74			
	3	2,25	19,36	10	39,64	0,276	27,87	77,79	0,285	26,99			
		2,25	19,36	10	29,44	0,274	28,10	67,59	0,283	27,22			
	2,25	19,36	10	19,23	0,272	28,33	57,38	0,280	27,52				

Продолжение таблицы 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	0,62	4	1,90	20,36	10	46,00	0,200	28,90	78,34	0,207	27,92
			1,90	20,36	10	36,90	0,198	29,17	69,24	0,205	28,20
			1,90	20,36	10	27,79	0,196	29,44	60,13	0,202	28,56
			1,90	20,36	10	18,68	0,194	29,70	51,03	0,201	28,75
10	0,98	1	5,4	10,08	6	39,25	1,614	23,84	72,85	1,628	23,63
			3,8	10,18	6	46,16	0,806	23,87	75,36	0,816	23,58
		2	3,8	10,18	6	31,09	0,801	24,02	60,29	0,811	23,73
			3,20	9,57	6	47,10	0,575	22,32	76,30	0,584	21,98
		3	3,20	9,57	6	33,91	0,571	22,47	63,11	0,579	22,13
			3,20	9,57	6	20,72	0,567	22,63	49,93	0,575	22,32
		4	2,70	10,08	6	54,79	0,413	23,27	77,09	0,420	22,92
			2,70	10,08	6	43,18	0,410	23,44	65,47	0,416	23,10
	2,70		10,08	6	31,56	0,407	23,62	53,85	0,412	23,32	
	2,70		10,08	6	19,94	0,404	23,79	42,23	0,410	23,46	
	0,62	1	5,4	10,08	10	39,25	0,775	1,559	72,85	1,574	14,67
			3,8	10,18	10	46,16	0,395	0,779	75,36	0,789	14,62
		2	3,8	10,18	10	31,09	0,392	0,774	60,29	0,784	14,72
			3,20	9,57	10	47,10	0,276	0,556	76,30	0,565	13,61
		3	3,20	9,57	10	33,91	0,274	0,552	63,11	0,561	13,72
			3,20	9,57	10	20,72	0,272	0,547	49,93	0,556	13,85
		4	2,70	10,08	10	54,79	0,200	0,400	77,09	0,407	14,19
			2,70	10,08	10	43,18	0,198	0,397	65,47	0,403	14,31
			2,70	10,08	10	31,56	0,196	0,394	53,85	0,399	14,46
			2,70	10,08	10	19,94	0,194	0,391	42,23	0,397	14,55

На основании выполненных расчетов были определены безразмерные коэффициенты местных сопротивлений кольцевых газоходов равномерной раздачи и потери давления для различных вариантов конструкций устройств для отвода уходящих газов котельных установок через вытяжные башни градирен БГ-2600 Самарской ТЭЦ (таблица 2.11) и БГ-2300 Сызранской ТЭЦ (таблица 2.12). При количестве коллекторов $n_r \geq 2$, расчет потерь давления ведется для наиболее протяженного полукольца.

Таблица 2.11 – Результаты расчетов потерь давления в коллекторах для градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ

Скорость газов в кольцевом коллекторе w_n , м/с	Расположение коллекторов	Коэффициент расхода μ	Количество коллекторов	Коэффициент местного сопротивления ζ	Потери давления Δp , Па
1	2	3	4	5	6
30	в центре градирни	0,98	1	6,02	2080,57
			2	5,90	2578,41
			3	5,84	2768,13
			4	5,70	2592,14

Продолжение таблицы 2.11

1	2	3	4	5	6
30	в центре градирни	0,62	1	6,02	2080,57
			2	5,90	2578,41
			3	5,84	2768,13
			4	5,70	2592,14
	у стенок башни	0,98	1	5,84	2017,35
			2	5,60	2446,91
			3	5,40	2561,37
			4	5,25	2389,32
		0,62	1	5,84	2017,35
			2	5,60	2446,91
			3	5,40	2561,37
			4	5,25	2389,32
20	в центре градирни	0,98	1	6,05	1127,34
			2	5,95	1064,80
			3	5,90	942,38
			4	5,77	961,23
		0,62	1	6,38	1189,31
			2	6,26	1121,34
			3	6,20	991,49
			4	6,06	1008,94
	у стенок башни	0,98	1	5,90	1099,54
			2	5,73	1025,82
			3	5,61	896,07
			4	5,48	912,33
		0,62	1	6,21	1156,88
			2	6,01	1075,88
			3	5,87	937,48
			4	5,72	951,91
10	в центре градирни	0,98	1	6,09	272,40
			2	6,00	279,52
			3	5,95	228,20
			4	5,84	261,26
		0,62	1	6,43	287,57
			2	6,32	294,63
			3	6,26	240,31
			4	6,13	274,57
	у стенок башни	0,98	1	6,00	268,32
			2	5,87	273,57
			3	5,79	222,17
			4	5,69	254,47
		0,62	1	6,32	282,81
			2	6,17	287,69
			3	6,08	233,28
			4	5,96	266,66

Таблица 2.12 – Результаты расчетов потерь давления в коллекторах для градирни БГ-2300 Сызранской ТЭЦ

Скорость газов в кольцевом коллекторе w_n , м/с	Расположение коллекторов	Коэффициент расхода μ	Количество коллекторов	Коэффициент местного сопротивления ζ	Потери давления Δp , Па
1	2	3	4	5	6
30	в центре градирни	0,98	1	6,03	2461,11
			2	5,93	2382,64
			3	5,87	2340,92
			4	5,75	2064,48
		0,62	1	6,03	2461,11
			2	5,93	2382,64
			3	5,87	2340,92
			4	5,75	2064,48
	у стенок башни	0,98	1	5,85	2385,08
			2	5,65	2270,22
			3	5,48	2186,12
			4	5,36	1926,19
		0,62	1	5,85	2385,08
			2	5,65	2270,22
			3	5,48	2186,12
			4	5,36	1926,19
20	в центре градирни	0,98	1	6,06	1095,18
			2	5,97	1057,33
			3	5,91	965,97
			4	5,79	1046,49
		0,62	1	6,40	1155,63
			2	6,28	1113,82
			3	6,22	1016,61
			4	6,08	1098,85
	у стенок башни	0,98	1	5,92	1069,50
			2	5,76	1020,60
			3	5,64	920,84
			4	5,50	994,51
		0,62	1	6,23	1125,69
			2	6,04	1070,98
			3	5,90	963,98
			4	5,75	1038,22
10	в центре градирни	0,98	1	6,09	270,08
			2	6,01	271,57
			3	5,96	237,92
			4	5,86	259,49

Продолжение таблицы 2.12

1	2	3	4	5	6
10	в центре градирни	0,62	1	6,44	285,16
			2	6,34	286,31
			3	6,28	250,60
			4	6,16	272,81
	у стенок башни	0,98	1	6,01	266,22
			2	5,89	266,17
			3	5,81	231,95
			4	5,72	253,28
		0,62	1	6,33	280,66
			2	6,20	295,88
			3	6,10	257,44
			4	5,99	280,62

Результаты проведенных расчетов показали, что оптимальной является скорость газов в коллекторе 10 м/с, т. к. повышение скорости газов до 20 и 30 м/с приводит к значительному увеличению потерь давления. Рекомендуется к исполнению на практике система газораспределения с тремя кольцевыми газовыми коллекторами и их центральным расположением по сечению вытяжной башни градирни с естественной тягой. В этом случае площадь перекрываемого системой газораспределения сечения вытяжной башни градирни составляет 593,46 м² (28 % от площади сечения вытяжной башни градирни на уровне расположения газовых кольцевых коллекторов), что меньше по сравнению с системой с четырьмя кольцевыми коллекторами на 21,7 %. При центральном расположении газораспределительных коллекторов по сравнению с их расположением у стенок башни площадь перекрываемого сечения вытяжной башни градирни снижается на 85,7 %.

2.2. Расчет газового тракта

На Самарской ТЭЦ отвод уходящих газов от трех энергетических котлов типа БКЗ-420-140 НГМ осуществляется через дымовую трубу ст. № 1 высотой 180 м. При применении системы отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни необходимо выполнить аэродинамический расчет газового тракта (рисунок 2.9) для подбора оборудования.

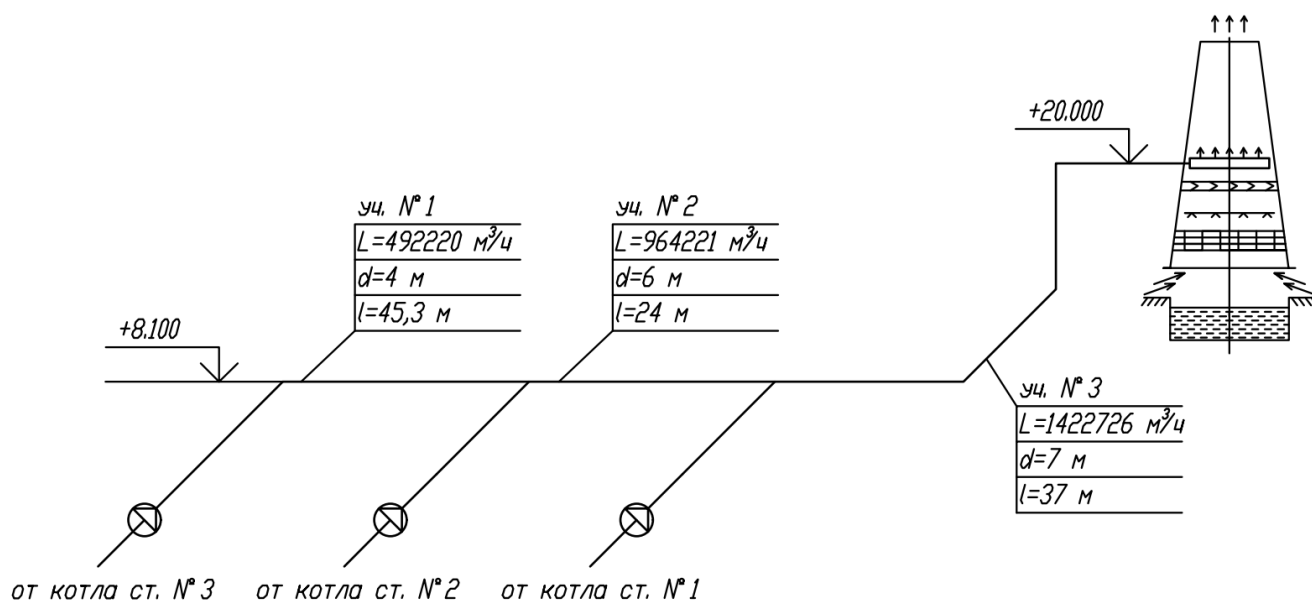


Рисунок 2.9 – Аксонометрическая схема газового тракта

Потери давления в газоходах $\Delta p_{\text{газ}}$, Па, складываются из потерь давления на трение $\Delta p_{\text{тр}}$, Па и потерь в местных сопротивлениях $\Delta p_{\text{мс}}$, Па [89–92; 101]:

$$\Delta p_{\text{газ}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{мс}}. \quad (2.35)$$

Потери давления на трение $\Delta p_{\text{тр}}$, Па [101]:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2 \rho}{2}, \quad (2.36)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения [101]; l – длина газохода, м; d – диаметр газохода, м; W – скорость уходящих газов, м/с; ρ – плотность уходящих газов, кг/м³.

Потери давления в местных сопротивлениях определяются по формуле:

$$\Delta p_{\text{мс}} = \Sigma \zeta \cdot \frac{W^2 \rho}{2}, \quad (2.37)$$

где $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений [101].

Результаты аэродинамического расчета газоходов представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Аэродинамический расчет газопроводов

№ участка	Расход газов на участке $G_r, \text{ м}^3/\text{ч}$	Длина газопровода, $L, \text{ м}$	Диаметр газопровода, $d, \text{ м}$	Скорость газов $W, \text{ м/с}$	Сумма коэффициентов местных сопротивлений $\Sigma \zeta$	Потери давления на трение $\Delta p_{\text{тр}}, \text{ Па}$	Потери давления в местных сопротивлениях $\Delta p_{\text{мс}}, \text{ Па}$	Сопротивление газопроводов $\Delta p_{\text{газ}}, \text{ Па}$
1	492220	45,3	4	10,89	0,8	11,86	37,25	49,11
2	964221	24	6	9,48	0,5	3,17	19,84	23,01
3	1422726	37	7	10,27	1,4	4,92	65,19	70,11
4	1422726	–	–	–	–	–	–	250,60
Сумма								392,82

Сопротивление газового тракта $\Delta p_{\text{т}}, \text{ Па}$:

$$\Delta p_{\text{т}} = \Delta p_{\text{к}} + \Sigma \Delta p_{\text{газ}}, \quad (2.38)$$

где $\Delta p_{\text{к}}$ – аэродинамическое сопротивление газового тракта котельного агрегата, Па.

Перепад давлений по газовому тракту $\Delta p_{\text{п}}, \text{ Па}$:

$$\Delta p_{\text{п}} = p_{\text{т}}'' + \Delta p_{\text{т}} - \Delta p_{\text{гр}}, \quad (2.39)$$

где $p_{\text{т}}''$ – разрежение дымовых газов на выходе из топки, Па; $\Delta p_{\text{гр}}$ – самотяга гравитации, Па.

Расчетный расход дымососа $L_{\text{р}}, \text{ м}^3/\text{ч}$:

$$L_{\text{р}} = \beta_1 \cdot L_{\text{г}}, \quad (2.40)$$

где β_1 – коэффициент запаса по производительности.

Расчетное давление дымососа $p_{\text{р}}, \text{ Па}$:

$$p_{\text{р}} = \beta_2 \cdot \Delta p_{\text{п}}, \quad (2.41)$$

где β_2 – коэффициент запаса по производительности.

Приведенное давление дымососа $p_{\text{р}}^{\text{пр}}, \text{ Па}$:

$$p_{\text{р}}^{\text{пр}} = K \cdot \Delta p_{\text{п}}, \quad (2.42)$$

В результате расчета получено:

– расчетный расход дымососа $L_{\text{р}} = 541442 \text{ м}^3/\text{ч}$;

– приведенное давление дымососа $p_{\text{р}}^{\text{пр}} = 4683,9 \text{ Па}$.

К установке рекомендуется дымосос ДОД 28,5-ИГМ.

2.3. Расчет тепло- и массообменных процессов при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни

Расчет тепло- и массообменных процессов [102–106] при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни выполнен по методике, разработанной на кафедре Тепловые электрические станции Самарского государственного технического университета [79; 82]. Методика расчета процессов тепло- и массообмена газовой смеси в вытяжной башне градирни заключается в определении температуры воды и газовой смеси (или воздуха) на выходе из градирни методом последовательных приближений. Задавшись температурой газовой смеси (или воздуха) на выходе из вытяжной башни градирни, определяется самотяга вытяжной башни градирни. Из равенства самотяги и аэродинамического сопротивления вытяжной башни градирни рассчитываются скорость и расход газовой смеси (или воздуха). Полученные значения температур газовой смеси и циркуляционной воды на выходе из вытяжной башни градирни сравниваются с принятыми ранее значениями этих параметров и при необходимости расчет повторяется.

Исходными данными для расчета являются: площадь оросителя $F_{ор}$, м²; высота оросителя $H_{ор}$, м; высота градирни $H_{гр}$, м; диаметр основания башни $D_{осн}$, м; диаметр устья $D_{уст}$, м; высота воздухоходных окон $H_{ок}$, м; площадь воздухоходных окон $F_{ок}$, м²; температура наружного воздуха ϑ_1 , °С; относительная влажность наружного воздуха φ_1 , %; барометрическое давление p_6 , кПа; температура охлаждаемой (циркуляционной) воды на входе в градирню t_1 , °С; расход циркуляционной воды $G_ж$, м³/ч; расход уходящих газов $G_г$, кг/с; температура уходящих газов $t_г$, °С.

Расчет выполнялся на ЭВМ с использованием специально разработанной программы ("Модуль расчета башенной градирни", свидетельство о регистрации № 2021619294) [107]. Модуль расчета башенной градирни позволяет определять параметры циркуляционной воды в зависимости от температуры наружного воз-

духа, количества и температуры уходящих газов и температуры смеси воздуха и газов на выходе из вытяжной башни градирни с естественной тягой, совмещенной с системой отвода уходящих продуктов сгорания котельных установок различного назначения.

Программа разработана на языке программирования C++ с использованием дополнительных возможностей фреймворка *Qt*. Интерфейс представляет собой два окна: исходные и расчетные данные с наполнением в виде текстовых полей и кнопок (рисунок 2.10). В первом окне расположены исходные данные, требующие ручного ввода. Во втором окне большая часть данных представляет собой автоматически рассчитываемые программой значения по нажатию кнопки обновления «Рассчитать».

В программе заложены 2 этапа проверки. Задавшись температурами воздуха и газовоздушной смеси на выходе из градирни, на первом этапе проверяется правильность определения расчетного значения расхода воздуха. Если расход воздуха определен неверно, появится сигнальное сообщение «Ошибка в расчете расхода воздуха». В этом случае необходимо перезадаваться значением температуры смеси и выполнить расчет заново. На втором этапе проверяется правильность заданного значения температуры циркуляционной воды на выходе из градирни. Заданное значение может отличаться от расчетного, не более чем на 1,3 %. В случае превышения погрешности появляется сигнальное сообщение «Большая погрешность между принимаемыми и полученными величинами!». Если все значения подходят под установленные программой ограничения, расчет считается выполненным. После этого пользователь может продолжить изменять данные, пересчитывать и проверять значения [108].

MainWindow
— □ ×

Исходные данные

Расчёт

<p>Площадь оросителя <input type="text" value="2600"/> м²</p> <p>Высота градирни <input type="text" value="72"/> м</p> <p>Высота воздухоподных <input type="text" value="4.3"/> м</p> <p>Диаметр основания <input type="text" value="58"/> м D сверху окон <input type="text" value="56.75"/> <input type="text" value="57.375"/> м</p> <p>Диаметр устья <input type="text" value="37"/> м</p> <p>Температура воздуха <input type="text" value="30"/> С</p> <p>Температура охлаждаемой воды <input type="text" value="37.5"/> С</p> <p>Отн. влажность воздуха <input type="text" value="0.46"/></p> <p>Баром. давление <input type="text" value="751"/> мм.рт.ст. <input type="text" value="0210.3"/> кгс/м² <input type="text" value="99.883"/> кПа</p> <p>Расход воды <input type="text" value="13750"/> м³/ч</p> <p>Плотность орошения <input type="text" value="5.28846"/> м³/м²·ч</p> <p>Высота расположения газораспр-ля <input type="text" value=""/> м</p> <p>Высота газораспределителя <input type="text" value=""/> м</p> <p>Расход дымовых газов <input type="text" value="363.98"/> кг/с</p> <p>Температура дымовых газов <input type="text" value="110"/> С</p>	<p>Диаметр градирни в оросит. части <input type="text" value="57.5169"/> м</p> <p>Половина длины воздухораспр-ля <input type="text" value="14.3792"/> м</p> <p>Площадь окон <input type="text" value="658.476"/> м²</p> <p>Отн. площ. окон к площ. оросителя <input type="text" value="0.25326"/></p> <p>Высота оросителя <input type="text" value="1"/> м</p> <p>Высота башни градир <input type="text" value="66.7"/> м</p> <p>Принятая темпер смеси на выходе <input type="text" value="42.6"/> С</p> <p>Принятая темпер возд на выходе <input type="text" value="33.1"/> С</p> <p>Парц давление насыщ вод паров при:</p> <p> ϕ 1 <input type="text" value="433"/> кгс/м²</p> <p> ϕ 2 см <input type="text" value="887"/> кгс/м²</p> <p>Плотность насыщ вод паров при:</p> <p> ϕ 1 <input type="text" value="0.0303"/> кг/м³</p> <p> ϕ 2 см <input type="text" value="0.05972"/> кг/м³</p> <p>Плотность воздуха начальная <input type="text" value="1.14218"/> кг/м³</p> <p>Газ. пост. для воздуха <input type="text" value="29.27"/> кгс·м/кг·°К</p> <p>Плотность воздуха конечная <input type="text" value="1.06852"/> кг/м³</p> <p>Отн. вла воздуха (на выходе из град) <input type="text" value="1"/></p>	<p>Коэф сопротивлен оросителя <input type="text" value="18.2"/></p> <p>Общ коэф. сопротивления <input type="text" value="45.5"/></p> <p>Санотяга градирни <input type="text" value="48.1977"/> Па</p> <p>Средн. плотность воздуха ρ ср <input type="text" value="1.10535"/></p> <p>Кξ <input type="text" value="1.1"/></p> <p>Скор воздуха в свободном сечен <input type="text" value="1.32001"/> м/с</p> <p>Расход смеси <input type="text" value="2948.23"/> кг/с</p> <p>Расход воздуха <input type="text" value="2584.25"/></p> <p>Средн площадь попереч сеч башни <input type="text" value="1771.16"/> м²</p> <p>Удельн расход воздуха <input type="text" value="0.676604"/></p> <p>Темп возд по смоч термометру <input type="text" value="17.5"/> С</p> <p>Характеристики оросителя:</p> <p> A <input type="text" value="1.41"/></p> <p> m <input type="text" value="0.54"/></p> <p>Теплоемкость воды <input type="text" value="4.19"/> кДж/(кг·°К)</p> <p>Теплота парообразования <input type="text" value="2493"/> кДж/кг</p> <p>Приняена темп воды на выходе <input type="text" value="29.1"/> С</p> <p>Вспомогат коэф <input type="text" value="0.951091"/></p> <p>Плотность воздуха при ϕ 1 <input type="text" value="1.16502"/> кг/м³</p>	<p>Давление насыщения пара при:</p> <p> t 1 <input type="text" value="658"/> кгс/м²</p> <p> t 2 <input type="text" value="410.5"/> кгс/м²</p> <p>Плотность пара при:</p> <p> t 1 <input type="text" value="0.04515"/> кг/м³</p> <p> t 2 <input type="text" value="0.02886"/> кг/м³</p> <p>Средн. температура воды <input type="text" value="33.3"/> С</p> <p>Давление и плотн насыщ пара при:</p> <p> t m <input type="text" value="521.7"/> кгс/м²</p> <p> <input type="text" value="0.03627"/> кг/м³</p> <p>Разность температур воды в градирне <input type="text" value="8.4"/> С</p> <p>Величины удельных энтальпий воздуха</p> <p> h° 1 <input type="text" value="147.817"/> кДж/кг</p> <p> h° 2 <input type="text" value="95.5447"/> кДж/кг</p> <p> h 1 <input type="text" value="61.5277"/> кДж/кг</p> <p> h° m <input type="text" value="119.215"/> кДж/кг</p> <p>Поправка к энтальпии <input type="text" value="1.23293"/> кДж/кг</p> <p>Энтальпия воздуха на выходе <input type="text" value="116.221"/> кДж/кг</p> <p>Средн разность энтальпий <input type="text" value="31.5581"/> кДж/кг</p>	<p>Темп охлажденной воды <input type="text" value="29.3207"/> С</p> <p>Погреш между прин и получ величинами <input type="text" value="0.00752711"/></p> <p>Объемн коэф массоотдачи <input type="text" value="6.0385"/> кг/(м³·ч)</p> <p>Me <input type="text" value="1.14183"/></p> <p><input type="text" value="1.14354"/></p> <p><input type="text" value="1.14183"/></p>
---	---	---	---	--

Рисунок 2.10 – Главная форма модуля расчета башенной градирни

В программе заложен оптимальный алгоритм действий для расчета системы отвода уходящих газов теплогенерирующих установок через градирню с естественной тягой с максимальной эффективностью [108] (рисунок 2.11.).

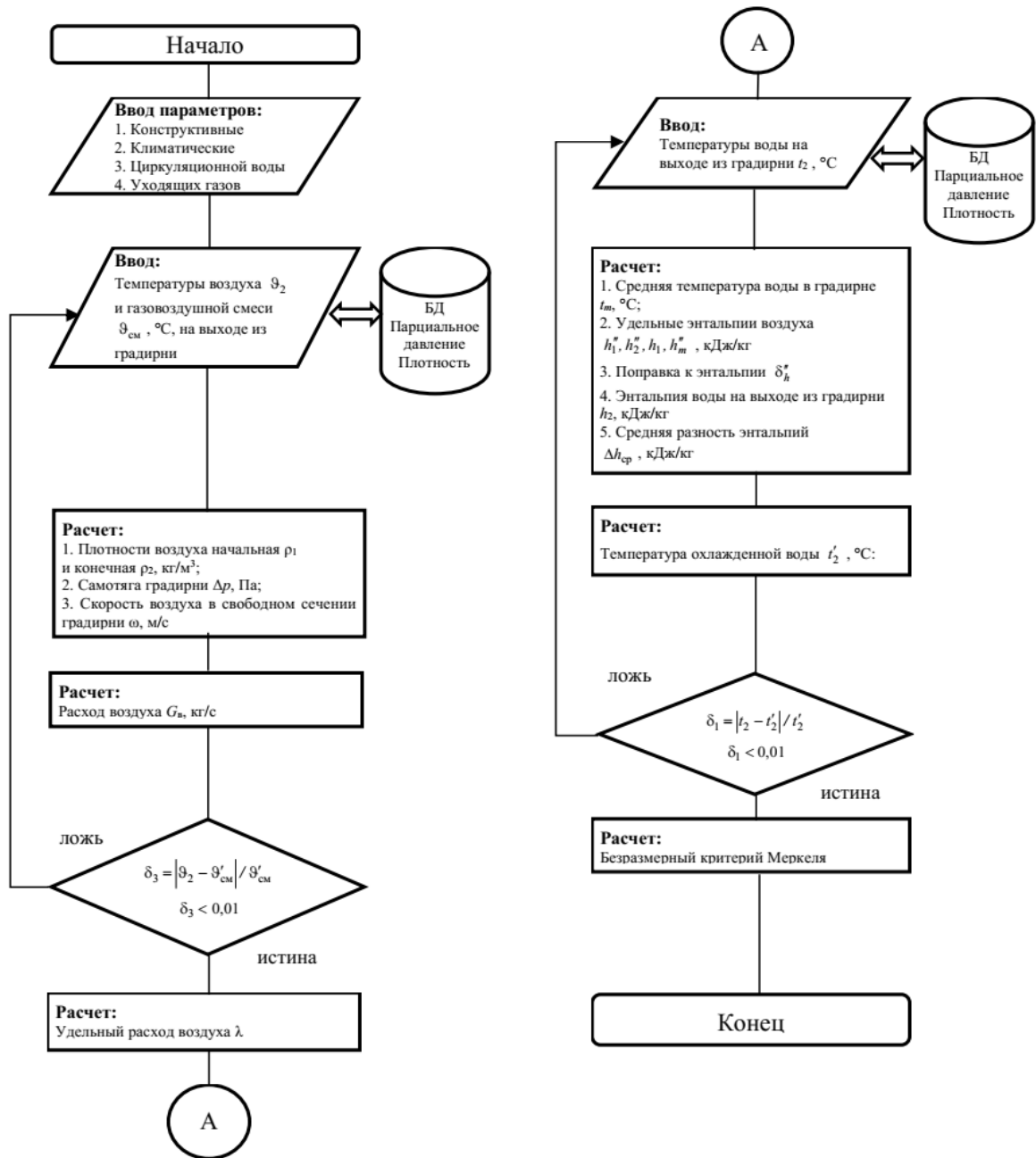


Рисунок 2.11 – Схема алгоритма математической модели расчета процессов тепло- и массообмена в вытяжной башне градирни

Исходными данными для расчета тепло- и массообменных процессов являются: геометрические параметры градирни, климатические параметры, расход и температура циркуляционной воды, расход и температура уходящих продуктов сгорания (таблица 2.14).

Таблица 2.14 – Исходные данные для расчета башенной градирни

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
Площадь оросителя	$F_{ор}$	м ²	2600
Высота оросителя	$H_{ор}$	м	1
Высота градирни	$H_{гр}$	м	72
Диаметр основания башни градирни	$D_{осн}$	м	58
Диаметр устья башни градирни	$D_{уст}$	м	37
Высота воздухоходных окон	$H_{ок}$	м	4,3
Площадь воздухоходных окон	$F_{ок}$	м ²	658,48
Температура воздуха	ϑ_1	°С	25,5
Относительная влажность воздуха	φ_1	%	46
Барометрическое давление	$p_б$	мм рт. ст.	751
Температура охлаждаемой воды	t_1	°С	36
Расход воды	$G_ж$	м ³ /ч	13750
Расход уходящих газов	$G_г$	кг/с	363,98
Температура уходящих газов	$t_г$	°С	110

Результаты расчета для двух режимов работы градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Результаты расчета башенной градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение параметра	
			без отвода газов через вытяжную башню градирни	с отводом газов через вытяжную башню градирни
1	2	3	4	5
Принятая температура воздуха (газовоздушной смеси) на выходе из градирни	ϑ_2	°С	32,3	40,4
Самотяга градирни	Δp	Па	26,26	53,45
Скорость воздуха в свободном сечении градирни при $k_{\xi}=1,1$	ω	м/с	0,959	1,381
Расход воздуха	$G_в$	кс/с	1938,26	2740,13
Принятая температура воды на выходе из градирни	t_2	°С	28,8	27
Разность температур в градирне	Δt	°С	7,2	9
Температура охлажденной воды	t'_2	°С	28,6943	27,1847

Продолжение таблицы 2.15

1	2	3	4	5
Погрешность между принятой и полученной температурами циркуляционной воды на выходе из градирни	δ_1	–	0,0037	0,0067
Безразмерный критерий Меркеля	Me	–	0,97	1,18
Температура воздуха на выходе из оросителя	ϑ'_2	°С	32,204	31,089
Погрешность между принятой и полученной температурами воздушного потока на выходе из градирни	δ_2	–	0,00297	–
Расход выходящей из градирни газовой смеси	$G_{см}$	кг/с	–	3104,11
Температура газовой смеси на выходе из градирни (при расчетах принято $c_B \approx c_T \approx c_{см}$)	$\vartheta'_{см}$	°С	–	40,34
Погрешность между принятой и полученной температурами выходящей из градирни газовой смеси	δ_3	–	–	0,001487

Результаты расчета процессов тепло- и массообмена для классической башенной градирни БГ-2600, выполненного с помощью разработанной программы ЭВМ, сравнивались с фактическими данными испытаний градирен Самарской ТЭЦ и нормативными характеристиками («Типовой проект градирни площадью орошения 2600 кв. м»). Значение температуры охлажденной воды на выходе из градирни, полученное в результате расчета, выполненного с помощью программы ЭВМ, составляет 28,8 °С, фактическая температура 31 °С, нормативная 28,9 °С. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными и нормативными данными.

Анализ результатов расчетов процессов тепло- и массообмена, приведенных в таблице 2.15, показал, что при применении отвода уходящих газов от трех энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ через вытяжную башню градирни возраста-

ют температура отводимого воздуха (смеси воздуха с газами) с 32,4 до 40,4 °С (на 8 °С), самотяга Δp – с 26,26 до 53,45 Па (на 27,19 Па), скорость воздуха в свободном сечении градирни – с 0,96 до 1,38 м/с (на 0,42 м/с), расход воздуха через ороситель – с 1938,26 до 2740,13 кг/с (на 801,87 кг/с). При этом температура циркуляционной воды t_2 на выходе из градирни снижается с 28,8 до 27 °С – на 1,8 °С.

Аналогично выполнены расчеты для других значений температур наружного воздуха теплого периода (от 30 до 20 °С) [108; 109]. Основные результаты расчетов представлены в таблице 2.16. и на рисунке 2.12.

Таблица 2.16 – Результаты расчета башенной градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ в диапазоне температур наружного воздуха от 20 до 30 °С

Температура наружного воздуха t_n , °С	Температура циркуляционной воды, °С			Разность температур, °С
	На входе в градирню	На выходе из градирни		
		Классическая градирня	Модернизированная градирня	
1	2	3	4	5
30	37,5	30,9	29,1	1,8
29	37,2	30,5	28,7	1,8
28	36,9	30,2	28,4	1,8
27	36,7	29,9	28,1	1,8
26	36,3	29,3	27,5	1,8
25,5	36,0	28,8	27,0	1,8
25	35,7	28,3	26,6	1,7
24	35,4	27,9	26,2	1,7
23	35,0	27,6	26,0	1,6
22	34,8	27,0	25,4	1,6
21	34,6	26,6	25,2	1,4
20	34,4	26,2	24,8	1,4

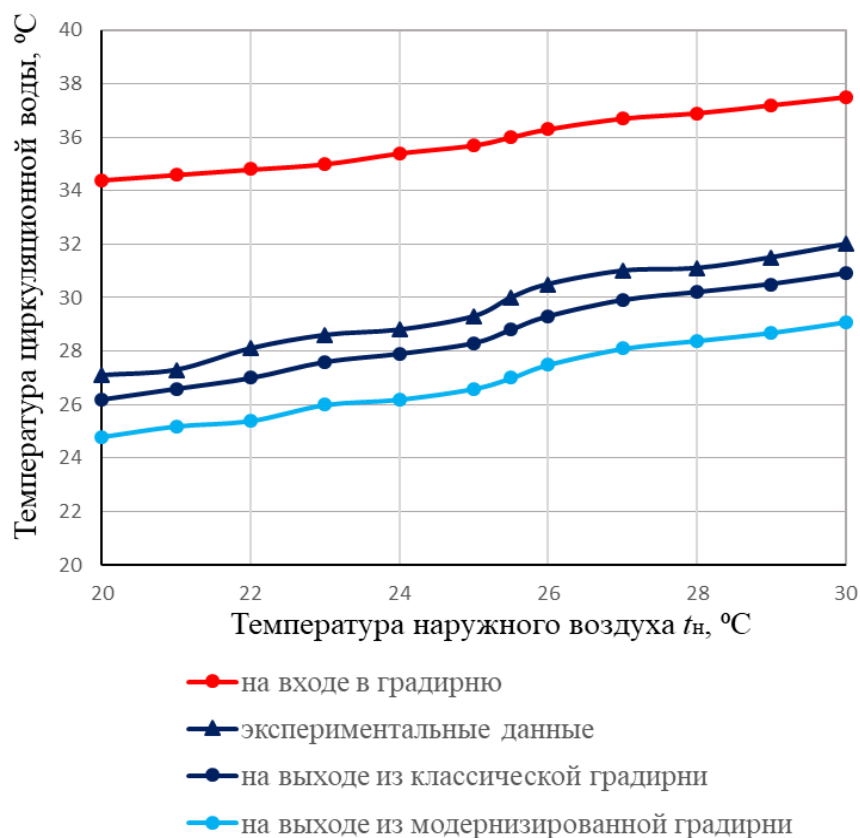


Рисунок 2.12 – Зависимость температуры циркуляционной воды от t_n

Анализ результатов расчетов, представленных на графиках (см. рисунок 2.12), показывает, что при изменении температуры наружного воздуха от +20 до +30 °C температура циркуляционной воды на выходе из градирни повышается с 26,2 до 30,9 °C. При отводе уходящих газов котельных установок через градирню эффект охлаждения циркуляционной воды повышается. При этом снижение температуры циркуляционной воды составляет 1,4 °C и 1,8 °C при $t_n=20$ и $t_n=30$ °C соответственно.

