

На правах рукописи



ФОМИЧЕВ Максим Дмитриевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В БАШЕННЫХ
ГРАДИРНЯХ ТЭС И АЭС**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Жуков Владимир Павлович**

Официальные оппоненты:

Аронсон Константин Эрленович, доктор технических наук, профессор федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», главный научный сотрудник кафедры «Турбины и двигатели»;

Пазушкина Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань

Защита состоится «20» марта 2026 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 имени В.И. Ленина.

Текст диссертации размещен:

http://isp.ru/sites/default/files/2025-12/Диссертация_Фомичев_М.Д..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «____»_____ 20____ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01

Козлова Мария Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Системы оборотного охлаждения (СОО) обеспечивают снижение температуры циркуляционной воды и поддержание оптимальных параметров работы энергоблоков ТЭС и АЭС. Среди различных типов охладительных систем особое место занимают системы с башенными градирнями, которые позволяют организовать замкнутый цикл использования водных ресурсов и сократить потери в окружающую среду. Эффективность работы градирен существенно зависит от внешних условий, включая температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра. В связи с этим, особую актуальность приобретает разработка математических моделей процессов тепломассообмена в башенных градирнях с учетом изменяющихся внешних факторов. Решение данной проблемы имеет не только технологическое, но и экономическое значение, поскольку повышение эффективности систем охлаждения напрямую влияет на себестоимость производимой электроэнергии и конкурентоспособность энергетических предприятий. Исследования в области совершенствования систем оборотного охлаждения, в условиях современных тенденций к энергосбережению и повышению экологической безопасности промышленных объектов, приобретают большое значение для развития энергетического комплекса страны. Все это определяет необходимость проведения комплексных исследований процессов тепломассообмена в башенных градирнях и повышения эффективности их функционирования.

Оборудование систем оборотного охлаждения, включая градирни, в течение года подвергается воздействию различных внешних факторов, что может приводить к загрязнению разбрызгивающих устройств, обмерзанию и обрушению элементов конструкции. В связи с этим остро встает вопрос о своевременном обнаружении дефектов и принятии эффективных мер по их ликвидации, что делает актуальной разработку системы диагностики состояния градирни и повышения эффективности СОО с башенными градирнями.

Степень разработанности темы диссертации. Исследования процессов тепломассообмена проводились многими выдающимися учеными. Значительный теоретический и экспериментальный вклад в эту область внесли В.А. Калатузов, А.Г. Лаптев, В.С. Пономаренко, Б.В. Проскуряков, Ю.И. Арефьев и др. Значимые теоретические и практические результаты процессов тепломассообмена применительно к энергетическому оборудованию представлены в работах А.Б. Голованчикова, В.А. Балашова, А.С. Пушнова, М.Г. Лагуткина и других исследователей. Важные результаты в совершенствовании конструкций и методов расчета градирен были получены С.П. Ивановым, Н.А. Меренцовым, С.А. Горбачевым, В.Л. Федяевым, А.В. Дмитриевым, А.И. Бадриевым, К.Х. Гильфановым,

В.Н. Шарифуллиным, К.Е. Бондарем и др. Существующие математические модели и методы расчета на их основе не всегда с заданной точностью могут решать задачи движения многофазных потоков с учетом фазовых превращений или требуют значительных временных и аппаратных ресурсов для их использования и получения нужных результатов. На сегодняшний день остаются недостаточно исследованными вопросы постановки и решения обратной задачи диагностики состояния охладительной способности градирни.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности функционирования ТЭС и АЭС за счет совершенствования эксплуатации и диагностики технического состояния башенных градирен на основе их математических моделей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели тепломассообмена в башенной градирне с учетом фазового перехода в теплоносителях и внешних факторов.

2. Разработка имитационной модели конвективного движения воздуха внутри и снаружи градирни с использованием программного пакета Ansys Fluent для определения распределения потоков воздуха в поперечном сечении градирни.

3. Разработка комбинированной математической модели на основе матричной модели тепломассообмена и имитационной модели движения потоков воздуха внутри и снаружи градирни.

4. Постановка и решение обратной задачи диагностики состояния башенной градирни, позволяющее констатировать ухудшение охладительной способности СОО.

5. Разработка алгоритма и программного обеспечения мониторинга и диагностики состояния башенных градирен на основе разработанных математических моделей и полученных решений обратных задач.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в части направлений исследований: по пункту 1 «Разработка ... методов расчета ... параметров ... энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом ... топлив(е) ... и их основного и вспомогательного оборудования»; по пункту 2 «Математическое моделирование, численные ... исследования ... рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом ... топлив(е) ..., их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии»; по пункту 4 «Разработка ... методов, алгоритмов ... диагностики ... основного и вспомогательного оборудования энергетических систем ... и входящих в них энергетических установок».

Научная новизна работы.

1. Разработана комбинированная модель башенной градирни на основе интеграции матричного трехпоточного описания тепломассообмена и имитационной модели аэродинамических процессов, которая учитывает фазовые переходы в теплоносителе и влияние ветровых воздействий на распределение потоков воздуха в поперечном сечении градирни.

2. Сформулирована и решена обратная задача диагностики состояния охладительной способности градирни, позволяющая учитывать неравномерность распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении градирни. Разработан алгоритм решения обратной задачи диагностики.

Теоретическая значимость работы состоит: *в расширении* области применения методики комбинированного подхода для моделирования системы обратного охлаждения с учетом фазового перехода в теплоносителях с выделением водяных паров, содержащихся в воздухе в отдельный поток; *в обосновании* целесообразности применения предложенной методики для постановки и решения прямых и обратных задач диагностики оборудования СОО; *в разработке* усовершенствованной методики диагностики градирен, учитывающей влияние внешних факторов на эффективность процессов тепломассообмена.

Практическая значимость результатов. Разработанный программный комплекс диагностики технического состояния башенных градирен, позволяющий производить оперативную оценку охладительной способности оборудования на основе решения обратных задач тепломассообмена, защищен свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2026685094; № 2025684686) и адаптирован для практического использования на тепловых и атомных электростанциях.

Методология и методы исследований. Для получения результатов работы использованы методы матричного математического моделирования, имитационное моделирование движения потоков воздуха с использованием пакета Ansys Fluent, методы обработки экспериментальных данных, методы анализа тепловой экономичности оборудования ТЭС и АЭС.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается применением апробированных методов математического моделирования и анализа тепловой экономичности энергетических установок; согласованностью отдельных результатов диссертации с опубликованными данными; апробацией разработанных методик расчета в условиях промышленной эксплуатации ТЭС и АЭС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комбинированная математическая модель тепломассообмена в башенной градирне, сочетающая имитационную модель конвективного

движения воздуха внутри и снаружи градирни и трехпоточную матричную модель тепломассообмена с учетом фазового перехода в теплоносителе.

