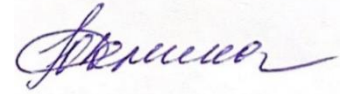


На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, **Кудинов Анатолий Александрович**

Официальные оппоненты:

Чичирова Наталия Дмитриевна, доктор химических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции»;

Замалеев Мансур Масхутович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 11:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета

Текст диссертации размещен

http://ispu.ru/files/Tekst_dissertacii_Deminoy_Yu.E._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 теплообмена 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 пограничного 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 теплоэнергетических 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.).

Соответствие паспорту специальности. По тематике и методике исследований диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы в части направлений исследований – пункту 1. «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах ... и их основного и вспомогательного оборудования»; пункту 2. «Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах..., их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии»; пункту 5. «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, ... в энергетических системах и комплексах».

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследо-

вания 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведен перечень научно-технических конференций, на которых докладывались и обсуждались результаты диссертационного исследования, описана структура и дано краткое содержание диссертации.

В первой главе представлены аналитический обзор и анализ научных работ отечественных и зарубежных ученых в области повышения экономичности тепловых электрических станций за счет отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни и способов защиты конструкций градирни от обмерзания. Вопросам совершенствования оборотных систем технического водоснабжения тепловых электрических станций с башенными градирнями посвящено большое количество научных работ российских и зарубежных ученых. Однако, некоторые вопросы, связанные с отводом уходящих газов котельных установок ТЭС через вытяжную башню градирни и защитой устья башни градирни от обледенения, недостаточно разработаны. На основании проведенного анализа научных работ сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложены научно обоснованные технические решения по совершенствованию системы отвода уходящих газов котельных установок ТЭС в атмосферу через вытяжную башню градирни. Анализ проведенных ранее исследований показал, что наиболее оптимальной из представленных вариантов, является система газоудаления с кольцевым распределителем (рисунок 1), для которой в диссертационном исследовании разработана методика расчета гидродинамических и конструктивных параметров.

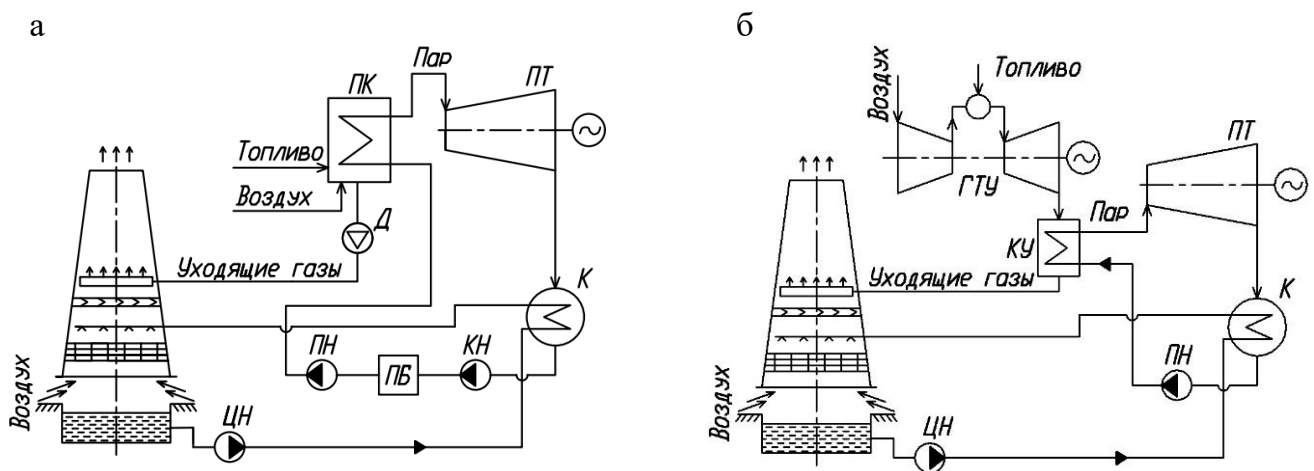


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема ТЭС с отводом уходящих газов через вытяжную башню градирни: а – от энергетического котла; б – от котла-утилизатора ПГУ

В основе разработки методики расчета гидродинамических и конструктивных параметров системы распределения уходящих газов котельных установок ТЭС в вытяжной башне градирни использовались принципы расчета воздухопроводов равномерной раздачи. Математическая постановка задачи описывается частным случаем уравнения Бернулли:

$$\left(\frac{l}{\mu f}\right)^2 \left(\frac{dL_x}{dx}\right)^2 + \left(\frac{L_x}{F_x}\right)^2 = \left(\frac{l}{\mu f}\right)^2 \left(\frac{dL_0}{dx}\right)^2 + \int_0^x \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{L_x^2}{F_x^3} dS, \quad (1)$$

где L – расход продуктов сгорания, м³/ч; l – длина газохода, м; μ – коэффициент расхода отверстия; f – площадь щели, м²; F – площадь сечения газохода, м²; λ – коэффициент гидравлического трения; S – площадь поверхности газохода, м².

В результате преобразований с принятыми в пределах инженерных расчетов максимальными отклонениями расхода воздуха в отверстиях $r_{\max} = \pm 0,05$ была получена упрощенная методика расчета газовых кольцевых коллекторов равномерной раздачи, основой которой является безразмерный параметр газохода $\bar{\lambda}l$:

$$\bar{\lambda}l = \lambda l / d, \quad (2)$$

где d – диаметр газохода, м.