2.4. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни

Для анализа рассчитанных процессов тепло- и массообмена при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни выполнено численное моделирование в среде OpenFOAM.

Принятая расчетная область представляет собой упрощенный внутренний объем градирни, оборудованной кольцевыми газораспределителями равномерной раздачи (рисунок 2.13).

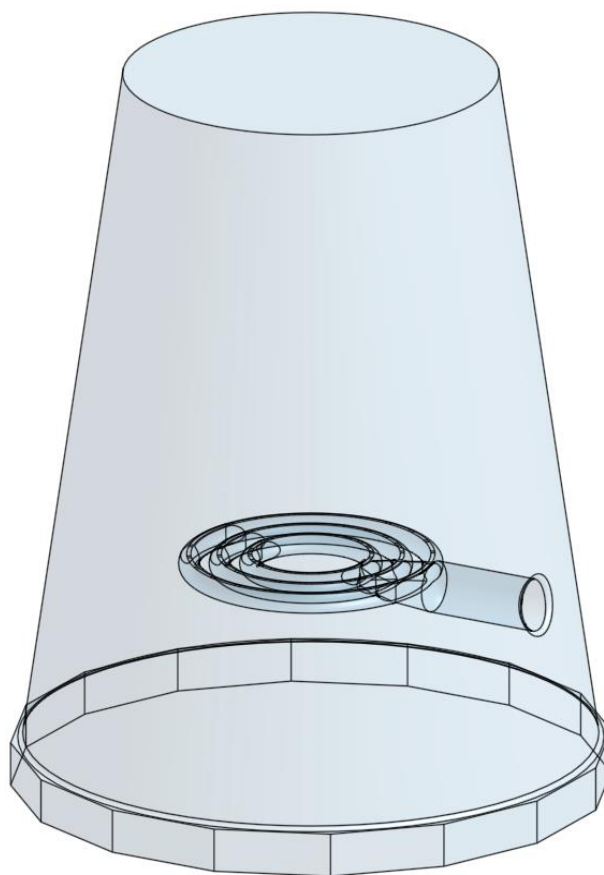


Рисунок 2.13 – Геометрия расчетной области

Газораспределитель представлен тремя кольцевыми газоходами с осевыми диаметрами 13, 21 и 29 м. Диаметры газоходов равны 3 м. Кольцевые газоходы расположены над каплеуловителем.

Расчетная сетка (рисунок 2.14) была сформирована по алгоритму NETGEN [110] из 535 000 пирамидальных ячеек, средний объем которых составлял $2,4 \text{ см}^3$. Гистограммы распределения соотношения сторон представлены на рисунке 2.15.

Для упрощения расчетной сетки отверстия в кольцевых газоходах выполнены плоскими. Для этого верхняя часть этих газоходов была срезана по высоте на 20 мм, а в полученной плоскости выделены отверстия.

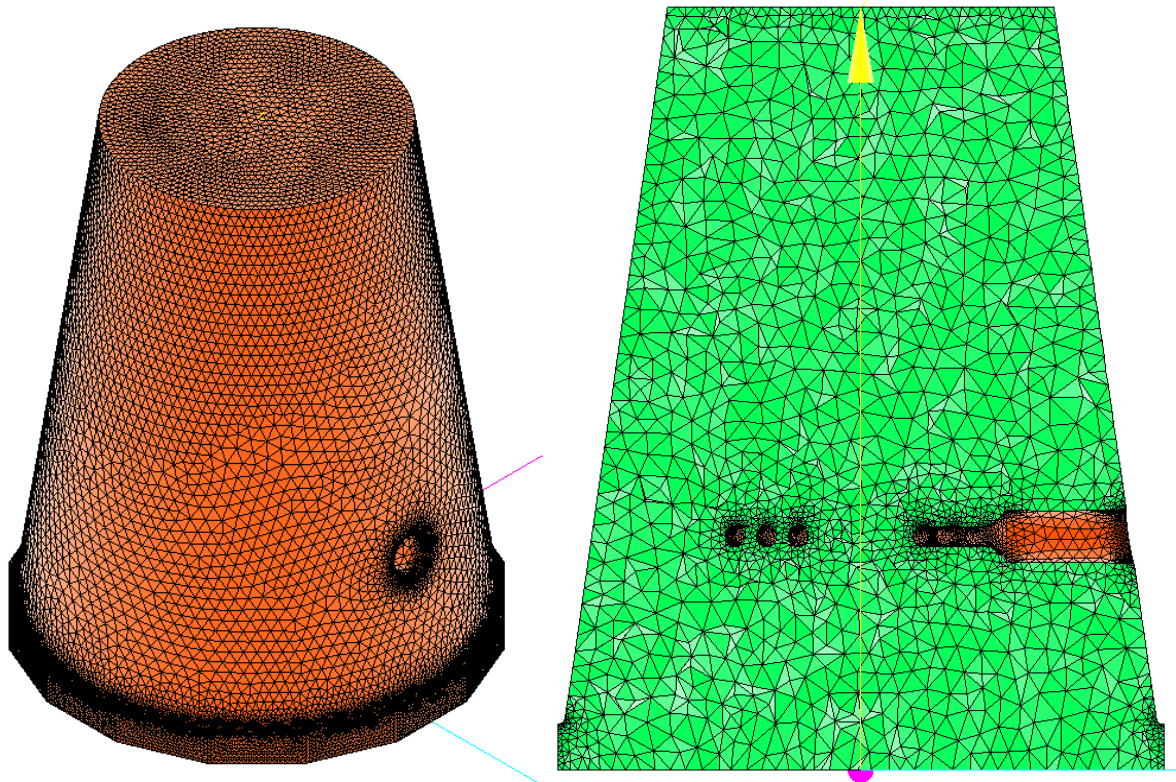


Рисунок 2.14 – Расчетная сетка: общий вид (слева) и разрез (справа)

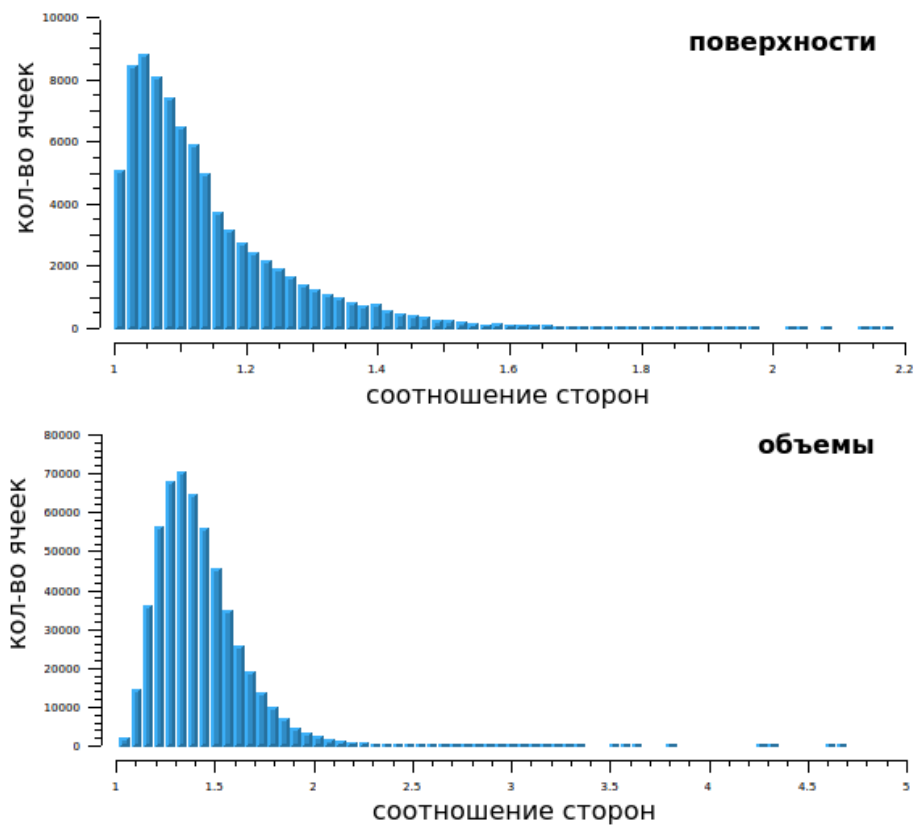


Рисунок 2.15 – Соотношения сторон для поверхностей и объемов ячеек

Численная модель процесса была основана на системе уравнений Навье-Стокса в стационарной постановке.

Для выходных отверстий в газоходах заданы граничные условия первого рода: расход ($G_T = 364$ кг/с), температура ($t_T = 110$ °С) и концентрация уходящих газов ($\psi = 1$).

В объеме вытяжной башни градирни происходит взаимодействие газового потока с воздухом, осуществляется одновременно (совместно) конвективный перенос вещества, молекулярная диффузия и теплообмен, то есть протекает диффузионный тепло - и массообмен. Рассматриваются граничные условия четвертого рода при наличии диффузионной составляющей теплового потока.

На остальных поверхностях (стенках) были заданы условия прилипания (нулевой скорости) и нулевого градиента (отсутствие теплообмена с окружающей средой).

Естественная конвекция и тяга были воссозданы за счет учета действия гравитационной силы и перепада гидростатического давления. Также были учтены зависимости теплофизических свойств компонентов рабочей среды (влажного воздуха и дымовых газов) от температуры. Зависимости свойств теплоносителей от давления не учитывались, поскольку относительный диапазон рабочих давлений составлял менее 0,2 %.

Плотности влажного воздуха и дымовых газов определялись по закону идеального газа для несжимаемых сред: $\rho = \frac{p_{ref}}{RT}$, где $p_{ref} = 101233$ Па – референсное значение давления, которое было подобрано для наибольшего соответствия фактической зависимости плотности от температуры в диапазоне 25-110 °С. Значения индивидуальной газовой постоянной ($R = 292$ Дж/кг К для влажного воздуха и $R = 272$ Дж/кг К для дымовых газов) были определены на основании молярных масс.

Зависимости теплоемкости, теплопроводности и вязкости от температуры для воздуха и газов описывались следующими уравнениями:

$$c_{pв} = 1,207e^6 - 15646,8T + 76,0595T^2 - 0,164315T^3 + 0,00013T^4; \quad (2.43)$$

$$c_{pr} = 966,425 + 0,275T; \quad (2.44)$$

$$\mu_b = 0,1901 - 0,002445T + 0,00001T^2 - 2,5114e^{-8}T^3 + 2,0062e^{-11}T^4; \quad (2.45)$$

$$\mu_r = 4,00783e^{-6} + 4,35e^{-8}T; \quad (2.46)$$

$$\lambda_b = 495,75 - 6,3761T + 0,0306872T^2 - 0,0000655T^3 + 5,23166e^{-8}T^4; \quad (2.47)$$

$$\lambda_r = -0,0008645 + 0,0000865T; \quad (2.48)$$

Для воссоздания гасящего воздействия орошающего потока воды в градирне была задана область с повышенным гидравлическим сопротивлением (пористость). Эта область была задана цилиндром диаметром 56,45 м и высотой 5,3 м, расположенным в основании расчетной области. Пористость была задана по модели Дарси-Форхгеймера с использованием значений коэффициента Дарси $d_{xy} = 20000 \text{ м}^{-2}$ в направлениях горизонтальной плоскости и $d_z = 40000 \text{ м}^{-2}$ в вертикальном направлении.

В результате моделирования были получены распределения температуры, давления, скорости рабочей среды (смеси влажного воздуха и дымовых газов). Основные результаты представлены на рисунках 2.16–2.18.

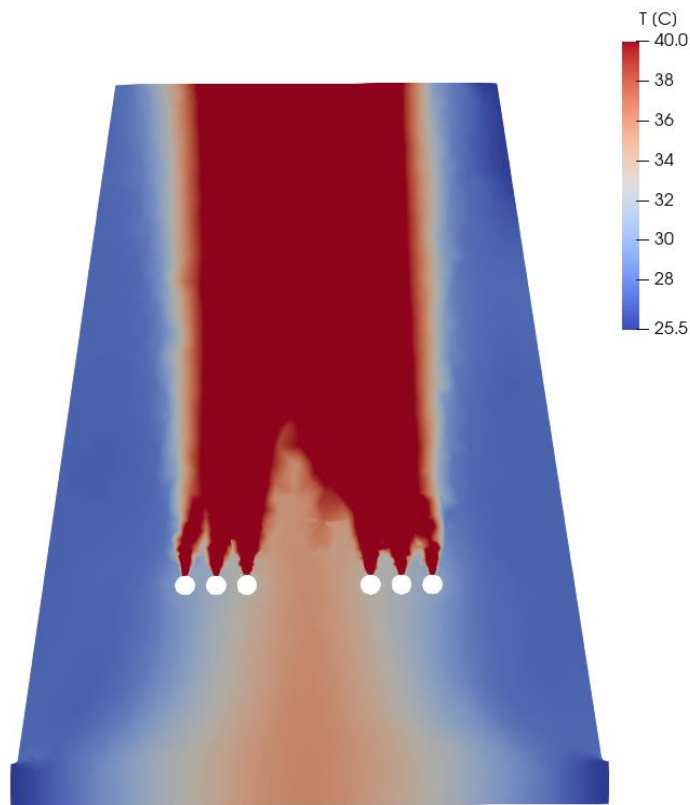


Рисунок 2.16 – Распределение температур в вытяжной башне градирни

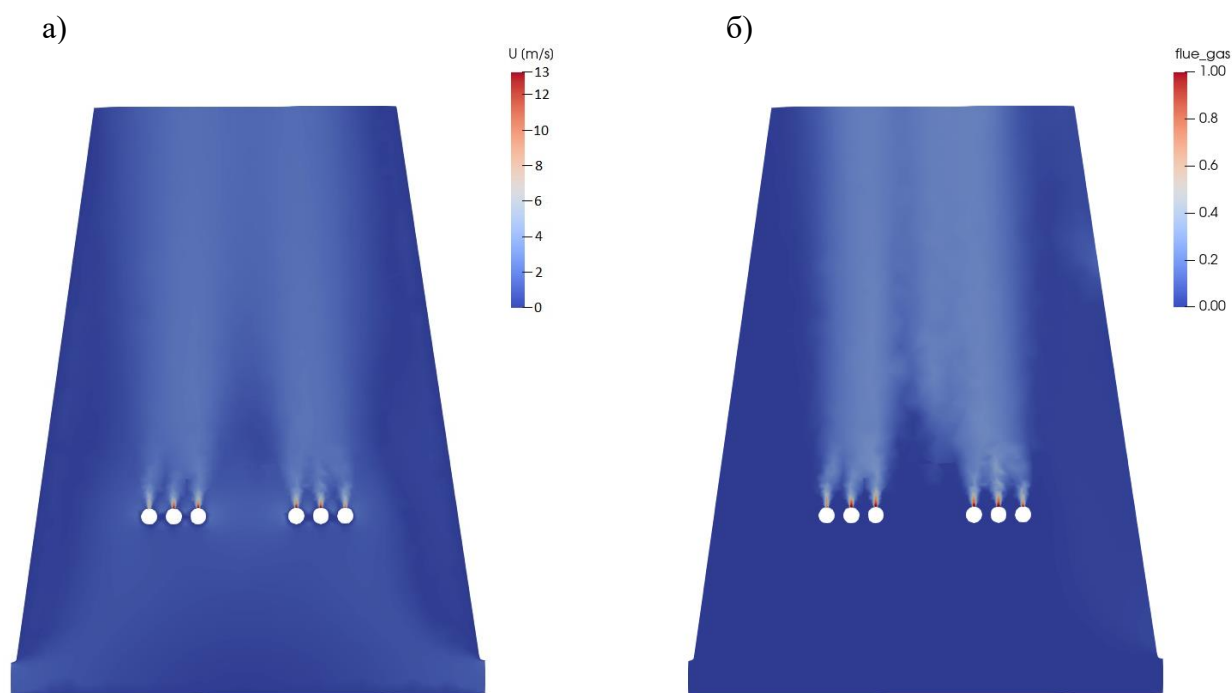


Рисунок 2.17 – Распределение скоростей газозвдушного потока (а) и долей уходящих газов (б) по объему вытяжной башни градирни

Анализ полученных результатов моделирования распределения температур и скоростей газозвдушной смеси в объеме вытяжной башни градирни, представленных на рисунках 2.16 – 2.17 показал, что при движении газов в вытяжной башне градирне происходит их смешение с влажным воздухом в центральной ее части. Причем, при температуре газов $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при скорости потока уходящих газов $13,72\text{ м/с}$ на выходе из газораспределителя, температура газозвдушной смеси в устье вытяжной башни градирни равна $40,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость потока газозвдушной смеси – $1,38\text{ м/с}$.

При этом основной поток уходящих газов движется в центральной части градирни, не соприкасаясь с ее стенками [111]. Таким образом, конденсация углекислоты на внутренней поверхности стенок башни градирни при принятых расчетных условиях не наблюдается.

Затем проводится верификация результатов для определения итерационной сходимости решения.

Стабилизация невязок при решении линеаризованных уравнений неразрывности, движения и энергии (рисунок 2.18) свидетельствует об итерационной схо-

димости полученного решения. Это подтверждает математическую корректность решения модели.

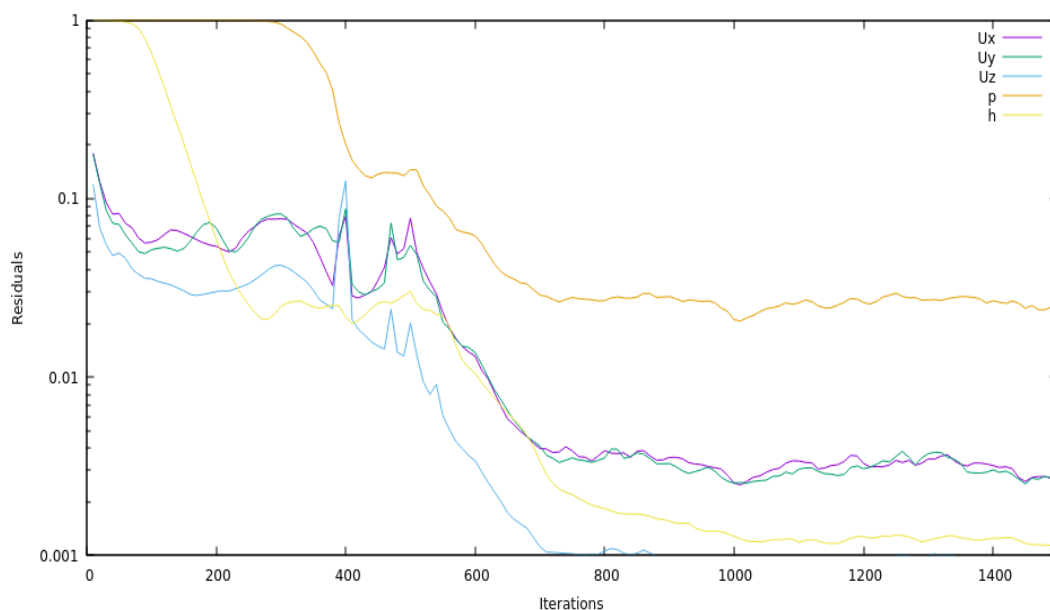


Рисунок 2.18 – Итерационная сходимость решения

Дополнительная верификация результатов моделирования проводилась путем сопоставления с имеющимися результатами инженерного расчета градирни. В качестве контрольных параметров использовались значения расходов забираемого из атмосферы воздуха и газовой смеси на выходе из градирни, а также температура влажного воздуха после оросителя. Результаты сопоставления приведены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Сопоставление результатов моделирования с расчетными значениями

Наименование параметра	Единица измерения	Расчетное значение	Модельное значение	Невязка
Расход воздуха (G_B)	кг/с	2740,13	2775	+1,3%
Расход газовой смеси (G_{CM})	кг/с	3104,11	3139	+1,1%
Температура воздуха на выходе из оросителя (ϑ'_2)	°C	31,1	31	-0,3%

Анализ полученных результатов моделирования распределения температур и скоростей газовой смеси в объеме градирни показал, что основной поток уходящих газов движется в центральной части градирни, не соприкасаясь с ее стенками. Таким образом, конденсация углекислоты на внутренней поверхности стенок башни градирни маловероятна.

2.5. Оценка вероятности выпадения конденсата из уходящих газов

Температура влажного воздуха после оросителя составляет 31,1 °С. Условием конденсации для влажного воздуха является температура $t \leq 31$ °С. При движении газовой смеси условие конденсации описывается формулой [102]

$$t \leq 31,1 + 23,9\overline{G}_r, \quad (2.49)$$

где \overline{G}_r – доля уходящих газов в газовой смеси.

Поэтому для газовой смеси использована линейная зависимость. На рисунке 2.19 показано распределение температур по объему вытяжной башни градирни в зависимости от доли уходящих газов в газовой смеси.

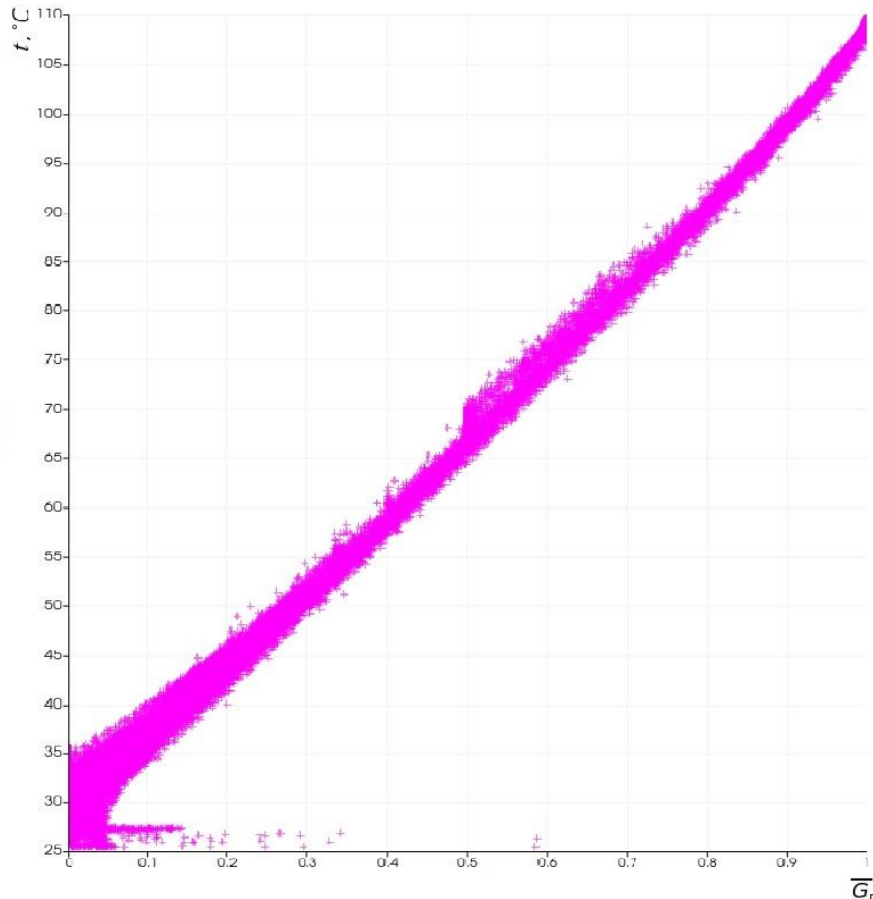


Рисунок 2.19 – Распределение температуры газовой смеси по объему градирни

Чтобы выделить ячейки, в которых справедливо условие (2.49), введем безразмерную температуру

$$t^* = (31,1 + 23,9\overline{G}_r) / t. \quad (2.50)$$

На рисунке 2.20 показано распределение безразмерных температур по объему вытяжной башни градирни в зависимости от доли уходящих газов в газовой-душной смеси.

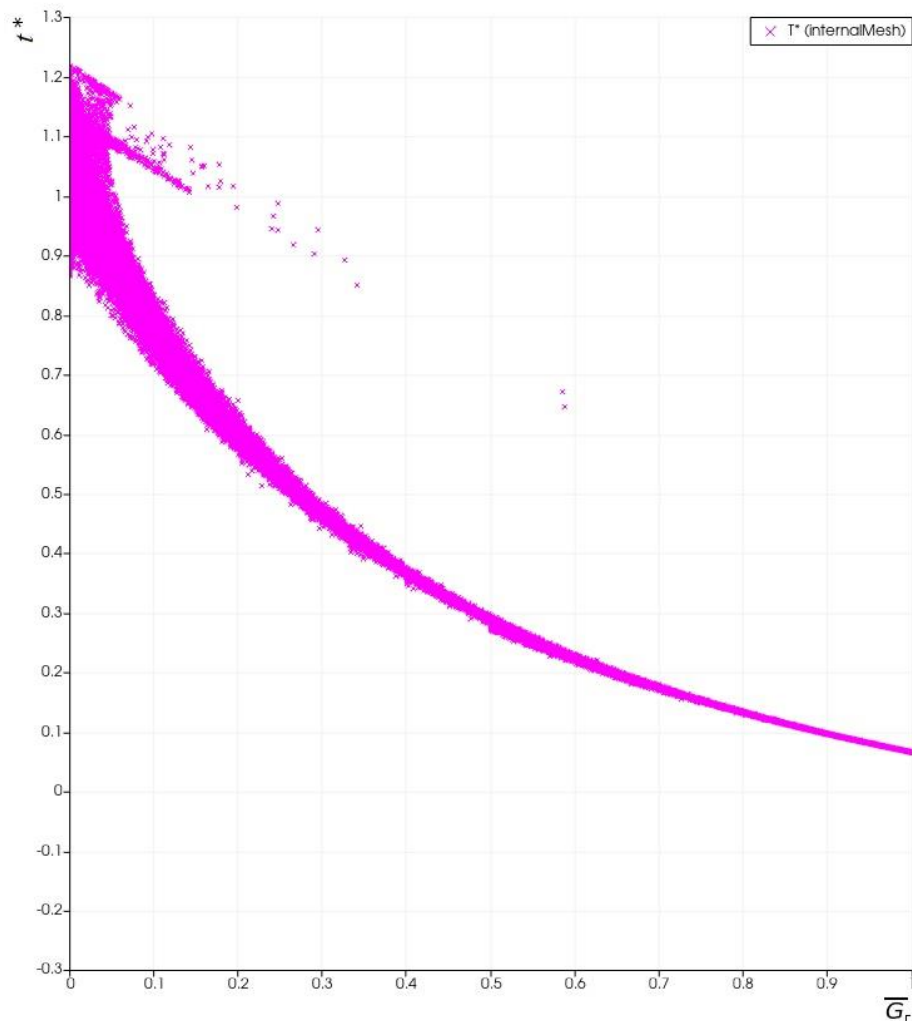


Рисунок 2.20 – Распределение безразмерной температуры газовой-душной смеси по объему вытяжной башни градирни

Отсекая зону орошения и зоны со значительной скоростью восходящего потока ($\omega > 0,1$ м/с), где конденсат будет уноситься из градирни в атмосферу, получаем объем конденсируемой части газовой-душной смеси, который составляет 14,5 % от общего объема градирни.

Используя полученную модель и зная объем каждой ячейки и долю дымовых газов, можно определить суммарный расход потенциально конденсирующихся уходящих газов, который при средней скорости движения газовой-душной смеси в градирне 1,381 м/с составит

$$G_r^k = 364 \cdot 0,145 = 52,78 \text{ кг/с.}$$

В уходящих газах природного газа, сжигаемого в энергетических котлах Самарской ТЭЦ, содержится 8,06 % диоксида углерода (CO_2). В этом случае максимально может образоваться угольная кислота (H_2CO_3) в количестве

$$G_{\text{H}_2\text{CO}_3} = 52,78 \cdot 0,0806 = 4,254 \text{ кг/с.}$$

Эффективность растворения CO_2 в воде составляет 0,88, при этом углекислый газ взаимодействует с водой частично с образованием угольной кислоты. Практически выход H_2CO_3 составляет не более 3,744 кг/с, что составляет 0,098 % от объема циркуляционной воды, разбрызгиваемой в градирне.

В градирне в связи с испарением воды из неё удаляется часть угольной кислоты и повышается концентрация ионов CO_3^{2-} , что приводит к возникновению условий для образования отложений CaCO_3 . Поэтому для оборотных систем охлаждения основной задачей является предотвращение образования кальциевых отложений. Для предотвращения выпадения CaCO_3 применяются следующие методы обработки охлаждающей воды: фосфатирование, подкисление и комбинированные методы [112–114].

Возможное выпадение углекислоты в процессе конденсации из газовой смеси водяных паров положительно повлияет на изменение количества ионов CO_3^{2-} в охлаждающей воде. При увеличении концентрации CO_2 в воде снижается концентрация гидрокарбонатного аниона HCO_3^- , что приводит к уменьшению содержания в воде потенциального накипеобразователя $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ [115]. Таким образом, внесение изменения в существующую схему обработки воды не требуется.

2.6. Расчет экономической эффективности

Температура охлаждаемой (циркуляционной) воды на входе в градирню $t_1=36$ °С. При недогреве циркуляционной воды в конденсаторе паровой турбины, равном 4 °С, температура насыщения $t_s=36+4=40$ °С и давление в конденсаторе $p_k=0,007384$ МПа. Для теплофикационной паровой турбины ПТ-60-130/13 (рисунок 2.21) Самарской ТЭЦ при отводе газов от трех энергетических котлов

БКЗ-420-140 НГМ в атмосферу через вытяжную башню градирни температура циркуляционной воды при её охлаждении в вытяжной башне градирни дополнительно понижается на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $t_{\text{н}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в таком случае давление в конденсаторе паровой турбины уменьшится и станет равным $0,006851\text{ МПа}$ и $0,006705\text{ МПа}$ соответственно.

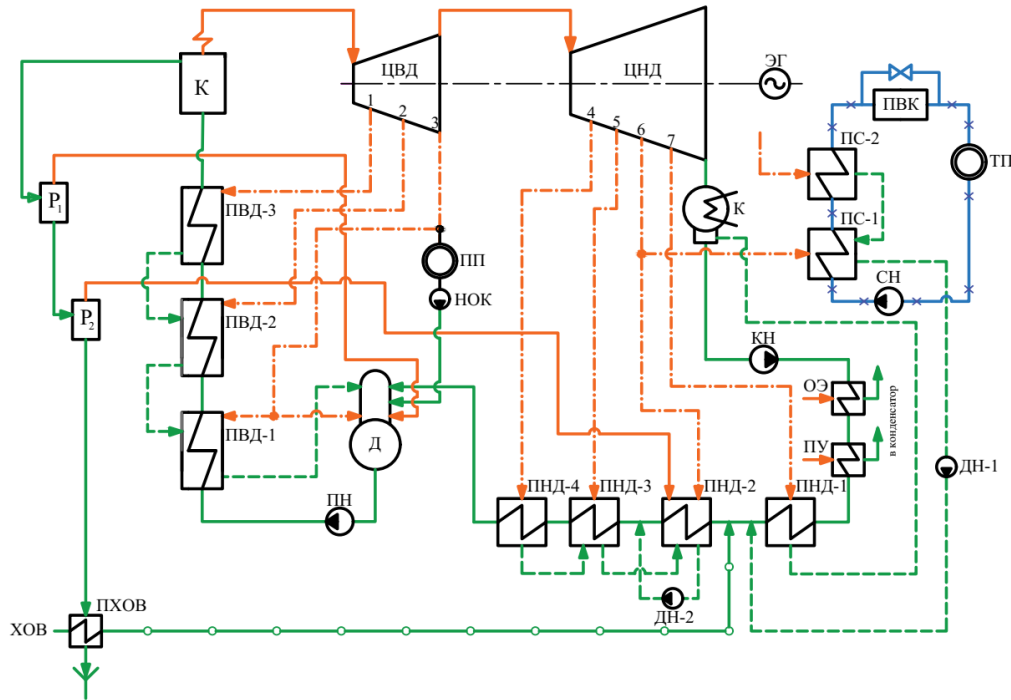


Рисунок 2.21 – Принципиальная тепловая схема турбоустановки ПТ-60-130/13

Расчет показателей экономической эффективности [116–121] выполнен для теплофикационной паровой турбины ПТ-60-130/13 производственного объединения турбостроения «Ленинградский металлический завод» (ПОТ ЛМЗ) с промышленным $D_{\text{п}} = 36,05\text{ кг/с}$ и теплофикационным $D_{\text{т}} = 19,55\text{ кг/с}$ отборами пара номинальной мощностью $N_{\text{ном}} = 60\text{ МВт}$.

Начальные параметры пара: давление $p_0 = 12,75\text{ МПа}$; температура $t_0 = 555\text{ }^{\circ}\text{C}$. Турбина предназначена для непосредственного привода электрического генератора ТВФ-80-2 с частотой вращения 50 с^{-1} и отпуска теплоты для нужд производства и отопления. Количество нерегулируемых отборов – 7. Номинальный расход пара $D_{0\text{ном}} = 92,5\text{ кг/с}$, максимальный $D_{0\text{макс}} = 107,5\text{ кг/с}$, температура питательной воды $t_{\text{пв}} = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход пара на деаэратор $D_{\text{д}} = 1,35\text{ кг/с}$.

Потери пара с утечками $D_{ут}$, кг/с, составляют:

$$D_{ут} = 0,027D_{0ном} \quad (2.51)$$

$$D_{ут} = 0,027 \cdot 92,5 = 2,4975 \text{ кг/с}.$$

Подогрев турбинного конденсата осуществляется последовательно в четырех регенеративных подогревателях низкого давления (ПНД) и в деаэраторе, а питательной воды в трех регенеративных подогревателях высокого давления (ПВД). Регенеративные подогреватели питаются паром из нерегулируемых отборов турбины.

Данные по регенеративным отборам приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Параметры пара регенеративных отборов

Подогреватели		Ступень турбины за которой отбирается пар	Параметры пара в камере отбора		Количество отбираемого пара, кг/с
Номер подогревателя	Тип подогревателя		Давление	Температура	
ПВД №3	ПВ-350-230-50м	9	4,413	403,4	5,78
ПВД №2	ПВ-350-230-36м	13	2,55	335	4,76
ПВД №1	ПВ-350-230-21м	17	1,3	260,9	3,82
Деаэратор	–	17	1,3	260,9	1,35
ПНД №4	ПН-130-16-9-1	20	0,518	174,4	3,33
ПНД №3	ПН-130-16-9-1	22	0,333	137,1	4,17
ПНД №2	ПН-130-16-9-1	26	0,1176	104,2	0,83
ПНД №1	Встроенный	28	0,0638	87,5	0,09

Для теплового расчета турбины выполняется построение процесса расширения пара в турбине на h, s -диаграмме [15; 16; 22; 120; 122].

На диаграмме h, s по параметрам p_0, t_0 строится точка О (состояние пара перед стопорным клапаном). Потеря давления в стопорном и регулирующих клапанах принимается $\Delta p = 0,05 p_0$, тогда давление пара перед соплами регулирующей ступени $p'_0 = 0,95 \cdot 12,75 = 12,11$ МПа. На пересечении изобары p'_0 и энтальпии $h_0 = \text{const}$ намечают точку О'.

Из точки О' проводится линия изоэнтропийного процесса до пересечения с изобарой, соответствующей давлению отбираемого пара $p_{отб_3} = 1,3$ МПа. (на ри-

сунке 2.23 не показана). Используемый теплоперепад H_i , кДж/кг, пара внутри части высокого давления (ЧВД), определяется по формуле:

$$H_i = H_0 \eta_{oi}, \quad (2.52)$$

где H_0 – изоэнтروпийный теплоперепад, кДж/кг, $\eta_{oi} = 0,85$ – внутренний относительный КПД части высокого давления турбины.