2. Постановка и решение обратной задачи диагностики состояния охладительной способности градирни, позволяющей учитывать неравномерность распределения потоков теплоносителей в башенной градирне.

3. Алгоритм решения обратной задачи диагностики технического состояния охладительной способности градирни на основе решения прямой задачи тепломассообмена.

4. Программный комплекс расчета и диагностики технического состояния охладительной способности башенной градирни и результаты расчетно-экспериментальных исследований по оценке эффективности реализации предложенных решений.

Реализация результатов работы:

1. Разработанная методика диагностики технического состояния охладительной способности градирни и реализующий её программный модуль «Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения» в составе комплексной системы мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования принята к рассмотрению в филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» (НВАЭС) с целью повышения точности диагностики состояния оборудования системы оборотного охлаждения.

2. В рамках проведенной научно-исследовательской работы на Петрозаводской ТЭЦ разработано математическое описание градирни как многопоточного теплообменного аппарата с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. На основе матричного метода моделирования и решения обратных задач по выбору режимных параметров теплообменных аппаратов, был выполнен расчет теплогидравлических и аэродинамических характеристик теплоносителей градирни ст. № 2 и определены наиболее эффективные режимы работы данной градирни. Использование результатов НИР в части анализа и совершенствования режимов работы градирен Петрозаводской ТЭЦ позволит обеспечить повышение эффективности ее работы за счет снижения температуры воды на выходе из СОО. Среднегодовой эффект от внедрения разработанного варианта комплекса мероприятий составит 4540 т.у.т.

3. Разработанная методика решения прямых и обратных задач диагностирования СОО и реализующий ее программный комплекс используются в учебном процессе ИГЭУ в рамках курсов «Теория принятия решения» и «Математическое моделирование» при выполнении лабораторных и научных работ студентами, обучающимися по направлениям подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Личное участие автора состоит в разработке математической модели трехпоточного тепломассообмена с выделением водяных паров, содержащихся в воздухе в отдельный поток, разработке и компьютерной реализации имитационной модели движения воздуха внутри и снаружи башенной градирни, в разработке комбинированной математической модели градирни, в постановке и решении обратной задачи диагностики состояния градирни, в алгоритмизации решения обратной задачи диагностики технического состояния градирни на основе решения задачи тепломассообмена в градирне, в разработке программного комплекса для расчета и диагностики технического состояния градирни, в апробации полученной методики в рамках работ по созданию научно-технической продукции применительно к НВАЭС и Петрозаводской ТЭЦ; в подготовке основных публикаций по тематике диссертационного исследования.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 12 конференциях: XVII, XVIII, XIX и XX всероссийских (IX, X, XI и XII международных) научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2022, 2023, 2024 и 2025 гг.); XXVIII, XXIX, XXX и XXXI Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2022, 2023, 2024 и 2025 гг.); XXII и XXIII Международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2023 и 2025 гг.); III и IV Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (Ульяновск, 2023 и 2024 г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 19 опубликованных работах, в том числе в 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК); 12 тезисах и полных текстах докладов конференций; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников из 145 наименований. Текст диссертации изложен на 145 стр. машинописного текста, содержит 47 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, внедрении её результатов, о публикациях по тематике исследования.

В первой главе проведен анализ данных по тематике исследования. Рассмотрены роль и место СОО в работе современных ТЭС и АЭС, раскрыты особенности эксплуатации башенных градирен, приведен аналитический

обзор ранее проведенных исследований процессов тепломассообмена в градирнях. Описаны существующие подходы к решению рассматриваемых задач, показаны преимущества методологии матричной формализации для моделирования процессов тепломассопереноса в энергетическом оборудовании. Сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей тепломассообменных процессов в башенной градирне. На начальном этапе исследований предложена матричная модель тепломассообмена в башенной градирне, учитывающая поток водяных паров, содержащихся в воздухе и позволяющая оценить влияние неравномерности распределения потоков воздуха и воды в поперечном сечении градирни на процесс тепломассообмена. Эскиз градирни и расчетная схема процесса приведены на рис. 1.

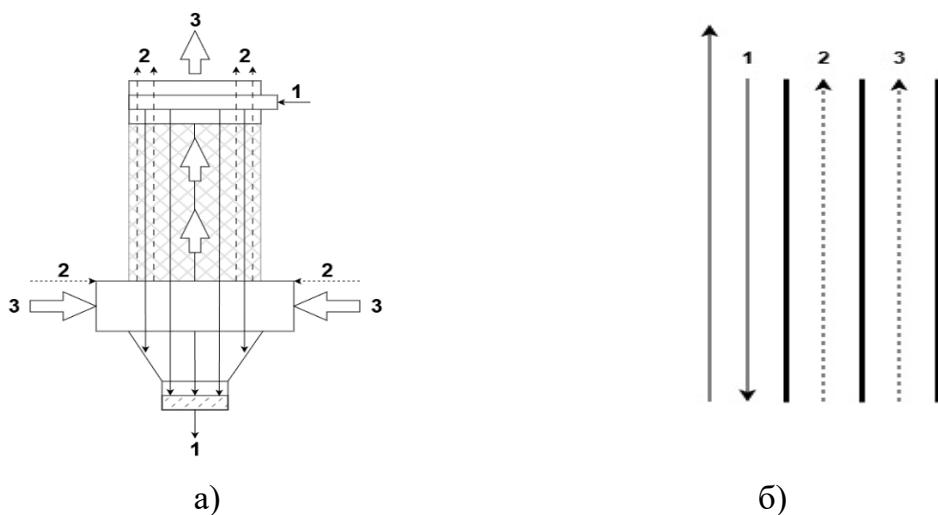


Рис.1. Схема потоков теплоносителей в башенной градирне (а), расчетная схема процесса тепломассопереноса (б) (индексы: 1—охлаждаемая вода, 2—водяные пары, содержащиеся в воздухе; 3—воздух)

Математическая модель процессов тепломассопереноса получена в виде системы четырёх дифференциальных уравнений (1), представленной в традиционном и матричном виде. В качестве первых двух модельных потоков рассматриваются охлаждаемая вода и воздух. Испарение циркуляционной воды в градирне приводит к изменению влажности воздуха, в связи с чем в качестве третьего модельного потока рассматриваются водяные пары, содержащиеся в воздухе. Процесс теплопередачи в рассматриваемой трёхпоточной системе описывается системой из трёх дифференциальных уравнений, в которых искомыми функциями являются температуры охлаждаемой воды t_1 , водяного пара t_2 и воздуха t_3 . Процесс массопереноса между циркуляционной водой и паровой фазой, обусловленный испарением воды, описывается четвёртым уравнением системы (1). Движущей силой этого процесса является разность между текущим влагосодержанием воздуха C и его предельным значением при насыщении C_n , соответствующим данной температуре.