Вычисляется значение комплекса $2d/\lambda$ и сравнивается с длиной газохода. Если $2d/\lambda \geq l$, расчет продолжают и определяют безразмерный параметр отверстия $\bar{\mu}\bar{\sigma}$ по следующим зависимостям:

$$\bar{\mu}\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2 \cdot r_{\max}}{0,25\bar{\lambda}l(n-1)^2 + \frac{0,4(n-1)}{n} - 0,167(4n+1)(n-1)}}; \quad (3)$$

$$\bar{\mu}\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2 \cdot r_{\max}}{0,167(2n+1)(n+1) - 1 - 0,083\bar{\lambda}l(n^2 - 1) - 0,2(n-1)}}. \quad (4)$$

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

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

Определив оптимальное значение количества отверстий n , рассчитывают площадь единичного отверстия:

$$\sigma = \bar{\mu}\bar{\sigma} F_{\text{факт}} / \mu, \quad (5)$$

где μ – коэффициент расхода (для отверстия с острыми выходными кромками $\mu = 0,62$; для коноидального насадка $\mu = 0,98$).

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

$$\nu_0 = L_{\Gamma} / 3600 \sigma_{\text{факт}} n. \quad (6)$$

На основании выполненных расчетов определяются потери давления для дальнейшего подбора тягодутьевого оборудования.

Гидравлические и конструктивные и характеристики систем газораспределения определялись путем проведения многовариантных расчетов на основе технических параметров башенных градирен с естественной тягой: расположение газопроводов в центре градирни и у стенок башни; от 1 до 4 концентрически расположенных газораспределителей, имеющих отверстия с острыми кромками и конoidalные насадки (таблица 1). Расчеты выполнены для башенных градирен БГ-2600 и БГ-2300, установленных на Самарской ТЭЦ и на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ.

Таблица 1 – Результаты расчетов газовых кольцевых коллекторов для Самарской ТЭЦ, количество коллекторов $n_r=3$

Параметр	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3
Расход газов L_T , 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
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 $\lambda \bar{l}$	0,162	0,117	0,073
Безразмерный параметр отверстия $\mu \bar{\sigma}_1$	0,042	0,041	0,041
Безразмерный параметр отверстия $\mu \bar{\sigma}_2$	0,054	0,054	0,053
Количество отверстий n	10	10	10
Площадь единичного отверстия σ , м ²	0,489	0,485	0,482
Размеры отверстия $a \times b$, м	0,6×0,8	0,6×0,8	0,6×0,8
Фактическая площадь единичного отверстия $\sigma_{\text{факт}}$, м ²	0,480	0,480	0,480
Скорость газов на выходе из отверстий v_0 , м/с	13,72	13,72	13,72

Анализ результатов выполненных вариантных расчетов (см. таблицу 1) показал, что наиболее оптимальной является конструкция с тремя кольцевыми газовыми коллекторами при скорости газов в коллекторе 10 м/с (рисунок 2). Повышение скорости газов в коллекторе до 20 и 30 м/с обуславливает значительное увеличение 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 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 %.

Для расчета тепло- и массообменных процессов, протекающих в вытяжной башне градирни с естественной тягой при отводе через нее уходящих газов котельных установок, разработана программа для ЭВМ на языке программирования C++ (модуль расчета башенной градирни, свидетельство о государственной регистрации № 2021619294) по методике, разработанной на кафедре «Тепловые электрические станции» СамГТУ.