От точки O' откладывается вниз величина H_i , на пересечении энтальпии $h_3 = \text{const}$ и изобары p_3 намечается точка 3, характеризующая состояние пара в камере отбора.

Определяются потери давления в камере отбора:

$$\Delta p_{\text{отб}_3} = 0,04 p_{\text{отб}_3}. \quad (2.53)$$

На h, s -диаграмму наносят $\Delta p_{\text{отб}_3}$.

Аналогично строится точка 6 и определяются потери давления в камере отбора $\Delta p_{\text{отб}_6}$.

Потеря давления в выхлопном патрубке (от последней ступени турбины до конденсатора) принимается $\Delta p_{\text{в.п.}} = 0,08 p_{\text{к}}$.

Определяют давление пара на выходе из последней ступени турбины $p_2 = p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{в.п.}}$. Изобару p_2 наносят на h, s -диаграмму.

Процессы расширения водяного пара в турбине ПТ-60-130/13 показаны на рисунках 2.22 – 2.24, а результаты расчетов – в таблице 2.19.

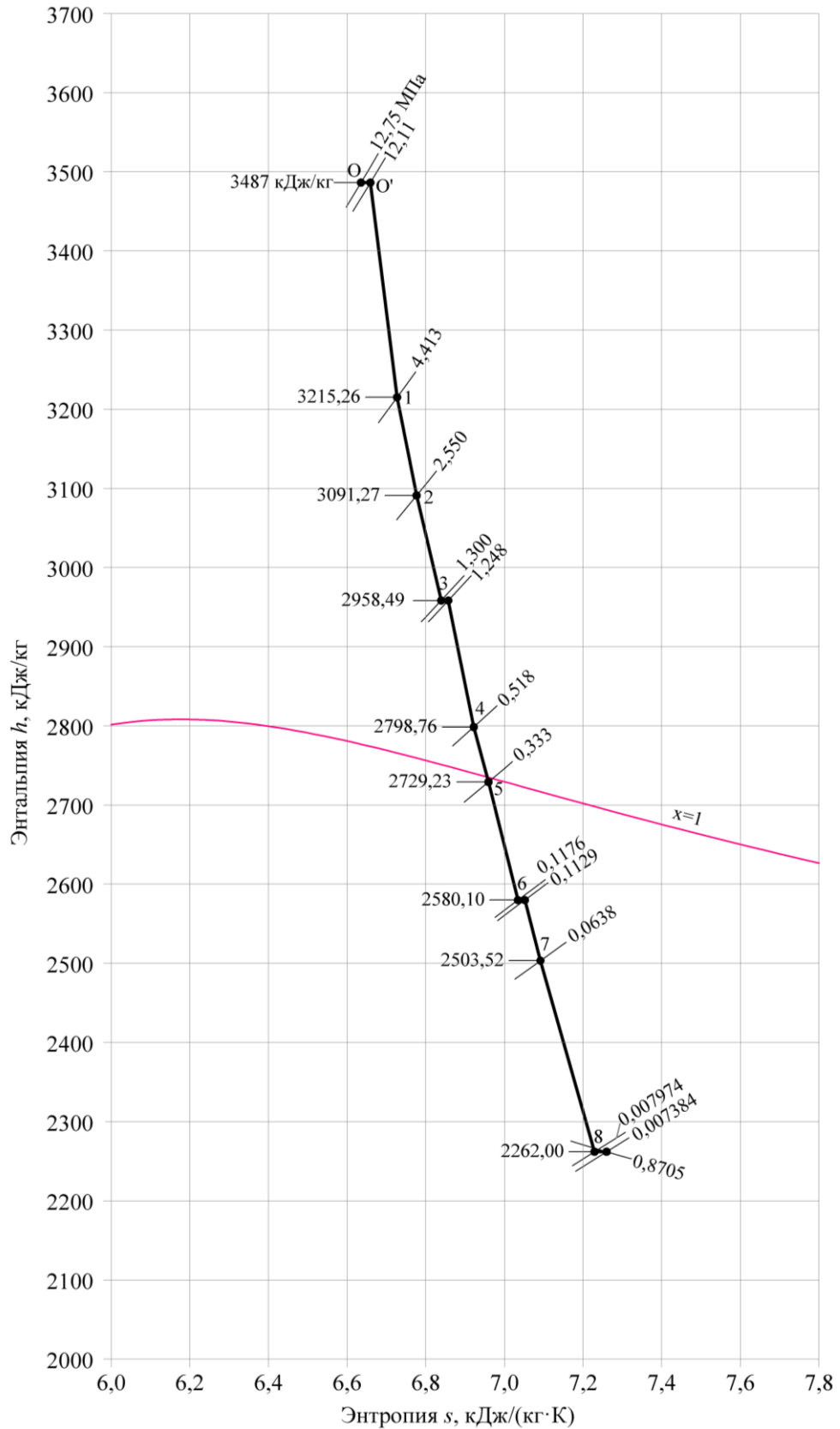


Рисунок 2.22 – Процесс расширения водяного пара в турбине ПТ-60-130/13 без осуществления отвода уходящих газов через градирню

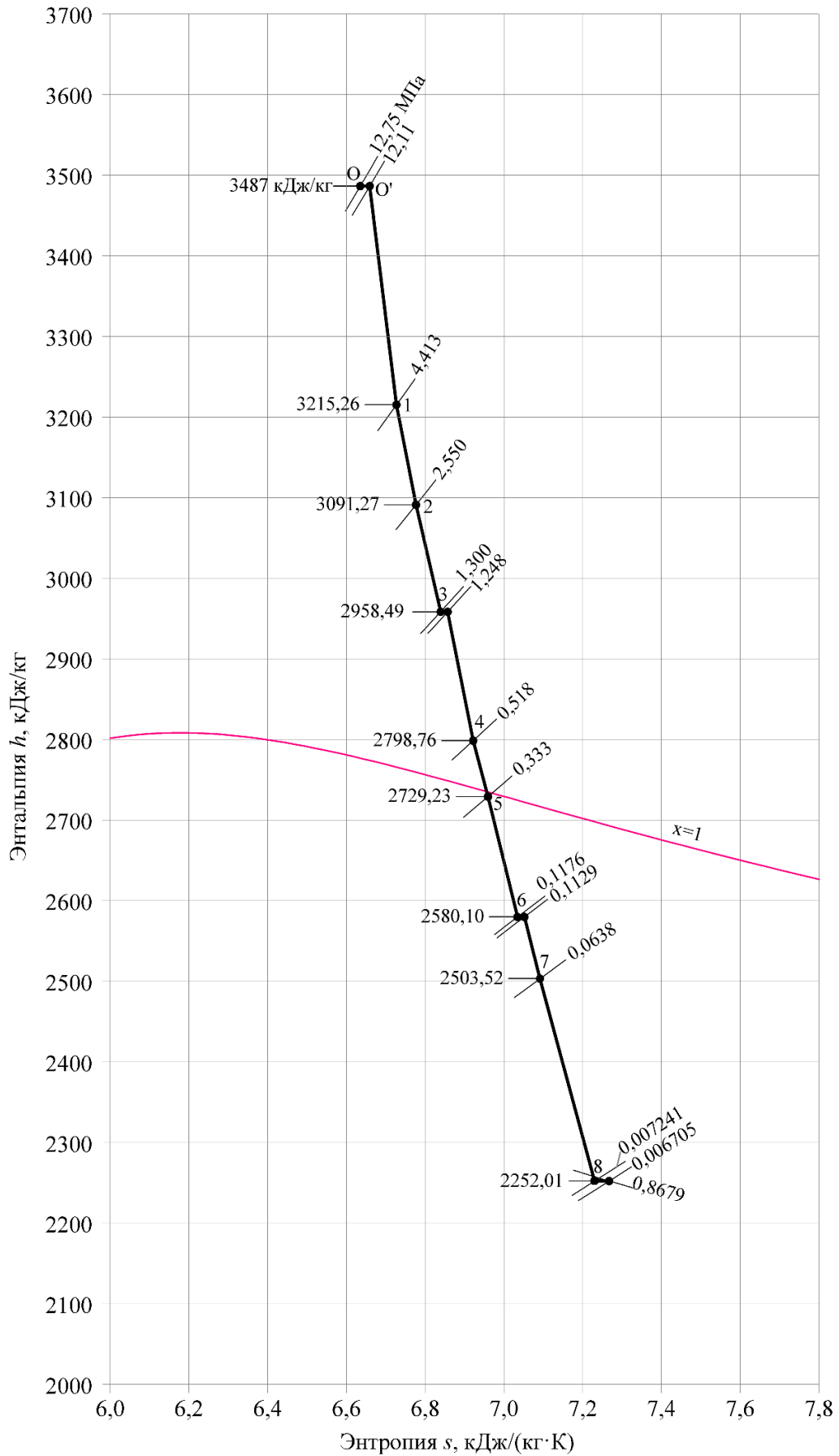


Рисунок 2.23 – Процесс расширения водяного пара в турбине ПТ-60-130/13 при осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,4°C)

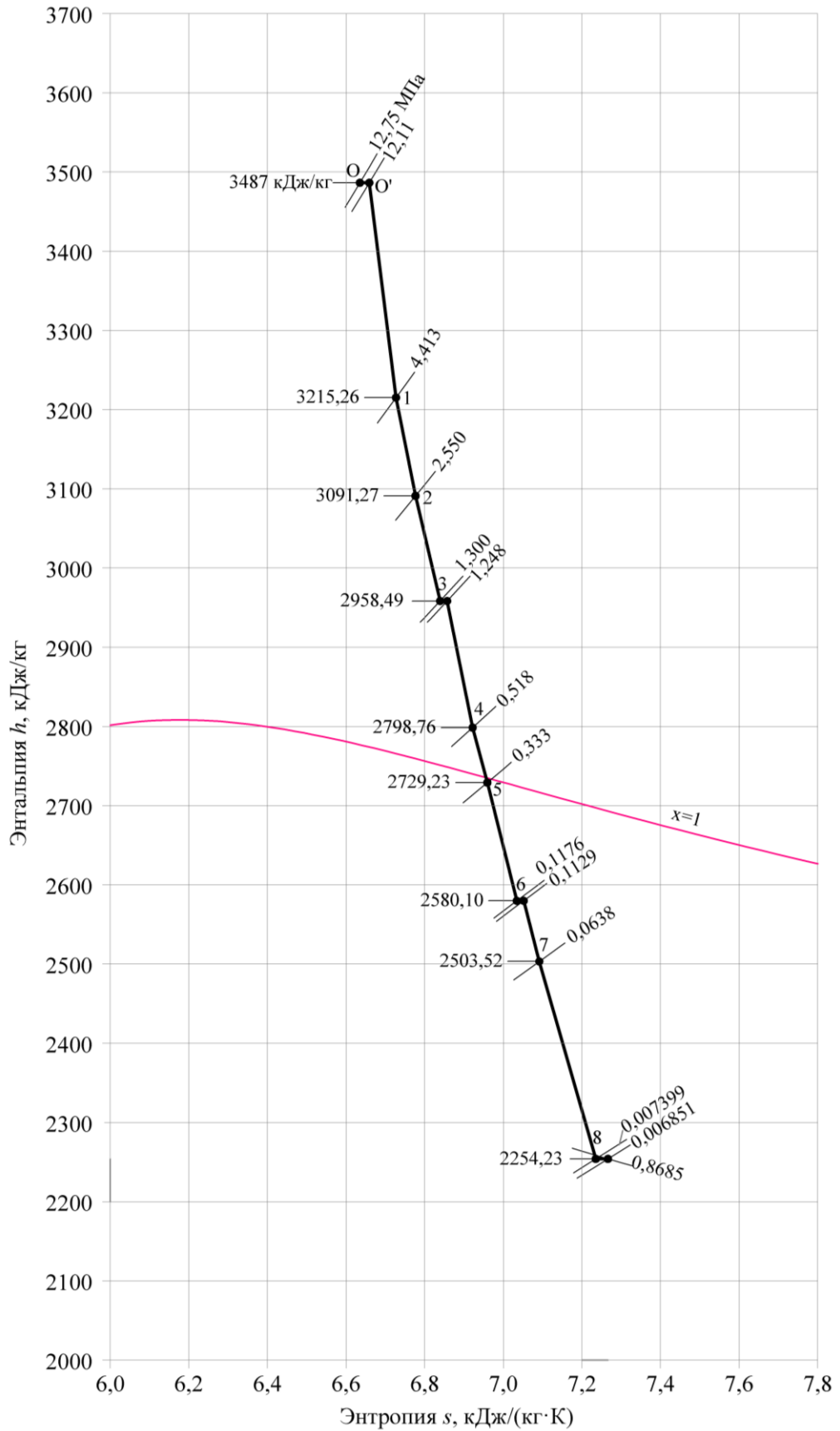


Рисунок 2.24 – Процесс расширения водяного пара в турбине ПТ-60-130/13 при осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,8 °С)

Таблица 2.19 – Результаты расчета процесса расширения пара в турбине ПТ-60-130/13

Точка процесса	Параметры пара в отборах			Расход пара, кг/с
	p , МПа	t , °С	h , кДж/кг	
О	12,75	555,0	3487,00	90,0
О'	12,11	552,5	3487,00	90,0
1	4,413	403,4	3215,26	5,78
2	2,55	335	3091,27	4,76
3	1,3	260,9	2958,49	41,22
4	0,518	174,4	2798,76	3,33
5	0,333	137,1	2729,23	4,17
6	0,1176	104,2	2580,10	20,38
7	0,0638	87,5	2503,52	0,09
8 (1)	0,007974	41,5	2262,00	10,27
8 (2)	0,007399	40,0	2254,23	10,27
8 (3)	0,007241	39,6	2252,01	10,27
К ₁	0,007384	40,0	2262,00	10,27
К ₂	0,006851	38,6	2254,23	10,27
К ₃	0,006705	38,2	2252,01	10,27

Расходы пара в отборах и по отсекам, теплоперепады и внутренняя мощность турбины ПТ-60-130/13 при ее работе в теплый период года, приведены в таблице 2.20.

Таблица 2.20 – Расходы пара в отборах и по отсекам турбины ПТ-60-130/13

№ отсека	Расход пара через отсек	Величина расхода пара через отсек, кг/с	Теплоперепад H_i , кДж/кг	Внутренняя мощность N_i , кВт
I	$D_I = D_0 - D_{yt}$	90,00	271,74	24456,60
II	$D_{II} = D_I - D_1$	84,22	123,99	10442,44
III	$D_{III} = D_{II} - D_2$	79,46	132,78	10550,70
IV	$D_{IV} = D_{III} - D_3 - D_{д} - D_{п}$	38,24	159,73	6108,08
V	$D_V = D_{IV} - D_4$	34,91	69,53	2427,29
VI	$D_{VI} = D_V - D_5$	30,74	149,13	4584,26
VII	$D_V = D_{IV} - D_4 - D_T$	10,36	76,59	793,42
VIII ₁	$D_{VIII} = D_k = D_{VII} - D_7$	10,27	241,52	2480,40
VIII ₂	$D_{VIII} = D_k = D_{VII} - D_7$	10,27	249,29	2560,16
VIII ₃	$D_{VIII} = D_k = D_{VII} - D_7$	10,27	251,51	2582,96

Внутренняя мощность турбоустановки без осуществления отвода уходящих газов через градирню $N_i=61843,18$ кВт.

Внутренняя мощность турбоустановки при осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на $1,4$ °С) $N_i=61922,24$ кВт.

Внутренняя мощность турбоустановки при осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на $1,8$ °С) $N_i=61945,74$ кВт.

Электрическая мощность турбины $N_э$, кВт, определяется по формуле:

$$N_э = N_i \cdot \eta_m \cdot \eta_r, \quad (2.54)$$

где $\eta_m = 0,99$ – механический КПД турбины; $\eta_r = 0,98$ – КПД электрического генератора.

КПД турбоустановки ТЭЦ по производству электрической энергии $\eta_{ты}^э$ рассчитывается по формуле:

$$\eta_{ты}^э = N_э / Q_{ты}^э. \quad (2.55)$$

Расход теплоты, затрачиваемый на выработку электрической энергии $Q_{ты}^э$, кВт:

$$Q_{ты}^э = Q_{ты} - Q_r - Q_{п}. \quad (2.56)$$

Расход теплоты на турбоустановку $Q_{ты}$, кВт, равен:

$$Q_{ты} = D_0 (h_0 - h_{п.в.}), \quad (2.57)$$

где h_0 – энтальпия свежего пара, кДж/кг; $h_{п.в.}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг. При $t_{пв} = 230$ °С энтальпия питательной воды $h_{п.в.} = 1076,63$ кДж/кг (энтальпии воды и водяного пара определялись по [123]).

Отпуск теплоты на производственные нужды $Q_{п}$, кВт:

$$Q_{п} = D_{п} (h_{п} - h_{ок}). \quad (2.58)$$

Здесь $h_{п}$ – энтальпия пара в отборе, кДж/кг; $h_{ок}$ – энтальпия обратного конденсата при $t_{ок} = 90$ °С.

$$Q_{\text{п}} = 36,05(2958,49 - 377) = 93062,71 \text{ кВт}$$

Отпуск теплоты на теплофикацию $Q_{\text{т}}$, кВт:

$$Q_{\text{т}} = D_{\text{т}}(h_{\text{т}} - h'_{\text{т}}). \quad (2.59)$$

Здесь $h_{\text{т}}$ – энтальпия пара в отборе, кДж/кг; $h'_{\text{т}}$ – энтальпия конденсата при температуре насыщения в сетевом подогревателе (104,2 °С).

$$Q_{\text{т}} = 19,55(2580,10 - 436,87) = 41900,15 \text{ кВт}$$

Суммарный отпуск теплоты потребителю $Q_{\text{п.т}}^{\circ}$, кВт:

$$Q_{\text{п.т}}^{\circ} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}}. \quad (2.60)$$

$$Q_{\text{п.т}}^{\circ} = 93062,71 + 41900,15 = 134962,86 \text{ кВт}$$

Процесс совместного производства электроэнергии и теплоты характеризуется суммарным КПД турбоустановки:

$$\eta_{\text{ту}}^{\text{э.т}} = (N_{\text{э}} + Q_{\text{п.т}}^{\circ}) / Q_{\text{ту}}. \quad (2.61)$$

КПД ТЭЦ по отпуску электрической энергии $\eta_{\text{с}}^{\text{э}}$ определяется по формуле:

$$\eta_{\text{с}}^{\text{э}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{пк}}, \quad (2.62)$$

где $\eta_{\text{тр}} = 0,98$ – КПД транспорта теплоты; $\eta_{\text{пк}} = 0,94$ – КПД парового котла.

Удельный расход топлива на единицу производимой электроэнергии $b_{\text{у}}^{\text{э}}$, г/(кВт·ч), определяется:

$$b_{\text{у}}^{\text{э}} = 123 / \eta_{\text{с}}^{\text{э}}. \quad (2.63)$$

Расчет экономической эффективности в денежном выражении $\mathcal{E}_{\text{год}}$, руб/год выполняется следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = nT_{\text{усл}}\Delta b_{\text{у}}^{\text{э}}N_{\text{э}}, \quad (2.64)$$

где $n=4056$ ч/год – продолжительность работы турбоустановки в неотопливаемый период; $T_{\text{усл}} = 7000$ руб/т.у.т – стоимость тонны условного топлива.

Результаты расчетов экономической эффективности за счет отвода уходящих газов трех энергетических котлов Самарской ТЭЦ через вытяжную башню градирни представлены в таблице 2.21.

Таблица 2.21 – Результаты расчетов экономической эффективности

Параметр	Без осуществления отвода уходящих газов через градирню	При осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,4 °С)	При осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,8 °С)
N_g , кВт	60000,25	60077,63	60099,75
$\eta_{\text{ту}}^{\text{э}}$	0,6818	0,6827	0,6830
$\eta_{\text{ту}}^{\text{э.т}}$	0,8744	0,8748	0,8749
$\eta_{\text{с}}^{\text{э}}$	0,6281	0,6289	0,6292
$b_y^{\text{э}}$, г/(кВт·ч)	195,83	195,58	195,49
$\mathcal{E}_{\text{год}}$, руб/год	–	424895,87	584254,96
$\mathcal{E}_{\text{год(2)}}$, руб/год	–	1132140,59	1556397,04

Анализ результатов расчетов показал, что при организации отвода уходящих газов от трех котлов БКЗ-420-140 НГМ в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой КПД турбоустановки ТЭЦ по производству электрической энергии повышается на 0,12 % (с 68,18 до 68,30 %), суммарный КПД турбоустановки по выработке тепловой и электрической энергии возрастает на 0,05 % (с 87,44 до 87,49 %), а КПД ТЭЦ по отпуску электрической энергии – на 0,11 % (с 62,81 до 62,92 %). При этом удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии уменьшается на 0,175 % (с 195,8287 до 195,4863 г/(кВт·ч)). Экономический эффект в денежном выражении составляет 584254,96 руб/год при работе одной турбины ПТ-60-130/13 и 1556397,04 руб/год при работе двух турбин ПТ-60-130/13 и Т-100/120-130.

КПД турбоустановки по выработке электроэнергии нетто равен:

$$\eta_{\text{ту}}^{\text{э.н}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} (1 - \bar{\mathcal{E}}_{\text{с.н}}), \quad (2.65)$$

где $\bar{\mathcal{E}}_{\text{с.н}}$ – доля расхода электроэнергии на собственные нужды.

При работе ТЭЦ в стационарном режиме (отвод уходящих газов котлов осуществляется через дымовую трубу) $\bar{\mathcal{E}}_{\text{с.н}} = 0,05$ (5,0 %) от мощности вырабатываемой электрогенератором турбоустановки.

При работе ТЭЦ с отводом уходящих газов котлов через вытяжную башню градирни расход электроэнергии на собственные нужды возрастает за счет увеличения мощности, затрачиваемой на привод дымососа

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{\text{д.н.}} = \Delta N_{\text{д.н.}} / N_{\text{э.ту}}, \quad (2.66)$$

где $\Delta N_{\text{д.н.}}$ – суммарное увеличение мощности дымососов, $\Delta N_{\text{д.н.}} = 600$ кВт.

КПД турбоустановки по выработке электроэнергии нетто при отводе уходящих газов через градирню:

$$\eta_{\text{ту}2}^{\text{э.н}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} (1 - \bar{\mathcal{E}}_{\text{с.н}} - \Delta \bar{\mathcal{E}}_{\text{д.н.}}), \quad (2.67)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 2.22.

Таблица 2.22 – Результаты расчетов затрат на собственные нужды

Параметр	Без осуществления отвода уходящих газов через градирню	При осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,4 °С)	При осуществлении отвода уходящих газов через градирню (снижение температуры циркуляционной воды на 1,8 °С)
$\eta_{\text{ту}}^{\text{э.н}}$	0,6818	0,6827	0,6830
$\eta_{\text{ту}2}^{\text{э.н}}$	0,6477	0,6460	0,6463
$\eta_{\text{с}2}^{\text{э.н}}$	0,5967	0,5951	0,5954
$b_{\text{у.2}}^{\text{э}}, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	206,13	206,69	206,58

Устройство системы отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни приводит к повышению ее аэродинамического сопротивления по сравнению с системой отвода газов через дымовую трубу, что обуславливает повышение мощности дымососа и расхода электроэнергии на собственные нужды станции. При этом удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии возрастет на 0,22 % (с 206,13 до 206,58 г/(кВт·ч)).

2.7. Выводы по второй главе

1. Предложено отвод уходящих газов паротурбинных и парогазовых ТЭС осуществлять через вытяжную башню градирни с естественной тягой. Разра-

ботана методика конструктивного расчета системы отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни. Представлена методика расчета теплообменных процессов при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни.

2. Выполнены расчеты систем отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни с естественной тягой. Рассмотрены четыре варианта конструктивного исполнения системы газораспределения: с одним, двумя, тремя и четырьмя коллекторами, установленными по центру и по периферии вытяжной башни градирни. При этом скорость движения газов в газораспределительных коллекторах принималась равной 10, 20, 30 м/с.

3. Анализ результатов проведенных расчетов показал, что наиболее оптимальной является конструкция с тремя кольцевыми газовыми коллекторами при скорости газов в коллекторе 10 м/с. Повышение скорости газов в коллекторах до 25 и 30 м/с обуславливает значительное увеличение потерь давления.

4. Применительно к башенным градирням типа БГ-2600 и БГ-2300 рекомендуется к исполнению на практике система газораспределения с тремя кольцевыми газовыми коллекторами и их центральным расположением по сечению вытяжной башни градирни. В этом случае площадь перекрываемого сечения вытяжной башни градирни меньше по сравнению с системой с четырьмя кольцевыми коллекторами на 21,7 %. При центральном расположении газораспределительных коллекторов по сравнению с их расположением у стенок башни площадь перекрываемого сечения вытяжной башни градирни снижается на 85,7 %.

5. Разработана программа расчета на ЭВМ процессов теплообмена при движении газовой смеси в вытяжной башне градирни (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619264).

6. Получены результаты расчетов при отводе в атмосферу уходящих газов котлов через вытяжную башню градирни, температура циркуляционной воды на выходе из градирни снижается на 1,8 °С и на 1,3 °С соответственно для паротурбинных ТЭС и ПГУ. КПД турбоустановки ТЭЦ по производству электрической энергии повышается на 0,12 %, суммарный КПД турбоустановки по выра-

ботке тепловой и электрической энергии – на 0,05 %, а КПД ТЭЦ по отпуску электрической энергии – на 0,11 %. Экономический эффект в денежном выражении составляет 584254,96 руб/год при работе одной турбины ПТ-60-130/13 и 1556397,04 руб/год при работе двух турбин ПТ-60-130/13 и Т-100/120-130. Устройство системы отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни приводит к повышению ее аэродинамического сопротивления по сравнению с системой отвода газов через дымовую трубу, что обуславливает повышение мощности дымохода и расхода электроэнергии на собственные нужды станции. При этом удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии возрастает на 0,22 % (с 206,13 до 206,58 г/(кВт·ч)).

7. Методика конструктивного расчета системы отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни применима для теплогенерирующих установок различного назначения и может быть использована при расчете систем отвода уходящих продуктов сгорания органического топлива для различных типов градирен с естественной тягой.

8. Выполнено численное моделирование распределения температур и скоростей газозадушной смеси в объеме вытяжной башни градирни в среде OpenFOAM. Численная модель процесса была основана на системе уравнений Навье-Стокса в стационарной постановке. Установлено, что основной поток уходящих газов движется в центральной части градирни, не соприкасаясь с ее стенками и конденсация углекислоты на внутренней поверхности стенок башни градирни при принятых расчетных условиях не наблюдается.

Глава 3. РАСЧЕТ РАССЕИВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ОТВОДЕ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТЭС ЧЕРЕЗ ДЫМОВУЮ ТРУБУ И ВЫТЯЖНУЮ БАШНЮ ГРАДИРНИ

3.1. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе

Дымовые трубы устанавливаются с целью отвода уходящих продуктов сгорания от котельных установок ТЭС и для эффективного рассеивания содержащихся в них загрязняющих веществ в атмосфере. В работах [59; 79–81] предложено отвод уходящих газов котельных установок в атмосферу производить через вытяжную башню градирни с естественной тягой. Возможность применения способа отвода уходящих газов в атмосферу через вытяжную башню градирни должна быть экологически обоснована. Габаритные характеристики (диаметр, высота) вытяжной башни градирни и дымовых труб различны. Поэтому необходимо проводить экологический анализ. Для того, чтобы оценить влияние выбросов, содержащихся в уходящих газах загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, проводится расчет их рассеивания в атмосфере, т.е. определение приземных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на различных расстояниях от источника выбросов [9; 23; 124]. С отработавшими газами энергетических установок, работающих на природном газе, в атмосферу поступают такие вредные вещества, как диоксид азота NO_2 , оксид азота NO , оксид углерода CO . Нормами наиболее жесткий ПДК задан для NO_2 , имеющего 3 класс опасности и максимально разовую предельно допустимую концентрацию $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,2 \text{ мг/м}^3$ [9]. Поэтому расчет рассеивания производился для данного вещества в соответствии с Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [27] на базе унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы УПРЗА «ЭКО центр» для двух вариантов:

- а) с учетом только вклада предприятия;

б) с учетом вклада предприятия и фоновых концентраций в зоне действия ТЭЦ (предприятия нефтехимического комплекса, автомобильный и железнодорожный транспорт).

Выполнен расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе от энергетических установок Самарской и Сызранской ТЭЦ для двух способов отвода уходящих продуктов сгорания: через дымовую трубу и вытяжную башню градирни с естественной тягой. Исходными данными для расчета содержания концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе являются: геометрические характеристики дымовых труб и градирен; расход уходящих газов и парогазовой смеси и их температуры; расход топлива, фоновая концентрация диоксида азота. Фоновые концентрации принимались для г.о. Самары и г.о. Сызрани по данным ФГБУ «Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [28] средние за 2021 г.

3.2. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе от энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ, установленных на Самарской ТЭЦ

Для г.о. Самары основными источниками загрязнения атмосферы являются предприятия строительной, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, электротехнической, металлургической, авиаприборостроительной, энергетической отраслей промышленности, а также автомобильный и железнодорожный транспорт (АО «РКЦ «Прогресс», АО «Металлист-Самара», АО «Куйбышевский НПЗ», ОАО «ЕПК Самара», «Безымянская отопительная котельная» филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс», АО «Авиакор – авиационный завод», АО «Группа компаний «Электрощит» - ТМ Самара, «Самарская ГРЭС» филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс», ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия», ПАО «ОДК Кузнецов», Производственное предприятие «Самарская ТЭЦ» филиала Самарский» ПАО «Т Плюс», ПАО СЗ «Экран», ООО «Самарские коммунальные системы», АО «Арко-

ник СМЗ», ООО «Лука», ООО «Завод приборных подшипников», ООО «Трасса-С», АО «Самаранефтепродукт», ЗАО «СБКК», ОАО ПКК «Весна»).

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета рассеивания выбросов NO_2 в атмосферном воздухе от энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ

Параметр	Дымовая труба	Градирня БГ-2600
Высота, м	180	72
Диаметр устья, м	8,4	35
Диаметр основания, м	16,8	58,3
Расход топлива (газ Уренгойского месторождения), кг/с	18,448	18,448
Расход уходящих газов, $\text{м}^3/\text{с}$	395,2	395,2
Температура уходящих газов, $^{\circ}\text{C}$	110	110
Расход смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, $\text{м}^3/\text{с}$	-	2756
Температура смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, $^{\circ}\text{C}$	-	40,4
Фоновая концентрация диоксида азота NO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$ [10]	0,035	0,035

В результате расчета получено распределение концентраций NO_2 в зоне действия ТЭЦ с учетом фона (рисунок 3.1.)

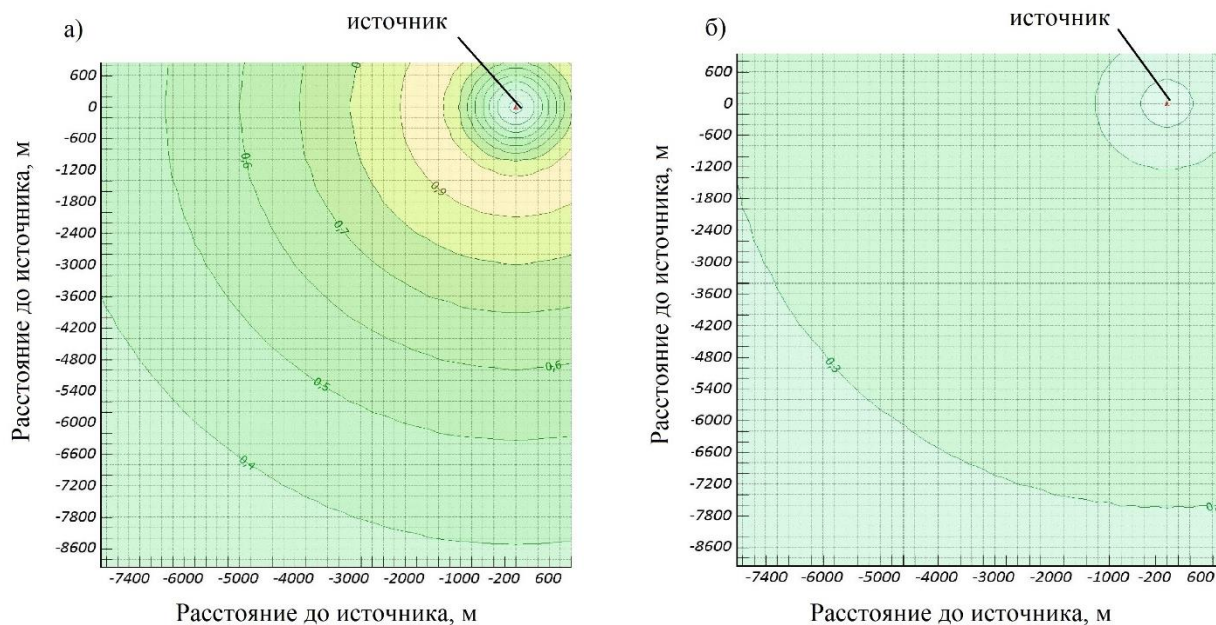


Рисунок 3.1 – Картограмма значений наибольших концентраций при различных способах отвода уходящих газов (Самарская ТЭЦ): а – через градирню, б – через дымовую трубу

Максимальная разовая приземная концентрация диоксида азота c_m , $\text{мг}/\text{м}^3$, при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым

устьем достигается при опасной скорости ветра (скорость ветра на стандартном уровне флюгера, при которой достигается наибольшая приземная концентрация) u_m , м/с, на расстоянии (расстояние от источника выброса, на котором приземная концентрация загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения) x_m , м, от источника выброса. Получены основные показатели вредного воздействия выбросов NO_2 для градирни и существующей дымовой трубы: опасная скорость и расстояние до максимума (таблица 3.2). Распределение концентраций NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов представлены в таблице 3.3 и на рисунках 3.2–3.4.