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = (-a_{12}(t_1 - t_2) - a_{13}(t_1 - t_3) + a_{14}(C - C_n))(-1) \\ \frac{dt_2}{dF} = -a_{21}(t_2 - t_1) - a_{23}(t_2 - t_3) \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_{31}(t_3 - t_1) - a_{32}(t_3 - t_2) \\ \frac{dC}{dF} = -a_{42} \cdot (C - C_n) \end{cases} \quad (1)$$

где $a_{12} = K_{12} / (c_1 \times G_1)$; $a_{13} = K_{13} / (c_1 \times G_1)$, $a_{14} = K_{14}^m G_3 r / (c_1 \times G_1)$; $a_{21} = K_{12} / (c_2 \times G_2)$; $a_{23} = K_{23} / (c_2 \times G_2)$; $a_{31} = K_{31} / (c_3 \times G_3)$; $a_{42} = K_{24}^m / (G_3)$; K – коэффициент теплопередачи, который определяется для рассматриваемого случая значением коэффициента теплоотдачи от: K_{12} – от воды к водяным парам, K_{23} – от водяных паров к воздуху, K_{31} – от воздуха к воде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$; K_{24}^m – коэффициент массопередачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; K_{14}^m – коэффициент массопередачи, $1/\text{м}^2$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг }^\circ\text{C})$; r – удельная теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; G – расход теплоносителя, $\text{кг}/\text{с}$; C – концентрация водяных паров в воздухе ($\text{кг}/\text{кг}$), C_n – концентрация водяных паров в воздухе при насыщении ($\text{кг}/\text{кг}$).

В матричном виде система уравнений (1) записывается следующим образом:

$$d\mathbf{X}/dF = \mathbf{A} \times \mathbf{X}, \quad (2)$$

где $\mathbf{X} = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ C]'$ – вектор-столбец неизвестных функций.

Решение системы уравнений (1) позволяет определить четыре искомые функции: распределение температур трёх теплоносителей, а также содержание водяного пара в воздухе вдоль выбранной координаты процесса F . Результаты численного решения системы уравнений (1) методом Рунге–Кутта при начальных условиях $t_1|_{F=0} = t_{10}$, $t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=0} = t_{30}$, $C|_{F=0} = C_0$ представлены на рис. 2.

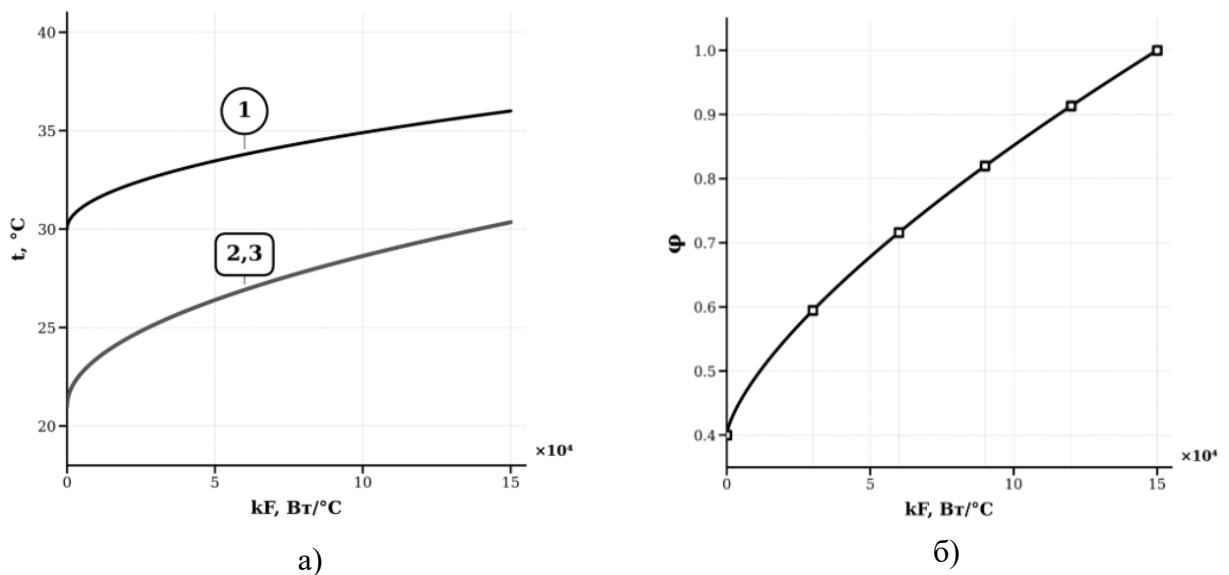


Рис. 2. Зависимости температур теплоносителей (рис. а) (1–охлаждаемая вода, 2–водяные пары, содержащиеся в воздухе; 3–воздух) и влажности воздуха (рис. б) от коэффициента kF

На рис. 3 представлено сравнение модельных и опытных зависимостей воздействия начальной относительной влажности воздуха на снижение температуры циркуляционной воды в башенной градирне.

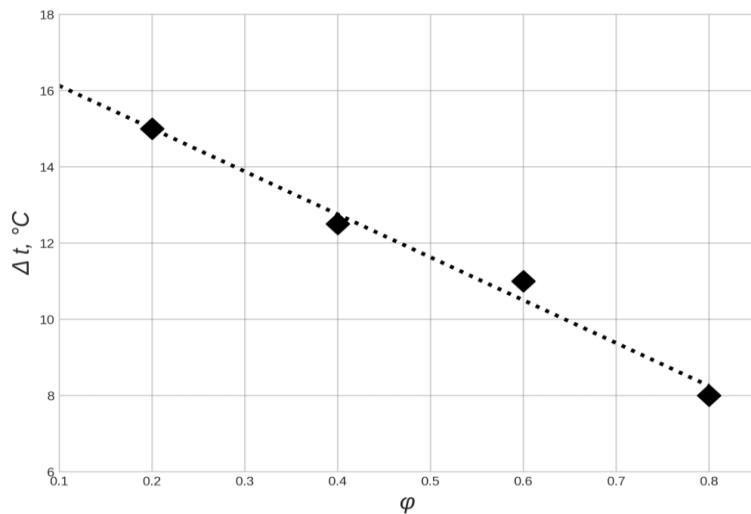


Рис. 3. Сравнение модельных (штриховая линия) и опытных (маркеры) зависимостей воздействия начальной относительной влажности воздуха на снижение температуры циркуляционной воды ($\Delta t_1, {}^{\circ}\text{C}$) в башенной градирне

Анализ приведенных зависимостей показывает адекватное описание предложенной моделью экспериментальных данных: усредненное расхождение не превышает $1 {}^{\circ}\text{C}$.

В рамках исследования влияния неравномерности распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении градирни на охлаждение циркуляционной воды сечение градирни условно разделено на четыре равные по площади сектора. В каждый из секторов осуществляется независимая подача теплоносителей: воздуха и воды. Такой подход позволяет оценить последствия неравномерного распределения потоков, возникающего в реальных условиях эксплуатации.

Результаты анализа влияния неравномерности распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении градирни на охлаждение циркуляционной воды представлены на рис. 4 в виде зависимости температуры циркуляционной воды на выходе из градирни от определяющей координаты процесса, выбранной в виде размерного параметра переноса, который определяется произведением коэффициента теплопередачи k и площади поверхности теплообмена F для четырех вариантов распределения потоков воздуха по сечению градирни. Приведенные результаты показывают существенное влияние данного распределения на температуру циркуляционной воды. Ухудшение охлаждения циркуляционной воды составляет 3-12 ${}^{\circ}\text{C}$, что может существенно снижать показатели работы энергетического оборудования. В тексте диссертации приводятся

аналогичные результаты по влиянию неравномерного распределения воды по сечению градирни.

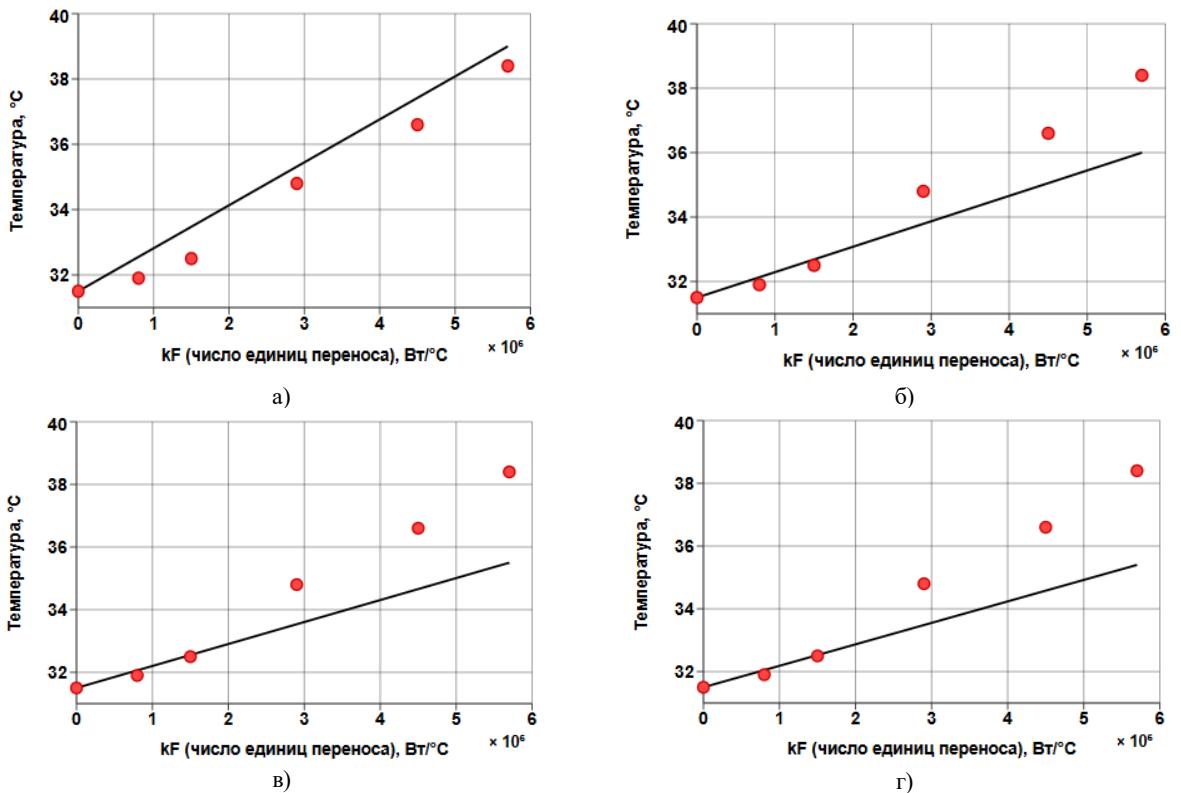


Рис.4. Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воздуха по секторам сечения: а) 2000 2000 2000 2000; б) 4000 2000 1500 500; в) 1000 1000 1000 5000; г) 500 6500 500 500 кг/с. Линиями показаны расчетные значения согласно комбинированной модели, точками – нормативные данные (РД 34.09.212).

Представленные на рис. 4 результаты расчетов получены для заранее заданного известного распределения потоков воздуха по сечению градирни. На практике распределение воздуха в поперечном сечении градирни определяется совокупностью внешних факторов: температурой и влажностью воздуха, направлением и скоростью ветра, состоянием и степенью открытия воздухозаборных окон (фрамуг). Для обеспечения эффективной работы системы обратного охлаждения необходимо учитывать перечисленные факторы при построении модели. Для учета факторов разработана комбинированная модель, построенная на интеграции матричной математической модели (1) с моделью, разработанной с помощью современного программного пакета имитационного моделирования Ansys Fluent. При этом движение воздуха снаружи и внутри башенной градирни описывается с использованием программного комплекса Ansys Fluent, а расчет тепломассообменных процессов с учетом найденных расходов воздуха выполняется на основе описанной выше математической модели. Такой подход позволяет эффективно сочетать преимущества

разработанных моделей с гибкостью и наглядностью численных методов, реализованных в современных программных средах.

Алгоритм расчета башенной градирни в рамках комбинированной модели приведен на рис. 5, а. На рис. 5, б представлена зависимость расхода теплоносителя (воздуха) через градирню от температуры наружного воздуха.

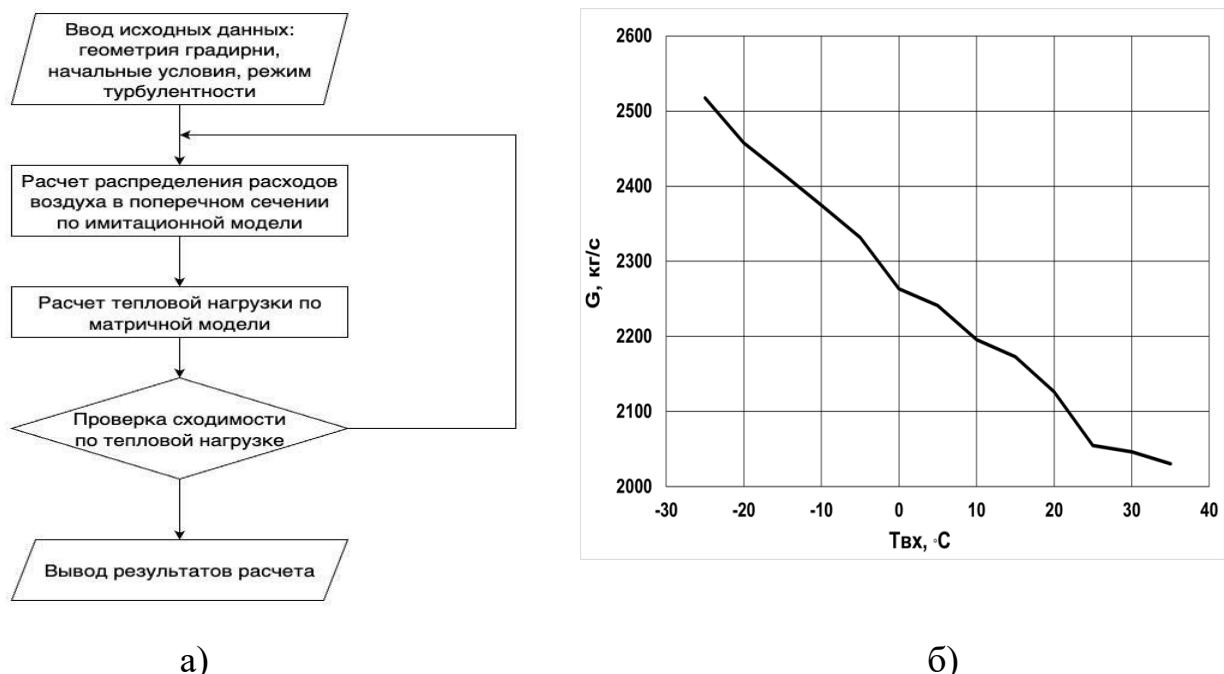


Рис. 5. Алгоритм расчета башенной градирни в рамках комбинированной модели (а), зависимость расхода воздуха через градирню от температуры наружного воздуха (б)

Зависимости температуры охлажденной воды от определяющей координаты процесса, представлены на рис. 6.

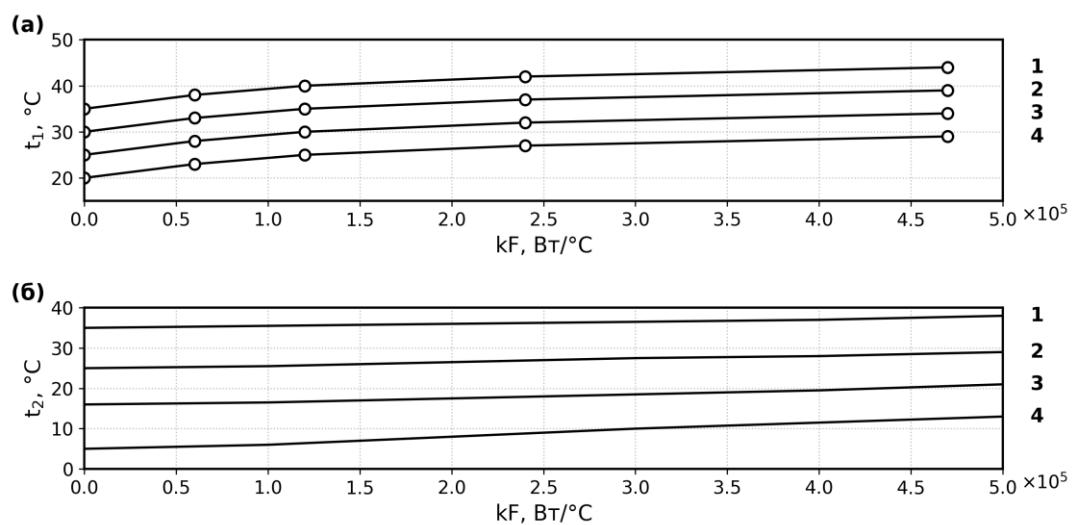


Рис. 6. Зависимость температуры охлажденной воды (а) и воздуха (б) от определяющей координаты при разных температурах поступающего воздуха: 1 – $t_{20}=35$; 2 – 25; 3 – 15; 4 – 5 °C; линиями показаны расчетные значения согласно комбинированной модели, точками – нормативные данные (РД 34.09.212)

Указанные зависимости приведены для различных значений температуры наружного воздуха. В качестве контрольных данных использованы нормативные значения температуры, полученные по номограммам, которые изображены на рисунке точками. Сравнение расчетных данных с нормативными значениями демонстрирует, что предложенная комбинированная модель адекватно отражает реальный процесс тепломассопереноса в башенной градирне и может использоваться для инженерных расчетов.

В третьей главе представлены, выполненные на основании предложенных моделей, результаты расчетно-экспериментальных исследований для решения ряда практических задач: определения влияния скорости ветра на эффективность функционирования градирни; обратной задачи диагностики состояния охладительной способности градирни, позволяющей определять неравномерность распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении.

Результаты расчета поля скоростей воздуха в градирне при скорости ветра 4 м/с приведены на рис.7, а. Зависимость общей неравномерности распределения воздуха по сечению градирни от скорости ветра показана на рис.7, б. Представленная зависимость (рис.7, б) позволяет количественно оценить увеличение неравномерности потоков с увеличением скорости ветра.

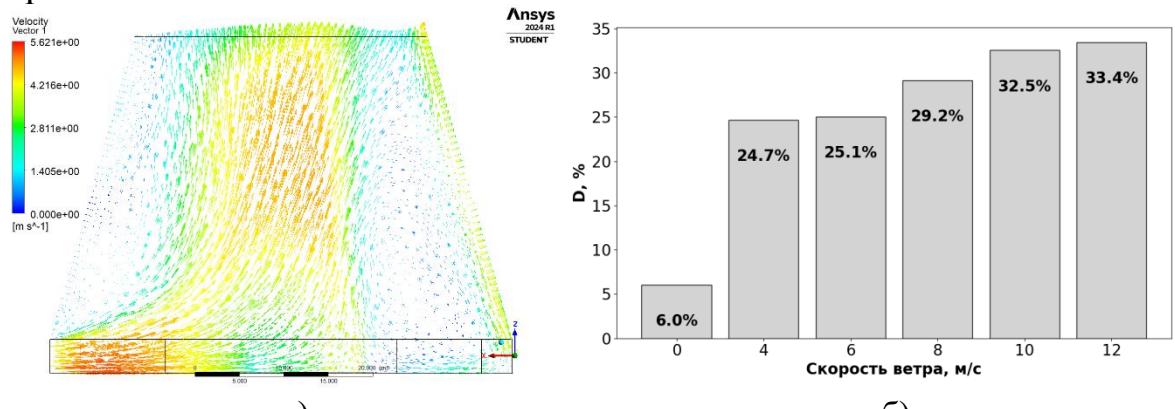


Рис. 7. Визуализация направления и скорости движения воздуха внутри градирни при скорости ветра 4 м/с (а) и зависимость общей неравномерности распределения воздуха по сечению градирни от скорости ветра (б). (D, % - суммарное по всему поперечному сечению отклонение расхода воздуха по секторам от среднего значения).

Для устранения неравномерного распределения воздушных потоков в поперечном сечении градирни, вызванного ветровой нагрузкой, предложено закрывать фрамуги согласно предварительно заданному алгоритму. Эффективность данного подхода была проверена тестовыми расчетами в рамках предложенной модели. На рис. 8 приведены результаты расчета, аналогичные представленным на рис. 7, но при закрытых

фрамугах. Проведенные расчеты показали значительное сокращение неравномерности воздушных потоков примерно в два раза при закрытии фрамуг в соответствии с предложенным алгоритмом при различных скоростях ветра. Полученные результаты демонстрируют возможность и пути снижения неравномерности потоков воздуха.

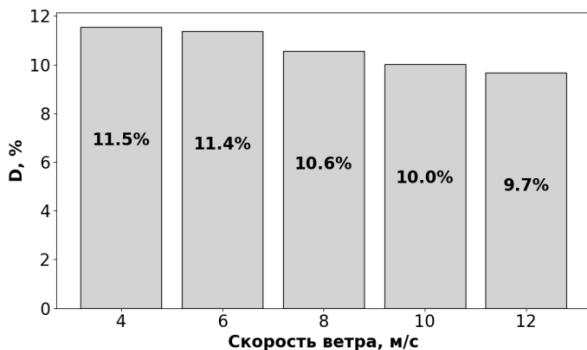


Рис. 8. Общая неравномерность распределения воздуха по сечению градирни в зависимости от скорости ветра при закрытии фрамуг по определенному алгоритму

Построение математических моделей позволило на ряду с прямыми задачами рассмотреть постановку и решение обратных задач диагностики башенных градирен. Под прямыми задачами в общем случае академик А.А. Самарский понимает задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными считаются задачи, когда по известным следствиям определяются причины. В обратных задачах определяющее уравнение и/или начальные, и/или граничные условия и/или коэффициенты не заданы полностью, но есть некоторая дополнительная информация. В общем случае можно говорить о коэффициентных (неизвестны некоторые коэффициенты уравнения), граничных (неизвестны граничные условия) и эволюционных (не задано начальное условие) обратных задачах математической физики. Под прямыми задачами СОО в нашем случае понимается определение температуры охлажденной циркуляционной воды по заданным исходным режимным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностику возможных неисправностей СОО при заданных наборах параметров теплоносителей на входе и выходе. Следует отметить, что известный набор параметров для каждой конкретной установки может отличаться, что обуславливает различия в постановке обратной задачи.

Математическая постановка обратных задач характеризуется неполнотой исходной информации относительно определяющих уравнений, начальных и граничных условий, либо коэффициентов дифференциальных операторов. Компенсация недостающей информации осуществляется посредством привлечения дополнительных экспериментальных данных или априорных ограничений. Пример численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни представлен на рис. 9.

В данном случае алгоритм решения обратной задачи следующий: по известной скорости ветра и известному недоохлаждению воды определяются средние квадратичные отклонения распределения потоков воздуха по сечению градирни. Совпадение значений среднего квадратичного отклонения на обоих графиках свидетельствует о корректной и стабильной работе оборудования, подтверждая, что распределение воздушного потока позволяет охлаждать циркуляционную воду в пределах допустимой нормы. В случае существенного расхождения среднего квадратичного отклонения на графиках рис. 9, а и рис. 9, б, показанными штриховыми линиями, выявляется превышение нормативной неравномерности расхода воздуха по секторам, что обуславливает необходимость проведения дополнительных работ по уточнению состояния оборудования.

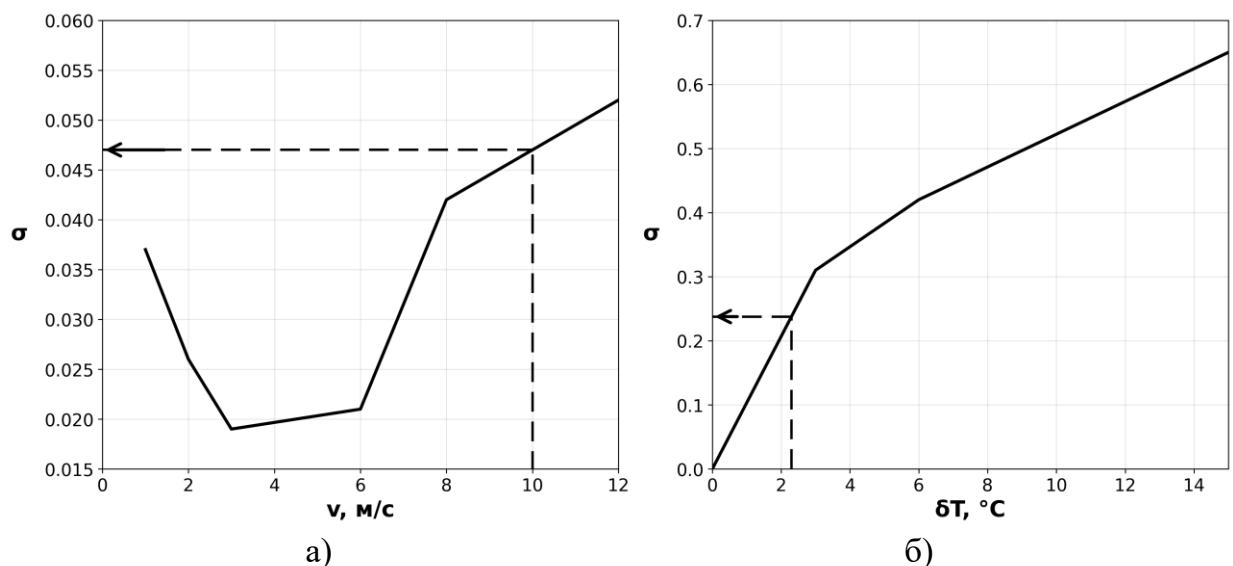


Рис. 9. Порядок численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни: а) – расчетная зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра; б) – зависимость среднего квадратичного отклонения от недоохлаждения циркуляционной воды

В четвертой главе приведены результаты научных исследований, которые нашли практическое применение и приняты к использованию на тепловых и атомных станциях, а также реализованы в учебном процессе:

1. Разработанная методика диагностики технического состояния охладительной способности градирни и реализующий её программный модуль «Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения» в составе комплексной системы мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования приняты к рассмотрению в филиале АО «НВАЭС» с целью обеспечения повышения точности диагностики состояния оборудования системы оборотного охлаждения. Архитектура разработанной системы мониторинга и диагностики технического состояния оборудования представлена на

рис.10. Согласно архитектурной диаграмме система включает в себя как реализованные (отмечены зеленым), так и перспективные модули (отмечены красным). Варианты экранных форм системы представлены на рис.11.

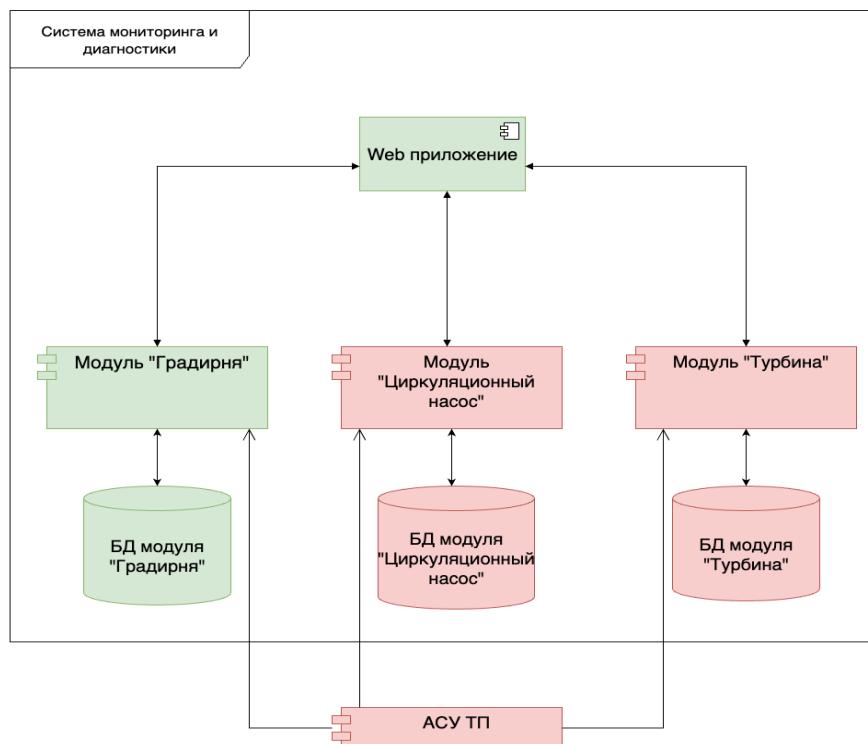


Рис.10. Архитектурная диаграмма комплексной системы мониторинга и диагностики технического состояния оборудования

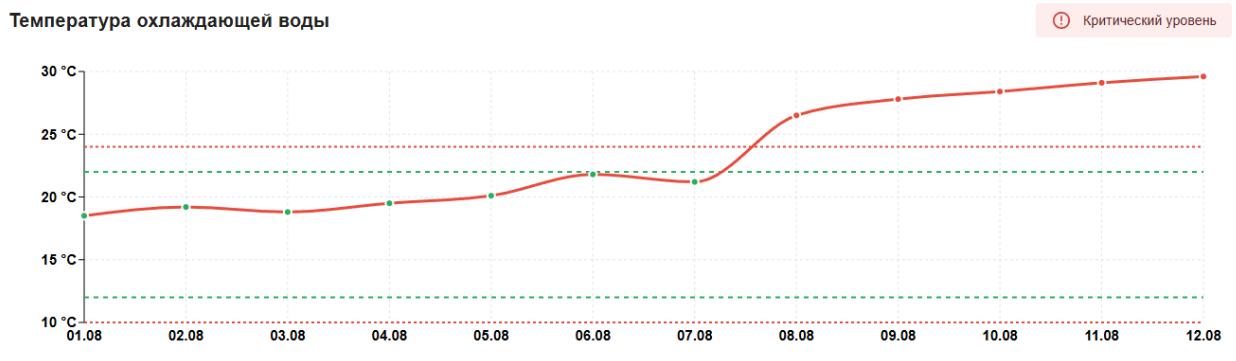


Рис.11. Варианты экранных форм системы «Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения» СОО НВАЭС

2. В рамках проведенной научно-исследовательской работы на Петрозаводской ТЭЦ разработано математическое описание градирни как многопоточного теплообменного аппарата с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. На основе матричного метода моделирования и решения обратных задач по выбору режимных параметров теплообменных аппаратов, был выполнен расчет теплогидравлических и аэродинамических характеристик теплоносителей градирни ст. № 2 и определены наиболее

эффективные режимы работы данной градирни. Использование результатов НИР в части анализа и совершенствования режимов работы градирен Петрозаводской ТЭЦ позволит обеспечить повышение эффективности функционирования СОО за счет снижения температуры охлажденной воды. Среднегодовой эффект от внедрения разработанного варианта комплекса мероприятий составит 4540 т.у.т.

3. Методика моделирования и диагностики оборудования ТЭС и АЭС используется в учебном процессе ИГЭУ в рамках курсов «Теория принятия решения» и «Математическое моделирование».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана комбинированная математическая модель, объединяющая имитационную и матричную модели тепломассообмена в башенной градирне и учитывающая фазовый переход в теплоносителе. С использованием разработанной модели выполнен анализ влияния неравномерности распределения потоков воздуха и циркуляционной воды по сечению на эффективность охлаждения циркуляционной воды. Снижение охлаждающей способности составило в среднем 6-7%.

2. Определены граничные условия для расчетов потоков воздуха внутри градирни с помощью имитационной модели внешнего обтекания ветром градирни. Выявлено влияние скорости ветра на неравномерность потоков воздуха внутри градирни и предложены рекомендации по устранению указанных неравномерностей. Расчетный анализ показал, что при исследованных условиях неравномерность воздушных потоков достигает минимального значения при скоростях ветра 3–6 м/с и существенно увеличивается при уменьшении скорости ветра до 1 м/с и при увеличении скорости ветра до 12 м/с.

3. Сформулирована и решена обратная задача диагностики состояния градирни по неравномерности потоков теплоносителей в поперечном сечении при заданной температуре циркуляционной воды при известных погодных условиях. Расчетным путем выполнена оценка влияния степени открытия фрамуг на снижение неравномерности потоков воздуха по сечению, что позволило разработать рекомендации для существенного уменьшения указанной неравномерности распределения воздуха и повысить эффективность теплообмена. Разработаны алгоритмы и программные комплексы расчета и диагностики состояния элементов системы обратного охлаждения на основе представленных математических моделей, получены три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

4. Разработанная методика диагностики технического состояния охладительной способности градирни и реализующий её программный модуль в составе комплексной системы мониторинга технико-

экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования переданы для реализации в филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «НВАЭС» с целью обеспечения повышения точности диагностики состояния оборудования системы оборотного охлаждения. Результаты выполненной НИР в части анализа и совершенствования режимов работы градирен Петрозаводской ТЭЦ позволяют обеспечить повышение эффективности работы СОО в части снижения температуры охлажденной воды. Среднегодовой эффект от внедрения разработанного варианта комплекса мероприятий оценивается в экономии 4540 т.у.т.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Дальнейшие исследования по тематике диссертационной работы целесообразно проводить в направлении создания методов и программных средств диагностики систем мониторинга технических и технико-экономических показателей работы оборудования систем оборотного охлаждения, оценки эффективности работы эксплуатационного персонала на основе предложенных методик диагностики, а также в направлении применения разработанных методик в системах оптимизации режимов работы систем оборотного охлаждения электростанций использующих башенные градирни.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Жуков, В.П.** Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС И АЭС / В.П. Жуков, М.Д. **Фомичев**, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков // Вестник ИГЭУ. – 2022. – №3. – С.57 – 63.
2. **Жуков, В.П.** Комбинированная модель тепломассообмена в башенных градирнях / В.П. Жуков, М.Д. **Фомичев**, Е.В. Барочкин, Е.А. Шуина, С.И. Шувалов // Вестник ИГЭУ. – 2023. – №5. – С.90 – 96.
3. **Фомичев, М.Д.** Исследование влияния скорости ветра на неравномерность распределения воздушного потока в башенных градирнях / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков, М.В. Козлова // Вестник ИГЭУ. – 2024. – №6. – С.75 – 80.
4. **Фомичев, М.Д.** Учет влияния направления и скорости ветра при решении прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, В.Ф. Очков, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2025. – №. 3. – С. 80-85.
5. **Жуков, В.П.** Моделирование и разработка информационно-диагностического комплекса системы оборотного охлаждения электрической станции /, М.Д. **Фомичев**, С.Д. Горшенин, Р.С. Дударев, Е.А. Шуина // Вестник ИГЭУ. – 2025. – №. 5. – С. 81–91.

Результаты интеллектуальной деятельности

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685094 Российская Федерация. «Программный комплекс для моделирования и анализа работы градирен» : заявл. 21.08.2025 : опубл. 19.09.2025 / М. Д. **Фомичев**,

В. П. Жуков ; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684686 Российской Федерации. «Система мониторинга и диагностики градирни» : заявл. 21.08.2025 : опубл. 16.09.2025 / М. Д. **Фомичев**, В. П. Жуков ; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Тезисы и полные тексты докладов конференций

8. **Фомичев, М.Д.** Математическое моделирование систем оборотного охлаждения / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов // Энергия-2022. Том 4. Электромеханотроника и управление: семнадцатая Всероссийская (девятая Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции: В 6 т., 11-13 мая 2022 г., г. Иваново. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".– 2022.– Т.4. – С.110 – 110.

9. **Фомичев, М.Д.** Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в системах оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (17–19 марта 2022 г., Москва): тезисы докладов. – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга".– 2022. – С.712-712.

10. **Фомичев, М.Д.** Анализ моделирования показателей работы башенной градирни / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2023: Двадцать девятая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (16–18 марта 2023 г., Москва): тезисы докладов. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга".– 2023. – С.874-874.

11. **Фомичев, М.Д.** Расчетные исследования тепломассобмена в башенных градирнях с использованием имитационного моделирования / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков, А.Е. Барочкин // Энергия-2023. Том 4. Электромеханотроника и управление: восемнадцатая Всероссийская (десятая Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 16-18 мая 2023 г., г. Иваново; материалы конференции: в 6 т. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет".– 2023.– Т.4. – С.105-105.

12. **Фомичев, М.Д.** Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды / М.Д. **Фомичев**, В.П. Жуков // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 июня 2023 года. Том 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 392-395.

13. **Фомичев, М.Д.** Исследование тепломассообмена в башенных градирнях на основе комбинированной модели / М.Д. Фомичев, В.П. Жуков // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (г. Ульяновск, 9–11 октября 2023): сборник трудов конференции. – Ульяновск: УлГТУ.– 2023. – С.10 – 14.

14. **Фомичев, М.Д.** Оценка неравномерности распределения воздуха на эффективность тепломассообмена в башенных градирнях на основе

комбинированной модели / М.Д. Фомичев, В.П. Жуков // Энергия-2024. Том 2. Тепловые и ядерные энерготехнологии: Девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2024», 14-16 мая 2024 г., г. Иваново: материалы конференции: В 6 т.– Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина".– 2024.– Т.2. – С.114-114.

15. **Фомичев, М.Д.** Улучшение эффективности башенных градирен с использованием комбинированной модели / М.Д. Фомичев, В.П. Жуков // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тридцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (29 февраля – 2 марта 2024 г., г. Москва): тезисы докладов. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга".– 2024. – С.801-801.

16. **Фомичев, М.Д.** Влияние скорости ветра на эффективность теплообмена в башенных градирнях / М.Д. Фомичев, В.П. Жуков // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 09–11 октября 2024 г., г. Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ.– 2024. – С.31 – 33.

17. **Фомичев, М.Д.** Анализ неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении башенной градирни при ветровом воздействии / М.Д. Фомичев, В.П. Жуков // Энергия-2025. Том 4. Электромехатроника и управление: Двадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2025», 17-19 марта 2025 г., г. Иваново: материалы конференции: В 6 т.– Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина".– 2025.– Т.4. – С.89-89.

18. **Фомичев, М.Д.** Исследование влияния скорости ветра на распределение воздушных потоков и эффективность теплообмена в градирне / М. Д. Фомичев, В. П. Жуков, С. Д. Горшенин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXIII Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию Российской атомной промышленности. В 3-х томах, Иваново, 29–31 мая 2025 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2025. – С. 303-307.

19. **Фомичев, М.Д.** Влияние направления и скорости ветра на неоднородность воздушных потоков в башенных градирнях / М. Д. Фомичев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 1004-1004.

ФОМИЧЕВ Максим Дмитриевич
**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В
 БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ ТЭС И АЭС**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.12.2025 г. Формат 60x84¹/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 87

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