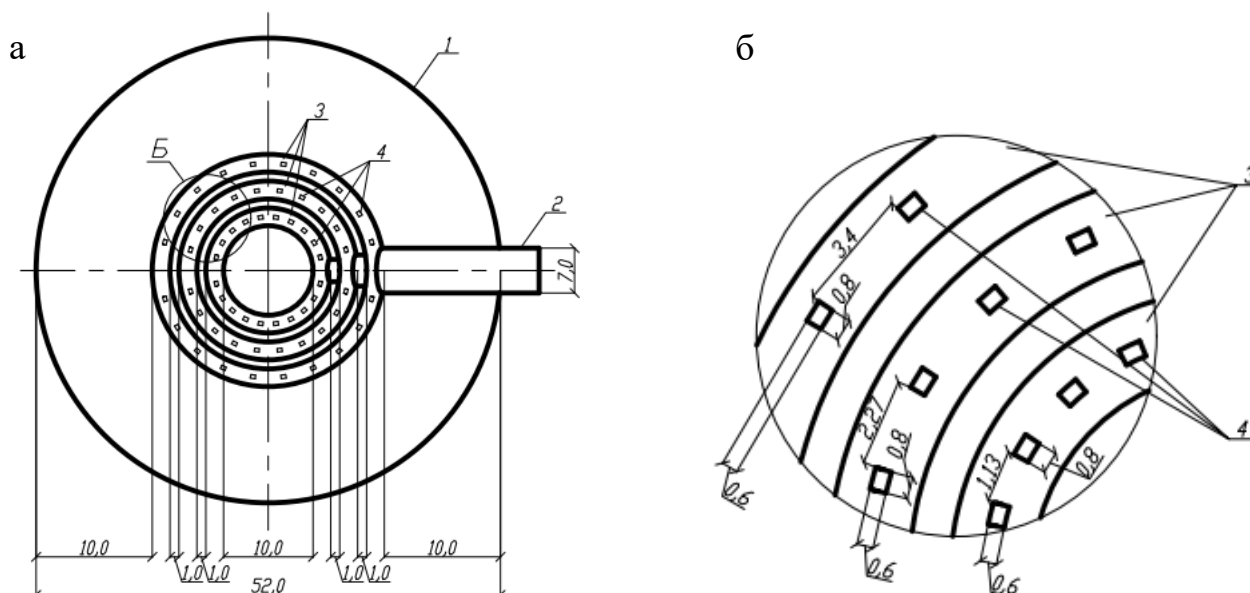


Рисунок 2 – Система отвода уходящих газов с тремя газовыми коллекторами:
 а – общий вид; б – коллектор с отверстиями: 1 – стенка башни градирни;
 2 – подводящий газоход; 3 – кольцевой коллектор; 4 – отверстия для выхода газов (раз-
 меры указаны для системы отвода уходящих газов Самарской ТЭЦ)

Результаты расчетов зависимости температуры циркуляционной воды для различных температур наружного воздуха и экспериментальные данные по результатам обследования системы циркуляционного водоснабжения Самарской ТЭЦ приведены на рисунке 3.

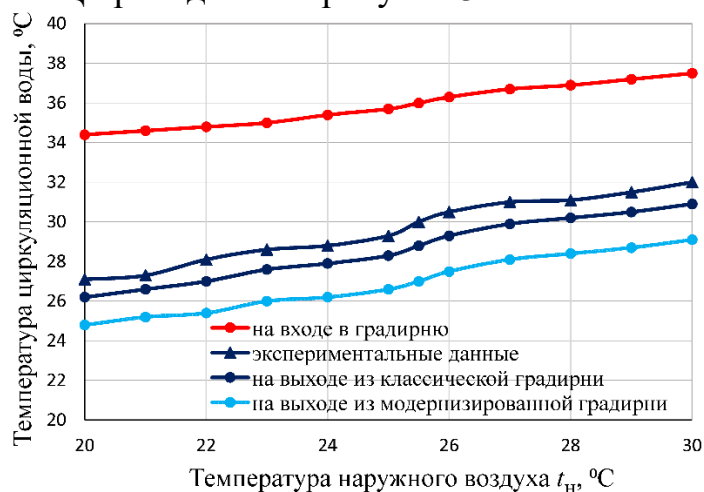


Рисунок 3 – Зависимость температуры циркуляционной воды от t_n

электрической энергии возрастает на 0,05 % (с 87,44 до 87,49 %), а КПД ТЭЦ по отпуску электроэнергии – на 0,11 % (с 62,81 до 62,92 %). 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. Турбины работают с загруженными производственным и теплофикационными отборами пара.

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)).

При применении отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни от энергетических котлов Самарской ТЭЦ в атмосферу температура циркуляционной воды на выходе из градирни снижается на 1,8 °C; от котлов-утилизаторов ПГУ-200 – на 1,31 °C, что обуславливает повышение КПД турбоустановки. В результате КПД турбоустановки ТЭЦ по производству электрической энергии повышается на 0,12 % (с 68,18 до 68,30 %), суммарный КПД турбоустановки по выработке тепловой и

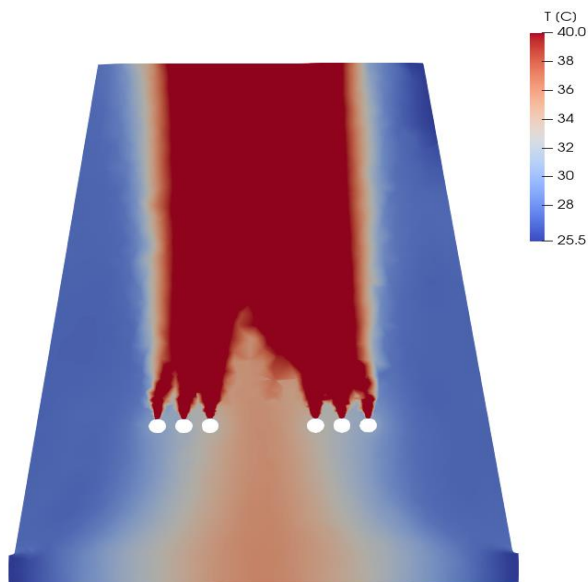


Рисунок 4 – Распределение температур потоков в башне градирни

Для анализа рассчитанных процессов тепло- и массообмена при движении смеси в вытяжной башне градирни выполнено численное моделирование в среде OpenFOAM. 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 результате моделирования были получены распределения температуры, скорости рабочей среды (смеси влажного воздуха и уходящих газов) в объеме вытяжной башни градирни (рисунок 4).

Анализ полученных результатов моделирования распределения температур и скоростей газозадушной смеси в объеме вытяжной башни 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 при принятых расчетных условиях не наблюдается.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, содержащихся в уходящих газах, при замене дымовой трубы на систему отвода уходящих газов котельных установок через вытяжную башню градирни с естественной тягой. Выполнены расчеты для Самарской ТЭЦ (СамТЭЦ) и ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ и определены приземные концентрации вредных веществ в атмосфере на различных расстояниях от источника выбросов. Расчеты рассеивания проводились на базе унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы УПРЗА «ЭКО центр».