Таблица 3.2 – Показатели вредного воздействия выбросов NO_2 для Самарской ТЭЦ

Объект	Показатель				
	Опасная скорость u_m , м/с	Масса выброса M , г/с	Максимальная концентрация без учета фона c_m , мг/м ³	Максимальная концентрация c_m с учетом фона c_m , мг/м ³	Расстояние до максимума x_m , м
Дымовая труба	3,877	217,4	0,042	0,077	2790,1
Градирня БГ-2600	6,495	217,4	0,164	0,199	1647,2

Таблица 3.3 – Распределение концентраций NO_2 в зоне действия Самарской ТЭЦ

Расстояние от источника выбросов, м	Дымовая труба			Градирня		
	Концентрация NO_2 , мг/м ³ (вклад предприятия)	Расчетная концентрация NO_2 , мг/м ³ (с учетом фона)	Расчетная концентрация NO_2 , дПДК (с учетом фона)	Концентрация NO_2 , мг/м ³ (вклад предприятия)	Расчетная концентрация NO_2 , мг/м ³ (с учетом фона)	Расчетная концентрация NO_2 , дПДК (с учетом фона)
1	2	3	4	5	6	7
0	0,000	0,035	0,175	0,000	0,035	0,175
200	0,001	0,036	0,180	0,012	0,047	0,236
400	0,004	0,039	0,196	0,041	0,076	0,380
600	0,009	0,044	0,220	0,075	0,110	0,550
800	0,014	0,049	0,243	0,109	0,144	0,720

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7
1000	0,019	0,054	0,270	0,135	0,170	0,850
1200	0,024	0,059	0,296	0,153	0,188	0,940
1400	0,029	0,064	0,320	0,161	0,196	0,980
1600	0,033	0,068	0,340	0,165	0,199	0,995
1800	0,037	0,072	0,360	0,161	0,196	0,980
2000	0,039	0,074	0,370	0,155	0,190	0,950
2200	0,041	0,076	0,380	0,151	0,186	0,930
2400	0,041	0,076	0,380	0,145	0,180	0,900
2600	0,042	0,077	0,385	0,141	0,176	0,880
2800	0,042	0,077	0,385	0,135	0,170	0,850
3000	0,041	0,076	0,380	0,131	0,166	0,830
3200	0,041	0,076	0,380	0,125	0,160	0,800
3400	0,040	0,075	0,375	0,121	0,156	0,780
3600	0,039	0,074	0,370	0,117	0,152	0,760
3800	0,039	0,074	0,370	0,113	0,148	0,740
4000	0,038	0,073	0,364	0,107	0,142	0,710
4200	0,037	0,072	0,360	0,103	0,138	0,690
4400	0,036	0,071	0,356	0,099	0,134	0,670
4600	0,035	0,070	0,350	0,095	0,130	0,650
4800	0,035	0,070	0,350	0,091	0,126	0,630
5000	0,034	0,069	0,345	0,087	0,122	0,610
5200	0,033	0,068	0,340	0,085	0,120	0,600
5400	0,033	0,068	0,340	0,081	0,116	0,580
5600	0,032	0,067	0,334	0,077	0,112	0,560
5800	0,031	0,066	0,330	0,075	0,110	0,550
6000	0,031	0,066	0,330	0,071	0,106	0,530
6200	0,030	0,065	0,323	0,069	0,104	0,520
6400	0,029	0,064	0,320	0,067	0,102	0,510
6600	0,028	0,063	0,317	0,063	0,098	0,490
6800	0,028	0,063	0,313	0,061	0,096	0,480
7000	0,027	0,062	0,310	0,059	0,094	0,470
7200	0,027	0,062	0,310	0,057	0,092	0,460
7400	0,026	0,061	0,304	0,055	0,090	0,450
7600	0,025	0,060	0,300	0,053	0,088	0,440
7800	0,025	0,060	0,300	0,051	0,086	0,430
8000	0,024	0,059	0,295	0,049	0,084	0,420
8200	0,023	0,058	0,290	0,047	0,082	0,410
8400	0,023	0,058	0,290	0,045	0,080	0,400
8600	0,022	0,057	0,287	0,044	0,079	0,395
8800	0,022	0,057	0,285	0,043	0,078	0,390
9000	0,021	0,056	0,280	0,041	0,076	0,380
9200	0,021	0,056	0,280	0,039	0,074	0,370
9400	0,021	0,056	0,280	0,039	0,074	0,370
9600	0,020	0,055	0,275	0,037	0,072	0,360
9800	0,019	0,054	0,270	0,036	0,071	0,355
10000	0,019	0,054	0,270	0,035	0,070	0,350

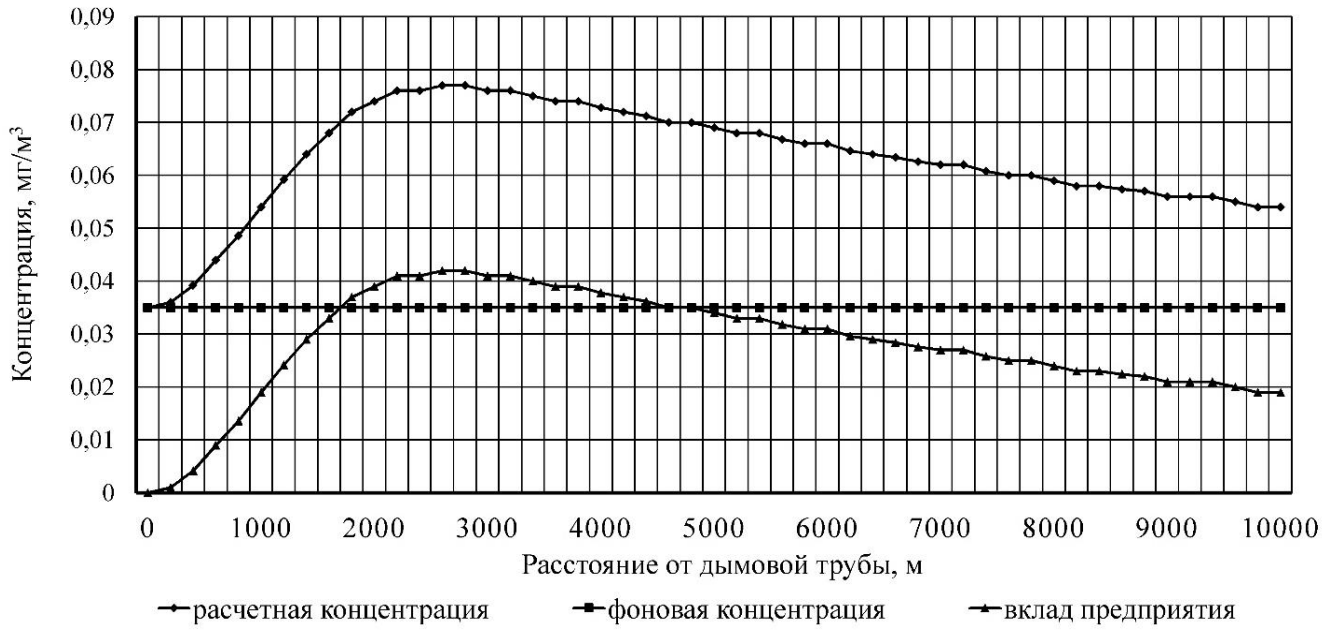


Рисунок 3.2 – Расчетные концентрации NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов при отводе уходящих газов через дымовую трубу (Самарская ТЭЦ), мг/м^3

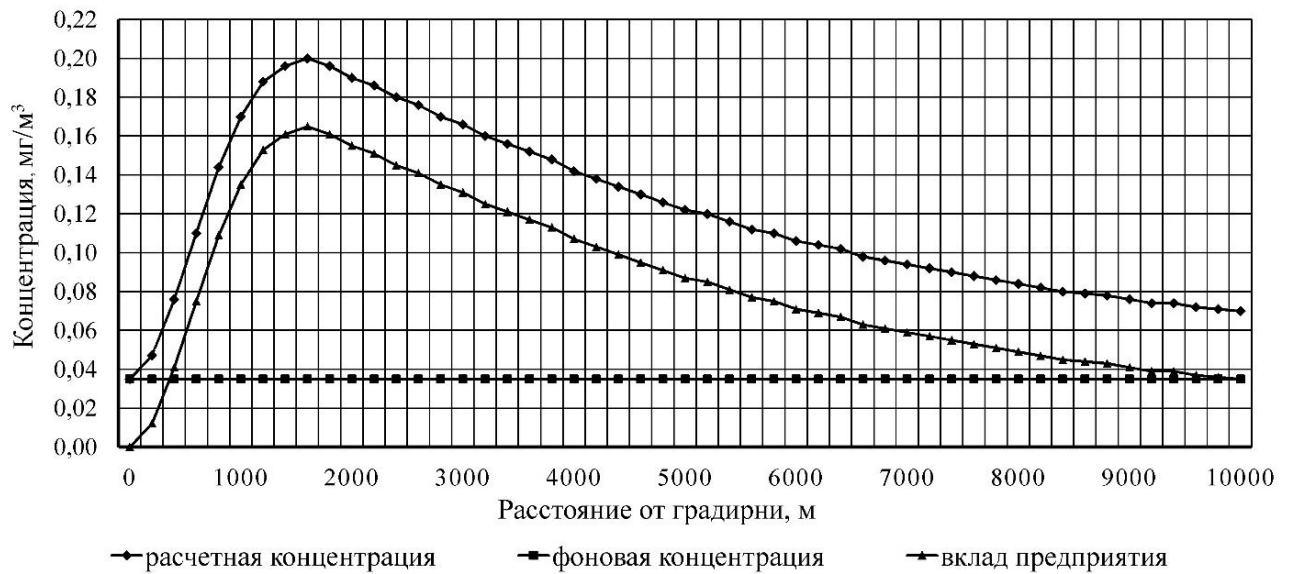


Рисунок 3.3 – Расчетные концентрации NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов при отводе уходящих газов через градирню (Самарская ТЭЦ), мг/м^3

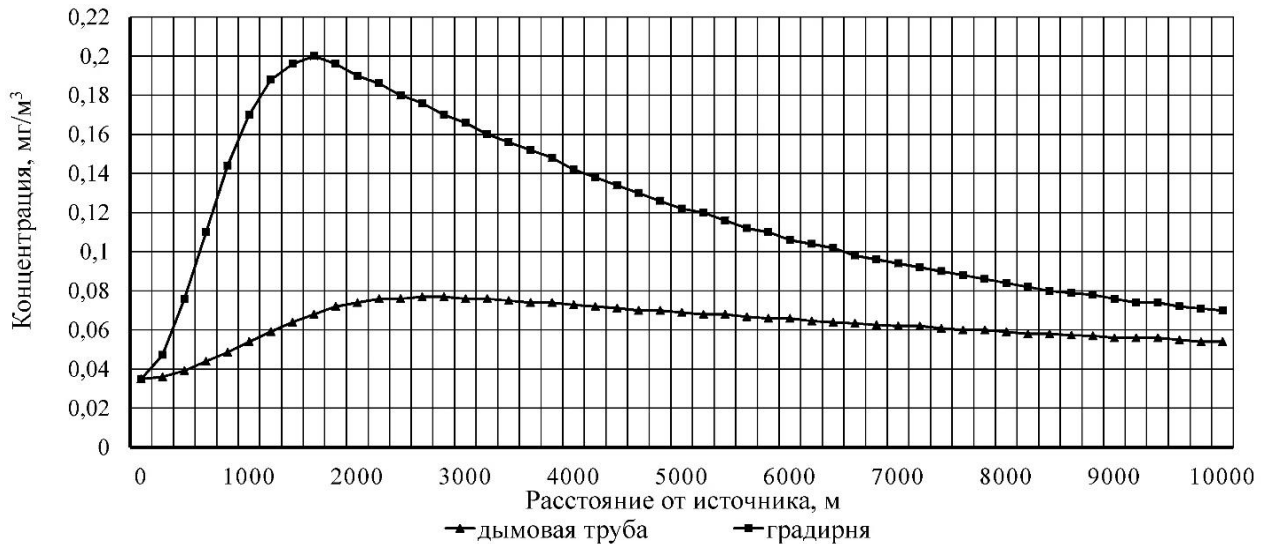


Рисунок 3.4 – Расчетные концентрации NO₂ в зависимости от расстояния от источника выбросов при различных способах отвода уходящих газов (Самарская ТЭЦ), мг/м³

Анализ результатов расчетов показал, что при отводе дымовых газов от котлов БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ в атмосферу через вытяжную башню градирни БГ-2600 и через дымовую трубу ($H_{тр}=180$ м) концентрации NO₂ в зоне действия источника не превышает ПДК (ПДК_{мр}=0,2 мг/м³) (см. рисунок 3.4). Расчетная максимальная концентрация NO₂ с учетом фона составляет 0,077 мг/м³ и 0,199 мг/м³ для дымовой трубы и градирни соответственно.

Повысить эффективность рассеивания уходящих продуктов сгорания и снизить приземные концентрации диоксида азота возможно за счет увеличения высоты башни градирни. При изменении геометрических характеристик требуется выполнить расчет процессов тепло- и массообмена для новых параметров. Расчет выполнялся при помощи программы ЭВМ [107] (модуль расчета башенной градирни, свидетельство о регистрации № 2021619294).

Исходные данные для расчета рассеивания выбросов NO₂ в атмосферном воздухе при различных высотах градирен представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные для расчета рассеивания выбросов NO₂ в атмосферном воздухе от энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ

Параметр	Градирня БГ-2600			
	72	80	90	100
Высота, м	72	80	90	100
Диаметр устья, м	35	35	35	35
Диаметр основания, м	58,3	58,3	58,3	58,3
Расход топлива (газ Уренгойского месторождения), кг/с	18,448	18,448	18,448	18,448
Расход уходящих газов, м ³ /с	395,2	395,2	395,2	395,2
Температура уходящих газов, °С	110	110	110	110
Расход смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, м ³ /с	2756	2858	2966	3076
Температура смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, °С	40,4	40	39,4	39
Фоновая концентрация диоксида азота NO ₂ , мг/м ³ [10]	0,035	0,035	0,035	0,035

В результате расчета получено распределение концентраций NO₂ в атмосферном воздухе в зоне действия Самарской ТЭЦ с учетом фона при различных высотах градирни. Получены основные показатели вредного воздействия выбросов NO₂ в атмосферном воздухе для градирен высотой 72, 80, 90 и 100 м (таблица 3.5) и распределение концентраций NO₂ в зависимости от расстояния от источника выбросов (рисунок 3.5).

Таблица 3.5 – Показатели вредного воздействия выбросов NO₂ для Самарской ТЭЦ

Высота градирни, м	Показатель			
	Опасная скорость u_m , м/с	Максимальная концентрация без учета фона c_m , мг/м ³	Максимальная концентрация c_m с учетом фона c_m , мг/м ³	Расстояние до максимума x_m , м
72	6,495	0,164	0,199	1647,2
80	6,228	0,134	0,169	1781,9
90	5,917	0,108	0,143	1941,9
100	5,677	0,090	0,125	2101,7

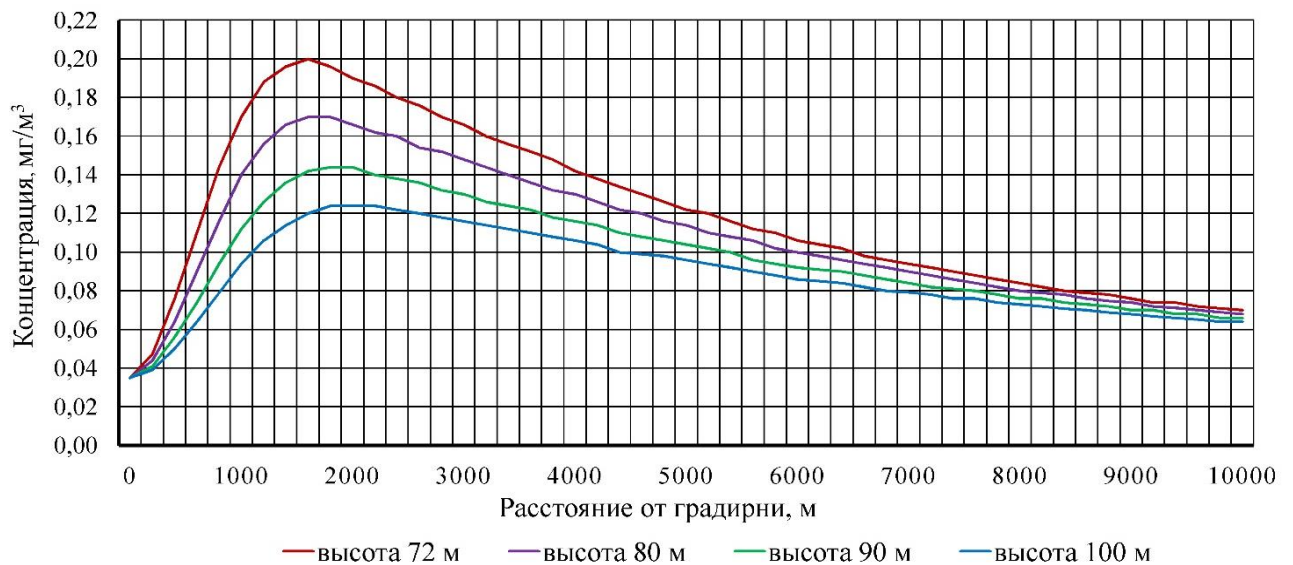


Рисунок 3.5 – Расчетные концентрации NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов при различных высотах градирни (Самарская ТЭЦ), $\text{мг}/\text{м}^3$

Анализ результатов расчетов показал, что при увеличении высоты градирни от 72 м до 100 м максимальная концентрация NO_2 в атмосферном воздухе с учетом фона в зоне действия источника снижается на 59,2 % и составляет 0,199 $\text{мг}/\text{м}^3$ и 0,125 $\text{мг}/\text{м}^3$ соответственно при отводе газов через градирню высотой 72 и 100 м.

3.3. Расчет рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе от газотурбинных установок PG611FA, установленных на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ

Для г.о. Сызрань основными источниками загрязнения атмосферы являются предприятия нефтепереработки, нефтехимии, ТЭЦ, железнодорожный и автомобильный транспорт (АО «Сызранский НПЗ», АО «Самаранефтегаз» УПН «Сызранская», ПАО «ЛПК», АО «Транснефть – Дружба» ЛПДС «Сызрань-1», АО «Тяжмаш», АО «РН-Транс», Сызранская ТЭЦ филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс», АО «Самаранефтепродукт»).

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Исходные данные для расчета рассеивания выбросов NO_2 в атмосферном воздухе от газотурбинных установок PG6111FA

Параметр	Дымовая труба	Градирня БГ-2300
Высота, м	60	74,4
Диаметр устья, м	4	35,85
Диаметр основания, м	4	
Расход топлива (газ Уренгойского месторождения), кг/с	8,28	8,28
Расход уходящих газов, $\text{м}^3/\text{с}$	461,64	461,6
Температура уходящих газов, $^{\circ}\text{C}$	115	115
Расход смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, $\text{м}^3/\text{с}$	-	2767
Температура смеси уходящих газов и влажного воздуха градирни, $^{\circ}\text{C}$	-	41,7
Фоновая концентрация диоксида азота NO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$ [10]	0,022	0,022

Результаты расчетов распределения концентраций NO_2 в зоне действия Сызранской ТЭЦ с учетом фона представлены на рисунке 3.6.

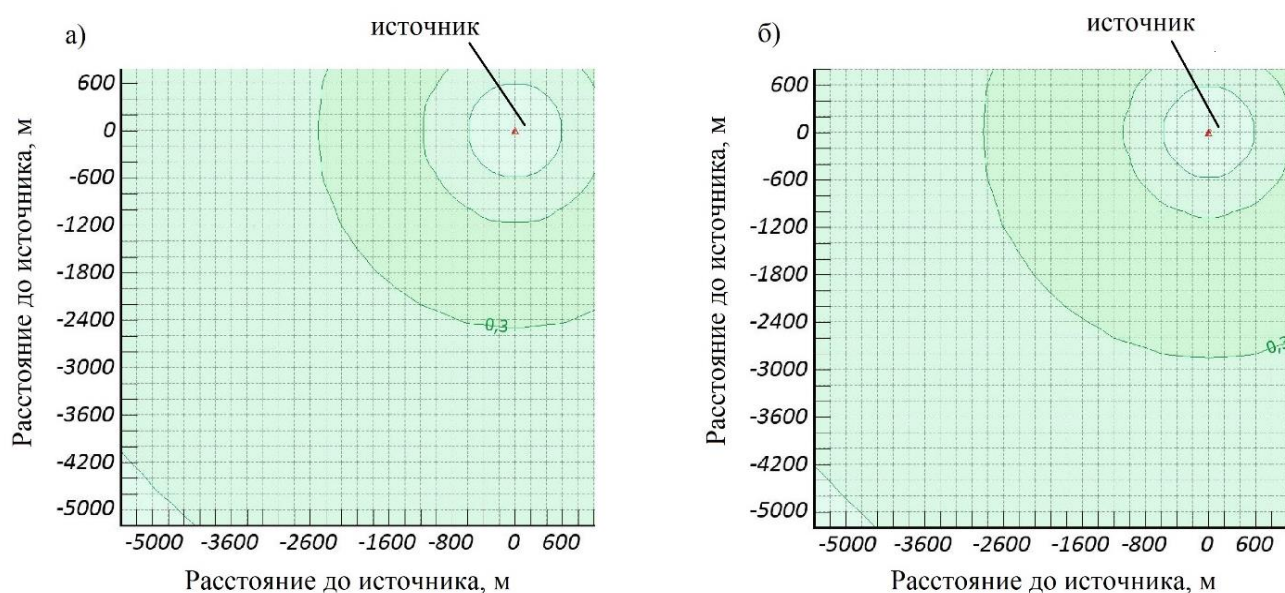


Рисунок 3.6 – Картограмма значений наибольших концентраций при различных способах отвода уходящих газов (Сызранская ТЭЦ): а – через градирню, б – через дымовую трубу

Получены основные показатели вредного воздействия выбросов NO_2 в атмосферном воздухе для градирни и существующей дымовой трубы Сызранской ТЭЦ (таблица 3.7) и распределение концентраций NO_2 в атмосферном воздухе в зависимости от расстояния от источника выбросов (таблица 3.8, рисунки 3.7–3.9).

Таблица 3.7 – Показатели вредного воздействия выбросов NO₂ для Сызранской ТЭЦ

Объект	Показатель				
	Опасная скорость u_m , м/с	Масса выброса M , г/с	Максимальная концентрация без учета фона c_m , мг/м ³	Максимальная концентрация c_m с учетом фона c_m , мг/м ³	Расстояние до максимума x_m , м
Дымовая труба	8,553	62,2	0,046	0,068	1727,0
Градирня БГ-2300	6,591	62,2	0,043	0,065	1710,3

Таблица 3.8 – Распределение концентраций NO₂ в зоне действия Сызранской ТЭЦ

Расстояние от источника выбросов, м	Дымовая труба			Градирня		
	Концентрация NO ₂ , мг/м ³ (вклад предприятия)	Расчетная концентрация NO ₂ , мг/м ³ (с учетом фона)	Расчетная концентрация NO ₂ , дПДК (с учетом фона)	Концентрация NO ₂ , мг/м ³ (вклад предприятия)	Расчетная концентрация NO ₂ , мг/м ³ (с учетом фона)	Расчетная концентрация NO ₂ , дПДК (с учетом фона)
0	0,000	0,022	0,110	0,000	0,022	0,110
200	0,003	0,025	0,124	0,003	0,025	0,125
400	0,010	0,032	0,160	0,010	0,032	0,160
600	0,019	0,041	0,207	0,019	0,041	0,204
800	0,028	0,050	0,250	0,027	0,049	0,247
1000	0,036	0,058	0,290	0,034	0,056	0,280
1200	0,042	0,064	0,320	0,039	0,061	0,306
1400	0,045	0,067	0,330	0,042	0,064	0,320
1600	0,046	0,068	0,340	0,043	0,065	0,324
1800	0,045	0,067	0,337	0,042	0,064	0,320
2000	0,044	0,066	0,330	0,041	0,063	0,316
2200	0,043	0,065	0,324	0,040	0,062	0,310
2400	0,041	0,063	0,317	0,039	0,061	0,304
2600	0,040	0,062	0,310	0,038	0,060	0,300
2800	0,039	0,061	0,300	0,036	0,058	0,290
3000	0,037	0,059	0,296	0,035	0,057	0,285
3200	0,036	0,058	0,290	0,034	0,056	0,280
3400	0,034	0,056	0,280	0,033	0,055	0,273
3600	0,033	0,055	0,275	0,031	0,053	0,267
3800	0,032	0,054	0,270	0,030	0,052	0,260
4000	0,031	0,053	0,260	0,029	0,051	0,255
4200	0,029	0,051	0,256	0,028	0,050	0,250
4400	0,028	0,050	0,250	0,027	0,049	0,245
4600	0,027	0,049	0,245	0,026	0,048	0,240
4800	0,026	0,048	0,240	0,025	0,047	0,234
5000	0,025	0,047	0,234	0,024	0,046	0,230

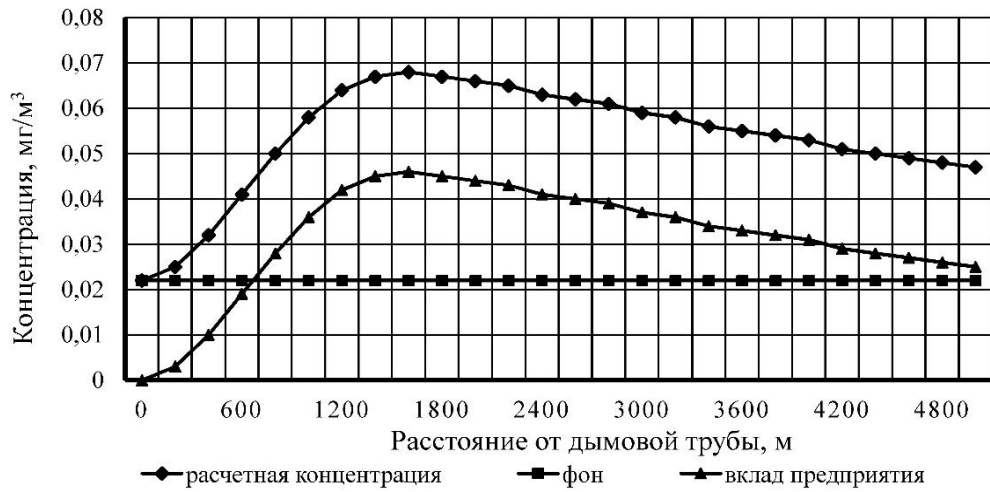


Рисунок 3.7 – Расчетные концентрации NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов при отводе уходящих газов через дымовую трубу (Сызраская ТЭЦ), мг/м³

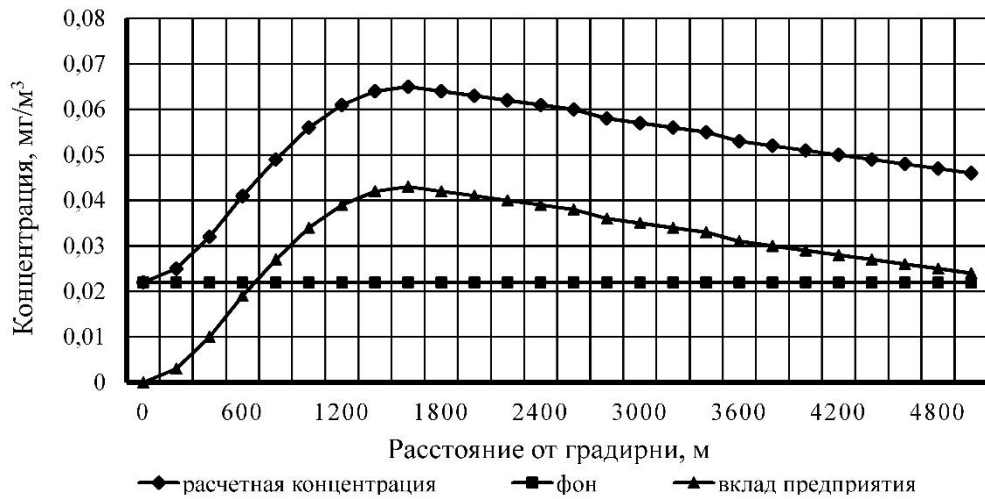


Рисунок 3.8 – Расчетные концентрации NO_2 в зависимости от расстояния от источника выбросов при отводе уходящих газов через градирню (Сызранская ТЭЦ), мг/м³

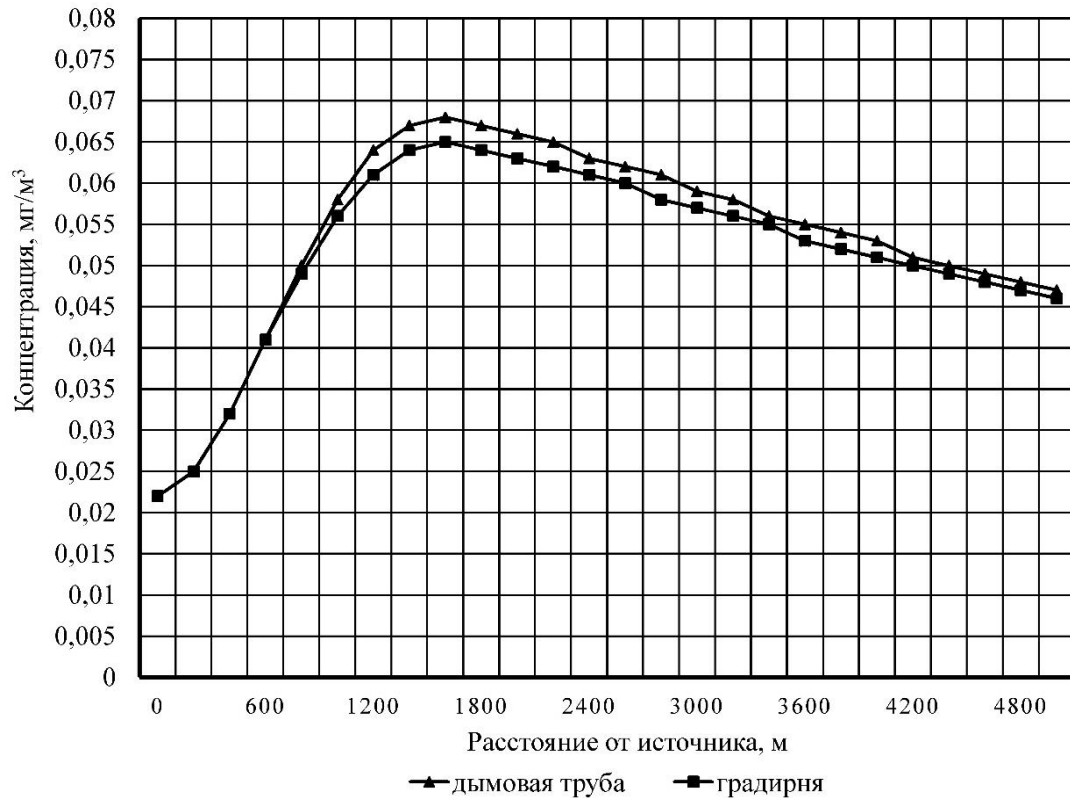


Рисунок 3.9 – Расчетные концентрации NO₂ в зависимости от расстояния от источника выбросов при различных способах отвода уходящих газов (Сызранская ТЭЦ), мг/м³

Анализ результатов расчетов показывает, что при отводе уходящих газов от газотурбинных установок PG6111FA, установленных на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ, через вытяжную башню градирни и через дымовую трубу концентрация NO₂ в зоне действия источника не превышает ПДК (ПДК_{мр}=0,2 мг/м³) (см. рисунок 3.9). Расчетная максимальная концентрация NO₂ в атмосферном воздухе с учетом фона составляет 0,068 мг/м³ и 0,065 мг/м³ для дымовой трубы и градирни соответственно. Таким образом, при отводе уходящих газов от газотурбинных установок PG6111FA ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ через башенную градирню БГ-2300 расчетная концентрация NO₂ в атмосферном воздухе снижается, что обусловлено большей высотой вытяжной башни градирни по сравнению с высотой дымовой трубы.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Получено распределение концентраций NO_2 в атмосферном воздухе с учетом только вклада предприятия и с учетом вклада предприятия и фоновых концентраций в зоне действия ТЭЦ при отводе уходящих газов энергетических установок через дымовую трубу и градирню для Самарской ТЭЦ и Сызранской ТЭЦ.

2. Получены основные показатели вредного воздействия (опасная скорость и расстояние до максимума) при отводе уходящих газов энергетических установок через дымовую трубу и градирню для Самарской ТЭЦ и Сызранской ТЭЦ.

3. Расчет рассеивания диоксида азота при удалении дымовых газов как через дымовую трубу, так и при использовании вместо дымовой трубы вытяжной башни градирни показал, что концентрация NO_2 в обоих случаях не превышает предельно допустимых значений и равны 0,042 и 0,164 мг/м³ соответственно для дымовой трубы и градирни Самарской ТЭЦ, и 0,046 и 0,043 мг/м³ – для Сызранской ТЭЦ.

4. Анализ полученных результатов расчетов показал, что с экологической точки зрения отвод уходящих продуктов сгорания от котлов-утилизаторов ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ (ТЭЦ ЗИГМ), от энергетических котлов БКЗ-450-140 НГМ Самарской ТЭЦ возможно осуществлять через вытяжные башни градирни этих ТЭЦ, что обуславливает экономический эффект за счет снижения приведенных затрат на строительство и эксплуатацию газоотводящих труб.

ГЛАВА 4. ЗАЩИТА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ВЫТЯЖНОЙ БАШНИ ГРАДИРНИ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

4.1. Способы защиты верхней части градирни от обмерзания

На ТЭС для охлаждения циркуляционной воды наиболее часто устанавливаются башенные градирни с естественной тягой воздуха. При этом не требуется источник водоснабжения (река, озеро), расположенный вблизи станции. Главной особенностью градирен является их компактность. В настоящее время градирни применяются как при расширении тепловых и атомных электростанций, так и при строительстве новых энергетических объектов.

Одной из особенностей работы башенных градирен является то, что при отрицательных температурах окружающей среды на выходе из вытяжной башни градирни влажный воздух, взаимодействуя с ее холодными стенками, охлаждается ниже точки росы, при этом, находящиеся в воздухе водяные пары конденсируются, конденсат намерзает на стенках вытяжной башни градирни, образуется значительное количество льда. При положительных температурах наружного воздуха лед отделяется от стенок вытяжной башни, падает с высоты и разрушает расположенные ниже элементы градирни, что снижает надежность градирни и тепловой электростанции.

Для предотвращения обмерзания внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни применяют различные способы:

- подачу сухого холодного воздуха по периметру верхней части башенной градирни с помощью вентиляторов [76];
- подачу сухого холодного воздуха через дополнительные воздухоходные окна см. рисунки 1.12 и 1.13 [77];
- установку по периметру в верхней части вытяжной башни градирни щитов, с расположенными на них шипами, исключающими падение намерзающего на них в зимнее время льда до полного его таяния [78];

– установку козырьков в верхней части вытяжной башни градирни (см. рисунок 1.14) [72].

В настоящей работе предлагается по периметру верхней части вытяжной башни градирни установить газораспределительное устройство, состоящее из кольцевого коллектора постоянного сечения с щелевыми отверстиями равномерной раздачи воздуха [98–100]. Рассматриваются два варианта защиты внутренней поверхности верхней части вытяжной башни градирни и ее устья от обледенения. В первом варианте в кольцевой коллектор подается сухой подогретый атмосферный воздух [125] (рисунок 4.1. а), а во втором – уходящие продукты сгорания паротурбинной или парогазовой ТЭС при температуре 80–130 °С (рисунок 4.1. б) [126]. Подача подогретого атмосферного воздуха или уходящих продуктов сгорания настилающими струями [91–95] позволяет отделить теплый влажный воздух, движущийся в вытяжной башне градирни, от холодных стенок вытяжной башни и предотвратить конденсацию водяных паров на ее внутренней поверхности [127–132].

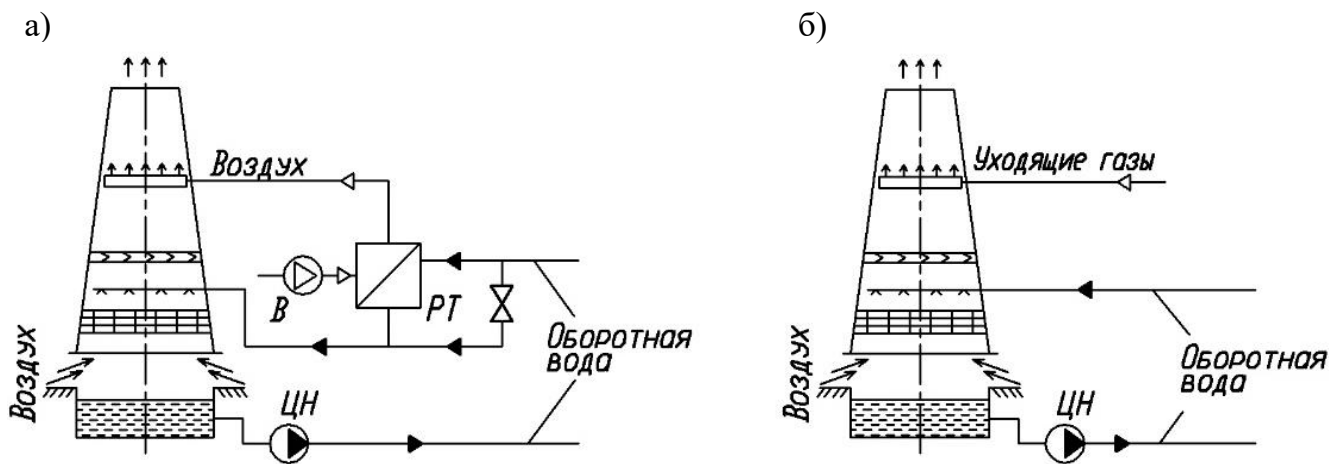


Рисунок 4.1 – Схема системы защиты от обледенения устья вытяжной башни градирни за счет подачи подогретого атмосферного воздуха (а) и уходящих газов (б):

В – вентилятор; РТ – рекуперативный теплообменник; ЦН – циркуляционный насос

4.2. Математическая модель защитного пограничного слоя

Моделирование выполнялось в среде OpenFOAM с использованием оболочки SimScale в стационарной постановке для сплошной среды в Эйлеровой формулировке с помощью усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Для описания пристеночного пограничного слоя и конвективного теплообмена в нем

была принята система уравнений, замкнутая моделью турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST. Аналитическая обработка результатов выполнена на языке Wolfram с использованием Wolfram Cloud.

На этапе формирования численной модели рассматриваемого процесса было сделано предположение о несжимаемости рабочей среды. В частности было принято, что течение среды будет находиться в дозвуковом диапазоне ($U_{\text{макс}} < 0,3U_{\text{звук}}$), а локальные перепады давления не превысят 5 %. Поскольку задача не предполагает моделирование конденсации водяного пара из влажного воздуха градирни (как поверхностной, так и объемной) уравнение неразрывности (сплошности среды) было сформулировано без учета изменения плотности во времени и пространстве:

$$\nabla \cdot U = 0. \quad (4.1)$$

Уравнение движения учитывает влияние на поток инерционных сил, а также сил вязкого трения и внешних сил (гравитации):

$$\nabla \cdot (\rho UU) = -\nabla p + \nabla \tau_{ij} + \rho g, \quad (4.2)$$

$$\nabla \tau_{ij} = \nabla \cdot \mu_{\text{eff}} \nabla U + \nabla \cdot \mu_{\text{eff}} \left[(\nabla U)^T - \frac{2}{3} t_r ((\nabla U)^T) I_n \right]. \quad (4.3)$$

Здесь $\nabla \tau_{ij}$ – тензор вязкого трения, μ_{eff} – эффективная динамическая вязкость, $(\nabla U)^T$ – транспонированная матрица скорости, t_r – оператор следа, I_n – единичная матрица ($n=3$ для 3D расчетной области), μ и Re – динамический коэффициент вязкости и критерий Рейнольдса.

Уравнение энергии описывает закон сохранения полной энергии E в контрольном объеме. Изменение энергии во времени $\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)$ и в пространстве $(\nabla \cdot (EU))$ происходит в результате конвективного теплообмена $(\nabla \cdot (\lambda \nabla T))$ и работы внешних сил $(\nabla U : \tau_{ij})$. В модели рассматривается только изменение внутренней энергии потока, поэтому полная энергия описывается уравнением:

$$E = e = mc_p T. \quad (4.4)$$

С учетом выражения (4.4) полное уравнение энергии будет иметь следующий вид:

$$\rho c_p (\nabla \cdot (TU)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla U : \tau_{ij}, \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \nabla U : \tau_{ij} = & \frac{\partial U_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial U_x \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial U_x \tau_{zx}}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial U_y \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial U_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial U_y \tau_{zy}}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial U_z \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial U_z \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial U_z \tau_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.3. Численное моделирование системы защиты верхней части градирни от обледенения

4.3.1. Формирование расчетной области

Система нагнетания воздуха (поддува) представляет собой круговой воздуховод круглого сечения диаметром 1000 мм с осевым диаметром 37460±50 мм (рисунок 4.2). Воздуховод дополнительного нагнетания воздуха расположен внутри вытяжной башни градирни на расстоянии 5 м от верхней кромки башни. Для подачи потока дополнительного воздуха в верхней части воздуховода обустроены щелевые отверстия шириной 100 мм. Крепление воздуховода поддува к внутренней поверхности стены градирни осуществляют хомутами, либо посредством г-образных кронштейнов с возможностью установки зазора между внутренней поверхностью стенки градирни к образующей воздуховода.

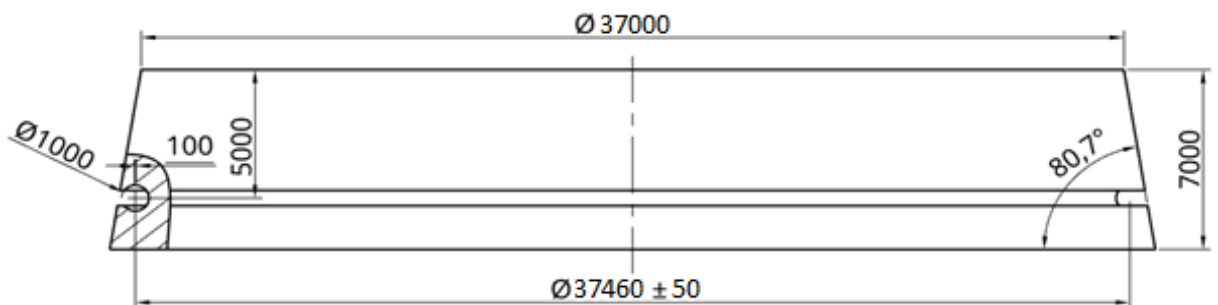


Рисунок 4.2 – Схема размещения воздуховода поддува в вытяжной башне градирни

В соответствии со схемой размещения воздуховода расчетная область (модель) настилающегося воздушного потока ограничена верхней частью градирни и представляет собой усеченный конус высотой 7 м (рисунок 4.3), с диаметрами нижнего и верхнего оснований 39,04 и 37,00 м соответственно. На расстоянии 5 м от устья вытяжной башни градирни выделен цилиндрический объем, представляющий собой модель воздуховода диаметром 1 м по осевому диаметру 37,46 м. По верхнему краю цилиндрического объема (модели воздуховода) выполнено условное разделение поверхности для формирования сплошной круговой щели шириной 0,1 м.

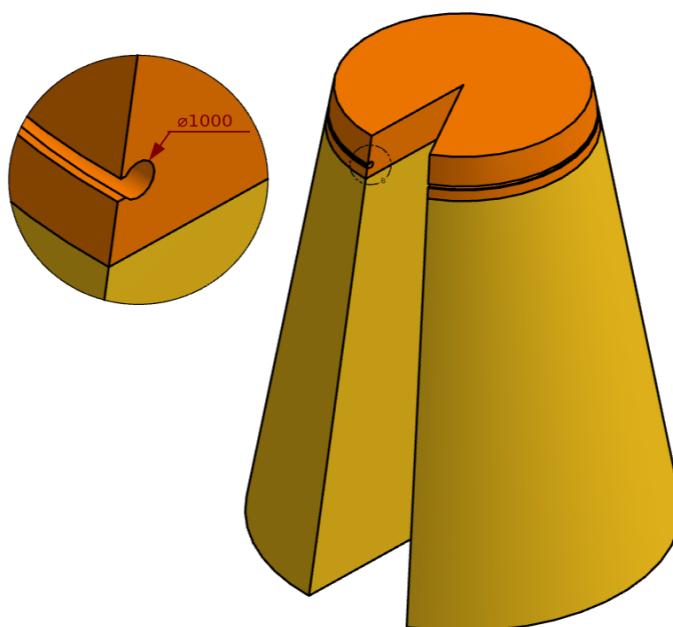


Рисунок 4.3 – Геометрия расчетной области градирни

Расчетная геометрическая модель охватывает область моделируемого пограничного слоя в полном объеме со следующими допущениями:

- принято полное примыкание воздуховода к внутренней стенке градирни;
- щелевые отверстия в воздуховоде замещены сплошной круговой щелью номинальной ширины (100 мм);
- крепежные элементы (кронштейны, хомуты и пр.) не показаны;
- место примыкания искусственно увеличено (см. рисунок 4.3).

4.3.2. Построение расчетной сетки

Расчетная область была дискретизирована четырьмя комбинированными сетками. Сетки содержали тетраэдральные и гексагональные ячейки со средним линейным размером $\Delta x = 216,8 - 415,1$ мм (см. таблицу 4.1), который определялся как среднее арифметическое от производных линейных размеров всех ячеек:

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \sqrt[3]{V_i}}{N}. \quad (4.7)$$

Здесь V_i – объем i -ячейки, N – количество ячеек в расчетной сетке.

Таблица 4.1 – Характеристики расчетных сеток

Относительный размер ячеек (номер сетки)	Количество ячеек	Средний размер ячеек Δx , мм	Максимальный размер ячеек Δx_{\max} , мм	Минимальный размер ячеек Δx_{\min} , мм
3	185200	415,1	2535	35,3
4	251800	374,7	2030	25,0
5	635000	275,3	634	19,0
6	1300000	216,8	433	15,5

Поскольку рассматриваемый процесс протекает в пристеночной зоне, то в объеме расчетной области сформированы ячейки преимущественно гексагональной формы и максимального размера (рисунок 4.4.). Это позволило снизить вычислительную нагрузку за счет сокращения количества расчетных узлов. В пристеночной зоне выполнено измельчение сетки. Ячейки в этой зоне тетраэдральные (кроме призматических слоев) для заполнения криволинейных поверхностей.

В пограничном слое (вблизи поверхности стенки) ячейки формируют призматические слои для обеспечения достаточного разрешения на границе с поверхностью теплообмена. Три слоя со степенью роста 1,5 обеспечивают величину безразмерного расстояния $y^+ \sim 1$. Толщина y первого слоя была определена относительно требуемой величины безразмерного расстояния y^+ и сдвиговой скорости U^* :

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho U^*}. \quad (4.8)$$

Здесь μ и ρ – динамический коэффициент вязкости и плотность потока.

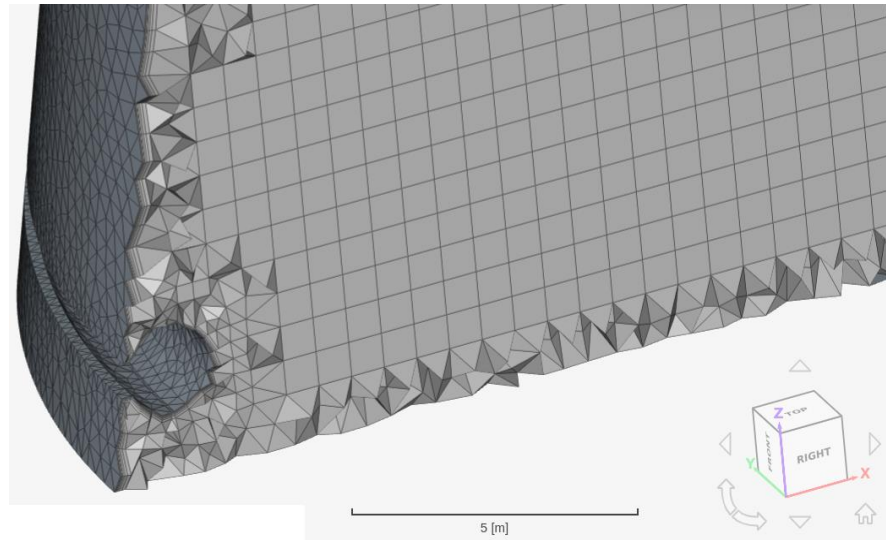


Рисунок 4.4 – Разрез расчетной сетки № 5

Сдвиговая скорость была определена через тензор сдвигового напряжения τ :

$$U^* = \sqrt{\frac{c_f U_\infty^2}{2}}. \quad (4.9)$$

Здесь U_∞ – скорость потока вдали от стенки, c_f – коэффициент сдвигового трения, который был определен по выражению Шлихтинга [133]:

$$c_f = (2 \log_{10}(\text{Re}_x - 0,65))^{-2,3}, \quad (4.10)$$

где Re_x – критерий Рейнольдса с определяющим размером $L=5$ м.

4.3.3. Термодинамические параметры

Влажный воздух градирни и дополнительный (дутьевой) воздух рассматривались как смеси сухого воздуха и водяного пара. Поэтому термодинамические параметры рабочей среды рассчитывались отдельно для каждого компонента и затем объединялись пропорционально массовым долям в смеси. Ожидаемый диапазон рабочих температур влажного воздуха 290–320 К (17–47 °С). Стандартные зависимости термодинамических параметров от температуры аппроксимировались уравнениями вида (4.11) – (4.13) то есть в модели были использованы собственные аппроксимации. Для расчета молярной теплоемкости, энтальпии и эн-

тропии в OpenFOAM применяются справочники Национального института стандартов и технологий [134], в которых используются следующие формулировки:

$$c_p(T) = R(a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4), \quad (4.11)$$

$$h(T) = R(a_0T + \frac{a_1T^2}{2} + \frac{a_2T^3}{3} + \frac{a_3T^4}{4} + \frac{a_4T^5}{5} + a_5), \quad (4.12)$$

$$s(T) = R(a_0 \ln(T) + a_1T + \frac{a_2T^2}{2} + \frac{a_3T^3}{3} + \frac{a_4T^4}{4} + a_6), \quad (4.13)$$

где c_p , Дж/(моль·К); h , Дж/моль; s , Дж/(моль·К) – соответственно теплоемкость, энтальпия и энтропия воздуха; $R=8,3145$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $\ln(T)$ – натуральный логарифм температуры.

Значения термодинамических коэффициентов для сухого воздуха и водяного пара представлены в таблице 4.2. Теплоемкость сухого воздуха в рассматриваемом диапазоне (250–300 К) принималась постоянной, поэтому коэффициенты a_1 – a_4 равны нулю. Графическое представление зависимости молярной теплоемкости водяного пара от температуры приведено на рисунке 4.5.

Таблица 4.2 – Термодинамические коэффициенты для сухого воздуха и водяного пара

Среда	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Воздух	3,50	0	0	0	0	433,90	–6,45
Водяной пар	1,59	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-7}$	$4,39 \cdot 10^{-10}$	4546,26	5,71

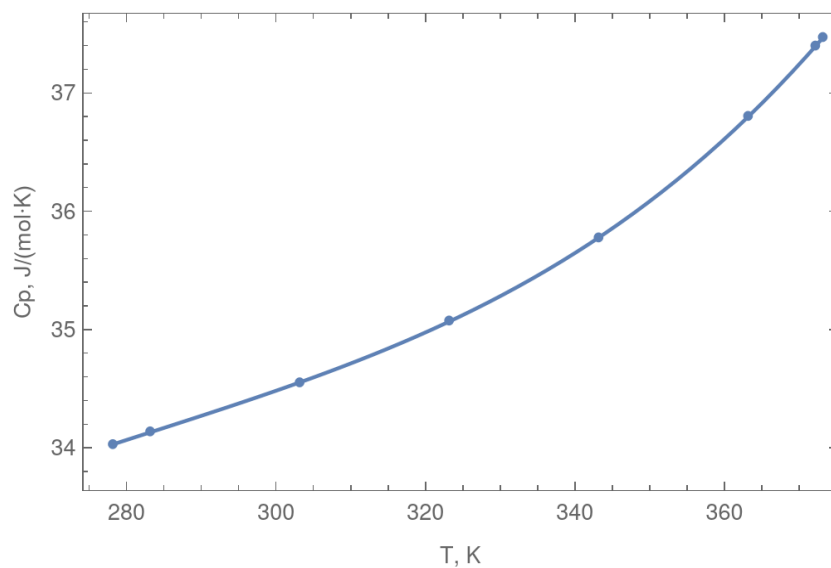


Рисунок 4.5 – Молярная теплоемкость водяного пара

Плотность для каждого компонента смеси рассчитывалась по закону для идеального газа

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (4.14)$$

где p – давление, Па; T – температура, К; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Динамический коэффициент вязкости компонентов рабочей смеси был рассчитан по выражению Сазерленда [135] с коэффициентами, подобранными для рассматриваемого температурного диапазона

$$\mu_{\text{возд}} = \frac{1,46e - 6\sqrt{T}}{1 + 110,62/T}, \quad (4.15)$$

$$\mu_{\text{вп}} = \frac{2,45e - 6\sqrt{T}}{1 + 1062,72/T}. \quad (4.16)$$

Графические представления зависимостей динамической вязкости для сухого воздуха и водяного пара от температуры представлены на рисунке 4.6.

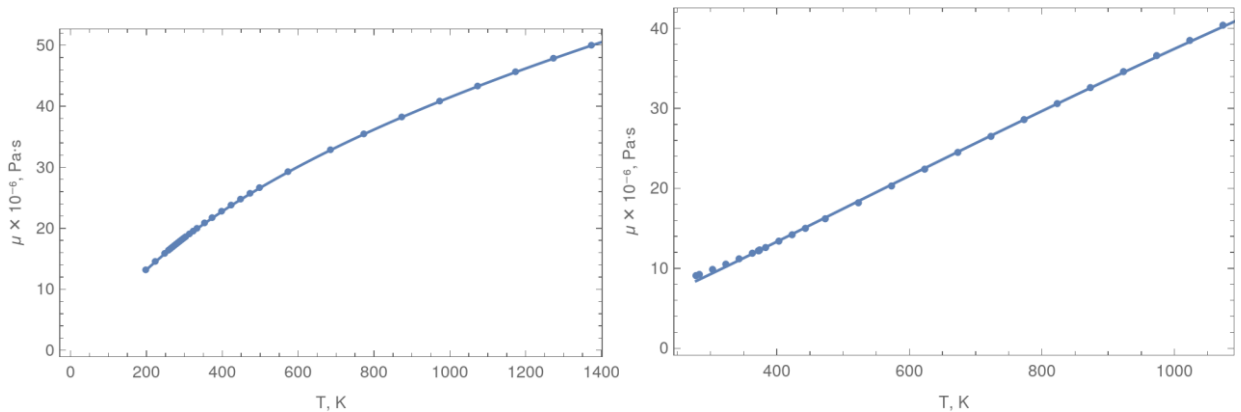


Рисунок 4.6 – Динамическая вязкость воздуха (слева) и водяного пара (справа)

4.3.4. Граничные условия

Граничные условия задаются из соображений наибольшего соответствия модели физическому объекту. В качестве исходных параметров были приняты параметры влажного воздуха градирни после каплеуловителя и влажного атмосферного воздуха.

В расчетную область поступает влажный воздух градирни и влажный атмосферный воздух. Качественный состав обеих смесей одинаков (сухой воздух и во-

дяной пар). При этом соотношение массовых долей компонентов определяется относительной влажностью смеси 100 % для влажного воздуха градирни и 83 % для дополнительно нагнетаемого (дутьевого) воздуха. Массовые доли компонентов были определены по закону идеального газа следующим образом:

$$x_{\text{вп}} = \frac{0,62198 p_{\text{нас}}}{p - p_{\text{нас}}}, \quad (4.17)$$

$$x_{\text{возд}} = 1 - x_{\text{вп}}. \quad (4.18)$$

Давление насыщения водяного пара $p_{\text{нас}}$ было определено по выражению Ардена Бака [136; 137]:

$$p_{\text{нас}}(t) = 661,21 \exp \left(\left(18,678 - \frac{t}{234,5} \right) \left(\frac{t}{257,14 + T} \right) \right). \quad (4.19)$$

Здесь t – температура влажного воздуха по сухому термометру, °С.

Температура и расход рабочей среды были заданы постоянными значениями с равномерным распределением ($\partial \psi / \partial t = 0$, $\partial \psi / \partial n = 0$). Параметры турбулентности определялись по следующим зависимостям:

$$k = 1,5(UI)^2, \quad (4.20)$$

$$I = \frac{16}{\text{Re}^{0,125}}, \quad (4.21)$$

$$\varepsilon = \frac{0,164k^{1,5}}{0,07d_h}, \quad (4.22)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k}, \quad (4.23)$$

$$\text{Re}_t = \frac{k^2}{\varepsilon \nu}, \quad (4.24)$$

$$\text{Pr}_t = \frac{6,374}{\text{Re}^{0,283} \text{Pr}^{0,161}}, \quad (4.25)$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, $\text{м}^2/\text{с}^2$; U – средняя скорость потока среды, $\text{м}/\text{с}$, I – интенсивность турбулентных пульсаций, %, $\text{Re} = \frac{UL}{\nu}$ – критерий Рейнольдса для потока, ε – интенсивность рассеивания энергии турбулентных пульсаций, $\text{м}^2/\text{с}^3$, d_h – гидравлический диаметр градирни, м , ω – приведенное значение интенсивности рассеивания энергии турбулентных пульсаций, $1/\text{с}$, Re_t и

Pr_t – турбулентные числа Рейнольдса и Прандтля, ν и Pr – кинематический коэффициент вязкости и число Прандтля для рабочей среды.

Выход влажного воздуха из градирни осуществляется через верхнюю грань расчетной области. Поскольку выход осуществляется в атмосферу в турбулентном режиме ($Re > 2300$), все граничные условия на выходе задавались с учетом вероятности возникновения обратного потока: $\nabla\psi = 0$ при прямом направлении потока (из расчетной области) и $\partial\psi / \partial t = 0 \cap \partial\psi / \partial n = 0$ при обратном направлении потока (в расчетную область). В случае обратного потока для всех параметров принимались значения граничных условий дутьевого воздуха.

На стенке вытяжной башни градирни было принято условие вязкого трения ($U = 0$). Пристеночные функции для определения параметров турбулентности вблизи стенки не использовались, т.к. призматические слои расчетной сетки были подобраны с учетом выполнения условия полной дискретизации пограничного слоя ($y^+ \sim 1$).

Температура на внутренней поверхности вытяжной башни градирни была задана граничными условиями Робина:

$$-\lambda_{\text{ввг}} \frac{T_{\text{ввг}} - T_{\text{ст2}}}{\delta} = \frac{T_{\text{возд}} - T_{\text{ст2}}}{\sum R}. \quad (4.26)$$

Здесь $\lambda_{\text{ввг}}$ – теплопроводность влажного воздуха градирни при температуре $T_{\text{ввг}}$; $T_{\text{возд}}$ – температура наружного воздуха; $T_{\text{ст2}}$ – температура внутренней поверхности стенки; $\delta = 0,07d_h$ – толщина пограничного слоя влажного воздуха градирни

диаметром d_h ; $\sum R = \frac{1}{\alpha_{\text{возд}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – суммарное термическое сопротивление стенки

градирни. В рассматриваемом случае термическое сопротивление собственно стенки не учитывается, поэтому суммарное сопротивление определяется коэффициентом теплоотдачи от стенки вытяжной башни градирни к наружному воздуху:

$$\sum R = \frac{1}{\alpha_{\text{возд}}}. \quad (4.27)$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности вытяжной башни градирни в зависимости от уровня сечения z был определен по эмпирическому выражению [138].

4.4. Результаты моделирования

4.4.1. Общие положения

Численное моделирование проводилось с целью выявления эффективности работы системы защиты от обледенения устья вытяжной башни градирни в зависимости от режимных параметров. Защитный пограничный слой создается предварительно подогретым до температуры $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ воздухом или дымовыми газами, отводимыми от теплогенерирующих установок при температуре $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве критерия оценки эффективности была использована толщина защитного слоя. При подаче подогретого атмосферного воздуха защитный слой представляет собой пристеночный объем воздуха с температурой на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем температура насыщения водяных паров в воздухе, движущемся в вытяжной башне градирни $t_{\text{зс}} \leq t_{\text{нас}} - 2$. При подаче дымовых газов достаточно поддержания положительной температуры стенки градирни, чтобы предотвратить обледенение.

Средняя толщина защитного пограничного слоя определялась по формуле:

$$\delta_{\text{зс}} = \frac{V_{\text{зс}}}{S_{\text{зс}}}, \quad (4.28)$$

где $S_{\text{зс}}$ – площадь поверхности защитного слоя, м^2 , равная площади внутренней поверхности стенки градирни выше воздуховода системы защиты от обледенения, $V_{\text{зс}}$ – объем защитного слоя, м^3 .

Рассмотрены пять режимных параметров работы градирни в зависимости от изменения температуры наружного воздуха. Результаты расчетов объединены в соответствующие серии (таблица 4.3). В каждой серии ступенчато изменяется температура наружного воздуха $t_{\text{возд}}$ в диапазоне $-30\text{...}-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расход подаваемого в защитный слой воздуха в расчетах принимался равным 2% от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни.

Также была произведена дополнительная серия расчетов (серия 1-3-Х) с переменной долей подаваемого в защитный слой воздуха в диапазоне от 0 до 5% .

Таблица 4.3 – Задаваемые значения параметров моделирования

№ расчета	Температура наружного воздуха t_n , °С (К)	Температура влажного воздуха градирни $t_{ввг}$, °С (К)	Температура насыщения $t_{нас}$, °С (К)	Расход влажного воздуха градирни $G_{ввг}$, тыс. м ³ /ч	Доля расхода воздуха дополнительного нагнетания, %
Серия 1 (воздушный защитный слой)					
1-3	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	2
1-4	-15 (258,15)	23,4 (296,55)	22,8 (295,95)	4783,7	2
1-5	-20 (253,15)	22 (295,15)	21,4 (294,55)	4714,5	2
1-6	-25 (248,15)	20,9 (294,05)	20,3 (293,45)	4631,5	2
1-7	-30 (243,15)	19,6 (292,75)	19,6 (292,25)	4542,9	2
Серия 1-3 (различные расходы подаваемого в защитный слой воздуха)					
1-3-0	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	0
1-3-1	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	1
1-3-1,5	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	1,5
1-3-2	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	2
1-3-5	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	23,9 (297,05)	4906,4	5
Серия 3 (защитный слой, создаваемый дымовыми газами)					
3-1	-10 (263,15)	24,6 (297,75)	–	4906,4	2
3-2	-15 (258,15)	23,4 (296,55)	–	4783,7	2
3-3	-20 (253,15)	22 (295,15)	–	4714,5	2
3-4	-25 (248,15)	20,9 (294,05)	–	4631,5	2
3-5	-30 (243,15)	19,6 (292,75)	–	4542,9	2

4.4.2. Результаты моделирования градирни

В результате моделирования градирни в соответствии с режимными параметрами (таблица 4.3) были получены пространственные распределения скорости, давления, температуры и других термодинамических параметров потока в рассматриваемом объеме градирни.

Воздушный защитный слой.

Пространственная визуализация защитного слоя при подаче подогретого воздуха для пяти вариантов расчетов для градирни представлена на рисунке 4.7. Для всех рассмотренных вариантов расчетов обеспечивается полное покрытие внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни защитным слоем воздуха с температурой ($t_{зс} \leq t_{нас} - 2$).

По всей высоте защитного слоя наблюдаются характерные утолщения, носящие случайно-периодический характер. Утолщения имеют клиновидную форму,

сужаются к верхней кромке градирни. Поскольку задача решалась в стационарной постановке, положения утолщений фиксировано. Однако, при натурных испытаниях наблюдается планомерное перемещение утолщений по периметру стенки вытяжной башни градирни, а также незначительные изменения их толщины и длины, возможны незначительные искривления. Наличие утолщений и характер их размещения определяется скоростью подаваемого в защитный слой воздуха и объясняется создаваемыми воздухом вихревыми потоками. Стабилизация вихревых потоков не требуется, поскольку впадины, компенсирующие выступы, не наблюдаются.

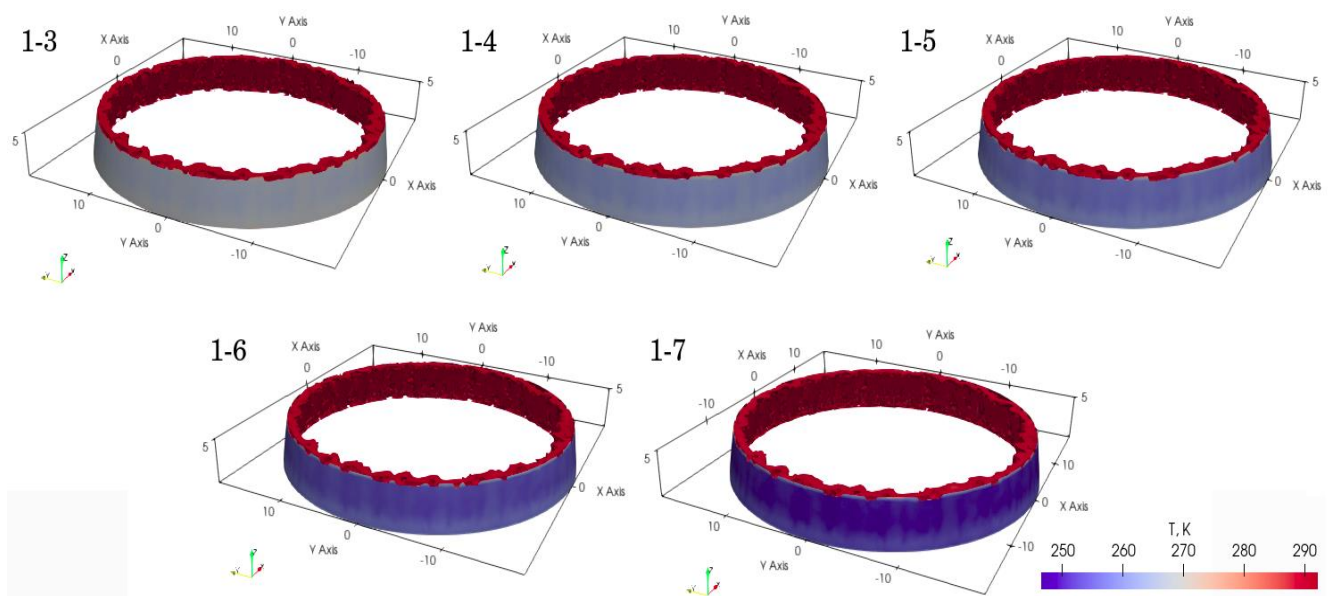


Рисунок 4.7 – Защитные слои для градирни: 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7 – при температуре наружного воздуха t_H соответственно -10, -15, -20, -25, -30 °С

На рисунке 4.8 показаны поперечные сечения защитного пограничного слоя. Азимутальный угол каждого сечения подобран таким образом, чтобы исключить прохождение через утолщения, описанные выше.

Минимальное значение толщины защитного пограничного слоя составило $\delta_{zc} = 1000$ мм. Наблюдались локальные утолщения защитного слоя до 1480 мм. Средние значения толщины воздушного защитного слоя были определены по выражению (4.28) и приведены в таблице 4.4. Средняя температура воздуха в защитном слое изменяется пропорционально изменению температуры наружного воздуха t_H , поскольку температура дополнительного подаваемого воздуха в расчетах принималась постоянной, равной 5 °С.

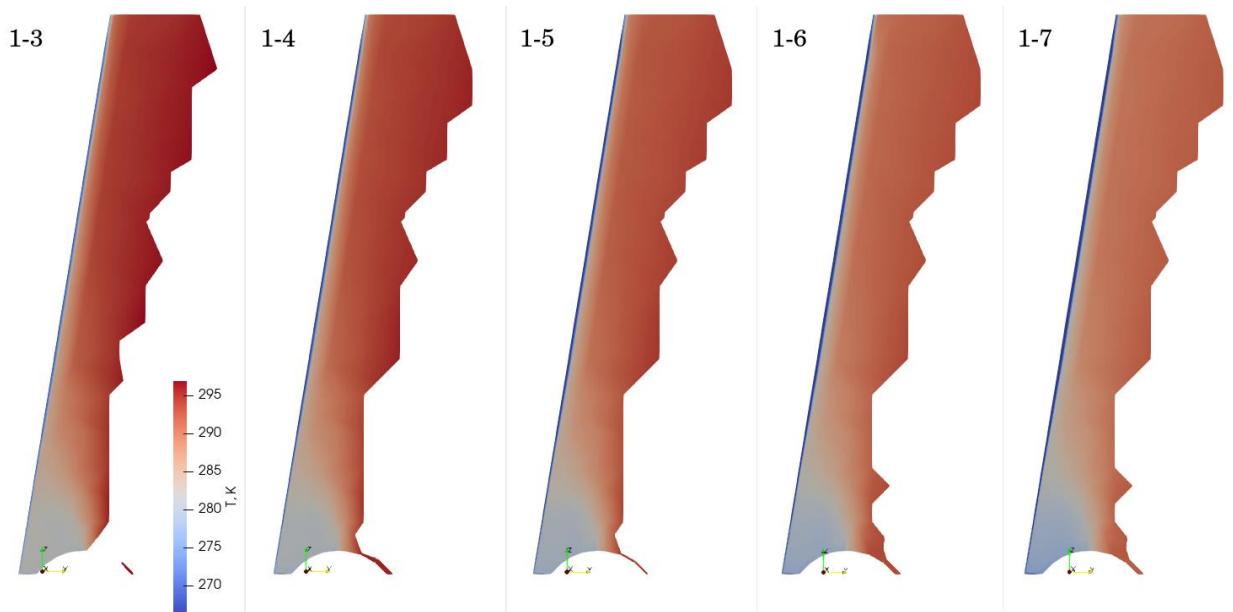


Рисунок 4.8 – Защитные слои в вертикальном сечении: расчеты 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7 – при температуре наружного воздуха t_n соответственно -10, -15, -20, -25, -30 °С

Таблица 4.4 – Параметры защитного слоя для градирни

№ расчета	Минимальная толщина защитного слоя, мм	Средняя температура воздуха в защитном слое, °С	Средняя температура стенки, °С
1-3	986	8,4	-6,0
1-4	993	6,1	-10,3
1-5	1002	2,0	-14,5
1-6	1012	-2,0	-18,7
1-7	1021	-4,1	-23,0

Защитный слой, создаваемый дымовыми газами.

При подаче в защитный слой уходящих продуктов сгорания котельной установки при температуре 80–120 °С условием защиты от обледенения является поддержание температуры внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни не ниже +2 °С. В диссертационном исследовании выполнены расчеты для пяти вариантов работы градирни при температурах наружного воздуха -10... -30 °С.