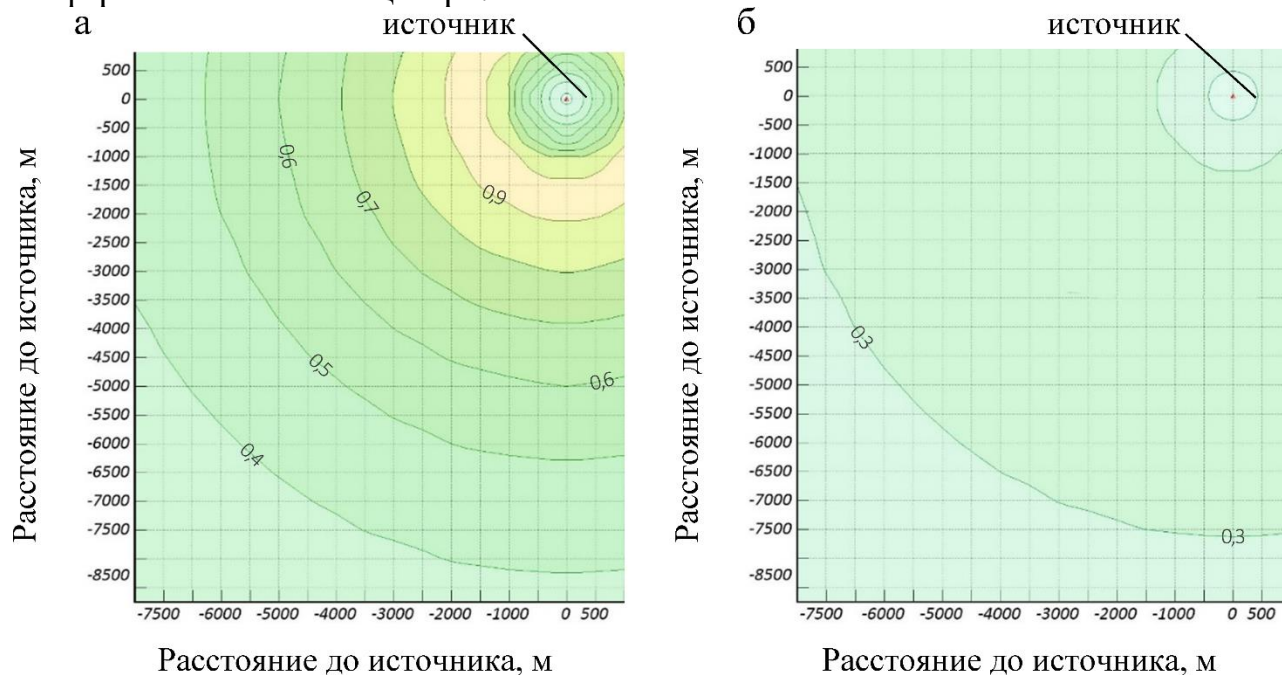


Рисунок 5 – Картограмма значений наибольших концентраций NO_2 при различных способах отвода газов (СамТЭЦ): а – через градирню БГ-2600; б – через дымовую трубу, $H_{\text{тр}}=180$ м

Результаты расчетов распределения концентраций NO_2 в атмосферном воздухе в зоне действия Самарской ТЭЦ для случаев отвода газов от энергокотлов через вытяжную башню градирни БГ-2600 и дымовую трубу № 2 высотой 180 м приведены на рисунке 5.

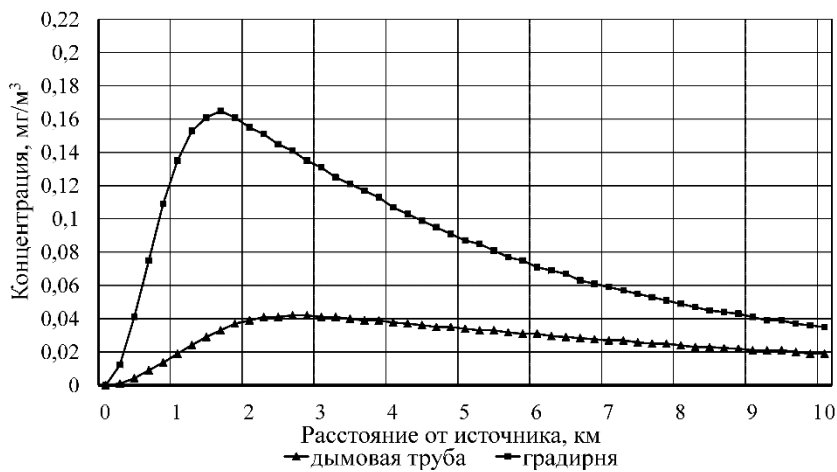


Рисунок 6 – Расчетные концентраций NO_2 при различных способах отвода уходящих газов (СамТЭЦ), мг/м³

Расчетная максимальная концентрация NO_2 в атмосферном воздухе составляет 0,164 мг/м³ при отводе газов через вытяжную башню градирни.

В четвертой главе излагаются научно обоснованные технические решения и разработки по предотвращению обмерзания верхней части вытяжной башни градирни за счет создания защитного воздушного потока.

При отрицательных температурах окружающей среды влажный воздух на выходе из вытяжной башни градирни, взаимодействуя с ее холодными стенками, охлаждается ниже точки росы, при этом находящиеся в воздухе водяные пары конденсируются, конденсат водяных паров намерзает на внутренней поверхности вытяжной башни градирни, образуется значительное количество льда.

Для предотвращения обмерзания внутренней поверхности в верхней части вытяжной башни градирни предлагается по ее периметру установить газораспределительное устройство, состоящее из кольцевого коллектора постоянного замкнутого сечения с щелевыми отверстиями равномерной раздачи воздуха или газов. 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, а во втором – уходящие продукты сгорания котлов паротурбинной или парогазовой ТЭС при температуре 80-130 °С.

Для проверки возможности реализации и выбора наиболее оптимального решения по конструкции газораспределительного устройства и проверки эффективности его работы проведено математическое моделирование защитного пограничного слоя в среде OpenFOAM с использованием оболочки SimScale. Задача решалась для несжимаемой сплошной среды в Эйлеровой формулировке для усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Для описания пограничного слоя и конвективного теплообмена в нем была принята система уравнений, замкнутая моделью турбулентности сдвигового транспорта $k-\omega$ SST.

Система подачи воздуха представляет собой кольцевой воздуховод замкнутого круглого сечения диаметром 1000 мм (рисунок 7). Воздуховод расположен на расстоянии 5 м от верхней кромки вытяжной башни градирни. Для подачи по-

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 ($H_{\text{тр}}=180$ м) концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в зоне действия источника не превышает ПДК (ПДК_{мр}=0,2 мг/м³) (рисунок 6).

догретого атмосферного воздуха или газов в верхней части воздуховода предусмотрены щелевые отверстия шириной 100 мм.

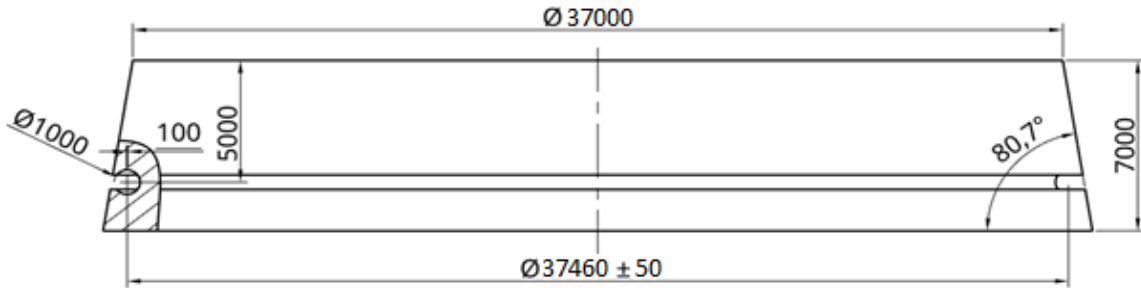


Рисунок 7 – Схема размещения кольцевого коллектора в вытяжной башне градирни

В качестве граничных условий для расчета распределительного устройства были использованы параметры влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни, наружного воздуха и дополнительно нагнетаемого подогретого атмосферного воздуха или уходящих газов.

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

$$k = 1,5(UI)^2; \quad (7) \quad I = \frac{16}{Re^{0,125}}; \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{0,164k^{1,5}}{0,07d_h}; \quad (9) \quad \omega = \frac{\varepsilon}{k}; \quad (10)$$

$$Re_t = \frac{k^2}{\varepsilon\nu}; \quad (11) \quad Pr_t = \frac{6,374}{Re^{0,283} Pr^{0,161}}; \quad (12)$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, m^2/c^2 ; U – средняя скорость потока среды, m/c ; I – интенсивность турбулентных пульсаций, %; $Re = \frac{UL}{\nu}$ – кри-

терий Рейнольдса для потока; ε – интенсивность рассеивания энергии турбулентных пульсаций, m^2/c^3 ; d_h – гидравлический диаметр градирни, m ; ω – приведенное значение интенсивности рассеивания энергии турбулентных пульсаций, $1/c$; Re_t и Pr_t – турбулентные числа Рейнольдса и Прандтля; ν и Pr – кинематический коэффициент вязкости и число Прандтля для рабочей среды.

Температура внутренней поверхности $T_{ст2}$ вытяжной башни градирни была задана следующими граничными условиями:

$$-\lambda_{ввг} \frac{T_{ввг} - T_{ст2}}{\delta} = \frac{T_{возд} - T_{ст2}}{\Sigma R}, \quad (13)$$

где $\lambda_{ввг}$ – теплопроводность влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни, при температуре $T_{ввг}$, $Вт/м\cdot К$; $T_{возд}$ – температура наружного воздуха, $К$; $T_{ст2}$ – температура внутренней поверхности стенки, $К$; $\delta = 0,07d_h$ – толщина воздушного пограничного слоя на стенке градирни диаметром d_h , m ; ΣR – термическое сопротивление стенки градирни, $m^2\cdot К/Вт$.

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 воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни

($t_{зс} \leq t_{нас} - 2$). При подаче дымовых газов достаточно поддержания положительной температуры стенки градирни, чтобы предотвратить обледенение.

Средняя толщина защитного пограничного слоя определялась по формуле:

$$\delta_{зс} = V_{зс} / S_{зс}, \quad (14)$$

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

Были рассмотрены пять режимных параметров работы градирни в зависимости от изменения температуры наружного воздуха. Результаты расчетов объединены в соответствующие серии. В каждой серии расчетов ступенчато изменялась температура наружного воздуха $t_{возд}$ в диапазоне $-30...-10$ °C с шагом 5 °C. Расход подаваемого в защитный слой воздуха в расчетах принимался равным 2% от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни.

Пространственная визуализация защитного пограничного слоя при подаче подогретого воздуха для пяти вариантов расчетов для градирни БГ-2600 представлена на рисунке 8. На рисунке 9 показаны поперечные сечения защитного пограничного слоя. Для всех рассмотренных вариантов расчетов обеспечивается полное покрытие внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни защитным слоем воздуха с температурой $t_{зс} \leq t_{нас} - 2$.

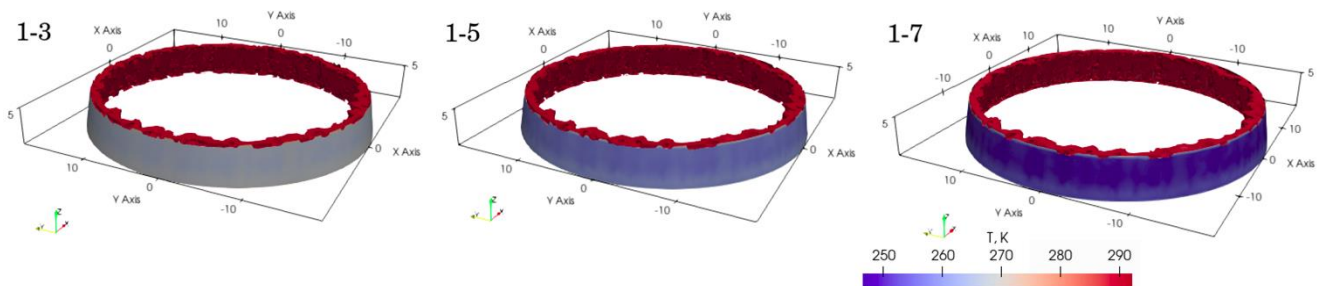


Рисунок 8 – Защитные слои для градирни: 1-3, 1-5, 1-7 – при температуре наружного воздуха соответственно -10 , -20 , -30 °C

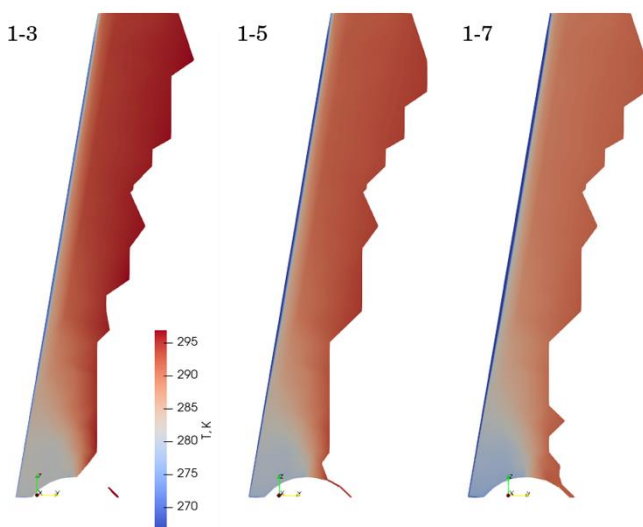


Рисунок 9 – Защитные слои в вертикальном сечении: расчеты 1-3, 1-5, 1-7 – при температуре наружного воздуха соответственно -10 , -20 , -30 °C

Минимальное значение толщины защитного пограничного слоя составило $\delta_{зс} = 1000$ мм. Наблюдались локальные утолщения защитного слоя до 1480 мм. Средние значения толщины воздушного защитного слоя были определены по выражению (14) и приведены в таблице 2.

Средняя температура воздуха в защитном слое изменяется пропорционально изменению температуры наружного воздуха, поскольку температура дополнительно подаваемого воздуха в расчетах принималась постоянной, равной 5 °C.

Таблица 2 – Параметры защитного слоя для градирни БГ-2600

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

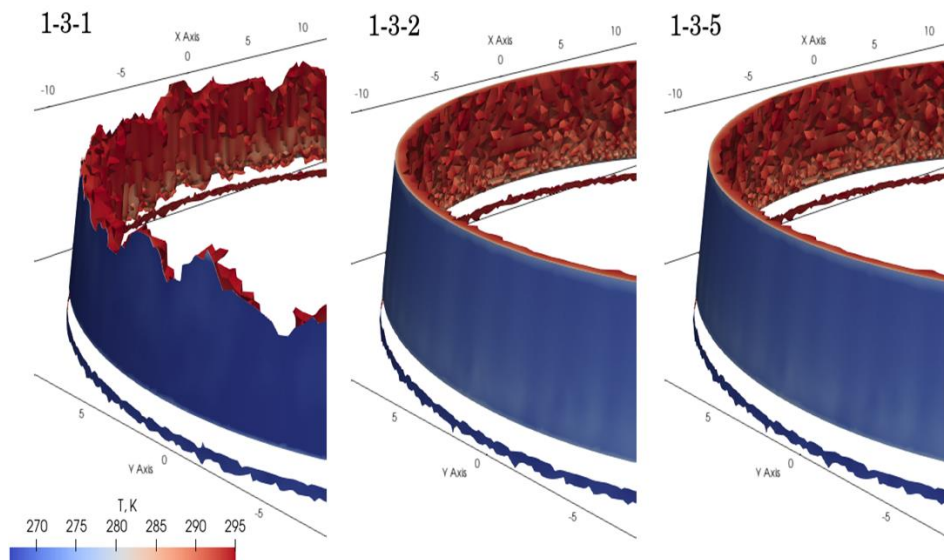


Рисунок 10 – Защитные слои для градирни при различных расходах подаваемого воздуха: 1-3-1, 1-3-2, 1-3-5 – соответственно 1, 2, 5 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни

Для установления зависимости влияния расхода воздуха на толщину защитного слоя проведена серия расчетов для различных расходов дополнительного подаваемого воздуха. Пространственная визуализация защитного слоя для каждого варианта расчетов представлена на рисунке 10, параметры защитного слоя приведены в таблице 3.

При подаче в защитный слой вместо воздуха 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 t_n наружного воздуха от -10 до -30 °С.

Таблица 3 – Параметры защитного слоя для градирни БГ-2600

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

Изменения температуры внутренней поверхности вытяжной башни градирни (рисунок 11) 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 12 приведены расчетные значения температуры внутренней поверхности вытяжной башни градирни для температуры наружного воздуха $t_n = -10$ °С и $t_n = -30$ °С. Для промежуточных значений t_n характер распределения температуры и толщины защитного пограничного слоя имеет аналогичную картину.

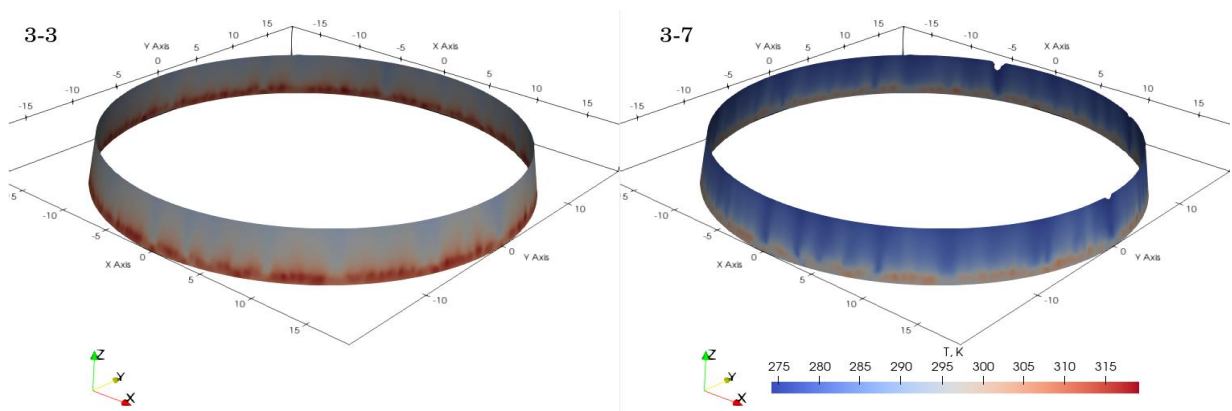


Рисунок 11 – Температура внутренней поверхности вытяжной башни градирни:
3-3 при $t_n = -10$ °С, 3-7 при $t_n = -30$ °С

Средняя температура стенки внутренней поверхности вытяжной башни градирни при подаче в защитный слой уходящих газов котлов ТЭС для $t_n = -10$ °С и $t_n = -30$ °С составляет 23 и 8 °С, а диапазоны температур внутренней поверхности вытяжной башни градирни – 12–32 и 4–19 °С.

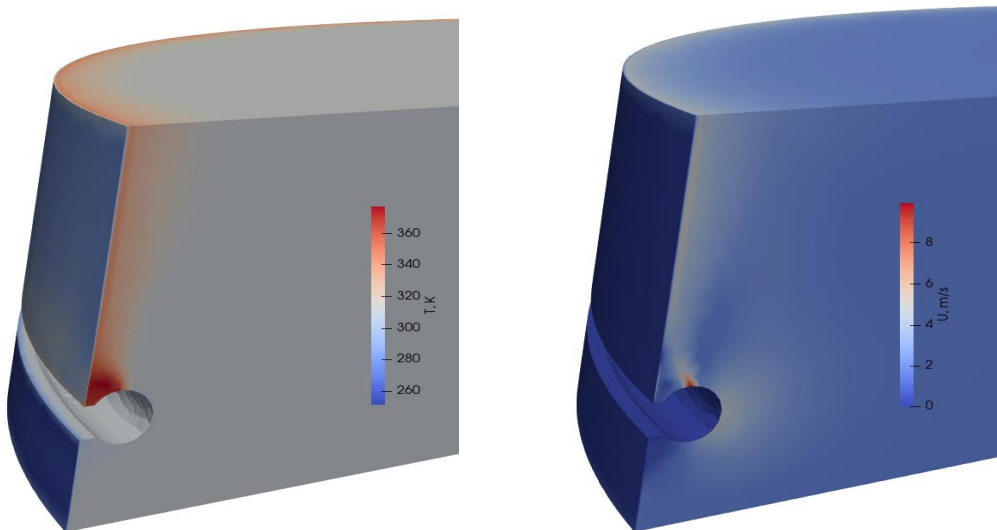


Рисунок 12 – Распределение температуры (слева) и скорости (справа)
в пристеночном слое вытяжной башни градирни при $t_n = -10$ °С

На основании полученных расчетных значений толщины защитного слоя для вытяжной башни градирни была составлена многофакторная аппроксимирующая функция вида $\delta_{зс} = f(T_{\text{возд}}, T_{\text{ввг}}, G_{\text{ввг}})$, мм, которая описывает зависимость толщины защитного пограничного слоя от основных режимных параметров – расхода и температуры воздуха, движущегося в башне градирни, и температуры наружного воздуха:

$$\delta_{зс} = 718,4 \frac{T_{\text{ввг}}}{T_{\text{возд}}} - \frac{289643}{G_{\text{ввг}}} + 385,7, \quad (15)$$

где $G_{\text{ввг}}$ – расход влажного воздуха, м³/с.

Аппроксимирующая функция (15) характеризуется средним отклонением $\varepsilon = \pm 1$ мм Коэффициент детерминации во всем рассматриваемом диапазоне $R^2 = 0,9997 - 0,9999$. Дополнительно была получена однофакторная аппроксимирующая функция вида $\Delta\delta_{зс} = f(G_{\text{возд}})$, которая описывает зависимость относительной толщины пограничного защитного слоя от доли подаваемого воздуха:

$$\Delta\delta_{\text{зс}} = 65/G_{\text{возд}} - 32. \quad (16)$$

Параметр $\Delta\delta_{\text{зс}}$ является показателем приращения толщины защитного слоя при снижении доли подаваемого в пограничный слой воздуха ниже 2 % от расхода влажного воздуха, движущегося в вытяжной башне градирни. Аппроксимирующая функция (16) характеризуется средними отклонениями ε в пределах 1%. Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,998$.

Приведенные затраты на устройство системы защиты внутренней поверхности вытяжной башни градирни типа БГ-2600 Самарской ТЭЦ от обледенения составляет 5383,59 тыс. руб. в ценах 2021 года.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы.

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 газозоудного потока.

2. Разработаны математическая модель и программа расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена газозоудной 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 газозоудной 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 стен-

ками 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 аппроксимирующая 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 газовоздушной 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Кудинов, А.А. Расчет системы отвода уходящих дымовых газов газотурбинной установки через башню градирни / А.А. Кудинов, Ю.Э. Демина // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т.8. – № 1(31). – С. 135–138. Doi: 10.17673/Vestnik.2018.01.23.
2. Зиганшина, С.К. Повышение экономичности ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ путём отвода в атмосферу отработавших в котле-утилизаторе газов через вытяжную башню градирни / С.К. Зиганшина, А.А. Кудинов, Ю.Э. Демина // Энергетик. – 2021. – № 8. – С. 41–44.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования SCOPUS

3. 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, Yu.E. Demina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 791 (2020) 012014 Doi:10.1088/1757-899X/791/1/012014.

Патенты на изобретения РФ

4. Пат. 2704364 С1 Российская Федерация, МПК F 01 К 23/10. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Ю.Э. Демина ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2018125190 ; заявл. 09.07.2018; опубл. 28.10.2019, Бюл. № 31. – 5 с.
5. Пат. 2693567 С1 Российская Федерация, МПК F 01 К 23/10. Способ работы парогазовой установки электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Д.В. Зеленцов, Ю.Э. Демина ; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2018128114; заявл. 31.07.2018 ; опубл. 03.07.2019, Бюл. № 19. – 5 с.
6. Пат. 2782483 С1 Российская Федерация, МПК F 01 К 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. 23.05.2022; опубл. 28.10.2022, Бюл. № 31. – 5 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619264 Российская Федерация. Модуль расчета башенной градирни с естественной тягой / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, З.Ф. Камальдинова, А.М. Шатохин; заявитель и патентообладатель СамГТУ – № 2021616049; заявл. 21.04.2021; опубл. 07.06.2021.

Статьи в других изданиях

8. Демина, Ю.Э. Защита от обмерзания устья вытяжной башни градирни с естественной тягой / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Градостроительство и архитектура. – 2022. – Т.12. – № 3. – С. 170–175. Doi: 10.17673/Vestnik.2022.03.24.

Полные тексты докладов конференций

9. 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
10. 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
11. 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. 110.1–110.6
12. 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 энер-

госбережение: теория и практика» [Электронный ресурс]. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – С. 107.1–107.5

13. **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.

14. **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.

15. **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.

16. **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.

17. **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.

18. **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

19. **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.

20. **Демина, Ю.Э.** Моделирование гидродинамических и конструктивных параметров системы отвода уходящих газов котлоагрегатов через вытяжную башню градирни с естественной тягой / Ю.Э. Демина, А.А. Кудинов // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» [Электронный ресурс]. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – С. 9–13.

21. **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.

22. **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.

ДЕМИНА Юлия Эрнестовна

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

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 20.10.2023 Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. п.л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 39

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рафаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