Изменения температуры внутренней поверхности вытяжной башни градирни (рисунок 4.9) свидетельствуют о том, что защита устья вытяжной башни градирни от обледенения путем подачи уходящих газов котлов ТЭС в защитный пограничный слой является эффективным научно-техническим решением для всех рассмотренных условий работы градирни при температурах наружного воздуха до -30 °С. На рисунке 4.10 приведены расчетные значения температуры внутрен-

ней поверхности вытяжной башни градирни для $t_{\text{н}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{н}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для промежуточных значений $t_{\text{н}}$ характер распределения температуры и толщины защитного пограничного слоя имеет аналогичную картину.

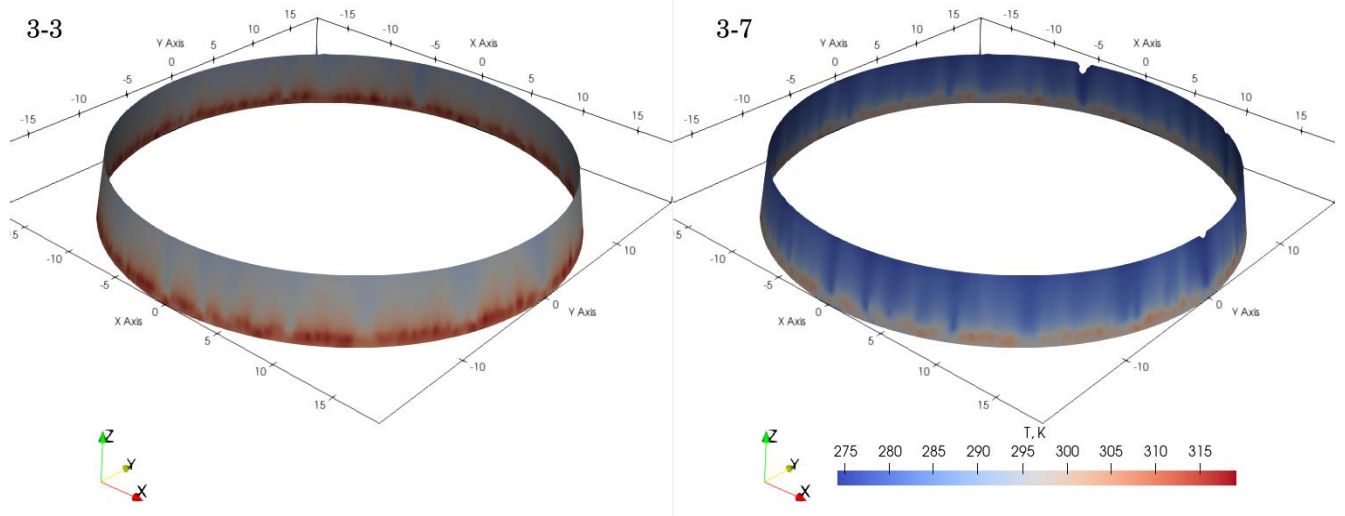


Рисунок 4.9 – Температура внутренней поверхности вытяжной башни градирни: 3-3 при $t_{\text{н}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3-7 при $t_{\text{н}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Средняя температура стенки внутренней поверхности вытяжной башни градирни при подаче в защитный слой уходящих газов котлов ТЭС для $t_{\text{н}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{н}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 23 и 8 $^{\circ}\text{C}$, а диапазоны температур внутренней поверхности вытяжной башни градирни – 12–32 $^{\circ}\text{C}$ и 4–19 $^{\circ}\text{C}$.

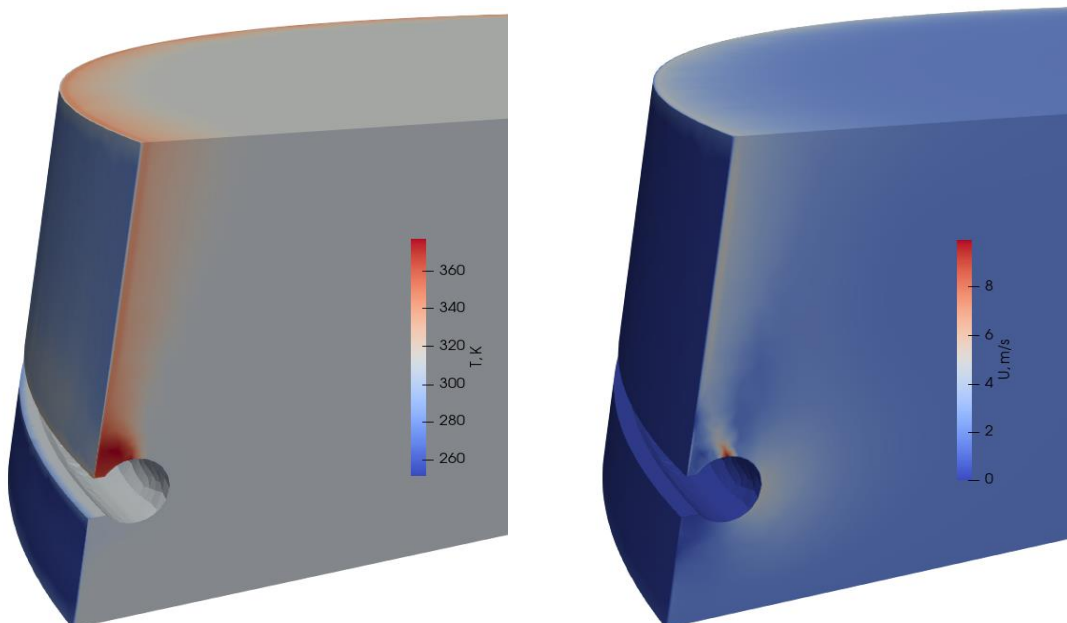


Рисунок 4.10 – Распределение температуры (слева) и скорости (справа) в пристеночном слое градирни при $t_{\text{н}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.3. Влияние расхода дутьевого воздуха на толщину защитного пограничного слоя

Для установления зависимости влияния расхода воздуха на толщину защитного слоя была проведена серия расчетов для различных расходов дополнительно подаваемого воздуха. В результате моделирования градирни в соответствии с режимными параметрами дополнительной серии расчетов 1-3-X (таблица 4.3) были получены пространственные распределения скорости, давления, температуры в рассматриваемом объеме градирни.

Пространственная визуализация защитного слоя для каждого варианта представлена на рисунок 4.11. Для всех рассмотренных вариантов расчетов обеспечивается покрытие внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни защитным слоем воздуха с температурой ($t_{zc} \leq t_{нас} - 2$). При этом средняя температура защитного слоя в пределах серии расчетов находилась в диапазоне 7,8–8,8 °С.

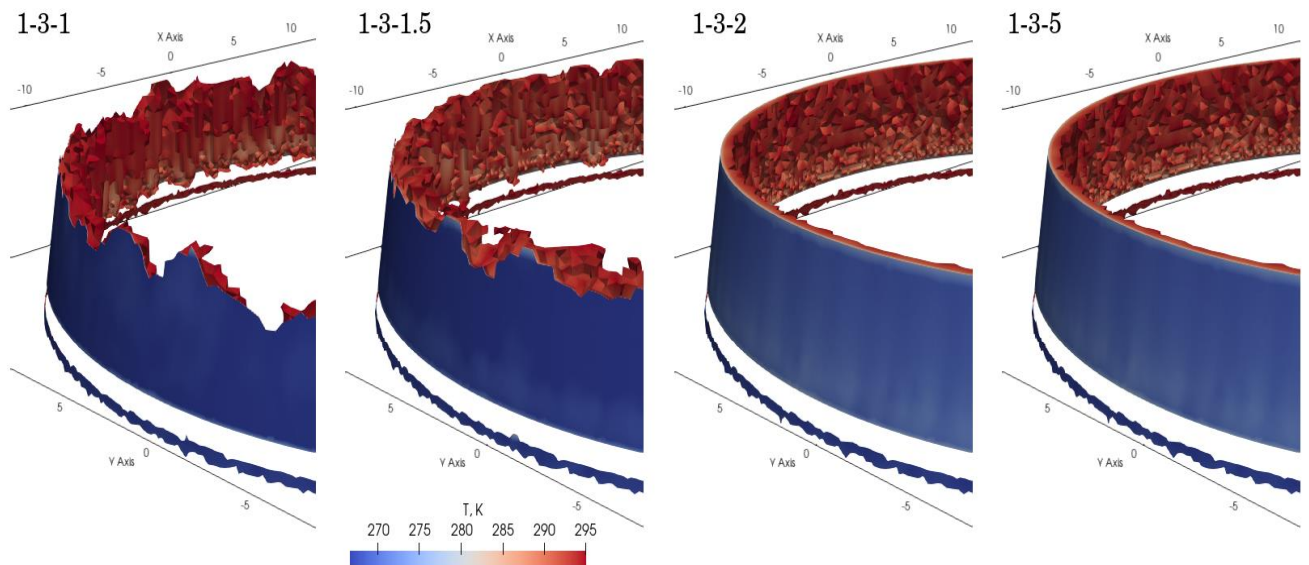


Рисунок 4.11 – Защитные слои для градирни при различных расходах подаваемого воздуха: 1-3-1, 1-3-1,5, 1-3-2, 1-3-5 – соответственно 1, 1,5, 2, 5 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни

На рисунке 4.12 показаны поперечные сечения защитного пограничного слоя. Азимутальный угол каждого сечения подобран таким образом, чтобы исключить прохождение через утолщения, описанные выше (см. п. 4.4.2).

Медианное (оно же базовое) значение доли расхода, подаваемого в защитный слой, воздуха составляет 2 % (98,13 тыс. м³/ч) от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни. Средние значения толщины воздушного защитного слоя были определены по выражению (4.28) и приведены в таблице 4.5. Минимальная толщина защитного слоя скачкообразно увеличивалась до 1506 мм при значении доли расхода, подаваемого в защитный слой, воздуха равной 1 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни. Далее толщина защитного слоя монотонно уменьшалась до 1002 мм при значении доли расхода подаваемого в защитный слой воздуха, равной 2 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни. Дальнейшее увеличение доли подаваемого воздуха (вплоть до 5 %) не оказывало влияния на толщину защитного слоя.

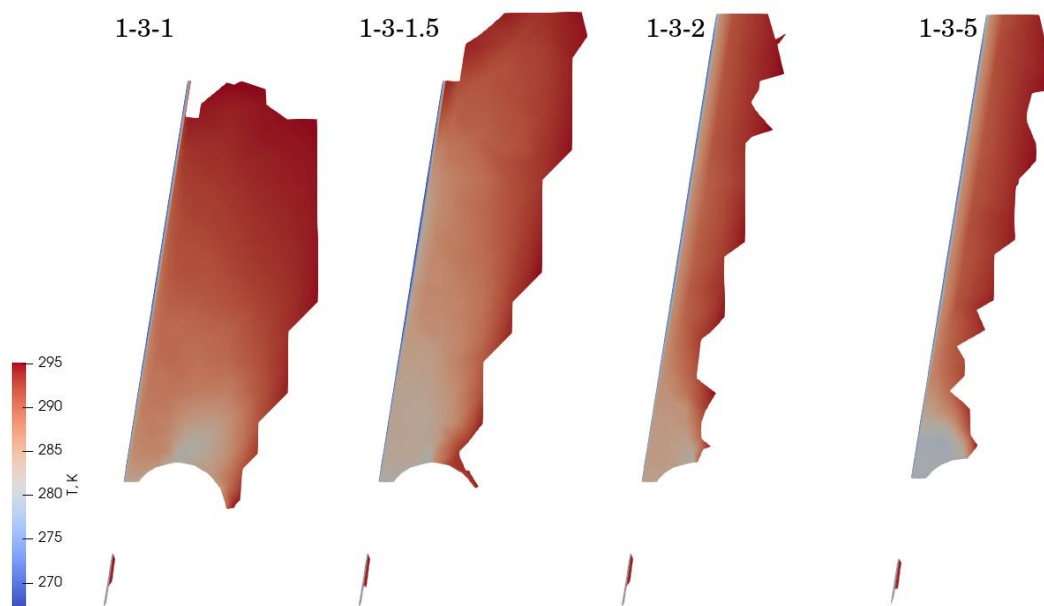


Рисунок 4.12 – Защитные слои в вертикальном сечении: расчеты 1-3-1, 1-3-1,5, 1-3-2, 1-3-5 – соответственно 1, 1,5, 2, 5 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни

Следует обратить внимание, что толщина защитного слоя увеличивается по мере сокращения интенсивности воздушного дутья вплоть до 1 %, а затем происходит резкое ее сокращение. Это объясняется вихревыми возмущениями, которые формируются в пристеночной области за счет разности скоростей основного потока влажного воздуха градирни и восходящего потока дутьевого воздуха.

Средняя температура защитного слоя была близка к среднему значению температур нагретаемого воздуха и влажного воздуха градирни с флуктуациями $\pm 1,2$ °С, которые были приняты за погрешность расчета ввиду пространственного и временного усреднения.

Таблица 4.5 – Параметры защитного слоя для градирни

№ расче-та	Минимальная толщина слоя, мм	Средняя температура воздуха в защитном слое, °С	Средняя температура стенки, °С
1-3-1	1506	8,0	-6,5
1-3-1,5	1312	8,1	-6,4
1-3-2	1002	8,4	-6,0
1-3-5	1008	7,8	-6,8

4.5. Верификация результатов моделирования

4.5.1. Сеточная сходимость

Пространственная дискретизация расчетной области необходима для решения системы дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель. Степень пространственной дискретизации до определенного порога оказывает существенное влияние на результат решения, поскольку его дискретные значения усредняются в объеме каждой ячейки. При достижении некоторого критического (порогового) значения, степень дискретизации не оказывает существенного влияния. Главным образом, это определяется алгоритмом описания вихревых структур моделью турбулентности. В настоящей работе была использована модель турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST, которая описывает только крупные вихревые структуры, а мелкие моделирует на основании эмпирических формулировок. То есть увеличение степени дискретизации выше некоторого порогового значения в рассматриваемом случае не целесообразно, так как результаты расчетов остаются неизменными, но значительно возрастает вычислительная нагрузка. Поэтому на этапе предварительного исследования было определено пороговое значение для разрешения расчетной сетки, которое и было использовано для основных расчетов.

Для определения порогового значения степени пространственной дискретизации расчетной области были проведены 4 расчета по варианту № 1-4 с одинаковыми исходными данными, но на расчетных сетках различной емкости. Параметры использованных расчетных сеток приведены в таблице 4.1.

Для определения истинного значения толщины защитного слоя была использована экстраполяция Ричардсона [139]:

$$\delta_{\text{зс,ист}} = \frac{(\Delta x_6)^{\hat{n}} \delta_{\text{зс},\Delta x_5} - (\Delta x_5)^{\hat{n}} \delta_{\text{зс},\Delta x_6}}{(\Delta x_5)^{\hat{n}} - (\Delta x_6)^{\hat{n}}}; \quad (4.29)$$

$$\hat{n} = \text{Max} \left[\frac{\ln \left(\frac{\delta_{\text{зс},\Delta x_6} - \delta_{\text{зс},\Delta x_5}}{\delta_{\text{зс},\Delta x_5} - \delta_{\text{зс},\Delta x_4}} \right)}{\ln(r)}, \frac{\ln \left(\frac{\delta_{\text{зс},\Delta x_5} - \delta_{\text{зс},\Delta x_4}}{\delta_{\text{зс},\Delta x_4} - \delta_{\text{зс},\Delta x_3}} \right)}{\ln(r)} \right]; \quad (4.30)$$

$$r = \text{Avg} \left[\frac{\Delta x_3}{\Delta x_4}, \frac{\Delta x_4}{\Delta x_5}, \frac{\Delta x_5}{\Delta x_6} \right]. \quad (4.31)$$

Здесь $\delta_{\text{зс},\Delta x_i}$ – толщина защитного слоя на сетке Δx_i , \hat{n} – эмпирический порядок численной схемы, r – степень измельчения набора расчетных сеток, Max и Avg – операторы максимума и среднего арифметического значений.

Результаты расчетов были обобщены в форме графической экстраполяции Ричардсона (рисунок 4.13). Очевидно, что сетки Δx_5 и Δx_6 наиболее близки к истинному (экстраполированному) значению ($\delta_{\text{зс,ист}} = 994,5$ мм) в пределах 0,5 %, что принято за удовлетворительную точность. При этом разница между результатами расчета на сетках Δx_5 и Δx_6 составила 0,5 мм (0,005 %), а расчетное время на сетке Δx_6 в 1,6 раз больше. На основании полученных результатов расчетная сетка Δx_5 была принята в качестве основной для всех серий расчетов.

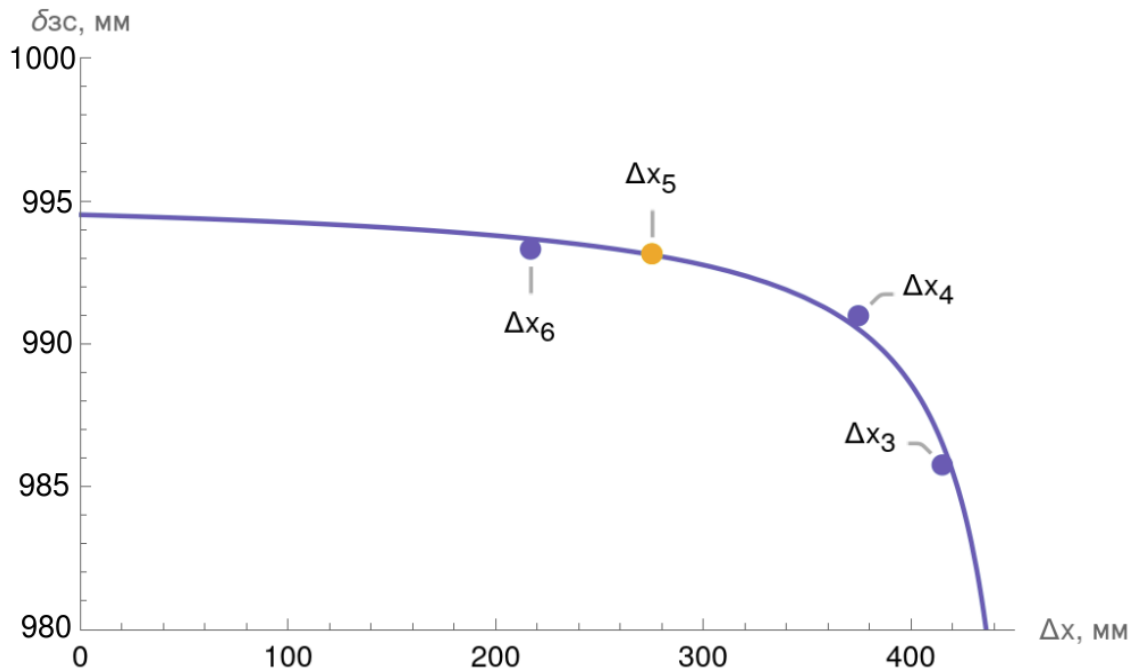


Рисунок 4.13 – Экстраполяция Ричардсона

4.5.2. Стабилизация контрольных параметров

В процессе расчетов выполнялся контроль динамики изменения контрольных параметров моделируемого процесса: скорости, давления, температуры, а также параметров турбулентности (кинетической энергии турбулентных пульсаций k , приведенного значения интенсивности рассеивания энергии турбулентных пульсаций ω и турбулентной вязкости ν_t). Контроль осуществлялся с периодичностью 10 итераций на входах, выходе, стенках и в целом по расчетной области.

Пример динамики изменения контрольного параметра приведен на рисунке 4.14. Анализ результатов расчетов показал, что температура стабилизируется после 400 итерации. Однако, период стабилизации различался среди контролируемых параметров в различных частях расчетной области. Наибольший период стабилизации был отмечен для скорости потока в пристеночной зоне – 850 итераций. Все расчеты выполнялись на 1000 итераций для обеспечения стабилизации решения даже в нестабильных зонах расчетной области.

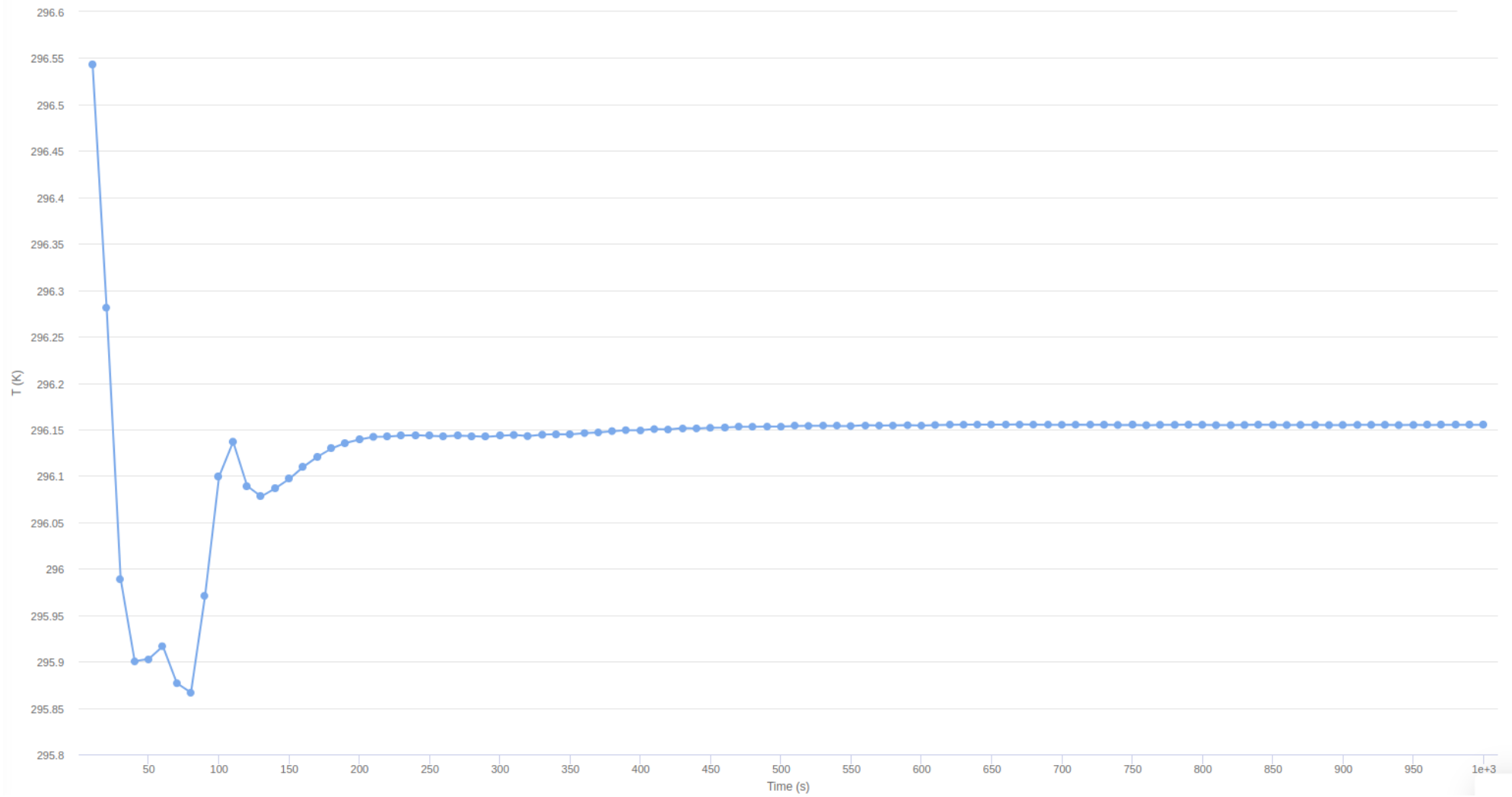


Рисунок 4.14 – Стабилизация температуры на выходе из градирни

4.5.3. Контроль невязок

При решении дифференциальных уравнений выполняется их предварительная линеаризация. В результате формируются системы линейных уравнений, которые решаются итерационным методом. Итерационный метод предполагает пошаговый подбор коэффициентов для выравнивания левой и правой частей каждого уравнения. Специфика формируемых систем линеаризованных уравнений не позволяет в большинстве случаев получить полное равенство левых и правых частей уравнений. Образующееся расхождение (невязка) неизбежна, но должна поддерживаться на некотором минимальном уровне (порядка $10^{-5} \dots 10^{-7}$ в зависимости от уравнения) во избежание значительного искажения результатов и дестабилизации решения.

В процессе расчетов выполнялся контроль невязок при решении уравнений основных уравнений Навье-Стокса (4.1), (4.2), (4.5), а также замыкающих уравнений модели турбулентности (определение кинетической энергии турбулентных пульсаций k и приведенного значения интенсивности рассеивания энергии турбулентных пульсаций ω). Контроль осуществлялся на каждой итерации на входах, выходе, стенках и в целом по расчетной области.

На рисунок 4.15 представлена динамика изменения невязок для уравнения движения (p_rgh , U_x , U_y , U_z), энергии (T) и замыкающих уравнений модели турбулентности (k , ω). Очевидно, что невязки по всем уравнениям монотонно снижаются по мере выполнения решения, замедляясь после 550 итерации. Все невязки находятся в диапазоне $10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-4}$. Дальнейшее решение не целесообразно, так как позволит снизить величины невязок не более, чем на 10 %, что является несущественным.

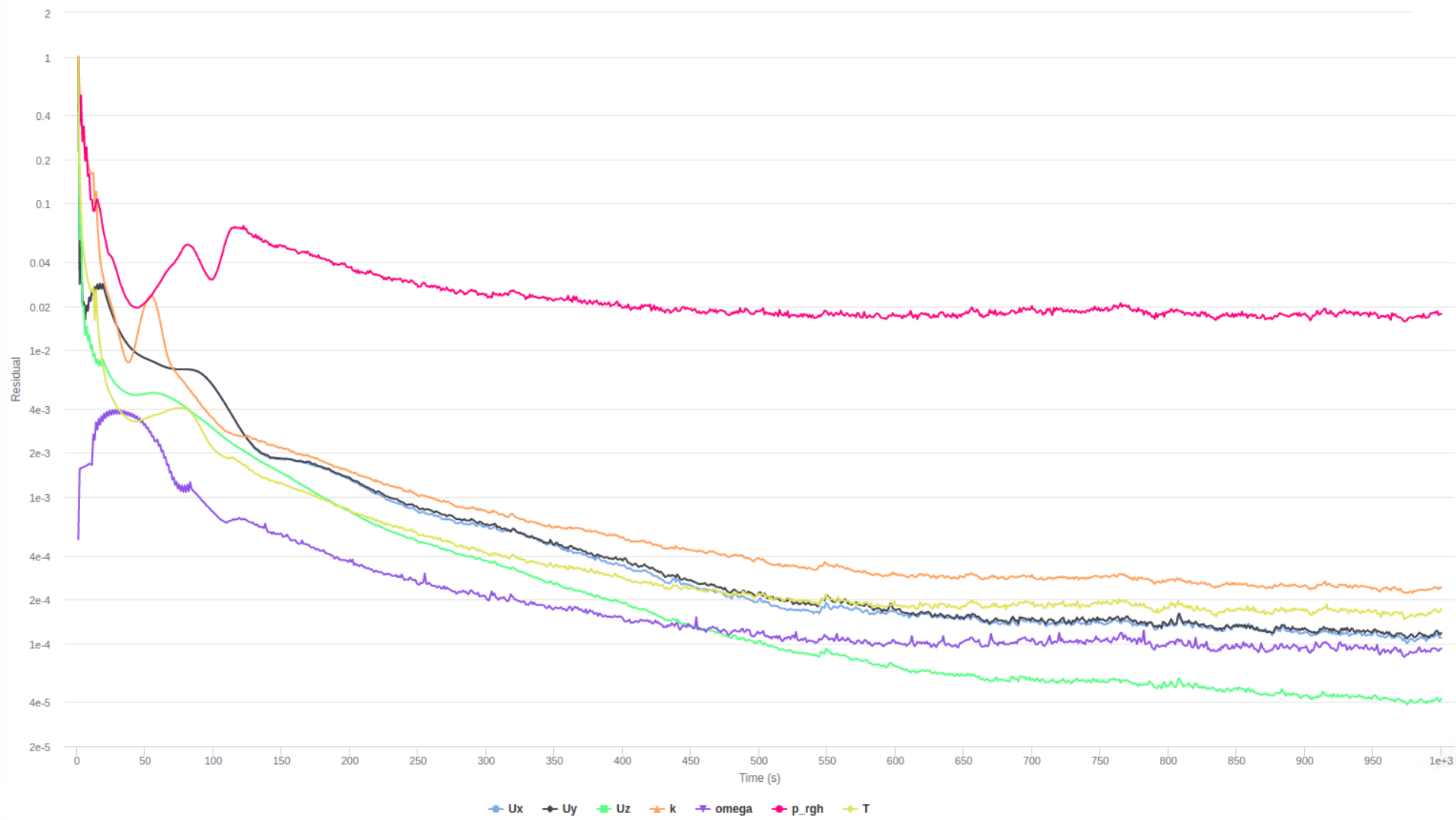


Рисунок 4.15 – Динамика невязок

4.6. Аналитическая обработка результатов моделирования

Полученные результаты численного моделирования градирен были проанализированы на предмет наличия взаимосвязей между режимными параметрами и эффективностью работы системы защиты от обледенения устья вытяжной башни градирни с естественной тягой. Расход и температура влажного воздуха градирни, а также температура наружного воздуха были приняты в качестве основных режимных параметров.

Влияние расхода дутьевого воздуха на эффективность системы поддува градирен было рассмотрено отдельно (серия 1-3-Х).

Регрессионный анализ проводился методом наименьших квадратов (квадратичная регрессия) [140; 141].

4.6.1. Влияние основных режимных параметров

Расчетные значения толщины воздушного защитного слоя представлены в таблице 4.4.

На основании полученных данных была составлена многофакторная аппроксимирующая функция вида $T_{зс} = f(T_{возд}, T_{ввг}, G_{ввг})$, К, которая описывает зависимость средней температуры защитного слоя градирни от основных режимных параметров – расхода и температуры влажного воздуха градирни, а также температуры наружного воздуха:

$$T_{зс} = 0,006T_{возд}^2 + \frac{421520}{T_{ввг}} + \frac{396138}{G_{ввг}} - 1835. \quad (4.32)$$

Здесь $G_{ввг}$ – расход влажного воздуха градирни в м³/с, $T_{ввг}$ и $T_{возд}$ – температуры влажного воздуха градирни и наружного воздуха, К.

Аналогичным образом была составлена многофакторная аппроксимирующая функция вида $T_{ст} = f(T_{возд}, T_{ввг}, G_{ввг})$, К, которая описывает зависимость средней температуры стенки градирни от основных режимных параметров:

$$T_{\text{ст}} = 0,82T_{\text{возд}} - \frac{42,33T_{\text{ВВГ}}}{G_{\text{ВВГ}}} + 62,1. \quad (4.33)$$

Толщина защитного слоя δ , мм, также находится в зависимости от рассмотренных режимных параметров:

$$\delta_{\text{зс}} = 718,351 \frac{T_{\text{ВВГ}}}{T_{\text{возд}}} - \frac{289643}{G_{\text{ВВГ}}} + 385,736. \quad (4.34)$$

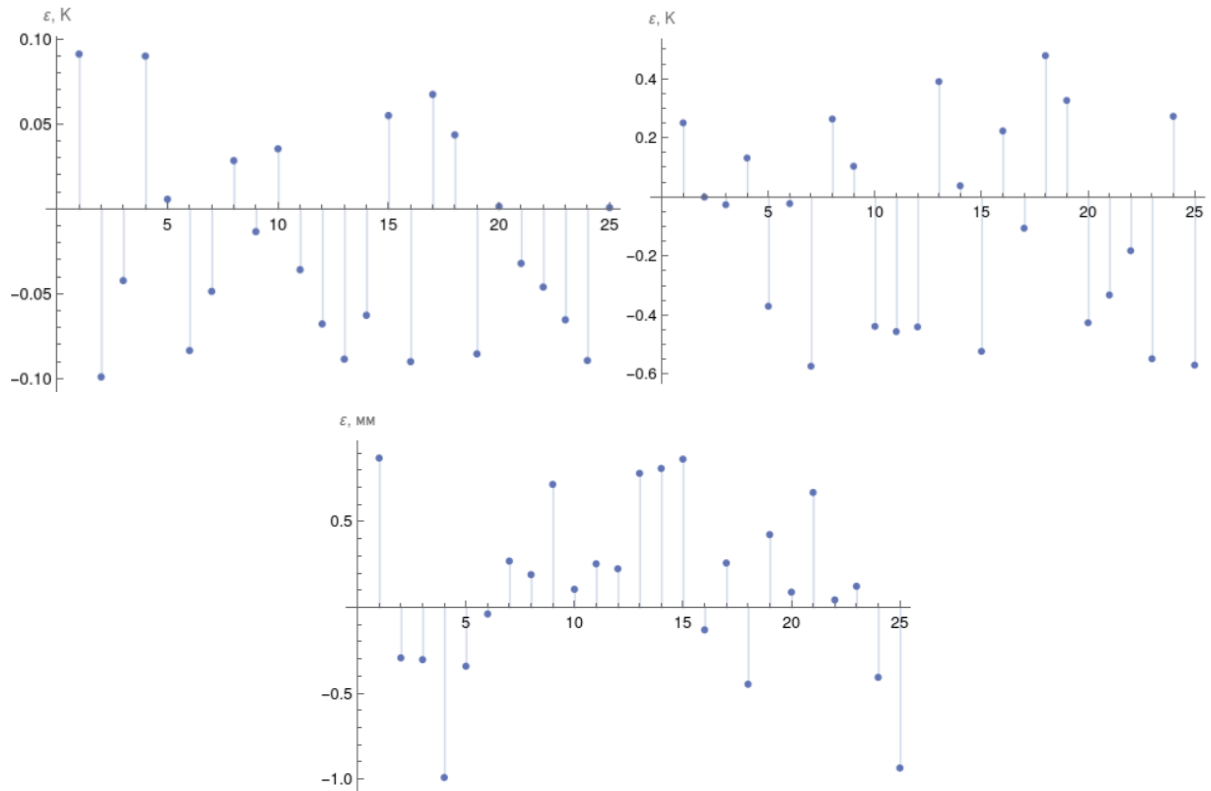


Рисунок 4.16 – Невязки регрессий (4.32), (4.33) и (4.34)

Аппроксимирующие функции (4.32), (4.33) и (4.34) характеризуются средними отклонениями $\varepsilon = \pm 0,1 \text{ К}$, $\varepsilon = \pm 0,6 \text{ К}$ и $\varepsilon = \pm 1 \text{ мм}$ соответственно (рисунок 4.16). Коэффициент детерминации во всем рассматриваемом диапазоне $R^2 = 0,9997 - 0,9999$. Информационный критерий Акаике (AIC) – 12,211, 24,605 и 19,474, Байесовский информационный критерий (BIC) – 7,13, 12,12 и 17,912.

Основные статистические характеристики аппроксимации представлены в таблицах 4.6 – 4.8. Регрессионное выражение разделено на базисные функции, для каждой из которых приводятся критерии оценки достоверности результата (точности аппроксимации). Оценочный параметр для базисной функции β представ-

ляет собой множитель, используемый для соответствующей базисной функции в общем уравнении регрессии. К основным критериям оценки достоверности отнесена среднеквадратичная ошибка (SE_{β}), т-статистика (t_{score}) и р-значение (p_{stat}).

Таблица 4.6 – Параметры регрессии (4.32)

Базисная функция	МНК-оценка (β)	Среднеквадратичная ошибка (SE_{β})	Т-статистика (t_{score})	р-значение (p_{stat})
1	-1835	358,162	-5,122	0,122
$T_{возд}^2$	0,006	6.39e-4	9,268	0,0684
$\frac{1}{T_{ВВГ}}$	421520	89522,4	4,709	0,133
$\frac{1}{G_{ВВГ}}$	396138	38928,8	10,176	0,062

Таблица 4.7 – Параметры регрессии (4.33)

Базисная функция	МНК-оценка (β)	Среднеквадратичная ошибка (SE_{β})	Т-статистика (t_{score})	р-значение (p_{stat})
1	62,1	9,72	6,39	0,002
$T_{возд}$	0,82	0,016	50,3	3,95e-4
$\frac{T_{ВВГ}}{G_{ВВГ}}$	-46,33	24,92	-1,86	0,204

Таблица 4.8 – Параметры регрессии (4.34)

Базисная функция	МНК-оценка (β)	Среднеквадратичная ошибка (SE_{β})	Т-статистика (t_{score})	р-значение (p_{stat})
1	385,736	7,0932	54,3811	3,34e-4
$\frac{1}{G_{ВВГ}}$	718,351	32,7643	21,9248	2,07e-3
$\frac{T_{ВВГ}}{T_{возд}}$	-289643	41648,7	-6,9544	0,02

В рассматриваемом случае линейной регрессии вида $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$, α и β – неизвестные оценочные параметры метода наименьших квадратов (МНК-оценки), ε – нормально распределенная случайная величина с нулевым средним значением

и неизвестной дисперсией σ^2 . Среднеквадратичная ошибка оценочного параметра β была определена следующим образом [133, 134]:

$$SE_{\beta} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (4.35)$$

Здесь n – количество расчетных точек, y – фактическое искомое значение, \hat{y} – аппроксимированное искомое значение, \bar{x} – среднее значение x для всей выборки.

T-статистика позволяет провести проверку нулевой гипотезы и в настоящей работе была определена как отношение МНК-оценки базисной функции β к ее среднеквадратичной ошибке SE_{β} [128; 129]:

$$t_{score} = \frac{\beta - \beta_0}{SE_{\beta}}. \quad (4.36)$$

Здесь $\beta_0 = 0$ – значение МНК-оценки для случая выполнения нулевой гипотезы ($\beta = \beta_0 \rightarrow y$ не зависит от x).

P-значение позволяет определить статистическую значимость базисной функции. В рассматриваемом случае р-значения большинства базисных функций оказались менее 0,01. Это подтверждает их статистическую значимость, т.е. неслучайность ненулевого значения β_i . Другими словами, анализ доказывает, что искомые значения (температура защитного слоя и стенки) зависят как от расхода влажного воздуха градирни, так и от разности температур влажного воздуха градирни и наружного воздуха. Причем разность температур оказывает значительно большее влияние. В случае с толщиной защитного слоя наибольшее влияние оказывает только расход влажного воздуха градирни.

4.6.2. Влияние расхода воздуха, подаваемого в защитный слой

На основании расчетных данных (таблица 4.5) была получена однофакторная аппроксимирующая функция вида $\Delta\delta_{зс} = f(G_{возд})$, %, которая описывает зависи-

мость относительной толщины защитного слоя градирни от доли подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха:

$$\Delta\delta_{\text{зс}} = \frac{65}{G_{\text{возд}}} - 32. \quad (4.37)$$

Здесь $G_{\text{возд}}$ – расход подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха в процентах от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни. Параметр $\Delta\delta_{\text{зс}}$ является показателем приращения толщины защитного слоя при снижении доли подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха ниже 2 %.

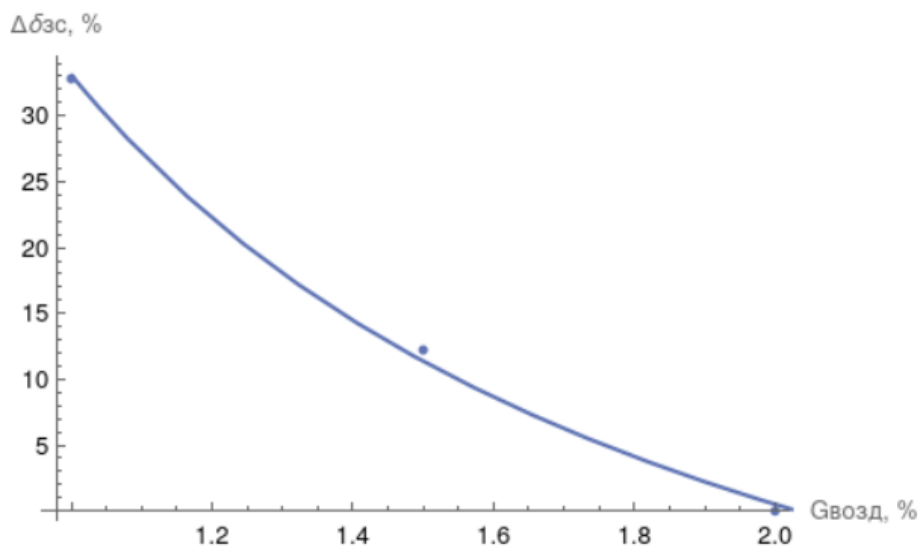


Рисунок 4.17 – Диаграмма регрессии (4.37)

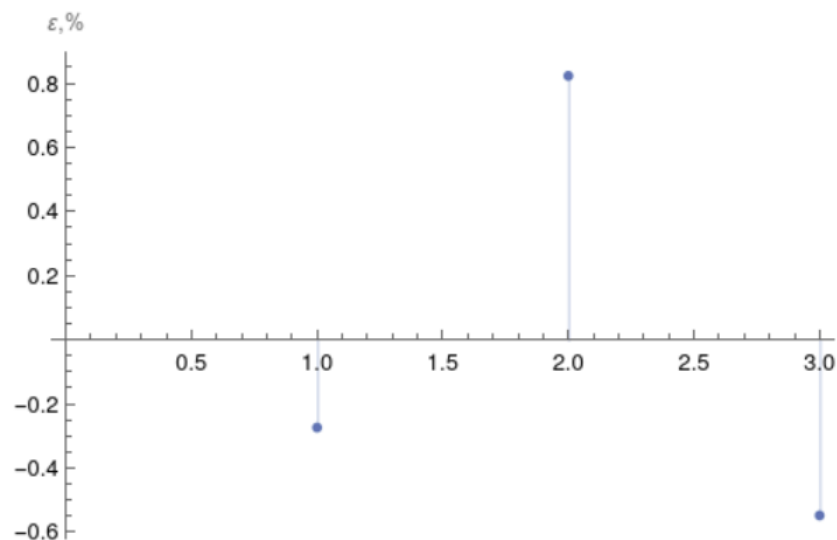


Рисунок 4.18 – Невязка регрессии (4.37)

Аппроксимирующая функция (4.37) характеризуется средними отклонениями ε в пределах 1 % (рисунок 4.18). Коэффициент детерминации во всем рассматриваемом диапазоне составил $R^2 = 0,998$. Анализ показывает, что искомое значение (относительная толщина защитного слоя) зависит от доли подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха практически линейно.

4.7. Оптимизации режимных параметров системы защиты от обледенения устья градирни

В работе рассмотрены следующие режимные параметры системы защиты от обледенения устья вытяжной башни градирни с естественной тягой: расход и температура влажного воздуха градирни, а также расход и температура подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха. На основании полученных расчетных данных были сформированы аналитические зависимости (4.32–4.34), (4.37).

Зависимости (4.33–4.35) являются многофакторными и учитывают три переменные, поэтому не могут быть визуализированы традиционным образом. В этой связи был использован аналитический метод оптимизации, который заключался в поиске максимума функции. В рассматриваемом диапазоне рабочих параметров (см. таблицу 4.3) глобальный максимум толщины защитного слоя составляет 1021 мм и достигается при наибольшей разности температур $T_{\text{ввг}} - T_{\text{возд}} = 49,6^\circ\text{C}$ и наименьшем расходе влажного воздуха градирни ($G_{\text{ввг}} = 4542,9$ тыс. м³/ч).

Зависимость (4.37) является однофакторной, поэтому поиск максимума может быть выполнен как графически (по рисунку 4.17), так и аналитически. В рассматриваемом диапазоне относительных расходов подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха (см. таблицу 4.3) глобальный прирост толщины защитного слоя составляет 48,8 % и достигается при доле подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха 1 %.

Дополнительно рекомендуется организация автоматического регулирования доли подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха в зависимо-

сти от разности температур влажного воздуха градирни и наружного воздуха. Автоматика должна обеспечивать непрерывный или периодический (с интервалом не более 10 минут) контроль температуры наружного воздуха и изменять долю подаваемого в защитный слой подогретого наружного воздуха таким образом, чтобы обеспечивать минимальную толщину защитного слоя. Это позволяет сократить энергозатраты на нагнетание наружного воздуха в систему защиты от обледенения устья вытяжной башни градирни.

4.8. Выводы по четвертой главе

1. Предложен способ защиты верхней части (устья) вытяжной башни градирни с естественной тягой от обмерзания путем создания защитного воздушного пограничного слоя (Пат. № 2704364, Россия: МПК F01K 23/10) [125].

2. Разработана математическая модель и выполнено численное моделирование защитного пограничного слоя в модели турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST. Моделирование выполнено для двух вариантов защиты внутренней поверхности вытяжной башни градирни с естественной тягой: а) защитный пограничный слой создается потоком подогретого атмосферного воздуха; б) пограничный слой создается уходящими газами котлоагрегатов.

3. Получены аналитические зависимости для расчета защитного пограничного слоя: многофакторная аппроксимирующая функция зависимости толщины защитного слоя градирни от основных режимных параметров – расхода и температур влажного воздуха градирни и наружного воздуха; однофакторная аппроксимирующая функция зависимости относительной толщины защитного слоя градирни от доли подаваемого подогретого наружного воздуха.

4. Произведен расчет системы защиты внутренней поверхности вытяжной башни градирни за счет создания воздушного пограничного слоя. Установлено, что при расходе воздуха в пограничном слое 98,13 тыс. м³/ч (2 % от расхода воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни) Минимальное значение толщины защитного пограничного слоя составило $\delta_{zc} = 1000$ мм. Наблюдались ло-

кальные утолщения защитного слоя до 1480 мм. При этом температура воздуха в защитном слое зависит от температуры наружного воздуха и изменяется в диапазоне от 8,4 °С до -4,1 °С, температура стенки изменяется в диапазоне от -6 °С до -23 °С.

5. Произведен расчет системы защиты внутренней поверхности вытяжной башни градирни за счет подачи уходящих продуктов сгорания котельной установки (парогазовой или паротурбинной ТЭС) посредством газораспределительного устройства настилающими струями на внутреннюю поверхность верхней части вытяжной башни градирни. Установлено, что при подаче в защитный слой уходящих газов с температурой +110 °С средняя температура стенки внутренней поверхности вытяжной башни градирни для $t_n = -10$ °С и $t_n = -30$ °С составляет 23 и 8 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены новые научно обоснованные технические решения по совершенствованию работы паротурбинной тепловой электрической станции путем отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой газозвдушного потока.

2. Разработаны математическая модель и программа расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена газозвдушной смеси, движущейся в вытяжной башне градирни с естественной тягой, с учетом отвода через нее уходящих газов котельных установок паротурбинных ТЭС (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619264).

3. Выполнены расчеты процессов тепло- и массообмена при отводе в атмосферу уходящих газов котлов через вытяжную башню градирни. Анализ результатов расчетов показал, что температура циркуляционной воды на выходе из градирни снижается на 1,8 °С и на 1,3 °С соответственно для паротурбинных ТЭС и ПГУ, что обуславливает повышение КПД турбоустановки. КПД турбоустановки ТЭЦ по производству электроэнергии повышается на 0,12 %, суммарный КПД турбоустановки по выработке тепловой и электрической энергии – на 0,05 %, а КПД ТЭЦ по отпуску электрической энергии – на 0,11 %. Экономический эффект в денежном выражении составляет 584254,96 руб/год при работе одной турбины ПТ-60-130/13 и 1556397,04 руб/год при работе двух турбин ПТ-60-130/13 и Т-100/120-130.

Устройство системы отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни, приводит к повышению ее аэродинамического сопротивления по сравнению с системой отвода газов через дымовую трубу, что обуславливает повышение мощности дымососа и расхода электроэнергии на собственные нужды станции. При этом удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии возрастает на 0,22 % (с 206,13 до 206,58 г/(кВт·ч)), а общий экономический эффект достигается за счет снижения капитальных затрат на строительство дымовой трубы и затрат на ее эксплуатацию.

4. Выполнено численное моделирование распределения температур и скоростей газовой смеси в объеме вытяжной башни градирни в среде OpenFOAM. Численная модель процесса была основана на системе уравнений Навье-Стокса в стационарной постановке. Установлено, что основной поток уходящих газов движется в центральной части градирни, не соприкасаясь с ее стенками и конденсация углекислоты на внутренней поверхности стенок башни градирни при принятых расчетных условиях не наблюдается.

5. Выполнена оценка экологического воздействия на окружающую среду процессов отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни с естественной тягой. Установлено, что предложенное решение не приводит к отрицательному воздействию на окружающую среду, расчетная концентрация вредных веществ (NO_2) в атмосферном воздухе не превышает ПДК и составляет $0,043 \text{ мг/м}^3$ при отводе уходящих газов от котлов-утилизаторов ПГУ и $0,164 \text{ мг/м}^3$ – от энергетических котлов.

6. Предложены научно обоснованные технические решения по защите внутренней поверхности верхней части (устья) вытяжной башни градирни с естественной тягой от обмерзания путем создания защитного воздушного пограничного слоя (Пат. на изобретение РФ № 2704364) и путем подачи уходящих продуктов сгорания котлоагрегатов в образованный в вытяжной башне градирни пристенный канал кольцевого сечения (Пат. на изобретение РФ № 2782483).

7. Разработана математическая модель и выполнено численное моделирование защитного пограничного слоя в модели турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST. Моделирование выполнено для двух вариантов защиты внутренней поверхности вытяжной башни градирни с естественной тягой от обледенения: а) защитный пограничный слой создается потоком подогретого атмосферного воздуха; б) пограничный слой создается уходящими газами котлоагрегатов. В результате получены аналитические зависимости для расчета защитного пограничного слоя: многофакторная аппроксимирующая функция зависимости толщины защитного слоя градирни от основных режимных параметров – расхода и температур влажного воздуха градирни и наружного воздуха; однофакторная аппрок-

симирующая функция зависимости относительной толщины защитного слоя градирни от доли подаваемого подогретого наружного воздуха.

8. Предложена конструкция системы отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни с естественной тягой газозвдушной смеси, представляющая собой три кольцевых газовых коллектора. Капиталовложения в установку системы отвода уходящих газов трех энергокотлов типа БКЗ-420-140 НГМ для градирни БГ-2600 Самарской ТЭЦ в ценах 2021 года составляют 14062,09 тыс. руб.

Практическая реализация результатов диссертационной работы подтверждена актом внедрения и справкой об использовании результатов научных исследований.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.

Направления исследований диссертационной работы будут продолжены в части создания новых конструктивных решений по отводу в атмосферу уходящих газов котельных установок тепловых электростанций, работающих на твердых топливах и сжиженных углеводородных газах, через вытяжную башню градирни с естественной тягой, а также в части разработки метода защиты от обмерзания внутренней поверхности устья вытяжной башни градирни на основе патента на изобретение РФ № 2782483 путем подачи уходящих газов котлоагрегатов в образованный в вытяжной башне градирни пристенный канал кольцевого сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об охране окружающей среды: федер. закон. – М.: Омега-Л, 2015. – 68 с.
2. Rittenhouse, R.C. Action builds on 1990 clean air act compliance / Power Engineering. – 1992– v. 96. – no. 5. P. 21.
3. Рихтер, Л.А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы / Л.А. Рихтер. – М.: Энергия, 1975. – 312 с.
4. Абрамов, А.И. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций : учебное пособие / А.И. Абрамов, Д.П. Елизаров, А.Н. Ремезов, А.С. Седлов; под ред. А.С. Седлова. –М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 378 с.
5. Кудинов, А.А. Горение органического топлива : учебное пособие / А.А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 350 с.
6. Трухний, А.Д. Парогазовые установки электростанций : учебное пособие / А.Д. Трухний. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 648 с.
7. Цанев, С.В. Газотурбинные энергетические установки : учебное пособие / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 428 с.
8. Цанев, С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 584 с.
9. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
10. Росляков, П. В. Методы защиты окружающей среды : учебник / П.В. Росляков. – М.: МЭИ, 2007. – 336 с.
11. Дужих, Ф. П. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы : справочное издание / Ф.П. Дужих, В.П. Осоловский, М.Г. Ладыгичев; под ред. Ф.П. Дужих. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с.
12. Шишков, И.А. Дымовые трубы энергетических установок / И.А. Шишков, В.Г. Лебедев, Д.С. Беляев. – М.: Энергия, 1976. – 176 с.

13. Волков, Э.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС / Э.П. Волков, Е.И. Гаврилов, Ф.П. Дужих. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
14. Пергаменщик, Б.К. Газоотводящие (дымовые) трубы ТЭС: возведение, ремонт, реконструкция, демонтаж [Электронный ресурс] : учебное пособие / Б.К. Пергаменщик, И.А. Лесников. – 2-е изд. (эл.). – М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2017.
15. Рогалев, Н.Д. Тепловые электрические станции / Н.Д. Рогалев, А.А. Дудолин, Е.Н. Олейникова; под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Изд-во МЭИ, 2022. – 768 с.
16. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции : учебник для вузов / В.Я. Рыжкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
17. Щинников, П.А. Расчет двухтопливной ПГУ с параллельной схемой работы : учеб. пособие / П.А. Щинников, О.В. Боруш, А.А. Францева, А.А. Зуева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 112 с.
18. Ремезов, А.Н. Анализ состояния газоотводящих трактов ТЭС / А.Н. Ремезов, Ю.В. Салов, Ю.Н. Богачко и др. // Тр. ИГЭУ. – 1999. – № 3. – С.90-92.
19. РД 153-34.1-21.523-99. Инструкция по эксплуатации железобетонных и кирпичных дымовых труб и газоходов на тепловых электростанциях / РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 72 с.
20. РД 34.21.562-93. Инструкция по эксплуатации железобетонных дымовых труб с металлическими газоотводящими стволами на тепловых электростанциях / РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 1995. – 29 с.
21. Колмогоров, А. Н. Проектирование высокоэффективных печных агрегатов для НПЗ / А. Н. Колмогоров, В. Д. Катин // Обзорная информация. – Вып. 1. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1995. – 88 с.
22. Буров, В.Д. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др.; под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 466 с.
23. Чичирова, Н.Д. Математическая модель для расчета приземной концентрации выбросов тепловых электрических станций в атмосферу / Н.Д. Чичирова, А.А. Федосов, Р.Е. Безруков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2000. – № 11–12. – С. 106.

24. Демина, Ю.Э. Расчет рассеивания загрязняющих веществ при удалении дымовых газов ГТУ через башню градирни / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» [Электронный ресурс]. – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 120.1–120.6.

25. Демина, Ю.Э. Анализ рассеивания загрязняющих веществ при удалении уходящих газов через дымовую трубу и башенную градирню / Ю.Э. Демина, С.К. Зиганшина // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» [Электронный ресурс]. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – С. 107.1–107.5.

26. Демина, Ю.Э. Сравнительный анализ различных способов отвода уходящих газов от энергетических котлов / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 79-й всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2022. – С. 736–741.

27. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273. [Электронный ресурс] Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс». URL: http://www.consultant.ru /document/cons_doc_LAW_222765/ (дата обращения: 29.11.2020).

28. Экологический бюллетень. Самарская область октябрь 2021 года / ФГБУ «Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». – Самара, 2021.– 42 с.

29. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.

30. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности: федер. закон. – М.: ПРИОР, 2009. – 20 с.

31. Энергоэффективность в России: Отчет Всемирного банка [Электронный ресурс]: http://www.cenef.ru/file/FINAL_EE_report_rus.pdf (Дата обращения: 17.02.2019).

32. Кудинов, А.А. Повышение экономичности ПГУ-450 путем подогрева исходной воды отработавшими газами газотурбинной установки / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, К.Р. Хусаинов // Промышленная энергетика. – 2018. – № 12. – С. 16–22.

33. Кудинов, А.А. Использование теплоты отработавших газов газотурбинной установки ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ для подогрева исходной воды / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, К.Р. Хусаинов, А.Ю. Губарев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 2(118). – С. 25–30.

34. Kudinov, A.A. Development of technologies to increase efficiency and reliability of combined cycle power plant with doublepressure heat recovery steam generator / A.A. Kudinov, S.K. Ziganshina, K.R. Khusainov, Iu.E. Demina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 791 (2020) 012014 Doi:10.1088/1757-899X/791/1/012014.

35. Пат. 2693567 Российская Федерация, МПК F 01 K 23/10. Способ работы парогазовой установки электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина, Д.В. Зеленцов ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2018128114 ; заявл. 31.07.18 ; опубл. 03.07.19, Бюл. № 19. – 5 с.

36. Кудинов, А.А. Разработка технологий повышения эффективности и надежности работы парогазовой ТЭС с двухконтурным котлом-утилизатором / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, К.Р. Хусаинов, Ю.Э. Демина // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетические системы» [Электронный ресурс]. – Белгород: БГТУ, 2019. – С. 44–50

37. Зиганшина, С.К. Анализ возможности промежуточного перегрева водяного пара в зоне высоких температур котла-утилизатора ПГУ-450 / С.К. Зиганшина, А.А. Кудинов, Ю.Э. Демина // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» [Электронный ресурс]. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – С. 1010.1–110.6

38. Зиганшина, С.К. Повышение надежности и экономичности ПГУ-450 за счет промежуточного перегрева водяного пара в котле-утилизаторе в зоне пониженных температур отработавших в ГТУ газов / С.К. Зиганшина, А.А. Кудинов, Ю.Э. Демина // Сборник трудов I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Развитие методов прикладной математики для

решения междисциплинарных проблем энергетики» [Электронный ресурс]. – Ульяновск: УлГТУ, 2021. – С. 150–155.

39. Кудинов, А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.

40. Кудинов, А.А. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 320 с.

41. Данилов, О.Л. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебник / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко; под ред. А.В. Клименко. – М.: МЭИ, 2010. – 424 с.

42. Буров, В.Д. Влияние подогрева топлива на входе в газотурбинную установку на показатели тепловой экономичности парогазовых установок / В.Д. Буров, А.С. Красичков // Новое в российской электроэнергетике. – 2022. – № 9. – С. 25–32.

43. Николаев, Ю.Е. Эффективность применения малых ТЭЦ с газовыми турбинами для энергоснабжения промышленных и коммунальных предприятий / Ю.Е. Николаев, С.В. Сизов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. – 68 с.

44. Николаев, Ю.Е. Области эффективного применения автономных энергокомплексов на базе ГТУ и ВЭУ в Российской Федерации / Ю.Е. Николаев, В.Ю. Игнатов // Энергетик. – 2023. – № 2. – С. 32–34.

45. Рихтер, Л.А. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций / Л.А. Рихтер, Д.П. Елизаров, В.М. Лавыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.

46. Кудинов, А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учебное пособие для вузов / А.А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 325 с.

47. Пат. 1813869 А1 СССР, Е 04 Н 12/28, 5/12. Дымовая труба – градирня / В.М. Демидов, В.Д. Куликов, Н.Г. Лаушин ; заявл. 10.02.88 ; опубл. 07.05.93, Бюл. № 17. – 3 с.

48. Пат. 1370211 А1 СССР, Е 04 Н 12/28. Дымовая труба - градирня / О.В. Жидович, Е.А. Зельцерман, Э.И. Лашковский, В.И. Барышев, А.П. Скворцов ; заявл. 01.08.85 ; опубл. 30.01.88, Бюл. № 4. – 3 с.

49. Пат.3488960 США кл. F 01 К 19/10, опубл. 1970.

50. Пат. 1735552 А1 СССР, Е 04 Н 12/28, 5/12. Дымовая труба – градирня / А.Г. Торовец ; заявл. 14.05.90 ; опубл. 23.05.92, Бюл. № 19. – 3 с.

51. Пат. DE 4231813 Германия, МПК F28C 1/00, опубл. 24.03.1994
52. Eldredge, T.V. An investigation of the effects of flue gas injection on natural draft cooling tower performance // Ph.D. Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, TN. – May 1993.
53. Eldredge, T.V. An investigation of the effects of flue gas injection on natural draft cooling tower performance / T.V. Eldredge, D.J. Benton, J.W. Hodgson // Journal of engineering for gas turbines and power. – 1997. – 119(2). – P. 478–484 DOI: 10.1115/1.2815599
54. Mcilvaine, R.W. New developments in European power plant air pollution control / R.W. Mcilvaine // Power Engineering. – 1989. – v. 93, no. 2. – P. 33.
55. Зиганшина, С.К. Энергосбережение в котельных установках тепловых электрических станций за счет использования вторичных энергоресурсов : автореф. дис. ... док. техн. наук : 05.14.14 / С.К. Зиганшина. – Казань: КГЭУ, 2021. – 36 с.
56. Айзенкрайн, Е. Градирни с естественной тягой с впуском дымовых газов / Е. Айзенкрайн, К. Котц-Полльклэзенер, Б. Миддендорф // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 9 (36). – С. 56–71.
57. Jianmin Du, Wenjuan Zhuang, Guo Li and Pei Zhang Influence of flue gas injection on the long-term durability of a natural draft concrete cooling tower materials. – 2019. – 12, 2038. doi:10.3390/ma12132038
58. Айзенкрайн, Е. Непрерывный мониторинг движения меридиональных трещин, возникающих в оболочках градирен под воздействием внешних факторов / Е. Айзенкрайн // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 5 (32). – С. 84–94.
59. Пат. 2453712 РФ, МПК F 01 К 23/10. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, С.П. Горланов ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2010135094/06 ; заявл. 20.08.10 ; опубл. 20.06.12, Бюл. № 17. – 3 с.
60. Линник, А.В. Исследование влияния системы совмещенного парогазоудаления на работу градирни ТЭЦ / А.В. Линник, Н.Н. Случанинов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–1. – С. 128–129.
61. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

62. Арефьев, Ю.И. Технологические расчеты башенных градирен / Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 7. – С. 17–20.

63. Бергман, Д. Испарительные градирни: современные конструкции и преимущества реконструкции / Д. Бергман // Энергетик. – 2000, спецвыпуск. – С. 15–21.

64. Власов, А.В. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни / А.В. Власов, Г.В. Дашков, А.Д. Солодухин, С.П. Фисенко // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 5. – С. 64–68.

65. ВСН 14-67. Технические указания по расчету и проектированию башенных противоточных градирен для тепловых и промышленных предприятий / Минэнерго СССР. – Л.: Энергия, 1971. – 87 с.

66. Гладков, В.А. Вентиляторные градирни / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, Пономаренко В.С. – М.: Стройиздат, 1976. – 216 с.

67. Лаптев, А.Г. Устройство и расчет промышленных градирен: монография / А.Г. Лаптев, И.А. Ведьгаева. – Казань: КГЭУ, 2004. – 180 с.

68. Ледуховский, Г.В. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 72–80.

69. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электростанции: учебник для вузов / Л.С. Стерман. – М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.

70. Случанинов, Н.Н. Математическое моделирование процессов теплообмена в градирне / Н.Н. Случанинов, В.И. Масько и др. // Энергосбережение и Водоподготовка. – 2011, – №6 (74). – С. 31–32.

71. Комелик, В.В. Анализ работы градирен с распылительными форсунками / В.В. Комелик, В.Н. Орлик // Хим. промышленность. – 2001. – № 10. – 10–15.

72. Наумов, А.В. Разработка методов совершенствования систем оборотного водоснабжения с башенными градирнями электростанций для увеличения выработки электроэнергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / А.В. Наумов. – М.: МЭИ, 2004. – 20 с.

73. Динмухаметов, А.М. Энергоэффективная эксплуатация градирен в зимний период / А.М. Динмухаметов, Н.А. Бутяков, А.Т. Галиакбаров // Молодой учёный. – 2015. – № 16 (96). – С. 155–157.

74. Пат. GB 2267744 Великобритания, МПК F 28C 1/12 ; опубл. 21.05.1993.

75. Пат. SU 1307201, МПК F 28C 1/10 ; опубл. 30.04.87.

76. Пат. 2451885 Российская Федерация, МПК F 28C 1/12. Способ предотвращения обледенения градирни / Н.Н. Случанинов, В.В. Смирнов, Е.В. Балашов, Е.Г. Коршунов, С.Н. Иванов, В.И. Масько ; заявитель и патентообладатель КНАГТУ – № 2011103826/06 ; заявл. 02.02.11 ; опубл. 27.05.12, Бюл. № 15. – 5 с.

77. Пат. 121046 Российская Федерация, МПК F 28 C 1/12 Градирня башенная с естественной тягой / Н.Н. Случанинов, В.В. Смирнов, Е.Г. Коршунов ; заявитель и патентообладатель КНАГТУ – № 2012115810/06 ; заявл. 19.04.12 ; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28. – 7 с.

78. Пат. 124957 РФ, МПК F 28 C 1/00 Градирня башенная с естественной тягой / Н.Н. Случанинов, Е.В. Балашов, Е.Г. Коршунов, Н.А. Петухов ; заявитель и патентообладатель КНАГТУ – № 2012124455/06 ; заявл. 13.06.12; опубл. 20.02.13, Бюл. № 5.– 9 с.

79. Кудинов, А.А. Повышение эффективности парогазовой ТЭС путем отвода уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, С.П. Горланов // Промышленная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 33–38.

80. Kudinov, A.A. Feedwaterheating in wasteheat boiler with exhaust gases from gas-turbine power unit / A.A. Kudinov, S.K. Ziganshina, K.R. Khusainov // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. – Vol. 1111. 012044.

81. Ziganshina, S.K. Preheating Boiler Blast Air with Exhaust Gases in Cooling Them Below the Dew Point / S.K. Ziganshina, A.A. Kudinov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – 92 (5). – Pp. 1142–1149.

82. Кудинов, А.А. Повышение экономичности ПГУ-200 Сызранской ТЭС путем отвода в атмосферу отработавших в котле-утилизаторе газов через вытяжную башню градирни / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина // Энергетик. – 2021. – № 8. – С. 41–44.

83. Пат. 2294498 РФ, МПК F 28 C 1/00 Способ работы вентиляторной и башенной градирни испарительного типа и устройство для его осуществления / В.А. Калатузов ; заявитель и патентообладатель Калатузов В.А. – № 2005127440/06 ; заявл. 01.09.06 ; опубл. 27.02.07, Бюл. № 6. – 7 с.

84. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции: учебное пособие / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

85. Талиев, В.Н. Приближенная равномерная раздача воздуха воздухопроводом постоянного сечения с боковыми отверстиями одинаковых размеров / В.Н. Талиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1972. – №1. – С. 28–31.

86. Гримитлин, М.И. Распределение воздуха в помещениях / М.И. Гримитлин. – СПб.: Авок Северо-Запад, 2004. – 319 с.

87. Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – М.: Авок-Пресс, 2008. – 212 с.

88. Лежава, И.Д. Теоретическое и экспериментальное исследование приточных и вытяжных транзитных воздухопроводов с постоянными параметрами канала и щели или канала и боковых отверстий : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. – Москва, 2000. – 184 с.

89. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости и газа / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1975. – 327 с.

90. Киселев, П.Г. Гидравлика: Основы механики жидкости: учебное пособие / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

91. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоиздат, 1984. – 640 с.

92. Бекнев, В.С. Газовая динамика. Механика жидкости и газа : учебное пособие / В. С. Бекнев, В. М. Епифанов, А. И. Леонтьев; под общ. ред. А. И. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ, 1997. – 666 с.

93. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 502 с.

94. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.

95. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник / А. Д. Гиргидов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 704 с.

96. Кудинов, А.А. Гидрогазодинамика: учебное пособие / А.А. Кудинов. – М.: ИНФРА – М, 2011. – 336 с.

97. Ромейко, М.Б. Аэродинамический расчет систем вентиляции с механическим побуждением: учеб. пособие / М.Б. Ромейко, В.Б. Жильников. – Самара: АСИ СамГТУ, 2016. – 248 с.

98. Демина, Ю.Э. Моделирование гидродинамического пограничного слоя в башенной градирне с естественной циркуляцией воздуха / Ю.Э. Демина // Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной году науки и технологий в России «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 232–236.

99. Кудинов, А.А. Расчет системы отвода уходящих дымовых газов газотурбинной установки через башню градирни / А.А. Кудинов, Ю.Э. Демина // Градостроительство и архитектура. – 2018. – № 1(31). – С. 135–139. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.23.

100. Демина, Ю.Э. Применение воздухопроводов равномерной раздачи для отвода уходящих газов котельных установок / Ю.Э. Демина // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 80-й всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2023. – С. 643–648.

101. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. – М.: Энергия, 1977. – 3-е изд. – 256 с.

102. Исаев, С.И. Теория теплообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 683 с.

103. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

104. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.

105. Крупнов, В.И. Техническая термодинамика / В.И. Крупнов, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др. – М.: Высш. школа, 1991. – 384 с.

106. Кудинов, А.А. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов / А.А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 375 с.

107. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619264 Российская Федерация. Модуль расчета башенной градирни с естественной тягой / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина, З.Ф. Камальдинова, А.М. Шатохин ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2021616049 ; заявл. 21.04.21 ; опубл. 07.06.2021.

108. Демина, Ю.Э. Программный комплекс расчета системы отвода уходящих газов теплогенерирующих установок через градирню с естественной тягой / Ю.Э. Демина, А.М. Шатохин // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей. – Самара, 2020. – С. 360–364.

109. Дудолин, А.А. Исследование влияния климатических условий и типа ГТУ на выбор структуры тепловых схем парогазовых ТЭЦ утилизационного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01 / А.А. Дудолин. – М.: Московский энергетический институт (Технический университет), 2004. – 190 с.

110. NGSolve: [Электронный ресурс]. URL: <https://ngsolve.org/> (дата обращения 31.07.2023).

111. Jianmin, Du. Flue gas injection on the long-term durability of a natural draft concrete cooling tower / Du Jianmin, Zhuang Wenjuan // Special issue long-term behavior of cementitious materials and reinforced concrete structures. – 2019. – 12 (13) 2038 <https://doi.org/10.3390/ma12132038>

112. Воронов, В.Н., Водно-химические режимы ТЭС и АЭС: учебное пособие / В.Н. Воронов, Т.И. Петрова; под ред. А.П. Пильщикова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 240 с.

113. Чичирова, Н.Д. Исследование структуры отложений в системах оборотного охлаждения паровых турбин ТЭС / Н.Д. Чичирова [и др.] // Теплоэнергетика. – 2018. – № 9. – С. 94–102.

114. Чичирова, Н.Д. Влияние концентраций компонентов на свойства химических систем, образующихся при проведении водно-химических мероприятий на

ТЭС и АЭС / Н.Д. Чичирова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 1–2. – С. 35–40.

115. Копылов, А. С. Водоподготовка в энергетике : учебное пособие для вузов / А. С. Копылов, В. М. Лавыгин, В. Ф. Очков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 309 с.

116. Ледуховский, Г.В. Энергетические характеристики оборудования ТЭС: учебное пособие / Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. – 232 с.

117. Поспелов, А.А. Режим работы и эксплуатация котельных установок ТЭС: учебное пособие / А.А. Поспелов, Г.В. Ледуховский. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – 372 с.

118. Чичирова, Н.Д., Низамов Л.А. Экономический эффект оптимизации режимов работы электростанций на примере Казанской ТЭЦ-3 / Н.Д. Чичирова, Л.А. Низамов // Надёжность и безопасность энергетики. – 2016. – № 2 (33). – С. 34–36.

119. Рогалев, Н.Д. Экономика энергетики: учебник для вузов / Н.Д. Рогалев, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова, Г.Н. Курдюкова, В.В. Бологова, О.Ю. Пономарёва, Д.Г. Шувалова, Е.Я. Синицина, Н.Л. Кетоева; под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 320 с.

120. Кудинов, А.А. Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие / А.А. Кудинов, С.К., Зиганшина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – 230 с.

121. Кудинов, А.А. Тепловые электрические станции: учеб. пособ. / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 102 с.

122. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учеб. пособие для вузов / А.А. Александров. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 158 с.

123. Пакет программ для вычисления теплофизических свойств воды и водяного пара «WaterSteamPro» (www.wsp.ru).

124. Чичирова, Н.Д. Экологическая и экономическая эффективность внедрения ресурсосберегающих технологий на тепловых электрических станциях /

Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.Г. Королёв, Т.Ф. Вафин // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 65-71.

125. Пат. 2704364 Российская Федерация, МПК F 01 K 23/10. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2018125190 ; заявл. 09.07.18 ; опубл. 28.10.19, Бюл. № 31. – 5 с.

126. Пат. 2782483 Российская Федерация, МПК F 01 K 11/02. Способ работы тепловой электрической станции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина, Е.А. Кудинов; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2022113651 ; заявл. 23.05.22 ; опубл. 28.10.22, Бюл. № 31. – 5 с.

127. Демина, Ю.Э. Защита от обмерзания устья вытяжной башни градирни с естественной тягой / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Градостроительство и архитектура. – 2022. – № 3. – С. 170–175. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.21.

128. Демина, Ю.Э. Повышение эффективности работы ТЭС за счет использования тепла оборотной воды / Ю.Э. Демина // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 78-й всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2021. – С. 728–733.

129. Демина, Ю.Э. Моделирование гидродинамического пограничного слоя в башенной градирне с естественной циркуляцией воздуха / Ю.Э. Демина // Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной году науки и технологий в России «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 232–236.

130. Демина, Ю.Э. Исследование способа защиты вытяжной башни градирни от образования наледи в зимний период эксплуатации / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Материалы I Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения». – Томск: ТПУ, 2021. – С. 269–273.

131. Демина, Ю.Э. Предотвращение льдообразования за счет создания защитного воздушного потока в верхней части вытяжной башни градирни / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» [Электронный ресурс]. – Кемерово: КузГТУ, 2022. – С. 107.1–107.5

132. Демина, Ю.Э. Технология защиты от обмерзания устья вытяжной башни градирни / Ю.Э Демина, А.А. Кудинов // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. трудов по материалам XVI Междун. науч.-техн. конф. «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов». – Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2022. – Вып. 11. – С. 113–119.

133. Schlichting, H. (2017). / H. Schlichting, H., K. Gersten // Boundary-layer theory. – 2017. doi:10.1007/978-3-662-52919-5.

134. NIST-JANAF. Thermochemical Tables. NIST Standard Reference Database 13. – 1998. DOI: 10.18434/T42S31.

135. Sutherland, W. The viscosity of gases and molecular force / W. Sutherland // Philosophical Magazine. – 2009. – Vol. 5 (36).P – 507-531.

136. Buck, A.L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor / A.L. Buck // Journal of applied meteorology. – 1981. – 20(12). P. 1527–1532. doi:10.1175/1520-0450(1981)020<1527:nefcyp>2.0.co;2

137. Buck, A.L. CR-1A User's Manual, Buck Research Instruments L.L.C. (1996), appendix 1.

138. Жерносек, В.Л. Методика определения коэффициентов теплоотдачи при расчете многослойной конструкции дымовой трубы / В.Л. Жерносек, В.А. Новик. – Минск: Изд-во БНТУ, – 2017. – С. 25–33.

139. Richardson, L.F. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam / L.F. Richardson // Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1911. – 210(459-470). – P. 307–357. doi:10.1098/rsta.1911.0009.

140. Weisstein E.W. Least Squares Fitting. From MathWorld-A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html> (accessed on 2021).

141. Weisstein E.W. Student's t-Distribution. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/Studentst-Distribution.html> (accessed on 2021).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Локальные ресурсные сметные расчеты

Таблица А.1

Самарская ТЭЦ

наименование (объекта) стройки

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЁТ № РС-119

(локальная ресурсная смета)

Монтаж газоходов

(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание : ЛС-218 Монтаж газоходов

Сметная стоимость 14062,09 тыс. руб.

Средства на оплату труда 2592,81 тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 4 квартал 2021 г. ФСНБ-2001 (редакция 2020 г.)

№ п.п.	Шифр, номера нормативов и коды ресурсов	Наименование работ и затрат, характеристика оборудования и его масса, расход ресурсов на единицу измерения	Ед. изм.	Количество единиц по проектным данным	Сметная стоимость, руб.	
					на единицу измерения	общая
1	2	3	4	5	6	7
1	26-02-003-02	Огнезащитное покрытие металлоконструкций составом на основе минераловатных волокон методом сухого торкретирования с пределом огнестойкости: 1 час	100 м2	37	117 434,68	4 345 083,27
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	7584,26	214,11	1 623 865,91
	1-1033	Рабочий строитель среднего разряда 3,3		3,3		
	2	Затраты труда машинистов	чел.-ч	1928,07	243,76	469 986,34
	91.06.03-060	Лебедки электрические тяговым усилием до 5,79 кН (0,59 т)	маш.-ч	28,86	19,76	570,27
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	41,07	580,30	23 832,92
	91.21.22-021	Агрегаты для нанесения составов методом торкретирования, 3,2 м3/ч	маш.-ч	1887	1 320,32	2 491 443,84
	01.7.03.01-0001	Вода	м3	43,216	32,79	1 417,05
	01.7.07.04-0004	Дисперсия поливинилацетатная гомополимерная грубодисперсная пластифицированная ДБ	т	0,6475	167 519,29	108 468,74
	01.7.20.08-0051	Ветошь	кг	174,64	36,93	6 449,46
	14.5.09.07-0022	Растворитель N 646	т	1,1581	76 880,30	89 035,08

2	14.2.02.11-0028	Состав огнезащитный для увеличения предела огнестойкости систем дымоудаления воздуховодов от 60 до 180 минут	кг	8140	63,16	514 122,40
3	20-01-002-23	Прокладка воздуховодов из листовой оцинкованной стали и алюминия класса П (плотные) толщиной: 1,4 мм, диаметром 2000 мм	100 м2	6,78	17 526,05	118 826,51
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	341,4408	211,50	72 214,73
	1-1032	Рабочий строитель среднего разряда 3,2		3,2		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	6,5088	298,70	1 944,18
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	2,6442	1 410,45	3 729,51
	91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	49,155	20,45	1 005,22
	91.06.03-055	Лебедки электрические тяговым усилием 19,62 кН (2 т)	маш.-ч	0,4068	36,17	14,71
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	3,8646	580,30	2 242,63
	91.17.04-233	Установки для сварки ручной дуговой (постоянного тока)	маш.-ч	7,5258	82,73	622,61
	01.7.06.03-0023	Лента полиэтиленовая с липким слоем, марка А	кг	32,0694	250,83	8 043,97
	01.7.11.07-0045	Электроды сварочные Э42А, диаметр 5 мм	т	0,001898	145 920,42	276,96
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	61,02	128,67	7 851,44
	01.7.19.04-0031	Прокладки резиновые (пластина техническая прессованная)	кг	54,24	420,81	22 824,73
4	19.1.01.03-0084	Воздуховоды из оцинкованной стали, толщина 1,2 мм, диаметр 1600 мм	м2	678	670,76	454 775,28
5	19.1.01.11-0001	Крепления для воздуховодов оцинкованные (подвески СТД, подвески регулируемые СТД, тяги, хомуты, кронштейны, траверсы, ленты, шпильки, профили)	т	1	71 370,33	71 370,33
6	20-01-002-23	Прокладка воздуховодов из листовой оцинкованной стали и алюминия класса П (плотные) толщиной: 1,4 мм, диаметром 2000 мм	100 м2	37	17 526,05	648 463,60
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	1863,32	211,50	394 092,18
	1-1032	Рабочий строитель среднего разряда 3,2		3,2		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	35,52	298,70	10 609,82
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	14,43	1 410,45	20 352,79
	91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	268,25	20,45	5 485,71
	91.06.03-055	Лебедки электрические тяговым усилием 19,62 кН (2 т)	маш.-ч	2,22	36,17	80,30
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	21,09	580,30	12 238,53
	91.17.04-233	Установки для сварки ручной дуговой (постоянного тока)	маш.-ч	41,07	82,73	3 397,72
	01.7.06.03-0023	Лента полиэтиленовая с липким слоем, марка А	кг	175,01	250,83	43 897,76
	01.7.11.07-0045	Электроды сварочные Э42А, диаметр 5 мм	т	0,01036	145 920,42	1 511,74
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	333	128,67	42 847,11

	01.7.19.04-0031	Прокладки резиновые (пластина техническая прессованная)	кг	296	420,81	124 559,76
7	19.1.01.02-0011	Воздуховоды из листовой стали толщиной 0,9 мм, диаметр до 7200 мм	м2	3700	465,49	1 722 313,00
8	19.1.01.11-0001	Крепления для воздуховодов оцинкованные (подвески СТД, подвески регулируемые СТД, тяги, хомуты, кронштейны, траверсы, ленты, шпильки, профили)	т	0,5	71 370,33	35 685,17
9	09-03-039-02	Монтаж опорных конструкций: для крепления трубопроводов внутри зданий и сооружений массой до 0,5 т	т	2	12 433,29	24 866,61
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	90,8	219,50	19 930,60
	1-1035	Рабочий строитель среднего разряда 3,5		3,5		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	0,54	298,75	161,33
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,22	1 410,45	310,30
	91.06.03-062	Лебедки электрические тяговым усилием до 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	3,6	53,08	191,09
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,32	580,30	185,70
	91.17.04-042	Аппараты для газовой сварки и резки	маш.-ч	4,64	9,29	43,11
	91.17.04-171	Преобразователи сварочные номинальным сварочным током 315-500 А	маш.-ч	9,8	169,62	1 662,28
	01.3.02.08-0001	Кислород газообразный технический	м3	3,9	50,33	196,29
	01.3.02.09-0022	Пропан-бутан смесь техническая	кг	1,18	72,16	85,15
	01.7.11.07-0036	Электроды сварочные Э46, диаметр 4 мм	кг	8	156,33	1 250,64
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	4	128,67	514,68
	01.7.15.06-0111	Гвозди строительные	т	0,00002	93 837,47	1,88
	01.7.20.08-0071	Канат пеньковый пропитанный	т	0,0002	293 362,83	58,67
	08.2.02.11-0007	Канат двойной свивки ТК, конструкции 6х19(1+6+12)+1 о.с., оцинкованный, из проволоки марки В, маркировочная группа 1770 н/мм2, диаметр 5,5 мм	10 м	0,0374	515,09	19,26
	08.3.03.06-0002	Проволока горячекатаная в мотках, диаметр 6,3-6,5 мм	т	0,00006	27 809,59	1,67
	08.3.11.01-0091	Швеллеры N 40, марка стали Ст0	т	0,00388	72 160,30	279,98
	11.1.03.01-0077	Бруски обрезные, хвойных пород, длина 4-6,5 м, ширина 75-150 мм, толщина 40-75 мм, сорт I	м3	0,00206	9 568,01	19,71
	14.4.01.01-0003	Грунтовка ГФ-021	т	0,00062	75 918,92	47,07
	14.5.09.07-0030	Растворитель Р-4	кг	1,2	57,11	68,53
10	07.2.07.11-0004	Опоры стальные	т	2	67 074,19	134 148,38
ИТОГИ ПО СМЕТЕ						
		Оплата труда рабочих	чел.-ч	9879,8208		2 110 103,42
		Оплата труда машинистов	чел.-ч	1970,6388		482 701,67
		Фонд оплаты труда	чел.-ч	11850,459		2 592 805,09
				6		
		Стоимость эксплуатации машин				2 567 409,24

	Стоимость материалов, учтенных в расценках	459 727,33
	Стоимость материалов, не учтенных в расценках	2 932 414,56
	Стоимость материалов	3 392 141,89
	Итого прямые затраты по смете	8 069 654,55
	Накладные расходы	2 366 229,49
	в том числе:	
Пр/812-016.0-1	Сантехнические работы внутренне(тр/провода, водопровод, канализация, отопление, газоснабжение, вентиляция и кондиционир.воздуха) 121% \times 0,9=108,9% от ФОТ текущего 478860,91	521 479,53
Пр/812-020.0-1	Теплоизоляционные работы 97% \times 0,9=87,3% от ФОТ текущего 2093852,25	1 827 933,01
Пр/812-009.0-1	Строительные металлические конструкции 93% \times 0,9=83,7% от ФОТ текущего 20091,93	16 816,95
	Сметная прибыль	1 282 527,26
	в том числе:	
Пр/774-016.0	Сантехнические работы внутренне(тр/провода, водопровод, канализация, отопление, газоснабжение, вентиляция и кондиционир.воздуха) 72% \times 0,85=61,2% от ФОТ текущего 478860,91	293 062,88
Пр/774-020.0	Теплоизоляционные работы 55% \times 0,85=46,75% от ФОТ текущего 2093852,25	978 875,93
Пр/774-009.0	Строительные металлические конструкции 62% \times 0,85=52,7% от ФОТ текущего 20091,93	10 588,45
	Итого по смете с накладными расходами и сметной прибылью	11 718 411,30
ФЗ РФ от 07.07.03 № 117-ФЗ	Налоги НДС, 20%	2 343 682,26
	Итого	14 062 093,56
	ВСЕГО ПО СМЕТЕ	14 062 093,56

Самарская ТЭЦ

наименование (объекта) стройки

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЁТ № РС-118

(локальная ресурсная смета)

Монтаж воздуховодов

(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание : ЛС-217 Монтаж воздуховодов

Сметная стоимость 5383,59 тыс. руб.

Средства на оплату труда 597,14 тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 4 квартал 2021 г. ФСНБ-2001 (редакция 2020 г.)

№ п.п.	Шифр, номера нормативов и коды ресурсов	Наименование работ и затрат, характеристика оборудования и его масса, расход ресурсов на единицу измерения	Ед. изм.	Количество единиц по проектным данным	Сметная стоимость, руб.	
					на единицу измерения	общая
1	2	3	4	5	6	7
1	20-01-001-18	Прокладка воздуховодов из листовой, оцинкованной стали и алюминия класса Н (нормальные) толщиной: 1,0 мм, диаметром от 900 до 1000 мм	100 м2	3,7	21 764,16	80 527,46
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	274,54	211,50	58 065,21
	1-1032	Рабочий строитель среднего разряда 3,2		3,2		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	2,368	298,70	707,32
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,962	1 410,45	1 356,85
	91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	37,185	20,45	760,43
	91.06.03-055	Лебедки электрические тяговым усилием 19,62 кН (2 т)	маш.-ч	0,481	36,17	17,40
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	1,406	580,30	815,90
	91.17.04-233	Установки для сварки ручной дуговой (постоянного тока)	маш.-ч	4,181	82,73	345,89
	01.1.01.09-0026	Шнур асбестовый общего назначения ШАОН, диаметр 8-10 мм	т	0,00407	333 392,32	1 356,91
	01.7.11.07-0045	Электроды сварочные Э42А, диаметр 5 мм	т	0,001221	145 920,42	178,17
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	22,2	128,67	2 856,47
	01.7.19.04-0031	Прокладки резиновые (пластина техническая прессованная)	кг	33,633	420,81	14 153,10
	14.5.04.03-0002	Мастика герметизирующая нетвердеющая из синтетического каучука, для заполнения и герметизации швов стеклянного ограждения теплиц	т	0,00888	69 946,63	621,13

2	19.1.01.02-0019	Воздуховоды из листовой стали толщиной 1,2 мм, диаметр до 1000 мм	м2	370	759,15	280 885,50
3	19.1.01.11-0001	Крепления для воздуховодов оцинкованные (подвески СТД, подвески регулируемые СТД, тяги, хомуты, кронштейны, траверсы, ленты, шпильки, профили)	т	0,8	71 370,32	57 096,26
4	20-01-001-19	Прокладка воздуховодов из листовой, оцинкованной стали и алюминия класса Н (нормальные) толщиной: 1,0 мм, диаметром до 1250 мм	100 м2	8,32	21 299,27	177 210,05
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	568,256	211,50	120 186,14
	1-1032	Рабочий строитель среднего разряда 3,2		3,2		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	5,3248	298,70	1 590,52
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	2,1632	1 410,45	3 051,09
	91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	83,616	20,45	1 709,95
	91.06.03-055	Лебедки электрические тяговым усилием 19,62 кН (2 т)	маш.-ч	1,0816	36,17	39,12
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	3,1616	580,30	1 834,68
	91.17.04-233	Установки для сварки ручной дуговой (постоянного тока)	маш.-ч	9,4016	82,73	777,79
	01.1.01.09-0026	Шнур асбестовый общего назначения ШАОН, диаметр 8-10 мм	т	0,009152	333 392,32	3 051,21
	01.7.11.07-0045	Электроды сварочные Э42А, диаметр 5 мм	т	0,002746	145 920,42	400,70
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	81,536	128,67	10 491,24
	01.7.19.04-0031	Прокладки резиновые (пластина техническая прессованная)	кг	82,4512	420,81	34 696,29
	14.5.04.03-0002	Мастика герметизирующая нетвердеющая из синтетического каучука, для заполнения и герметизации швов стеклянного ограждения теплиц	т	0,013894	69 946,63	971,84
5	19.1.01.02-0020	Воздуховоды из листовой стали, толщиной 1,4 мм, диаметр до 1800 мм	м2	832	774,18	644 117,76
6	19.1.01.11-0011	Крепления (подвески) для воздуховодов СТД6208, СТД6209, СТД6210	т	0,5	60 403,78	30 201,89
7	20-06-015-05	Установка агрегатов вентиляторных производительностью: до 125 тыс.м3/час	шт	2	23 002,39	46 004,79
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	141,2	232,88	32 882,66
	1-1040	Рабочий строитель среднего разряда 4		4		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	5,54	298,44	1 653,36
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	2,22	1 410,45	3 131,20
	91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	35,3	20,45	721,89
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	3,32	580,30	1 926,60
	01.7.15.02-0051	Болты анкерные	т	0,048	152 967,60	7 342,44
8	64.1.05.01-0032	Вентиляторы радиальные взрывозащищенные: ВР-80-75-12,5 из алюминиевых сплавов низкого давления взрывозащищенный, тип электродвигателя АИМ180М8 (15 кВт, 750 об/мин.)	компл	2	407 077,24	814 154,48
9	20-04-002-05	Установка калориферов массой: до 0,5 т	шт	4	2 763,64	11 054,53

1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	32,64	206,81	6 750,28	
1-1030	Рабочий строитель среднего разряда 3		3			
2	Затраты труда машинистов	чел.-ч	1,32	298,13	393,53	
91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,52	1 410,45	733,43	
91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	8,16	20,45	166,87	
91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,8	580,30	464,24	
91.17.04-233	Установки для сварки ручной дуговой (постоянного тока)	маш.-ч	1,96	82,73	162,15	
01.1.02.08-0002	Прокладки из паронита ПМБ, толщина 1 мм, диаметр 100 мм	1000 шт	0,008	16 533,90	132,27	
01.7.11.07-0045	Электроды сварочные Э42А, диаметр 5 мм	т	0,00196	145 920,42	286,00	
01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	1,8	128,67	231,61	
23.8.03.11-0652	Фланцы стальные плоские приварные из стали ВСтЗсп2, ВСтЗсп3, номинальное давление 1,0 МПа, номинальный диаметр 40 мм	шт	8	265,96	2 127,68	
10	64.5.03.02-0012	Калориферы пластинчатые стальные КВБ12, площадь поверхности теплообмена 133,7 м2, производительность по воздуху 25000 м3/ч	шт	4	56 631,33	226 525,32
11	20-06-005-07	Установка фильтров воздушных (сухих) производительностью: до 125 тыс.м3/час	шт	2	18 373,29	36 746,56
1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	133	232,88	30 973,04	
1-1040	Рабочий строитель среднего разряда 4		4			
2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	1,5	298,41	447,62	
91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,6	1 410,45	846,27	
91.06.03-047	Лебедки ручные и рычажные тяговым усилием 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	39,78	20,45	813,50	
91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,9	580,30	522,27	
01.7.15.02-0051	Болты анкерные	т	0,01728	152 967,60	2 643,28	
01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	2,7	128,67	347,41	
01.7.19.04-0031	Прокладки резиновые (пластина техническая прессованная)	кг	1,24	420,81	521,80	
04.3.01.09-0014	Раствор готовый кладочный, цементный, М100	м3	0,026	3 038,17	78,99	
12	19.3.03.03-0004	Фильтры воздушные (сухие) ФР-4 с объемным фильтрующим материалом ФРНК-1, производительность до 40 тыс. м3/час	шт	2	79 917,85	159 835,70
13	26-01-009-01	Изоляция трубопроводов: матами минераловатными, плитами минераловатными на синтетическом связующем	м3	90	6 415,86	577 427,00
1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	1260	236,18	297 586,80	
1-1041	Рабочий строитель среднего разряда 4,1		4,1			
2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	53,1	279,97	14 866,41	
91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	53,1	580,30	30 813,93	
91.21.22-443	Установки для изготовления бандажей, диафрагм, пряжек	маш.-ч	56,7	15,98	906,07	

	01.7.15.04-0054	Винты самонарезающие, оцинкованные, размер 4x12 мм	т	0,0036	335 048,19	1 206,17
	08.3.02.01-0041	Лента стальная упаковочная мягкая нормальной точности 0,7x20-50 мм	т	0,954	65 612,47	62 594,30
	08.3.03.05-0011	Проволока стальная низкоуглеродистая разного назначения оцинкованная, диаметр 1,1 мм	т	0,0477	100 914,25	4 813,61
	08.3.03.05-0013	Проволока стальная низкоуглеродистая разного назначения оцинкованная, диаметр 1,6 мм	т	0,0909	100 914,25	9 173,11
	08.3.05.05-0054	Сталь листовая оцинкованная, толщина 0,8 мм	т	1,215	117 422,71	142 668,59
	10.1.02.02-0103	Листы алюминиевые, марка АД1Н, толщина 1 мм	кг	70,2	377,83	26 523,67
	12.2.03.10-0008	Стеклопластик рулонный теплоизоляционный, плотность 120 г/м2, ширина 1м	м2	45	25,35	1 140,75
14	12.2.04.04-0005	Маты минераловатные прошивные без обкладок, 100, толщина 80 мм	м3	97,2	2 298,41	223 405,45
15	09-03-039-02	Монтаж опорных конструкций: для крепления трубопроводов внутри зданий и сооружений массой до 0,5 т	т	1	12 433,29	12 433,29
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	45,4	219,50	9 965,30
	1-1035	Рабочий строитель среднего разряда 3,5		3,5		
	2	Оплата труда машинистов	чел.-ч	0,27	298,75	80,66
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,11	1 410,45	155,15
	91.06.03-062	Лебедки электрические тяговым усилием до 31,39 кН (3,2 т)	маш.-ч	1,8	53,08	95,54
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,16	580,30	92,85
	91.17.04-042	Аппараты для газовой сварки и резки	маш.-ч	2,32	9,29	21,55
	91.17.04-171	Преобразователи сварочные номинальным сварочным током 315-500 А	маш.-ч	4,9	169,62	831,14
	01.3.02.08-0001	Кислород газообразный технический	м3	1,95	50,33	98,14
	01.3.02.09-0022	Пропан-бутан смесь техническая	кг	0,59	72,16	42,57
	01.7.11.07-0036	Электроды сварочные Э46, диаметр 4 мм	кг	4	156,33	625,32
	01.7.15.03-0042	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	2	128,67	257,34
	01.7.15.06-0111	Гвозди строительные	т	0,00001	93 837,47	0,94
	01.7.20.08-0071	Канат пеньковый пропитанный	т	0,0001	293 362,83	29,34
	08.2.02.11-0007	Канат двойной свивки ТК, конструкции 6x19(1+6+12)+1 о.с., оцинкованный, из проволок марки В, маркировочная группа 1770 н/мм2, диаметр 5,5 мм	10 м	0,0187	515,09	9,63
	08.3.03.06-0002	Проволока горячекатаная в мотках, диаметр 6,3-6,5 мм	т	0,00003	27 809,59	0,83
	08.3.11.01-0091	Швеллеры N 40, марка стали Ст0	т	0,00194	72 160,30	139,99
	11.1.03.01-0077	Бруски обрезные, хвойных пород, длина 4-6,5 м, ширина 75-150 мм, толщина 40-75 мм, сорт I	м3	0,00103	9 568,01	9,86
	14.4.01.01-0003	Грунтовка ГФ-021	т	0,00031	75 918,92	23,53

	14.5.09.07-0030	Растворитель Р-4	кг	0,6	57,11	34,27
16	07.2.07.11-0004	Опоры стальные	т	1	67 074,19	67 074,19
17	16-02-005-05	Прокладка трубопроводов отопления и водоснабжения из стальных электросварных труб диаметром: 100 мм	100 м	0,7	19 454,98	13 618,48
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	50,75	236,18	11 986,14
	1-1041	Рабочий строитель среднего разряда 4,1		4,1		
	2	Затраты труда машинистов	чел.-ч	1,239	289,61	358,83
	91.05.01-017	Краны башенные, грузоподъемность 8 т	маш.-ч	0,189	1 297,70	245,27
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъемность 16 т	маш.-ч	0,07	1 410,45	98,73
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,98	580,30	568,69
	91.17.04-042	Аппараты для газовой сварки и резки	маш.-ч	24,444	9,29	227,08
	01.3.02.03-0001	Ацетилен газообразный технический	м3	0,427	288,03	122,99
	01.3.02.08-0001	Кислород газообразный технический	м3	0,469	50,33	23,60
	01.7.03.01-0001	Вода	м3	7,693	32,79	252,25
	01.7.11.04-0072	Проволока сварочная легированная, диаметр 4 мм	т	0,00035	119 027,03	41,66
	03.1.02.03-0015	Известь строительная негашеная хлорная, марка А	кг	0,02751	22,25	0,61
	04.3.01.09-0016	Раствор готовый кладочный, цементный, М200	м3	0,0147	3 500,69	51,46
18	23.7.01.04-0005	Трубопроводы из стальных электросварных труб с гильзами для отопления и водоснабжения, наружный диаметр 108 мм, толщина стенки 4 мм	м	70	979,20	68 544,00
19	26-01-001-01	Изоляция трубопроводов конструкциями теплоизоляционными комплектами на основе цилиндров минераловатных на синтетическом связующем	м3	1	12 290,16	12 290,16
	1	Оплата труда рабочих	чел.-ч	36,3	232,88	8 453,54
	1-1040	Рабочий строитель среднего разряда 4		4		
	2	Затраты труда машинистов	чел.-ч	0,69	279,97	193,18
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,69	580,30	400,41
	01.7.15.04-0054	Винты самонарезающие, оцинкованные, размер 4x12 мм	т	0,00047	335 048,19	157,47
	08.3.05.05-0054	Сталь листовая оцинкованная, толщина 0,8 мм	т	0,01946	117 422,71	2 285,05
	10.1.02.02-0103	Листы алюминиевые, марка АД1Н, толщина 1 мм	кг	2,63	377,83	993,69
20	12.2.08.01-0097	Цилиндры теплоизоляционные минераловатные М-100, на синтетическом связующем, кашированные алюминиевой фольгой, диаметр 108 мм, толщина 50 мм	м	72,1	701,54	50 581,03
ИТОГИ ПО СМЕТЕ						
		Оплата труда рабочих	чел.-ч	2542,086		576 849,11
		Оплата труда машинистов	чел.-ч	71,3518		20 291,43
		Фонд оплаты труда	чел.-ч	2613,4378		597 140,54
		Стоимость эксплуатации машин				54 653,93
		Стоимость материалов, учтенных в расценках				335 809,28

	Стоимость материалов, не учтенных в расценках	1 581 741,78
	Стоимость материалов	1 917 551,06
	Итого прямые затраты по смете	2 549 054,10
	Накладные расходы	578 396,89
	в том числе:	
Пр/812-016.0-1	Сантехнические работы внутренне(тр/провода, водопровод, канализация, отопление, газоснабжение, вентиляция и кондиционир.воздуха) 121% \times 0,9=108,9% от ФОТ текущего 265994,65	289 668,18
Пр/812-020.0-1	Теплоизоляционные работы 97% \times 0,9=87,3% от ФОТ текущего 321099,93	280 320,24
Пр/812-009.0-1	Строительные металлические конструкции 93% \times 0,9=83,7% от ФОТ текущего 10045,96	8 408,47
	Сметная прибыль	318 197,17
	в том числе:	
Пр/774-016.0	Сантехнические работы внутренне(тр/провода, водопровод, канализация, отопление, газоснабжение, вентиляция и кондиционир.воздуха) 72% \times 0,85=61,2% от ФОТ текущего 265994,65	162 788,73
Пр/774-020.0	Теплоизоляционные работы 55% \times 0,85=46,75% от ФОТ текущего 321099,93	150 114,22
Пр/774-009.0	Строительные металлические конструкции 62% \times 0,85=52,7% от ФОТ текущего 10045,96	5 294,22
	Стоимость оборудования	1 040 679,80
	Итого по смете с накладными расходами и сметной прибылью	4 486 327,96
ФЗ РФ от 07.07.03 № 117-ФЗ	Налоги НДС, 20%	897 265,59
	Итого	5 383 593,55
	ВСЕГО ПО СМЕТЕ	5 383 593,55

**ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ
ПРАКТИЧЕСКУЮ РЕАЛИЗАЦИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**



Филиал «Самарский»
 ПАО «Т Плюс»
 ул. Маяковского, 15,
 г. Самара, 443100

Тел.: (846) 279-63-51, 332-34-35
 Факс: (846) 242-43-94
 info-samara@tplusgroup.ru
 www.tplusgroup.ru

СПРАВКА об использовании результатов научных исследований

Справка дана д.т.н., профессору Зиганшиной Светлане Камиловне, аспирантке Деминой Юлии Эрнестовне, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» в том, что в филиале «Самарский» ПАО «Т Плюс» рассмотрены результаты научно-исследовательской работы «Разработка технологий отвода уходящих газов котельных установок в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной тягой и ее защиты от обледенения», выполненной в рамках государственной научно-исследовательской работы кафедры «Тепловые электрические станции» СамГТУ «Совершенствование тепломеханического оборудования тепловых электрических станций и систем теплоснабжения».

Научный руководитель работы профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Самарского государственного технического университета, д.т.н., профессор Кудинов Анатолий Александрович.

Вид рекомендованных к внедрению результатов научных исследований:

1. Способ отвода уходящих газов котла-утилизатора газотурбинной установки в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха (Патент Российской Федерации на изобретение № 2453712);
2. Способ защиты выходной части вытяжной башни градирни с естественной тягой от обледенения путем создания защитного газовоздушного пограничного слоя на ее внутренней поверхности (Патент Российской Федерации на изобретение № 2704364);
3. Методика и программа расчета на ЭВМ (Свидетельство РФ № 2021619264) процессов тепло- и массообмена при движении газозвдушной смеси в вытяжной башне градирни.

Область и форма внедрения: котельные установки тепловых электрических станций, научные исследования.

Социальный эффект: развитие науки и научных исследований, защита окружающей среды, путем снижения вредных выбросов за счет повышения эффективности использования органического топлива.

Эффект от внедрения: экономия органического топлива, повышение надежности тепловой электрической станции.

Заместитель главного инженера
 по генерации




12.09.2022

К.А. Шевченко



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», д.п.н., профессор
 О.В. Юсупова
18» 05 2022 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» результатов диссертационной работы
аспиранта Деминой Юлии Эрнестовны

В учебном процессе при чтении лекций, проведении практических занятий по дисциплинам «Котельные установки тепловых электростанций», «Тепловые и атомные электростанции» для студентов направления подготовки 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника и «Парогазовые и газотурбинные энергетические установки» для магистрантов направления подготовки 13.04.01 - Теплоэнергетика и теплотехника, в курсовом и дипломном проектировании, организации научно-исследовательской работы студентов и магистрантов на кафедре «Тепловые электрические станции» Теплоэнергетического факультета СамГТУ используются результаты научных исследований аспиранта Деминой Ю.Э., включенные в состав ее кандидатской диссертации: методика и модуль расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена газовоздушной смеси в вытяжной башне градирни с учетом отвода через нее в атмосферу уходящих газов котельных установок; методика расчета процессов гидродинамики и конструктивных параметров кольцевого газораспределителя для отвода уходящих газов котлоагрегатов тепловых электростанций в атмосферу через вытяжную башню градирни; запатентованные технические решения по совершенствованию систем отвода в атмосферу уходящих продуктов сгорания паротурбинных и парогазовых ТЭС и систем обратного циркуляционного водоснабжения с градирнями.

Декан Теплоэнергетического
факультета

Председатель методического совета
Теплоэнергетического факультета

 К.В. Трубицын
 Ю.Н. Горбунова

ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2704364

Парогазовая установка электростанции

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Кудинов Анатолий Александрович (RU), Зиганшина Светлана Камилловна (RU), Демина Юлия Эрнестовна (RU)*

Заявка № 2018125190

Приоритет изобретения 09 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 июля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



12/18

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2693567

СПОСОБ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Кудинов Анатолий Александрович (RU), Зиганшина Светлана Камилловна (RU), Зеленцов Данила Владимирович (RU), Демина Юлия Эрнестовна (RU)*

Заявка № 2018128114

Приоритет изобретения 31 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 31 июля 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021619264

МОДУЛЬ РАСЧЕТА БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГОЙ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Демина Юлия Эрнестовна (RU), Кудинов Анатолий Александрович (RU), Зиганшина Светлана Камиловна (RU), Камальдинова Зульфия Фаисовна (RU), Шатохин Александр Михайлович (RU)*

Заявка № 2021616049

Дата поступления 21 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 июня 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2782483

Способ работы тепловой электрической станции

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Кудинов Анатолий Александрович (RU), Зиганишина Светлана Камилловна (RU), Демина Юлия Эрнестовна (RU), Кудинов Евгений Анатольевич (RU)*

Заявка № 2022113651

Приоритет изобретения 23 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 28 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 23 мая 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 66b80077c14c3910a94e6b024145d5c7
Инициалы: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 28.10.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов