

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

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)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Жуков Владимир Павлович

ИВАНОВО – 2025

## Реферат

Диссертация 145 стр., 47 рис., 7 табл., 145 библ.

Тепловая электрическая станция, атомная электрическая станция, система оборотного охлаждения, башенная градирня, распределение воды и воздуха по сечению градирни, тепломассообмен, моделирование, матричная модель, комбинированная модель, прямые и обратные задачи, система диагностики, численный метод решения, метод конечных элементов.

**Объектом исследования** являются системы оборотного охлаждения с башенными градирнями.

**Предметом исследования** являются модели и методики расчета и диагностики систем оборотного охлаждения с башенными градирнями.

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

Проведен комплекс расчетных и экспериментальных исследований систем оборотного охлаждения с башенными градирнями, предложена матричная модель тепломассообмена в градирне. Для определения распределения воздуха в поперечном сечении градирни использованы имитационные модели. На основе синтеза имитационной и матричной моделей разработана комбинированная модель, с использованием которой сформулированы и решены прямые и обратные задачи диагностики систем оборотного охлаждения, разработан программный комплекс, защищенный свидетельствами о регистрации программных продуктов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПУБЛИКОВАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС И АЭС: СХЕМЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ДИАГНОСТИКА.....</b>	<b>12</b>
1.1. Классификация систем технического водоснабжения на ТЭС и АЭС.....	12
1.2. Типы градирен и схемы их включения в системах оборотного охлаждения ТЭС и АЭС .....	14
1.2.1. Вентиляторные градирни .....	16
1.2.2. Башенные градирни .....	19
1.3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов теплообмена в технологических установках.....	24
1.4. Выводы по результатам анализа.....	36
1.5. Постановка задач исследования .....	37
<b>ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В БАШЕННОЙ ГРАДИРНЕ .....</b>	<b>38</b>
2.1. Анализ охладительной способности градирни на основе уравнений баланса массы и энергии .....	38
2.2. Анализ влияния неравномерного распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды .....	45
2.3. Имитационная модель градирни .....	48
2.4. Комбинированный подход к моделированию теплообменных процессов в башенной градирне.....	50
2.5. Выводы по главе.....	53
<b>ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ .....</b>	<b>55</b>
3.1. Расчетные исследования влияния неравномерности распределения потоков воды и воздуха на эффективность охлаждения циркуляционной воды .....	55
3.2. Анализ влияния скорости ветра на распределение воздуха в башенных градирнях .....	60
3.3. Постановка и решение обратных задач диагностики состояния систем оборотного охлаждения.....	63
3.4. Выводы по главе.....	68

<b>ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....</b>	<b>69</b>
4.1. Разработка системы мониторинга и диагностики технического состояния градирен .....	69
4.1.1. Концептуальная модель системы .....	69
4.1.2. Алгоритмы диагностики технического состояния .....	76
4.1.3. Программная реализация системы .....	78
4.1.4. Пользовательские интерфейсы системы .....	82
4.1.5. Схематический интерфейс .....	87
4.2. Система мониторинга и диагностики градирен Нововоронежской АЭС .....	88
4.3. Повышение эффективности функционирования градирни ст. №2 Петрозаводской ТЭЦ .....	99
4.3.2. Техничко-экономический расчет результатов внедрения на Петрозаводской ТЭЦ .....	110
4.4. Выводы по главе.....	115
<b>ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ .....</b>	<b>116</b>
<b>БИБЛОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ, РАЗРАБОТАННЫХ ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>138</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ПРАКТИЧЕСКУЮ РЕАЛИЗАЦИЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>141</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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. Арёфьев 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 охлаждающей 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 охлаждающей способности СОО.

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

#### **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 охлаждающей 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 оборотного 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 охлаждающей 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 охлаждающей способности градирни, позволяющей учитывать неравномерность распределения потоков теплоносителей в башенной градирне.

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

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

#### **Реализация результатов работы:**

1. Разработанная методика диагностики технического состояния охлаждающей 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.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПУБЛИКОВАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС И АЭС: СХЕМЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ДИАГНОСТИКА**

В первой главе рассматривается роль и общие вопросы функционирования систем охлаждения циркуляционной воды ТЭС и АЭС, их классификация, обсуждается их конструктивные и режимные особенности, роль и место в энергетической и смежных отраслях [1-37]. На основании анализа существующих моделей и методов расчета систем охлаждения циркуляционной воды демонстрируются и анализируются их преимущества и области применения [38-94]. Перечисляются известные критерии эффективности работы энергетических теплообменных систем, а также оптимизационные задачи, сформулированные на их основе, рассматриваются методы математического программирования и системного анализа, используемые для решения оптимизационных задач [95-103]. Приводится анализ подходов к моделированию многокомпонентных систем [104-107] и разделения смеси потоков жидкостей с разными физическими свойствами [108]. Анализируются методики, нормативные документы, справочные, материалы по обработке результатов экспериментальных исследований, программные комплексы для расчета энергетических характеристик и оптимизации процессов тепломассообмена применительно к энергетическим и химическим технологиям [114-126]. На основе проведенного анализа литературных данных формулируются задачи исследования.

### **1.1. Классификация систем технического водоснабжения на ТЭС и АЭС**

Тепловые и атомные электрические станции обеспечивают значительную долю вырабатываемой электроэнергии в России [1]. Одним из ключевых элементов функционирования таких объектов является система технического водоснабжения [2], которая обеспечивает охлаждение и конденсацию пара после паровых турбин.

Системы технического водоснабжения на ТЭС и АЭС по структуре схемы организации потоков воды классифицируются на прямоточные, оборотные и комбинированные.

При **прямоточной схеме водоснабжения** циркуляционная вода забирается из водоема с помощью водозаборных сооружений и после использования сбрасывается в водоемы на таком расстоянии, которое исключает попадание теплой воды обратно в систему. В случае, когда температура воды в водоемах достаточно низкая, в маловодные периоды возможно применение схемы, при которой к холодной воде специально добавляется подогретая вода с электростанции. Система прямоточного водоснабжения характеризуется невысокими затратами на строительство и стабильной сравнительно низкой температурой охлаждающей воды [3].

Для обеспечения потребностей мощных электростанций требуются значительные объемы воды, которыми располагают преимущественно крупные реки. В настоящее время в атомной энергетике в связи со строительством мощных энергоблоков и недостатком маломинерализованных вод в местах их строительства чаще используются **оборотные системы охлаждения (СОО)**.

Существуют также **комбинированные системы водоснабжения** электростанций, для которых в периоды недостатка воды наряду с режимом прямоточного водоснабжения подключаются дополнительные охлаждающие устройства: водохранилище, градирни или брызгальные установки, а иногда и их сочетание [3].

На ТЭС и АЭС широкое распространение получили оборотные схемы водоснабжения с башенными градирнями. На рисунке 1.1 показана схематично система водоснабжения с оборотным охлаждением воды в градирнях.

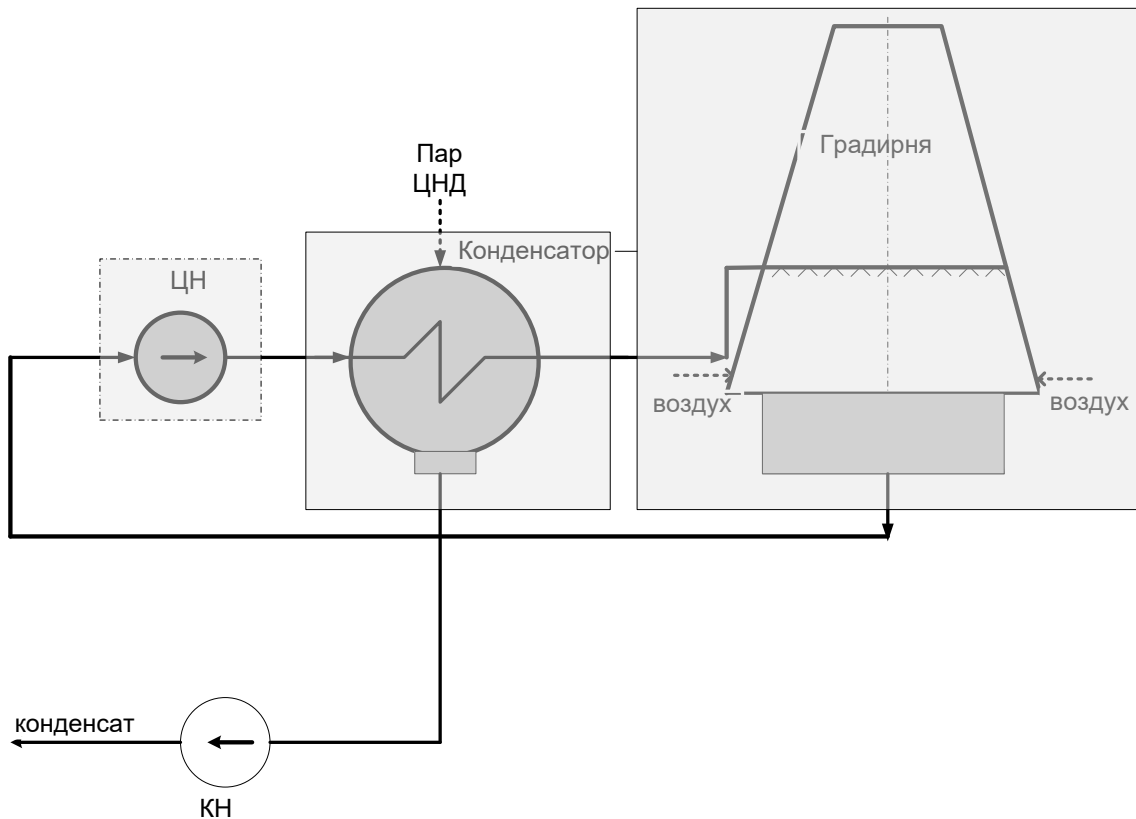


Рисунок 1.1 Принципиальная схема оборотного водоснабжения с башенными градирнями

Обеспечение эффективной работы СОО на ТЭС и АЭС является критически важным для поддержания эффективного функционирования энергоблоков. Недостаточный расход охлажденной воды или ее повышенная температура могут привести к ухудшению вакуума в конденсаторах турбин, к снижению коэффициента полезного действия блока и нередко к ограничению мощности ТЭС [4].

## 1.2. Типы градирен и схемы их включения в системах оборотного охлаждения ТЭС и АЭС

Градирни как основные элементы систем оборотного охлаждения подразделяются на несколько основных типов в зависимости от конструктивных особенностей и принципа действия [5]. Анализ российских и зарубежных источников показывает, что существует несколько подходов к классификации градирен.

Классификация градирен осуществляется, прежде всего, по способу организации подвода воздуха к зоне теплообмена, а также по типу

оросительного устройства, формирующего структуру взаимодействия воды с воздушным потоком.

В зависимости от способа подачи воздуха градирни подразделяются на три основные категории [5, 34]:

- вентиляторные градирни, в которых воздушный поток создается с помощью нагнетательных или вытяжных вентиляторов;
- башенные градирни, функционирование которых основано на создании естественной тяги за счёт высокой вытяжной башни;
- атмосферные (открытые) градирни, в которых движение воздуха обеспечивается преимущественно за счёт ветрового напора и частично за счет естественной конвекции воздуха.

С точки зрения конструктивного исполнения оросительной системы и способов увеличения площади фазового контакта, градирни подразделяются на следующие типы [5]:

- пленочные, где вода стекает тонкой пленкой по поверхности оросителя;
- капельные, в которых вода рассеивается в виде капель, падающих через воздушный поток;
- капельно-пленочные, сочетающие элементы обоих вышеуказанных типов.

Каждый из этих типов градирен может иметь множество вариантов исполнения: они могут отличаться по геометрическим параметрам элементов оросительной системы, расстояниям между ними, а также материалами, используемыми при их изготовлении [5,34,109].

При ограниченных водных ресурсах или с учетом технико-экономических и экологических аспектов применяют «сухие» градирни, что позволяет организовать закрытые системы охлаждения.

В период 1950–1960-х годов в Советском Союзе было принято стратегическое решение о преимущественном использовании башенных градирен на тепловых и атомных электростанциях. Подобная практика

получила распространение и в северных регионах Европы и США, поскольку такие градирни отличались простотой конструкции, экономичностью в эксплуатации и компактностью размещения на территории станции. Наибольшее распространение в энергетической отрасли получили вентиляторные и башенные градирни, на конструкции, схемах включения и режимах работы которых остановимся более подробно.

### **1.2.1. Вентиляторные градирни**

Одним из ключевых преимуществ вентиляторных градирен является их способность выдерживать более высокие тепловые нагрузки по сравнению с другими типами охладителей. Это достигается за счёт увеличенного относительного расхода воздуха (в пересчёте на единицу объёма охлаждаемой воды), проходящего через зону теплообмена. Таким образом, обеспечивается более глубокое охлаждение воды и, как следствие, повышение эффективности всей системы охлаждения [5,23-27, 34, 51, 88,109].

Вентиляторные градирни часто изготавливаются в виде секционных модулей или как отдельно стоящие одновентиляторные установки. В плане такие сооружения могут иметь прямоугольную, квадратную, многоугольную или круглую форму, что определяется конкретными требованиями размещения и объемами теплообмена [5,34,109].

Температура теплоносителей на выходе вентиляторной градирни может приближаться к температуре окружающего воздуха по показаниям смоченного термометра. В большинстве случаев температура охлажденной воды превышает её лишь на 4–6 °С, а при оптимальных условиях — всего на 2–3 °С. В сравнении с этим, башенные градирни обеспечивают охлаждение воды на 8–10 °С выше температуры по смоченному термометру. В «сухих» градирнях охлаждение воды возможно только до температур, превышающих температуру окружающего воздуха по сухому термометру. Таким образом, эффективность радиаторных установок ограничена и оправдана лишь при охлаждении среды с изначально высокой температурой, когда конечная



температура охлаждения может оставаться на  $20^{\circ}\text{C}$  выше температуры воздуха по сухому термометру.

Перепад температур или разность температур входящей и выходящей водой на градирне определяется температурой воды, поступающей на охлаждение, которая, в свою очередь, зависит от параметров технологического оборудования, использующего воду в качестве теплоносителя. На вентиляторных градирнях возможен перепад температур до  $25^{\circ}\text{C}$  и выше, в зависимости от начальной температуры воды. В условиях эксплуатации башенных градирен, таких как на тепловых электростанциях, максимальный перепад, как правило, ограничивается значением  $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$ .

Преимуществом вентиляторных градирен является высокая степень управляемости температурным режимом, позволяющая более точно поддерживать заданные параметры теплоносителей. По сравнению с башенными конструкциями, вентиляторные установки обладают большей маневренностью, а также более высокой степенью автоматизации, что упрощает их интеграцию в современные системы управления технологическими процессами [34].

С точки зрения строительных и эксплуатационных характеристик, вентиляторные градирни требуют значительно меньшей площади застройки для обеспечения эквивалентного охлаждающего эффекта. Кроме того, они работают при более низких гидравлических напорах, что снижает нагрузку на насосное оборудование и повышает энергоэффективность всей установки.

Важным эксплуатационным параметром является аэродинамическое сопротивление зоны оросителя, поскольку оно напрямую влияет на потребляемую мощность вентиляторов и, соответственно, на эксплуатационные затраты. Чем ниже сопротивление воздушному потоку в насадке, тем ниже необходимая мощность привода вентилятора и расход электроэнергии (или, в случае башенных градирен, высота сооружения). Таким образом, при проектировании и выборе типа оросителя целесообразно

отдавать предпочтение конструкциям с оптимальным соотношением между охлаждающей способностью и потерями давления воздуха [34,109].

Принципиальная схема вентиляторной градирни представлена на рис. 1.2.

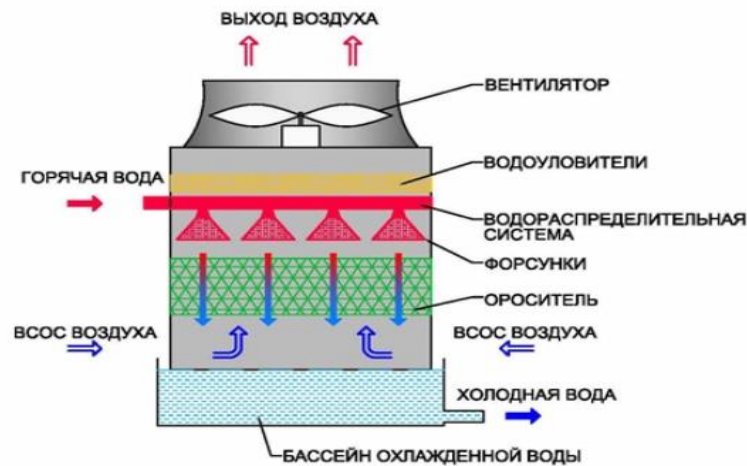


Рисунок 1.2 Принципиальная схема вентиляторной градирни

С течением времени условия строительства гидротехнических сооружений и нормативно-правовая база претерпели значительные изменения. Появление более совершенных конструкций вентиляторов и других элементов градирен, а также усиление экологических требований способствовали тому, что на современных ТЭС и АЭС все чаще устанавливаются вентиляторные градирни, иногда в сочетании с башенными [3]. Это повышает гибкость системы охлаждения в зависимости от нагрузки и климатических условий. Например, на Ростовской АЭС внедрение вентиляторных градирен позволило поддерживать номинальную мощность третьего энергоблока даже при высоких летних температурах, обеспечивая стабильную выработку электроэнергии для потребителей юга России. Эти устройства позволяют поддерживать мощность реактора на оптимальном уровне даже в периоды экстремальной жары, обеспечивая щадящий режим работы основного оборудования, повышая общую безопасность и надежность станции [15]. Успешный опыт эксплуатации вентиляторных градирен на третьем энергоблоке послужил основанием для принятия решения о

строительстве аналогичной системы для четвертого энергоблока Ростовской АЭС [15].

### **1.2.2. Башенные градирни**

Башенные градирни являются неотъемлемой частью СОО на многих электростанциях. Их функционирование напрямую влияет на стабильность и эффективность технологических процессов, что, в свою очередь, определяет экономичность ТЭС и АЭС. Современные исследования и практические разработки в области градирен демонстрируют, что совершенствование конструктивных решений и применение инновационных методов обслуживания позволяют значительно повысить коэффициент полезного действия электростанций. [1,7,8,14, 44,37,105].

В башенных градирнях в результате разности плотностей воздушных столбов холодного наружного воздуха и нагретого воздуха внутри башни возникает естественная тяга. За счёт этой тяги обеспечивается устойчивый восходящий поток воздуха, проходящий через оросительное устройство и выходящий через верхнюю часть конструкции. Расчёт параметров тяги невозможно выполнить изолированно от теплового расчёта, поскольку расход воздуха зависит как от начального состояния наружного воздуха, так и от степени его нагрева и увлажнения внутри оросителя. Требуется комплексный подход, при котором тепловой и аэродинамический расчёта производятся совместно. Такой подход значительно усложняет расчётную задачу и требует итерационного согласования параметров потока и теплообмена [7,5, 23- 30, 51-53,88,89,93,109].

Дополнительную сложность при эксплуатации башенных градирен представляет сезонный температурный режим. В холодное время года при отрицательной температуре наружного воздуха важно обеспечить, предотвращение обледенения конструктивных элементов, особенно в верхней части башни и на соприкасающихся с воздухом поверхностях. В типовых промышленных градирнях минимальная температура охлаждённой воды, как

правило, поддерживается в пределах 10 °С [3]. Соблюдение этого ограничения способствует сохранению надёжности работы оборудования и предотвращает аварийные ситуации в зимний период.

**Особенности эксплуатации башенных градирен.** В современных условиях вопрос строительства новых атомных электростанций в регионах с ограниченными запасами маломинерализованной воды становится все более актуальным, исходя из этого выбор эффективных систем охлаждения приобретает особое значение. Сравнение традиционных методов охлаждения, таких как использование водоемов или брызгательных бассейнов, с башенными градирнями выявляет значительные преимущества последних. Башенные градирни требуют меньшей площади, способствуют сохранению водных ресурсов и предотвращают их загрязнение [5,39,91].

Эффективность функционирования башенных градирен определяется интенсивностью и характером протекающих в них процессов теплообмена. Эффективность этих процессов зависит от конструктивных особенностей и организации взаимодействия между охлаждаемой водой и воздухом. Охлаждение оборотной воды в градирнях осуществляется преимущественно за счёт теплообмена в тонких пленках воды, равномерно стекающих по поверхности оросительных элементов. Дополнительный вклад в процесс охлаждения вносят капельно-струйные потоки, формирующиеся при диспергировании воды форсунками, а также при её стекании с элементов оросителя. Эффективность теплоотдачи от водяных капель во многом определяется их размером, температурой, а также термодинамическими характеристиками окружающей воздушной среды [111].

Существенное влияние на интенсивность охлаждающего процесса оказывает микроклимат в приземной атмосфере в непосредственной близости от градирни. Переменные метеорологические условия, включая температуру, влажность и скорость воздуха, обуславливают высокую вариативность режима охлаждения. Это создаёт значительные трудности при интерпретации

и сопоставлении экспериментальных данных, полученных в ходе эксплуатации градирен в реальных условиях.

В типичной башенной градирне охлаждаемая вода подается в верхнюю часть через водораспределительную и оросительную системы, формируя развитую поверхность для тепломассообмена с воздухом. Воздух поступает снизу и движется вверх навстречу потоку воды, обеспечивая ее охлаждение за счет теплопередачи и частичного испарения. При этом часть воды переходит в пар, унося тепловую энергию и способствуя снижению температуры оставшейся жидкости [3].

Башенные градирни представляют собой масштабные установки, применяемые на крупных энергетических и промышленных объектах для охлаждения больших объемов оборотной воды. Их работа основана на естественной тяге. Такие градирни характеризуются большими размерами, что позволяет обеспечивать значительные площади орошения и, соответственно, реализовывать высокие показатели теплоотвода [3].

Аэродинамика башенных градирен определяется не только их габаритными размерами, но и конструктивными особенностями: формой башни, расположением входных и выходных воздухозаборных окон, а также особенностями оросительной системы. Оптимизация этих параметров позволяет создать равномерное распределение воздушного потока и увеличить время контакта между воздухом и водой, что критически важно для повышения эффективности теплообмена [10].

Эффективность работы градирен существенно зависит от размеров конструкции, в частности от диаметра башни, а также от параметров оросительной системы. Увеличение диаметра градирни приводит к расширению площади орошения, что способствует более равномерному распределению воды и увеличению площади контакта с воздушным потоком. Высокая плотность орошения позволяет формировать тонкий и равномерный слой воды, способствующий интенсивному испарительному охлаждению за

счет увеличения общей площади теплообмена и снижения капельного уноса. Экспериментальные исследования, описанные в ряде научных публикаций, подтверждают, что оптимальное сочетание этих параметров может значительно повысить охлаждающую способность градирен и улучшить их эксплуатационные характеристики [11,12].

Современные градирни эксплуатируются в условиях, где переменные температурные, влажностные и ветровые режимы существенно влияют на распределение воздушного потока внутри устройства. Такие колебания зачастую приводят к неоднородности распределения воздуха по поперечному сечению градирни, что негативно сказывается на эффективности теплообмена и, соответственно, на охлаждении циркуляционной воды [64,65,66,127].

Эффективность башенной градирни также напрямую связана с интенсивностью испарительного процесса, который является основным механизмом отвода тепла от циркуляционной воды. В летний период, когда окружающий воздух характеризуется высокой температурой и повышенной влажностью, испарение становится доминирующим процессом охлаждения. Однако высокая относительная влажность уменьшает разницу между температурой воды и точкой росы, что ограничивает максимальный температурный перепад и снижает эффективность теплообмена [16]. Для решения этой проблемы на тепловых электростанциях зачастую прибегают к снижению расхода воздуха через градирню, что позволяет увеличить время контакта воздуха с теплой водой и тем самым углубить процесс теплообмена. Кроме того, при таких климатических условиях дополнительно вводят вентиляторные градирни, которые обеспечивают более точное регулирование воздушного потока [15]. Это позволяет не только оптимизировать интенсивность испарения, но и снизить потери воды, характерные для высоких скоростей естественной тяги в башенных градирнях [91].

Зимой, напротив, низкие температуры окружающего воздуха значительно замедляют процесс испарения. Основной проблемой становится

риск обмерзания элементов оросительной системы градирни, что приводит к блокированию потоков воды и ухудшению теплообмена [3]. Также основной проблемой, с которой сталкивается градирня в период зимней эксплуатации, является замерзание воздухозаборных окон. Низкие температуры воздуха способствуют образованию наледи на этих элементах, что приводит к уменьшению их проходного сечения и затрудняет поступление воздуха внутрь градирни. В результате снижается эффективность теплообмена между охлаждаемой водой и воздухом, что ухудшает охлаждающую способность сооружения [96,108]. В некоторых случаях наледь может распространяться внутрь градирни, вызывая повреждения оросителей и других конструктивных элементов, вплоть до их обрушения. Это существенно снижает надежность системы оборотного водоснабжения и может привести к вынужденным остановкам для удаления наледи и проведения ремонтных работ.

Для предотвращения обмерзания и обеспечения стабильной работы градирен в зимних условиях необходимо применять комплекс мероприятий. Рассматриваемые методы можно объединить в несколько основных групп, направленных на снижение риска образования льда в градирнях [1,3,16].

Первая группа мер связана с оптимизацией распределения воды: это изменение схемы орошения оросителя, при котором перераспределяют подачу воды для создания либо усиленного орошения центральной части, либо, наоборот, формирования водяной завесы на периферии. Такая регулировка позволяет изменять площадь контакта охлаждаемой воды с воздухом и поддерживать оптимальные температурные режимы, предотвращая образование наледи.

Вторая группа методов включает установку специализированных устройств и защитных конструкций. Среди них – разбрызгивающие устройства, располагаемые как над входными окнами градирен, так и вне их, а также системы обогрева трубопроводов и элементов несущего каркаса с подачей нагретой воды. Дополнительно применяются защитные экраны,

козырьки, тамбуры и навесные щиты, которые ограничивают прямое воздействие холодного наружного воздуха. Эти комплексные меры, в совокупности с режимной оптимизацией подачи охлаждаемой воды на отдельные секции градирен, способствуют повышению надежности работы градирен и предотвращению аварийных ситуаций, вызванных обмерзанием.

Своевременное проведение профилактических мероприятий и постоянный мониторинг состояния градирни позволяют значительно снизить риск обмерзания и обеспечить бесперебойную работу системы охлаждения [11].

Таким образом, сезонные изменения метеорологических условий оказывают существенное влияние на режим работы башенной градирни. Летом доминирует интенсивное испарение, которое, несмотря на высокие температуры, ограничивается повышенной влажностью и приводит к увеличенным потерям воды, а зимой – снижение скорости испарения и риск обмерзания требуют специальных конструктивных решений для обеспечения стабильного теплообмена.

Своевременное проведение профилактических мероприятий и постоянный мониторинг состояния градирни позволяют значительно снизить риск обмерзания и обеспечить бесперебойную работу системы охлаждения [11].

### **1.3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепломассообмена в технологических установках**

Эффективность работы башенных градирен во многом определяется температурой, относительной влажностью, плотностью и скоростью движения атмосферного воздуха, а также системой распределения воздушных потоков. В литературных источниках представлены теоретические и экспериментальные исследования, в которых анализируются явления неравномерного распределения фаз и демонстрируется их существенное влияние на эффективность работы этих аппаратов. [33,60,65,66,67,90,107,112, 113,123]. Для исследования и повышения эффективности работы теплообменных аппаратов разработаны математические модели,



позволяющие проводить расчет и прогнозировать эксплуатационные характеристики и оптимизацию теплообменного оборудования. На анализе некоторых из них, имеющих непосредственное отношение к СОО, остановимся подробнее.

Для моделирования процессов теплообмена в сложных системах и установках применяется метод матричной формализации [139,151], который в последнее время достаточно широко используется для описания и расчета систем теплообменных аппаратов со сложной структурой потоков теплоносителей.

Суть матричной формализации расчета заключается в представлении каждой ступени или в целом теплообменного аппарата в виде отдельного четырехполюсника, имеющего два входных и два выходных потока для холодного и горячего теплоносителя соответственно [70]. Для моделирования процесса теплопередачи в поверхностном теплообменном аппарате для случая прямоточной схемы движения двух теплоносителей с учетом расчетной схемы, представленной на рис. 1.3 (а), на основании балансовых соотношений энергии записывается система дифференциальных уравнений следующего вида [70]:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_1 - t_2), \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $a = K/(c_p G)$ ;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> °С);  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг °С);  $G$  – расход теплоносителя, кг/с; индексы: 1 – горячий теплоноситель; 2 – холодный теплоноситель.

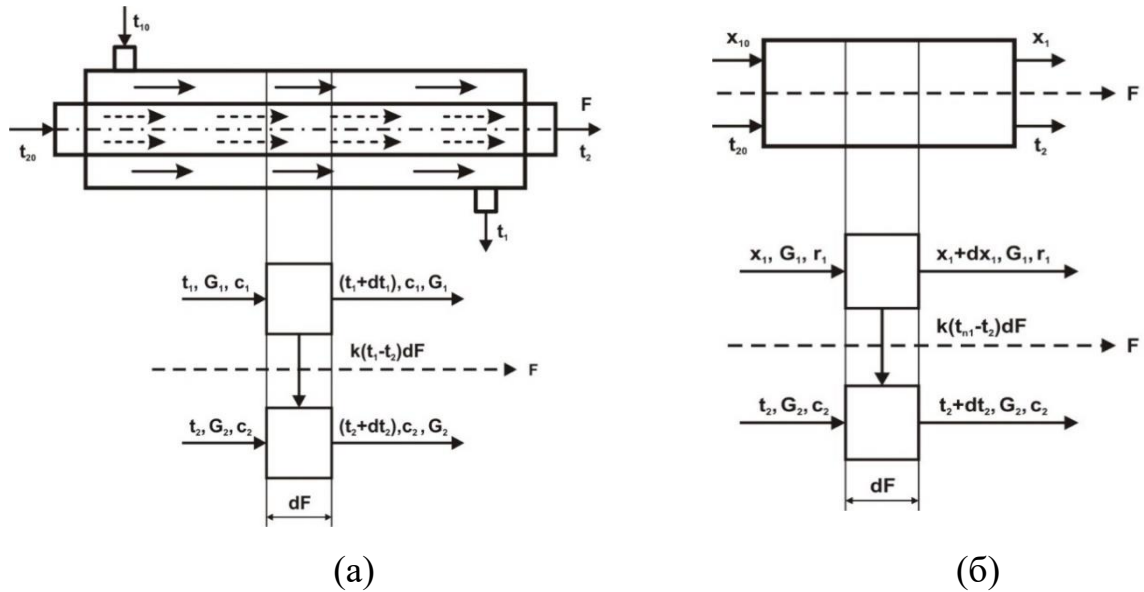


Рисунок 1.3 Расчетная схема теплообменного аппарата для случая прямоточной схемы движения двух теплоносителей (а) без фазового перехода в горячем теплоносителе и (б) с фазовым переходом в горячем теплоносителе [139]:  $dF$  – элемент поверхности теплообмена; прочие обозначения приведены в тексте

Для моделирования процесса теплопередачи в прямоточном теплообменном аппарате с учетом фазового перехода горячего теплоносителя используется система дифференциальных уравнений в виде [139]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -a_1(t_{s,1} - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_{s,1} - t_2), \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $x$  – степень сухости пара;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $t$  – температура теплоносителя, °C;  $a_1 = K_2/(rG_1)$ ;  $a_2 = K_2/(c_{p,2}G_2)$ : индексы: индекс «s» соответствует состоянию насыщения; 1 – горячий теплоноситель; 2 – холодный теплоноситель.

Частное аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1.1) с учетом начальных условий  $t_1|_{F=0} = t_{10}$  и  $t_2|_{F=0} = t_{20}$  представляется в матричном виде:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{T}_0, \quad (1.3)$$

где  $\mathbf{B} = \{b_{m,n}\}$ ,  $(m = \overline{1,2}; n = \overline{1,2})$  – матрица коэффициентов системы;  
 $\mathbf{T} = [t_1, t_2]^T$  – вектор-столбец неизвестных членов;  $\mathbf{T}_0 = [t_{10}, t_{20}]^T$  – вектор-столбец свободных членов;  
 $b_{11} = \frac{a_2 + a_1 \cdot e^{-(a_1+a_2) \cdot F}}{a_1 + a_2}$ ;  $b_{12} = \frac{a_1 \cdot (1 - e^{-(a_1+a_2) \cdot F})}{a_1 + a_2}$ ;  
 $b_{21} = \frac{a_2 \cdot (1 - e^{-(a_1+a_2) \cdot F})}{a_1 + a_2}$ ;  $b_{22} = \frac{a_1 + a_2 \cdot e^{-(a_1+a_2) \cdot F}}{a_1 + a_2}$ .

Решение системы уравнений (1.3) выполняется методом обращения матрицы [70].

Системы дифференциальных уравнений и их аналитические решения с учетом фазового состояния горячего и холодного теплоносителей приводятся в [139]. Следует отметить, что данные модели не позволяют учитывать теплообменные и массообменные процессы, происходящие во влажном воздухе с учетом испарения части воды в градирне. Для учета данного эффекта представленные модели нуждаются в существенной доработке.

В работе Лаптева А.Г. [110] представлена математическая модель процесса тепло- и массообмена в противоточной пленочной градирне с учетом неравномерностей распределения потоков воды и воздуха. Основой исследования является ячеечная модель структуры потоков в контактных устройствах градирен (рис. 1.4), которая позволяет учитывать неравномерности как в вертикальном, так и в поперечном направлениях. При этом рабочая зона условно делится на ряд ячеек полного перемешивания, число которых определяется экспериментально и косвенно учитывает обратное перемешивание потоков.

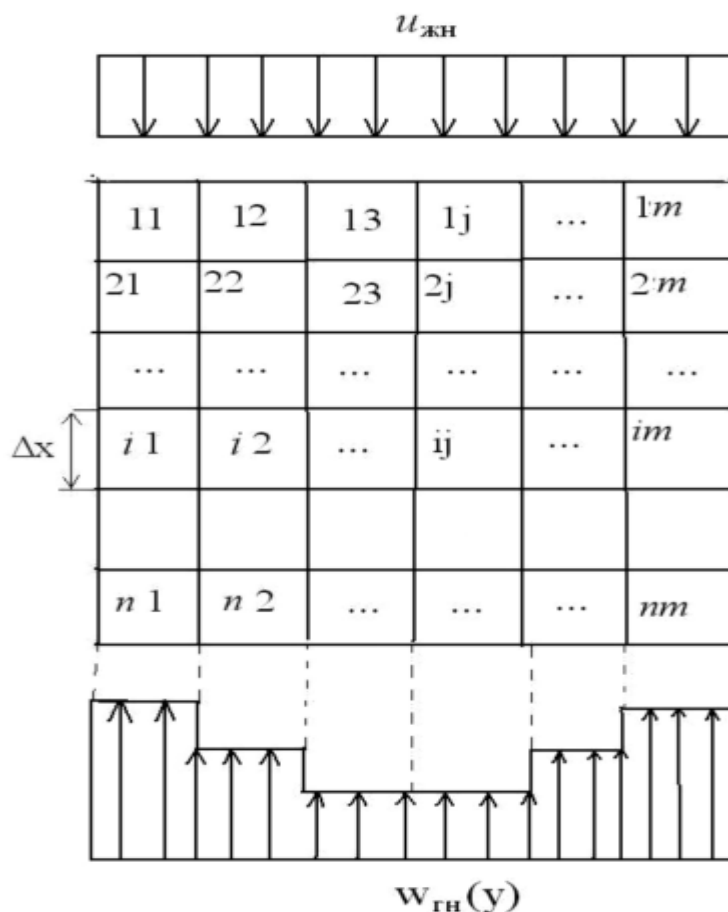


Рисунок 1.4 Условное представление блока оросителей ячейками при неравномерной подаче воздуха на входе

Ключевые результаты исследования показывают, что при равномерном орошении и неравномерном распределении воздуха снижение теплового КПД может составлять 5–15% [110].

Фундаментальные исследования тепломассообменных процессов в башенных испарительных градирнях были значительно продвинуты в работе [111], где предложена комплексная методология анализа экспериментальных данных о тепловой эффективности градирен, основанная на сопоставлении натурных измерений с результатами математического моделирования.

Эффективность работы башенной градирни оценивается тепловым коэффициентом полезного действия  $\eta$ , который определяется выражением [109]

$$\eta = \frac{T_{w0} - T_{wf}}{T_{w0} - T_{lim}}$$

где  $T_{w0}$  - средняя температура поступающей в градирню воды, °С;  $T_{wf}$  - средняя температура выходящей из градирни воды, °С;  $T_{lim}$  - предельная температура охлаждения воды (°С) при испарительном охлаждении для данной температуры входящего воздуха  $T_{m0}$ , °С и относительной влажности  $\psi$ .

Авторы разработали математическую модель, отражающую влияние отношения массовых расходов воды и воздуха  $Q_w/Q_a$ , на тепловой КПД градирни (рис 1.5).

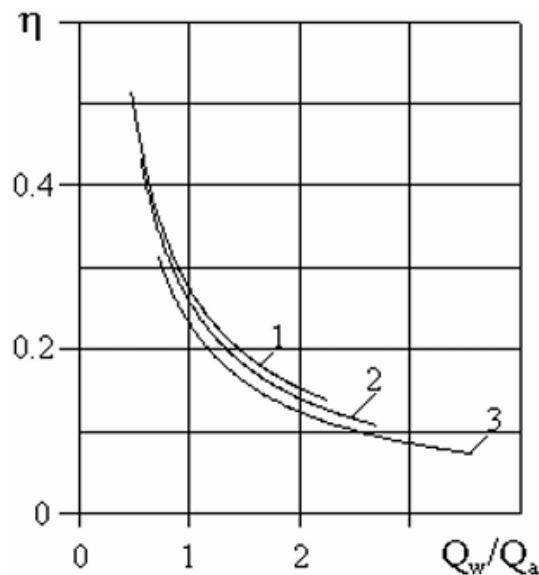


Рисунок 1.5 Расчетная зависимость теплового КПД градирни ( $\eta$ ) от отношения расходов воды и воздуха  $Q_w/Q_a$  для температуры входящей воды  $T_{w0}=30\pm1$  °С, температуры окружающего воздуха  $T_{m0}=24\pm2$  °С, относительной влажности окружающего воздуха  $\psi=40\pm5\%$ , массового расхода воды  $Q_w=6250-17020$  т/ч

Особенностью предложенного подхода является учет влияния испарительного охлаждения как в пленочных течениях на щитах оросителя, так и в капельно-струйных течениях при распылении воды форсунками.

Экспериментальные исследования, проведенные на градирне Минской ТЭЦ-4 с площадью орошения 3200 м<sup>2</sup> и номинальной нагрузкой 28000 т/ч,

выявили нелинейный характер зависимости теплового КПД от отношения массовых расходов воды и воздуха. Установлено, что при увеличении гидравлической нагрузки экспериментальные значения КПД превышают расчетные, что объясняется возрастающим вкладом испарительного охлаждения капель воды. Этот эффект связан с уменьшением размера капель при более высоких перепадах давления на форсунках, что интенсифицирует процессы тепломассообмена в капельной фазе. Авторы также показали, что изменение атмосферного давления в диапазоне 720-760 мм рт.ст. практически не влияет на КПД градирни (менее 1%) из-за взаимной компенсации эффектов изменения коэффициента диффузии водяного пара и плотности воздуха.

Принципиально важными являются результаты исследования влияния ветровых воздействий на эффективность градирни. Введенный авторами безразмерный параметр

$$S = \frac{w}{u}, \quad (1.4)$$

где  $w$  – скорость ветра, измеренная на высоте 2 метра вдали от градирни, м/с;  
 $u$  – скорость воздуха на срезе воздухозаборных окон, м/с.

позволил классифицировать ветровые режимы и количественно оценить их влияние на тепловой КПД. Обнаружен нелинейный характер зависимости эффективности от параметра  $S$ : при слабых ветрах ( $S < 1$ ) влияние незначительно, в диапазоне  $1.3 \leq S \leq 1.8$  достигается максимальное увеличение КПД до 3%, а при дальнейшем росте  $S$  эффективность снижается до уровня штилевых условий или ниже. Такое поведение объясняется конкуренцией двух процессов: положительного влияния увеличения расхода воздуха через наветренные окна и отрицательного воздействия наклона паровоздушного факела, приводящего к уменьшению живого сечения градирни и образованию вихревых течений.

Актуальным направлением в области моделирования аэродинамических процессов в градирнях является разработка упрощенных инженерных моделей, позволяющих учитывать неравномерность распределения скоростей

в поперечном сечении градирни. Пушнов А.С. [39], основываясь на статистических данных из работы [31], предложил оригинальную поликанальную N-зонную модель аэродинамики градирни, основанную на статистическом обобщении экспериментальных данных по полям скоростей в действующих градирнях. Методология исследования базируется на разделении поперечного сечения градирни на характерные зоны с близкими значениями локальных скоростей воздушного потока и последующем усреднении скоростей в пределах каждой зоны методом графического интегрирования.

Для башенной градирни с естественной тягой площадью орошения  $1520 \text{ м}^2$  автор выделил четыре характерные зоны: центральную (А), основную (В), промежуточную (С) и периферийную (D) с соответствующими средними скоростями 0,7; 0,54; 0,65 и 0,43 м/с при общей средней скорости 0,6 м/с (рис.1.6). Для одиночной вентиляторной градирни типа СК-400 площадью орошения  $400 \text{ м}^2$  модель включает три зоны: центральную (1,17 м/с), среднюю (0,96 м/с) и периферийную (1,1 м/с) при средней скорости 1,0 м/с.

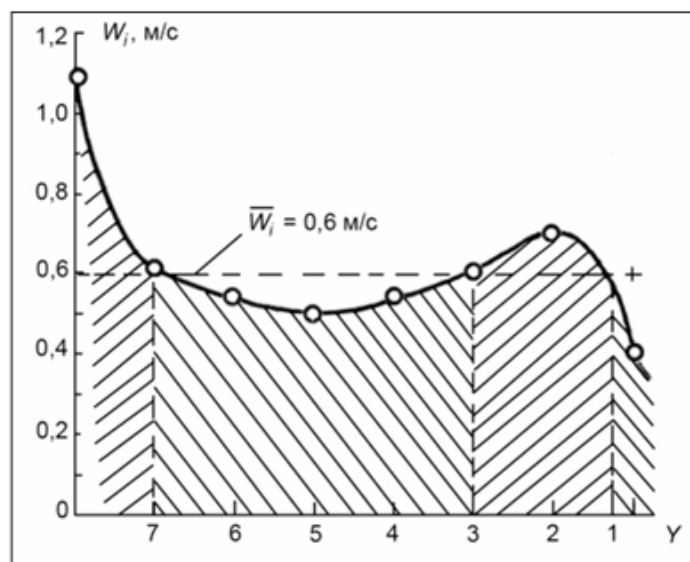


Рисунок 1.6 Профиль локальных скоростей  $W_i$  на выходе воздушного потока из водораспределительной системы башенной градирни с естественной тягой площадью орошения  $1520 \text{ м}^2$

Разработанная многоканальная аэродинамическая модель башенной градирни позволяет подбирать типы насадок на основании конструктивных характеристик комбинированного оросителя. Это моделирование способствует выравниванию воздушных потоков в поперечном сечении и, как следствие, усиливает охлаждающую эффективность аппарата [32].

В работе Smrekar J., Oman J., Širok B. [55] представлено экспериментальное исследование повышения эффективности башенных градирен естественной тяги путем оптимизации распределения воды по площади орошения. Ключевым результатом исследования стало теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение необходимости поддержания оптимального соотношения массовых расходов вода/воздух, которое должно быть постоянным по всей площади градирни. Авторы установили, что неравномерное распределение воды приводит к различным локальным соотношениям расходов: в периферийных зонах с высокими скоростями воздуха наблюдается недостаток воды относительно воздушного потока, в то время как в центральных областях избыточное орошение вызывает быстрое насыщение воздуха в нижней части оросителя, снижая эффективность теплообмена в верхних секциях. Оптимизация водораспределения в соответствии с локальными характеристиками воздушного потока обеспечила уменьшение температуры воды на выходе на  $1,4^{\circ}\text{C}$  и повышение КПД градирни с 38,9% до 44,4%, что убедительно демонстрирует критическую важность учета неравномерности распределения потоков при проектировании и эксплуатации башенных градирен.

В работе Колесникова С.В. [45] представлена математическая модель оборотной системы, основанная на применении аппарата теории графов и использовании законов Кирхгофа. Предложенный подход позволяет выполнять расчет различных режимов функционирования системы при изменяющейся конфигурации оборудования. Кроме того, в исследовании сформулированы принципы построения режимных карт работы



теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с учетом изменений метеорологических условий.

В исследовании [17] представлена концепция и разработка аппаратов для охлаждения оборотной воды с использованием вихревых камер, что открывает перспективные направления повышения эффективности теплообмена. В работе [46] выполнен всесторонний анализ эксплуатационных характеристик промышленных градирен, оснащённых различными типами контактных устройств (насадок). На основе сопоставления результатов, полученных при идентичных технологических и метеорологических условиях, установлено, что геометрия, конструктивные особенности и пространственное размещение насадок оказывают существенное влияние на общую эффективность работы градирен.

Использование указанных решений и аналогичных подходов [19, 115] ограничивается в основном стадией проектирования новых оборотных систем и градирен, либо требует глубокой модернизации действующих установок с вынужденной приостановкой их эксплуатации.

В статье [83] авторы проводят численное исследование процессов тепло- и массообмена внутри градирни с естественной тягой (NDWCT) (рис.1.7) при различных ветровых условиях. Для моделирования использована трехмерная CFD-модель с стандартной турбулентной моделью  $k-\epsilon$ . В модели применяется схема Эйлера для воздушной фазы и Лагранжа для водной фазы, где пленочный характер потока воды в заполнителе аппроксимируется движением капель с заданной скоростью. Управляя скоростью капель, достигается необходимый тепло- и массообмен. В статье исследуются влияния следующих параметров на тепловую эффективность градирни: диаметр капель, температура входящей воды, количество форсунок, расход воды и число дорожек на форсунке. Также изучено воздействие ветра на тепловую эффективность градирни.

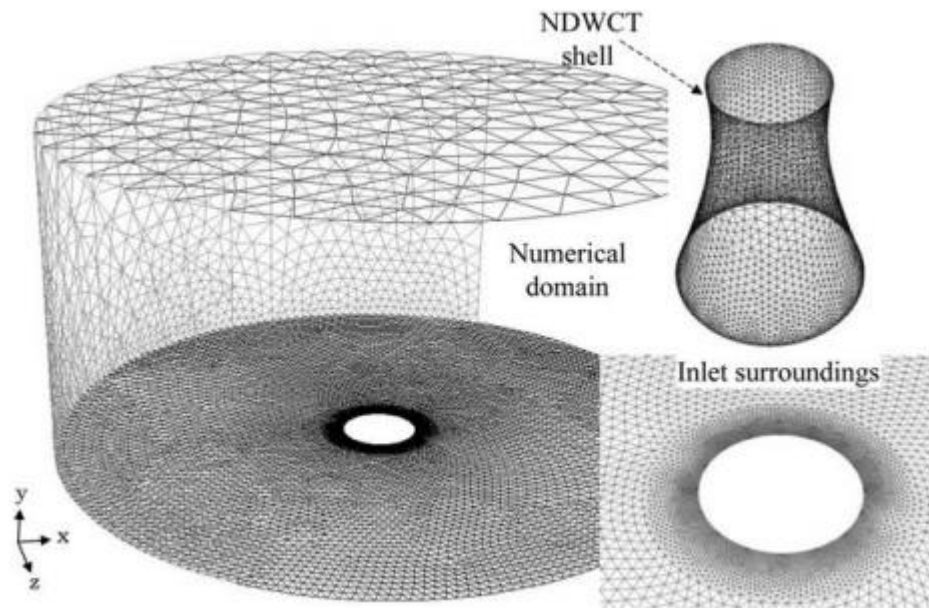


Рисунок 1.7 Трехмерная модель расчетной области градирни

Численное моделирование широко применяется для анализа и оптимизации работы градирен [41,71-87]. Однако его использование сопряжено с рядом ограничений: высокая ресурсоемкость вычислительных процедур; успешное использование пакетов к решению прямых задач и их слабая приспособленность к решению обратных задач диагностики.

В статье [84] авторы представляют точный и быстрый аналитический метод для моделирования процессов тепло- и массообмена в градирне. Они выводят аналитические решения одномерных дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы, выраженные через элементарные функции. Полученные решения позволяют определить распределение температур жидкости и газа, а также содержание водяных паров в воздухе на каждом участке по высоте башни. Сравнение аналитических результатов с экспериментальными данными показало хорошее совпадение. Эти аналитические решения могут служить эталоном для проверки результатов численных расчетов.

Следует отметить, что данный подход имеет ряд ограничений, связанных с одномерной постановкой задачи, с трудностями адаптации результатов для решения обратных задач диагностики.

В работах [85,86] авторы применяют искусственные нейронные сети (ИНС) для предсказания эффективности градирни в широком диапазоне эксплуатационных условий. Для обучения и тестирования модели была использована экспериментальная градирня с противотоком, работающая в стационарных условиях при варьировании температуры сухого термометра, относительной влажности входящего воздуха, температуры поступающей горячей воды, а также расходов воздуха и воды. Часть экспериментальных данных использовалась для обучения модели ИНС на основе стандартного алгоритма обратного распространения ошибки. Модель предсказывала такие параметры, как отвод тепла в градирне, скорость испарения воды в воздушный поток, температура выходящего водяного потока, а также температура сухого термометра и относительная влажность выходящего воздушного потока. Тестирование модели по экспериментальным данным, не использованным в процессе обучения, показало хорошее соответствие предсказанных значений с экспериментальными, с коэффициентами корреляции в диапазоне 0,975–0,994 и средними относительными ошибками в диапазоне 0,89–4,64%. Результаты демонстрируют, что подход с использованием ИНС может быть успешно применен для высокоточного и надежного прогнозирования производительности градирен.

Сравнивая матричное математическое моделирование и искусственные нейронные сети, следует выделить следующие моменты:

1. Матричные модели разрабатываются на основе балансовых соотношений массы и энергии, ИНС часто рассматривают объект как "черные ящики", что затрудняет интерпретацию результатов и выявление причинно-следственных связей. ИНС могут страдать от переобучения и чувствительности к шуму в данных, что влияет на стабильность и воспроизводимость результатов.

2. Матричные модели разрабатываются на основе фундаментальных физических законов и требуют меньше эмпирических данных для калибровки.

ИНС нуждаются в больших объемах данных для обучения для достижения приемлемой точности, что может быть проблематично при ограниченности доступных данных.

3. Матричные модели, основанные на физических законах, более адекватны к изменениям внешних условий и параметров системы, тогда как ИНС могут потребовать повторного обучения при значительных изменениях в данных.

#### **1.4. Выводы по результатам анализа**

1. Проведенный анализ систем технического водоснабжения показал перспективность и востребованность использования на современных мощных ТЭС и АЭС оборотных систем водоснабжения с башенными градирнями.

2. Для расчета башенной градирни целесообразно использовать методологию матричной формализации, позволяющую учесть сложную структуру потоков теплоносителей и влагосодержание воздуха.

3. Сезонные погодные условия оказывают существенное влияние на неравномерность распределения воды и воздуха в поперечном сечении градирни. Для повышения эффективности охлаждения циркуляционной воды актуальной является задача разработка моделей и программных продуктов для оценки влияния скорости и направления ветра на указанную неравномерность.

4. Использование существующих программных пакетов имитационного моделирования связано с финансовыми и ресурсными затратами при решении комплексных многомерных многофазных и многопоточных задач тепломассообмена для башенных градирен.

5. Искусственные нейронные сети демонстрируют хорошие результаты в прогнозировании эксплуатационных параметров, но требуют большого объема данных для обучения.

6. Особый актуальность в контексте решения обратных задач предиктивной аналитики представляют матричные модели, которые

целесообразно развить и использовать для моделирования и диагностики состояния башенных градирен.

### **1.5. Постановка задач исследования**

Проведенный анализ литературных источников и опыт эксплуатации систем оборотного охлаждения позволил сформулировать следующие задачи, которые решаются в диссертационной работе для достижения поставленной цели:

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 охлаждающей способности СОО.

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

## **ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В БАШЕННОЙ ГРАДИРНЕ**

Системы оборотного охлаждения в качестве основных подсистем включают башенные градирни, конденсаторы турбин и циркуляционные насосы. На примере башенной градирни рассматриваются более подробно подходы к моделированию и анализу этих подсистем для разработки путей и методов повышения ее энергоэффективности.

### **2.1. Анализ охладительной способности градирни на основе уравнений баланса массы и энергии**

Повышение эффективности охлаждения циркуляционной воды возможно за счет моделирования градирен с применением точных математических методов. При этом важной задачей является выбор на основе математических моделей таких режимов работы и конструктивных решений оборудования, которые позволят достичь баланса между потерями воды в окружающую среду и снижением эффективности работы энергоблока. Анализ эффективности работы градирни требует учета множества взаимосвязанных факторов, таких как влажность и температура наружного воздуха, распределение потоков воды и воздуха в поперечном сечении градирни, также направление и скорость ветра, степень открытия воздухозаборных окон, степень минерализации циркулирующей воды [1,40, 21].

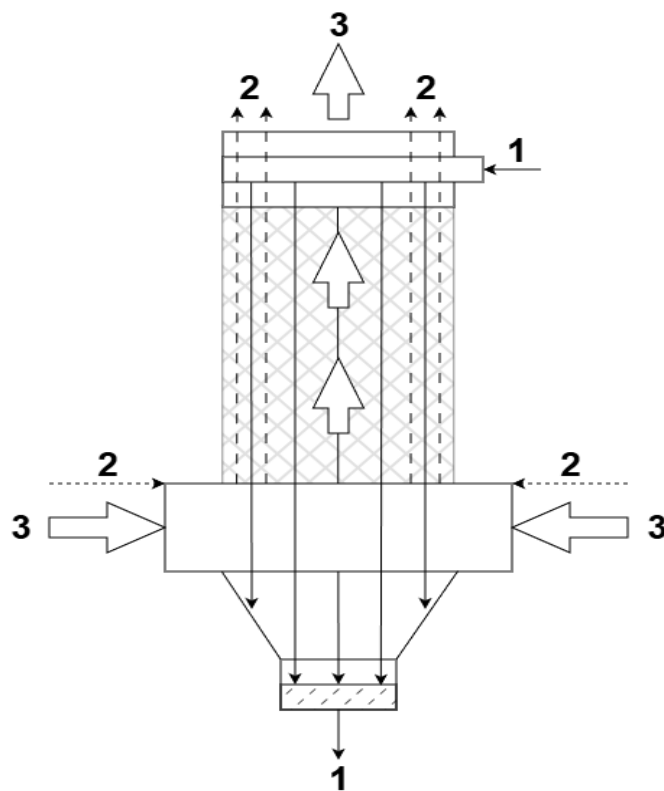
Для описания процессов тепломассопереноса с учетом фазовых превращений в теплоносителях предлагается использовать математические модели, основанные на уравнениях баланса массы и энергии.

На рисунке 2.1 изображена схема движения теплоносителей, применяемая при моделировании процессов в градирне. Охлаждающая вода поступает в верхнюю часть градирни, проходя через системы орошения, задача которых состоит в формировании обширной контактной зоны между водой и поднимающимся воздушным потоком (рис. 2.1, а). Воздушный поток входит через нижнюю часть конструкции и поднимается навстречу

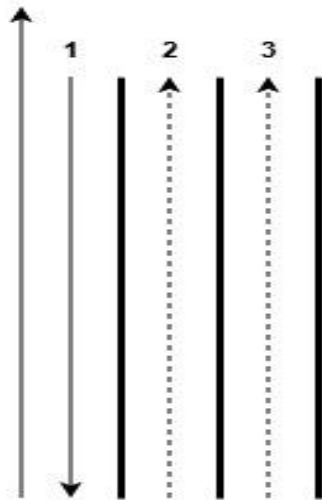
нисходящему водному потоку. Взаимодействие с воздухом приводит к охлаждению воды благодаря двум механизмам: конвективному теплопереносу и частичному испарению, при котором определенная доля жидкой фазы трансформируется в парообразное состояние.

Влагосодержание воздуха характеризуется концентрацией водяного пара в его составе. Несмотря на то, что пар распределен в воздушном потоке, в математических моделях его рассматривают как отдельный поток — такой подход позволяет независимо контролировать его характеристики в ходе тепломассообменных процессов.

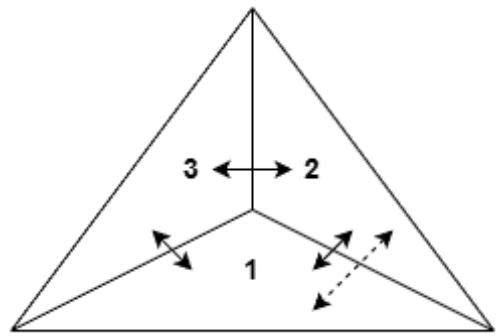
На рис. 2.1,б в роли основной координаты процесса выступает площадь теплообменной поверхности  $F$ . Воздух и пар перемещаются по направлению координатной оси, в то время как циркулирующая вода движется в обратном направлении. Возможные варианты переноса энергии и массы между теплоносителями показаны на рис. 2.1, в.



a)



б)



в)

Рисунок 2.1 Схема потоков теплоносителей в башенной градирне (а), расчетная схема процесса (б), схема потоков энергии (сплошные линии) и массы (пунктирная линия) между теплоносителями (в) (индексы: 1–охлаждаемая вода, 2–водяные пары, содержащиеся в воздухе; 3–воздух)

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, происходящий за счёт испарения с поверхности жидкости, описывается четвёртым уравнением системы (2.1) [97]. Движущей силой процесса является разность между текущим влагосодержанием воздуха  $C$  и его предельным значением при насыщении  $C_n$ , соответствующим данной температуре.

Таким образом, математическая модель процессов тепломассопереноса формулируется в виде системы четырёх дифференциальных уравнений (2.1):



$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = (-a_{12}(t_1 - t_2) - a_{13}(t_1 - t_3) + a_{14}(C - C_n))(-1) \\ \frac{dt_2}{dF} = -a_{21}(t_2 - t_1) - a_{23}(t_2 - t_3) \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_{31}(t_3 - t_1) - a_{32}(t_3 - t_2) \\ \frac{dC}{dF} = -a_{42} \cdot (C - C_n) \end{cases} \quad (2.1),$$

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, Вт/(м<sup>2</sup> °С) ;  $K_{24}^m$  – коэффициент массопередачи, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $K_{24}^m$  – коэффициент массопередачи, 1/м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг °С);  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $G$  – расход теплоносителя, кг/с;  $C$  – концентрация водяных паров в воздухе (кг/кг);  $C_n$  – концентрация водяных паров в воздухе при насыщении (кг/кг).

В матричном виде система уравнений (2.1) записывается следующим образом:

$$d\mathbf{X}/dF = \mathbf{A} \times \mathbf{X}, \quad (2.2)$$

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

Для описания движения воды против оси процесса правая часть первого уравнения системы (2.1) умножается на (-1) [97]. Третье слагаемое в правой части этого уравнения отражает изменение температуры воды, обусловленное испарением влаги с её поверхности. Помимо испарения, возможен также капельный унос жидкости в атмосферу [21], однако в рамках данной модели он не рассматривается.

Представленная система уравнений (2.1) позволяет определить четыре искомые функции: распределения температур трёх теплоносителей, а также содержание водяного пара в воздухе вдоль выбранной координаты процесса  $F$ . Как известно [21], плотность насыщенного водяного пара в воздухе зависит

от температуры, и эта зависимость должна быть учтена при моделировании. Соответствующий график для рассматриваемого температурного диапазона приведён на рис. 2.2.

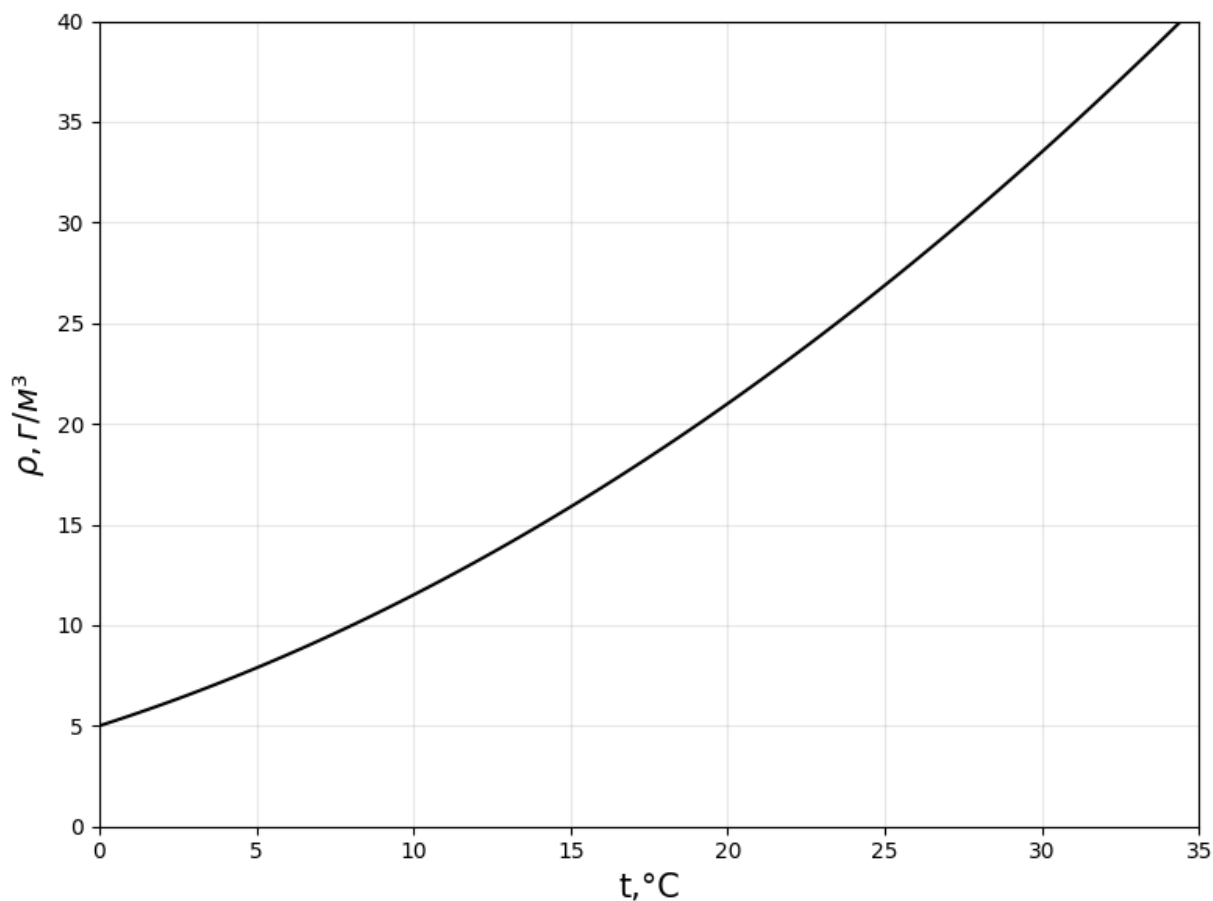


Рисунок 2.2 Зависимость плотности насыщенных водяных паров от температуры воздуха при влажности 100%

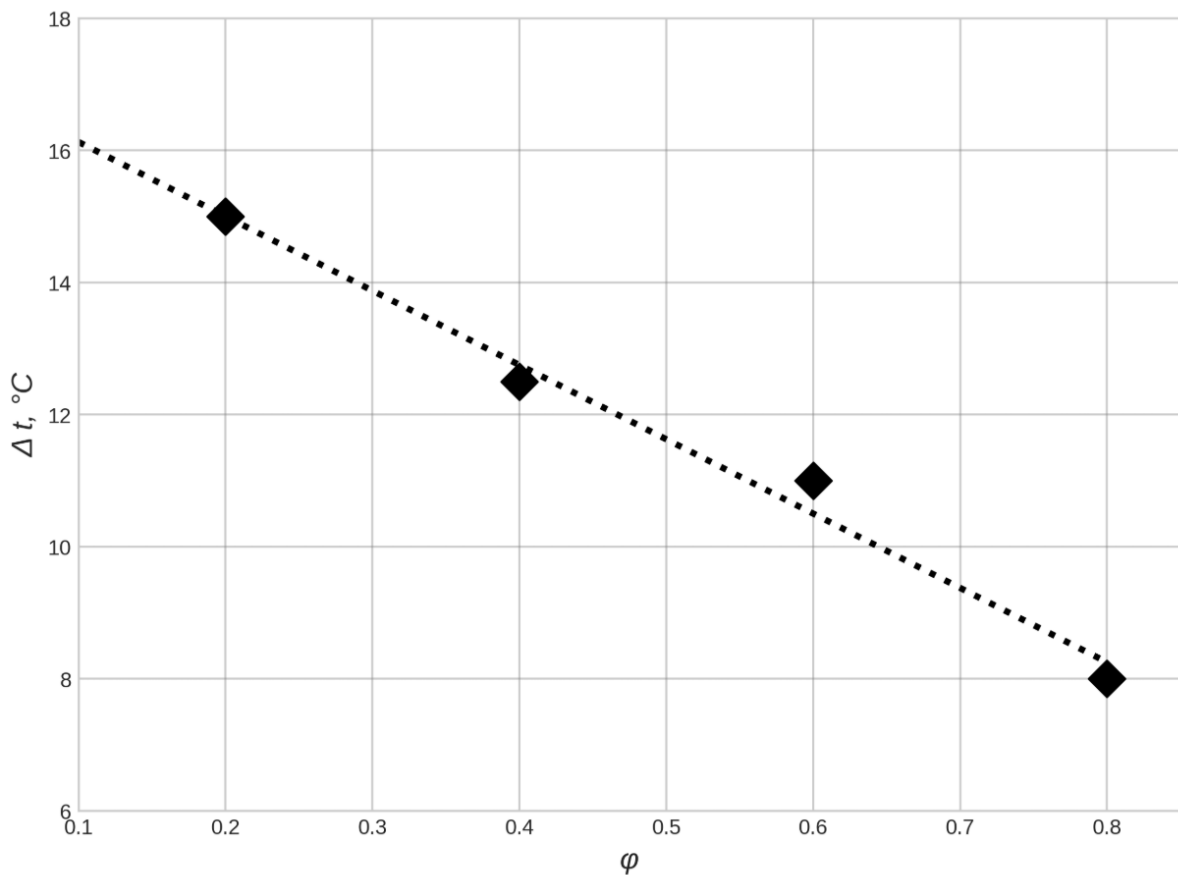
Решение системы уравнений (2.1) выполняется численно методом Рунге–Кутты четвёртого порядка [99], при начальных условиях  $t_1|_{F=0} = t_{10}$ ,  $t_2|_{F=0} = t_{20}$ ,  $t_3|_{F=0} = t_{30}$ ,  $C|_{F=0} = C_0$ .

Полученные расчётные данные дают возможность определить массу испарившейся влаги, вычислить требуемый объём продувки, препятствующей солеотложению в системе СОО, установить площадь межфазного контакта, которая обеспечит заданное снижение температуры воды, а также проанализировать экономические показатели работы энергоустановок.

Следовательно, приведённые вычисления позволяют провести комплексную оценку производительности и надёжности функционирования системы.

С целью проверки адекватности разработанной модели выполнена серия расчётных экспериментов, изучающих воздействие исходной влажности воздушного потока на охлаждение циркулирующей воды в башенной градирне. Ключевой целью подобных вычислений выступает расчет конечной температуры охлаждённой воды либо температурного перепада между входным и выходным сечениями градирни.

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 2.3.



**Рисунок 2.3 Сравнение модельных (штриховая линия) и опытных [22] (маркеры) зависимостей воздействия начальной относительной влажности воздуха на снижение температуры циркуляционной воды ( $\Delta t$ , °C) в башенной градирне**

Расчётные данные, полученные с использованием модели (2.1), отображены в виде штриховой линии, экспериментальные данные [22]

представлены маркерами. Среднее отклонение между модельными и экспериментальными данными не превышает  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является допустимым при проведении инженерных расчётов.

Предложенная математическая модель башенных градирен обеспечивает постановку и решение задач повышения эффективности процессов тепломассообмена для градирен различного функционального назначения, с учетом влажности атмосферного воздуха. На рисунке 2.4 приведены расчётные данные в форме зависимостей искомых величин от комплекса  $k \cdot F$ , представляющего собой произведение коэффициента теплопередачи ( $k$ ) и определяющей координаты процесса ( $F$ ). Указанный комплекс ( $k \cdot F$ ) эквивалентен размерному числу единиц переноса, которое широко используется в практике моделирования тепломассообменных процессов [105].

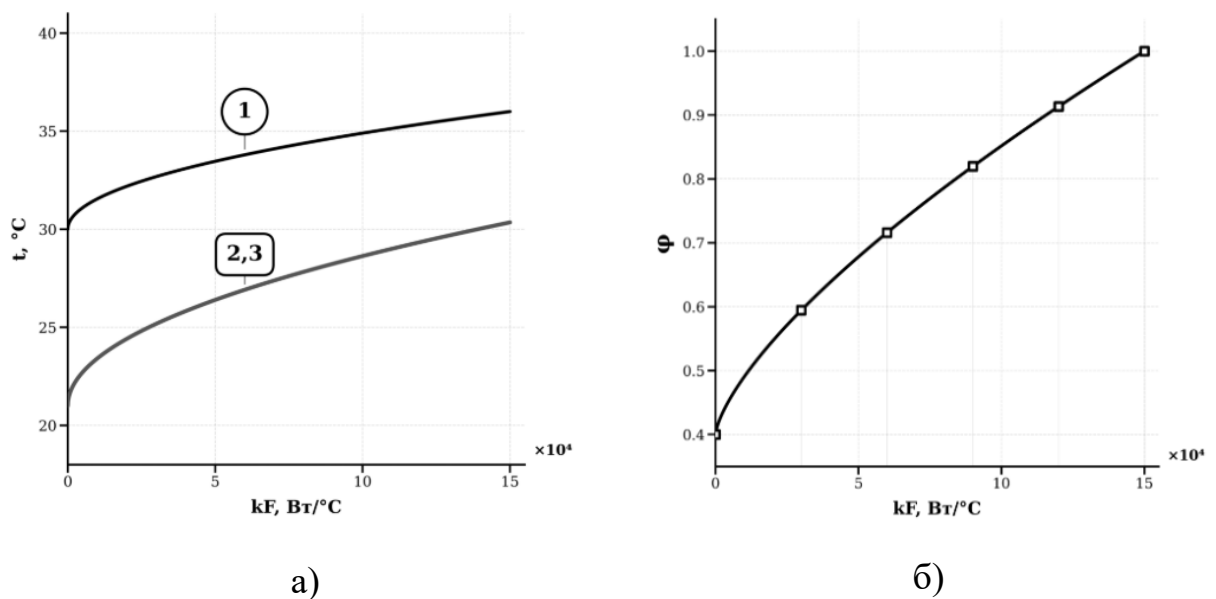


Рисунок 2.4 Зависимости температур теплоносителей (рис. а) (1–охлаждаемая вода, 2–водяные пары, содержащиеся в воздухе; 3–воздух) и влажности воздуха (рис. б) от коэффициента  $kF$

## **2.2. Анализ влияния неравномерного распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлаждённой воды**

Одним из ключевых факторов эффективности функционирования башенных градирен является распределение теплоносителей по поперечному сечению. Идеальной ситуацией считается равномерное распределение, при котором каждый элемент поверхности участвует в процессе с одинаковой интенсивностью. Однако в реальных условиях за счет неравномерного подвода теплоносителей, ветровых нагрузок и конструктивных особенностей градирен потоки теплоносителей часто распределяются по сечению неравномерно.

Такая неравномерность приводит к снижению общего теплового потока между теплоносителями. Кроме того, неравномерное распределение потоков может негативно влиять на долговечность оборудования за счёт неравномерности механических нагрузок, образования зон с повышенной коррозионной активностью и частичного обледенения.

Для получения количественной оценки влияния неравномерности потоков на рабочие характеристики градирни используется описанная ранее модель, построенная на уравнениях баланса массы и энергии. В ходе расчетного анализа проводится количественная оценка влияния неравномерного распределения теплоносителей в башенной градирне на эффективность теплообмена.

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 этих секторов осуществляется независимая подача теплоносителей: воздуха и воды. Такой подход позволяет оценить последствия неравномерного распределения потоков, возникающие в реальных условиях эксплуатации. Условное разбиение поперечного сечения градирни представлено на рис. 2.5

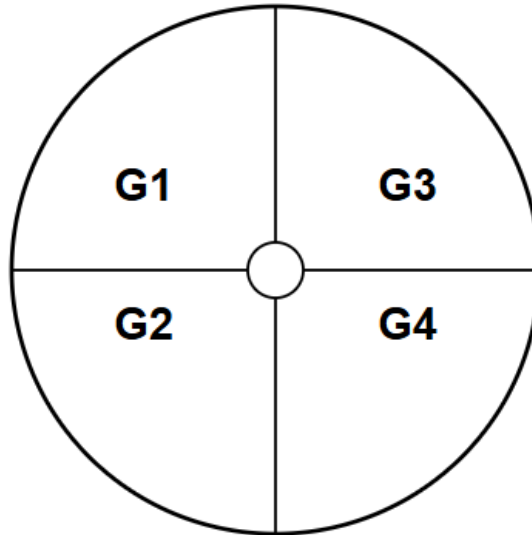


Рисунок 2.5 Условное разбиение поперечного сечения градирни  
где G1, G2, G3, G4 – расходы теплоносителя (кг/с)

Для обоснования выбора количества секторов разбиения поперечного сечения градирни был проведен анализ сходимости численного решения. Исследование показало (рис. 2.6), что разбиение на четыре сектора является оптимальным с точки зрения баланса между точностью моделирования и вычислительными затратами. Результаты расчетов демонстрируют, что при  $n = 4$  отклонение температуры охлажденной воды от асимптотического значения не превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ , что находится в пределах погрешности измерительных приборов и допустимых инженерных отклонений. Дальнейшее увеличение детализации расчетной сетки ( $n > 4$ ) не приводит к существенному уточнению результатов, при этом значительно возрастает время вычислений и усложняется интерпретация данных. Установленная точка сходимости подтверждает корректность выбранной методики расчета и обосновывает использование четырехсекторной модели для практических инженерных расчетов систем охлаждения энергетического оборудования.

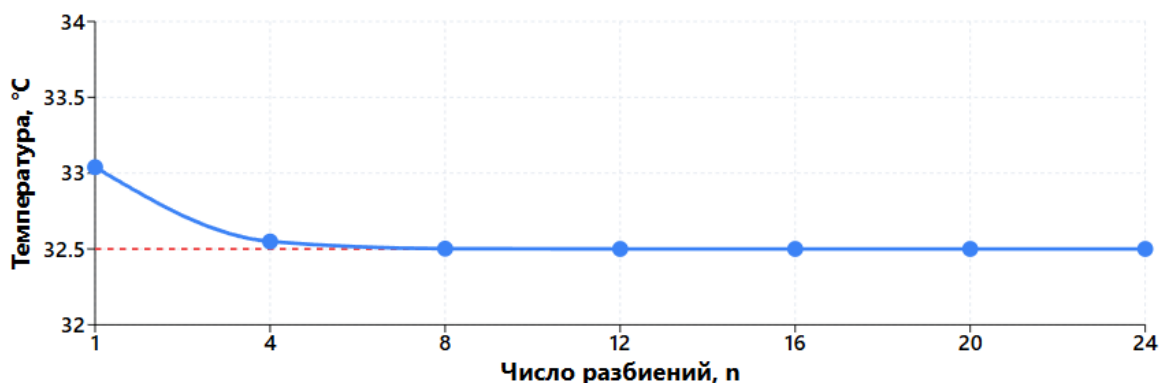


Рисунок 2.6 Зависимость температуры охлажденной воды от числа разбиений поперечного сечения башенной градирни

Пример расчетного анализа влияния неравномерного распределения воздуха по сечению градирни на температуру охлаждённой воды на примере градирни типа БГ-1600 представлен на рис. 2.7. Графическое представление включает нормативные параметры (отображены точками), полученные из номограмм[116], и расчетные значения (показаны линией). Более подробно результаты расчетного анализа указанного влияния рассмотрены в разделе 3.1.

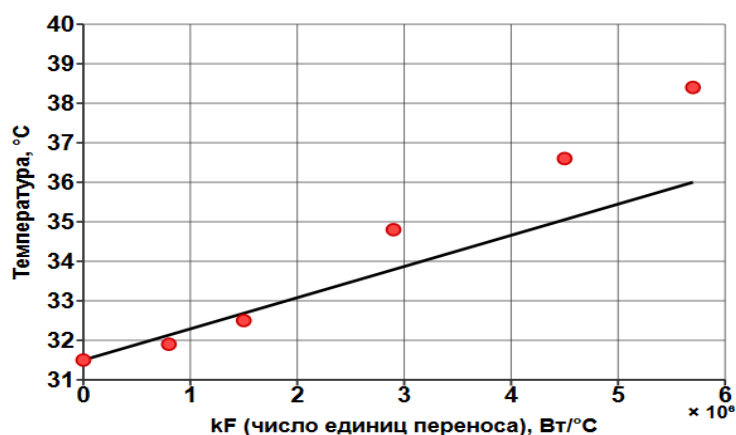


Рисунок 2.7 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воздуха по секторам перечного сечения градирни: [4000 2000 1500 500] кг/с

Анализ результатов расчета показывает, что неравномерное распределении теплоносителей приводит к существенному снижению охлаждающей способности. Ухудшение охлаждения циркуляционной воды может составлять 3-12°C, что существенно снижает показатели работы энергетического оборудования.

Таким образом, обеспечение равномерного распределения теплоносителей при различных эксплуатационных нагрузках и метеорологических условиях представляет актуальную и практически значимую задачу для современной энергетики [138].

### 2.3. Имитационная модель градирни

Представленные на рис. 2.6 результаты расчетов получены для наперед 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 оборотного охлаждения необходимо учитывать перечисленные факторы при построении модели. Для этого разработана имитационная модель с использованием современного программного пакета имитационного моделирования *Ansys Fluent*. Для решения задач распределения воздушного потока по сечению градирни разработана трёхмерная имитационная модель в программном комплексе *Ansys Fluent* [117]. Данная модель позволяет учесть сложную геометрию конструкции, взаимодействие между воздушными и водяными потоками, а также обеспечивает возможность детального исследования физических процессов в различных зонах градирни, включая области с повышенными градиентами параметров, которые сложно изучить экспериментальными методами.

Ключевым элементом данной процедуры является построение сеточной структуры расчётной области в *Ansys Fluent*. Геометрия градирни задается с помощью конечных элементов различных типов (тетраэдры, гексаэдры и др.). Для генерации сетки применяется встроенный в пакет алгоритм автоматического построения, позволяющий изменять плотность сетки в зависимости от локальных градиентов скорости и температуры [117]. В зонах с интенсивными изменениями параметров сетка уплотняется, а в менее

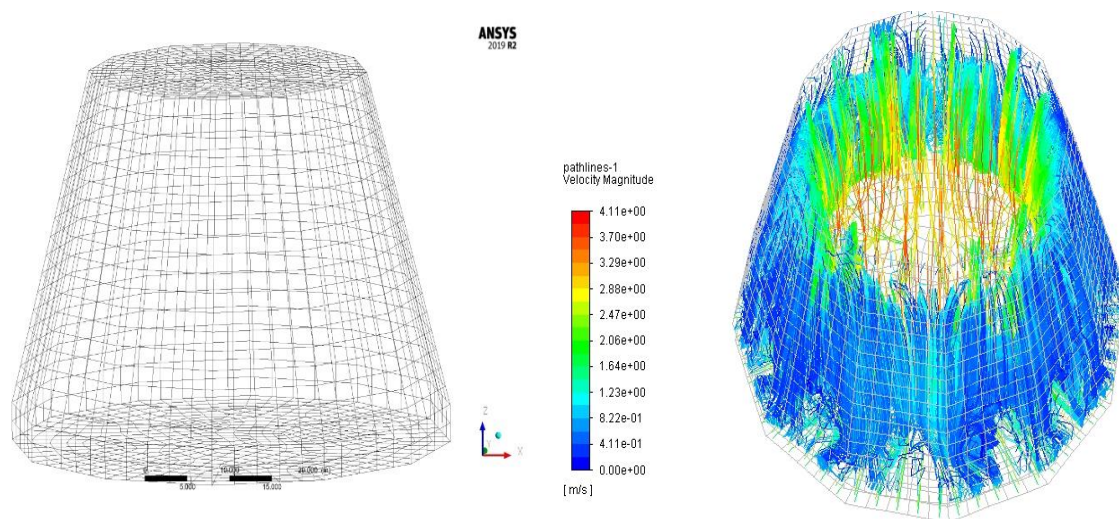


активных областях выбирается более разрежённое разбиение. Это обеспечивает оптимальный баланс между точностью результатов и затратами вычислительных ресурсов.

Дополнительно используется метод адаптивной локальной рефинировки сетки, позволяющий динамически уменьшать размер ячеек в наиболее чувствительных зонах, тем самым улучшая разрешение расчёта в областях с высокими градиентами параметров. Такой подход позволяет адаптировать сеточную модель к различным физико-геометрическим условиям, характерным для градирен.

Особое внимание при создании сеточной структуры уделяется выбору формы и размера элементов. Для моделирования градирни преимущественно используются тетраэдральные и гексаэдральные элементы. Применённая сетка с характерным размером ячейки порядка 4 м обеспечивает достаточную детализацию потока и тепломассообмена в пределах конструкции.

Полученная сеточная модель градирни и предварительные результаты движения воздуха в градирне представлены на рисунке 2.8.



**Рисунок 2.8    Сеточная модель башенной градирни и визуализация движения воздуха в градирне**

## **2.4. Комбинированный подход к моделированию теплообменных процессов в башенной градирне**

Для обеспечения эффективной работы градирни и системы оборотного охлаждения во всём диапазоне изменения внешних факторов необходимо иметь достоверное описание рабочего процесса охлаждающей установки в этих условиях. При проведении расчетов теплообмена в градирне ранее считались известными распределения потоков воздуха по сечению градирни, хотя хорошо известно, что расход воздуха определяется рядом внешних факторов: температурой и влажностью воздуха, направлением и скоростью ветра, исправностью и открытием фрамуг

При проведении расчётов теплообмена с учетом перечисленных внешних факторов, возникает необходимость в обоснованном выборе модели, метода расчёта и соответствующего программного обеспечения. Современные программные комплексы численного моделирования, такие как ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics и другие [47,48,87,117], демонстрируют высокую эффективность при решении типовых задач.

Однако при выполнении расчётного анализа совмещённых процессов течения и теплопереноса, осложнённых фазовыми переходами в теплоносителях (например, испарением или конденсацией), данные программные средства не всегда обеспечивают необходимую точность и достоверность результатов. Это связано со спецификой течения многофазных сред и ограничениями универсальных моделей, заложенных в эти пакеты.

Существующие матричные математические модели и методы расчёта, основанные на них [49,97,106], а также матричная модель башенной градирни, представленная выше, не всегда способны обеспечить требуемую точность при решении многомерных задач движения многофазных сред. Кроме того, их практическое применение может сопровождаться значительными временными затратами на разработку, адаптацию и верификацию соответствующего программного обеспечения.

Очевидно, что для ряда задач целесообразно применение комбинированных подходов, основанных на интеграции известных матричных математических моделей с современными программными пакетами имитационного моделирования. Такой подход позволяет эффективно сочетать преимущества разработанных моделей с гибкостью и наглядностью численных методов, реализованных в современных программных средах.

В настоящем разделе предлагается подход, направленный на повышение эффективности функционирования системы обратного охлаждения за счёт применения комбинированной модели. В рамках данного подхода предлагается объединение численное моделирование движения воздуха в башенной градирне на основе использования программного комплекса Ansys Fluent и расчет тепломассообменных процессов на основе матричной математической модели. Такое сочетание методов позволяет учитывать особенности аэродинамики и фазовых превращений с высокой степенью достоверности, обеспечивая более точную оценку рабочих характеристик СОО [128].

Алгоритм расчёта башенной градирни в рамках разработанной комбинированной модели представлен на рисунке 2.9. Перед началом расчётной процедуры, наряду с другими исходными параметрами, задаётся начальное приближённое значение удельной тепловой нагрузки градирни.

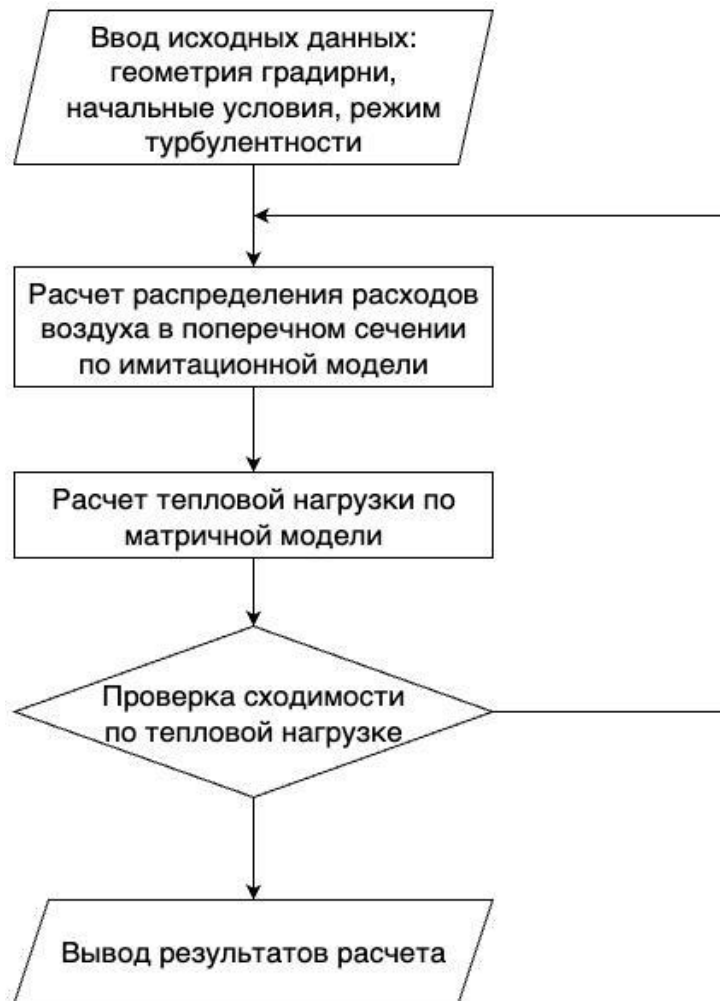


Рисунок 2.9 Алгоритм расчета башенной градирни в рамках комбинированной модели

На первом этапе расчёта с использованием программного комплекса Ansys Fluent производится моделирование аэродинамики и определяется поле скоростей и массовый расход воздуха, проходящего через градирню. Полученные результаты служат входными данными для второго этапа, где в рамках матричной модели рассчитываются температуры теплоносителей на выходе и уточняется величина тепловой нагрузки. Далее выполняется сравнение рассчитанного значения тепловой нагрузки с предварительно заданным. В случае расхождения итерационный процесс продолжается до достижения требуемой точности по критерию тепловой нагрузки.

Результаты расчета по второму этапу алгоритма комбинированной модели приведены на рис. 2.10

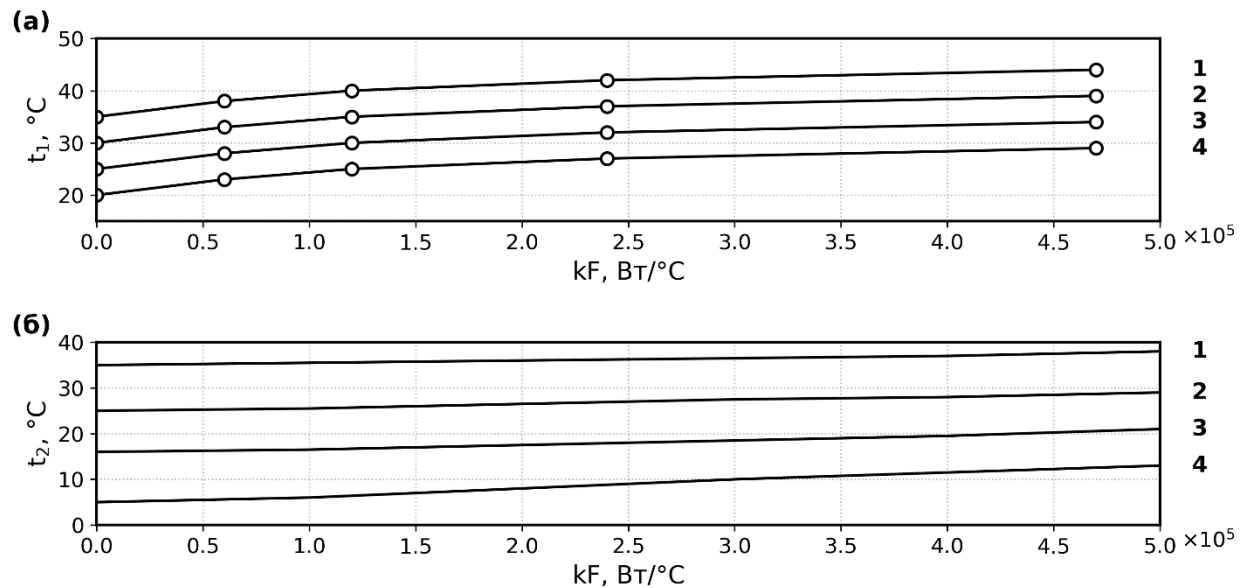


Рисунок 2.10 Зависимость температуры охлажденной воды (а) и воздуха (б) от определяющей координаты при разных температурах поступающего воздуха: 1– $t_0=35$ ; 2–25; 3–15; 4–5 $^\circ\text{C}$ ; линиями показаны расчетные значения согласно комбинированной модели, точками – нормативные данные согласно [116]

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 [116]. 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.

## 2.5. Выводы по главе

1. Разработана трехпоточная матричная математическая модель тепломассообмена в башенной градирне, позволяющая исследовать влияние неравномерности распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении градирни на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

2. С помощью имитационной модели найдено распределение потоков воздуха внутри градирни, исследовано влияние погодных условий на неравномерность распределение воздуха внутри градирни.

3. Предложена комбинированная модель градирни, объединяющая численное моделирование полей скоростей в программном комплексе Ansys Fluent с расчетом тепломассообменных процессов на основе матричной математической модели. Данный подход позволяет преодолеть ограничения универсальных CFD-пакетов при моделировании процессов с фазовыми переходами.

4. Разработанная комбинированная математическая модель позволяет учитывать влияние температуры поступающего воздуха на температуру охлажденной воды.

Материалы главы опубликованы в работах [127,128,136-139,143].

### **ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния неравномерности распределения потоков воды и воздуха в поперечном сечении на эффективность СОО. Предложен подход к анализу влияния скорости ветра на эффективность охлаждения циркуляционной воды в градирнях. Сформулирована и решена обратная задача диагностики состояния башенной градирни

#### **3.1. Расчетные исследования влияния неравномерности распределения потоков воды и воздуха на эффективность охлаждения циркуляционной воды**

Одним из наиболее значимых факторов, определяющих эффективность работы градирен башенного типа, является степень равномерности распределения воздушных и водяных потоков по поперечному сечению оросительного устройства. Неравномерность распределения теплоносителей приводит к формированию локальных зон с различной интенсивностью теплообмена, что существенно снижает общую эффективность охлаждения циркуляционной воды. Экспериментальные исследования показывают, что даже незначительные нарушения в распределении потоков могут оказывать заметное влияние на температуру охлажденной воды и, как следствие, на экономические показатели работы турбоустановки.

Для верификации расчётных данных использовались номограммы, разработанные специалистами АО «Фирма ОРГРЭС» [116], основанные на результатах балансовых испытаний башенных градирен. Указанные номограммы обеспечивают надёжную основу для оценки охлаждающей способности и являются проверенным инструментом при инженерных расчётах.

Результаты численного расчета согласно ранее представленной модели (2.1), иллюстрирующие изменение температуры охлаждённой воды при

различном распределении потоков воздуха по поперечному сечению градирни представлены на рис. 3.1-3.4.

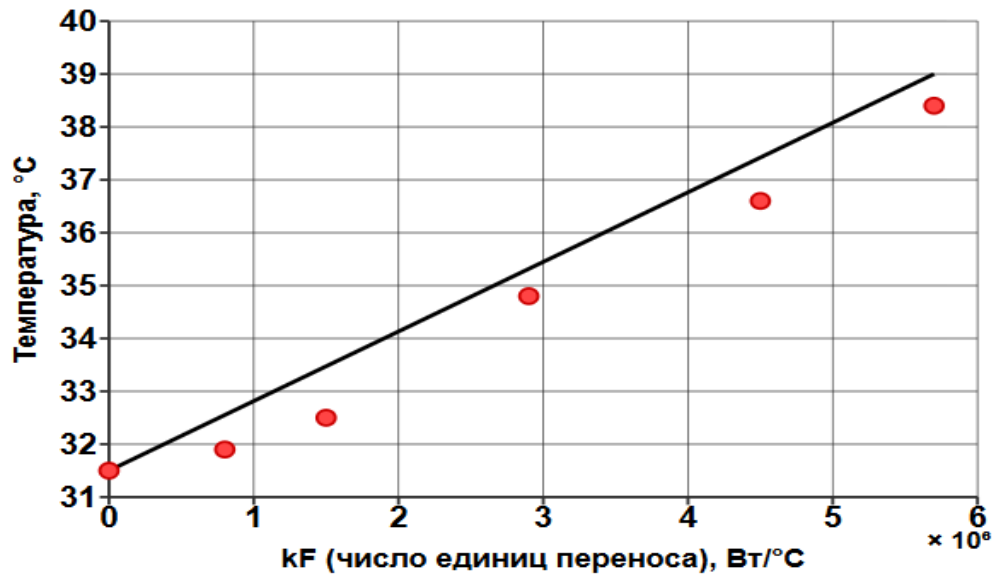


Рисунок 3.1 Результаты расчета температуры охлажденной воды при равномерном распределении воздуха по секторам: [2000 2000 2000 2000] кг/с

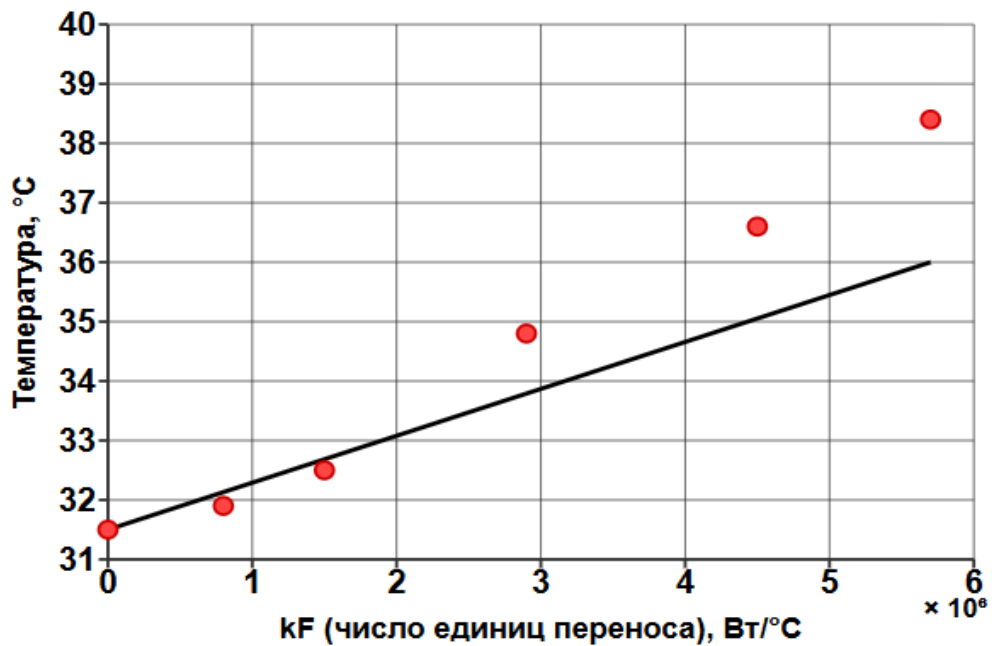


Рисунок 3.2 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воздуха по секторам: [4000 2000 1500 500] кг/с



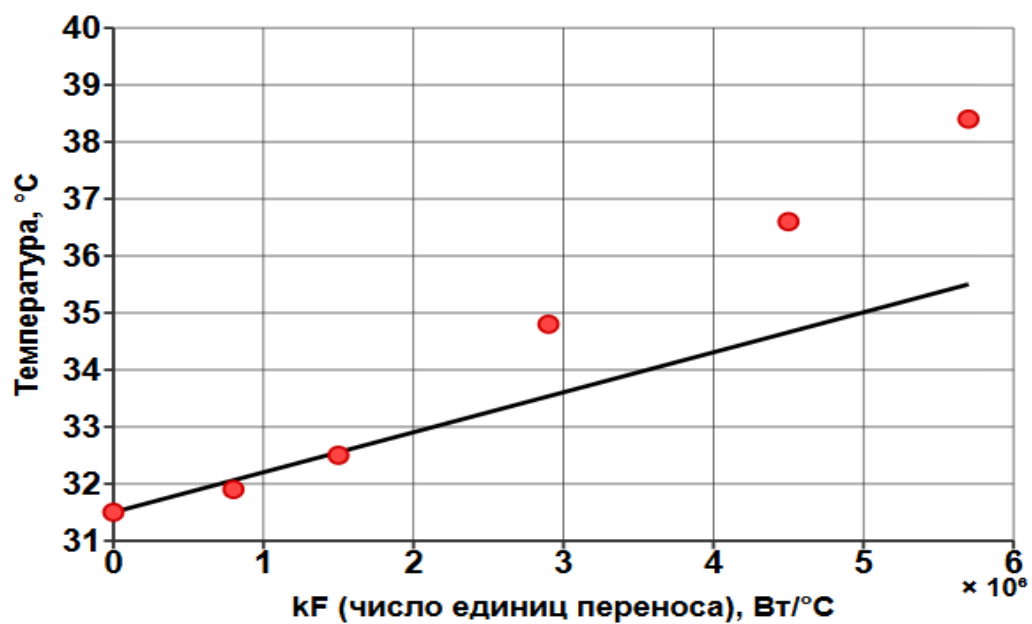


Рисунок 3.3 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воздуха по секторам: [1000 1000 1000 5000] кг/с

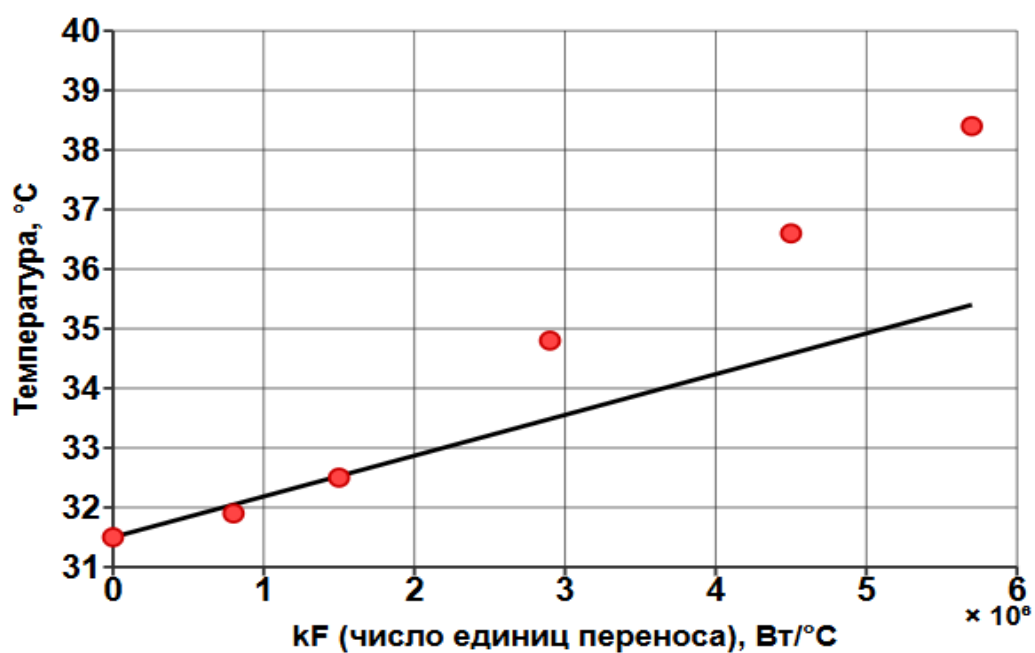


Рисунок 3.4 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воздуха по секторам: [500 6500 500 500] кг/с

Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерной подаче по сечению этой воды приведены на рис. 3.5 – 3.8

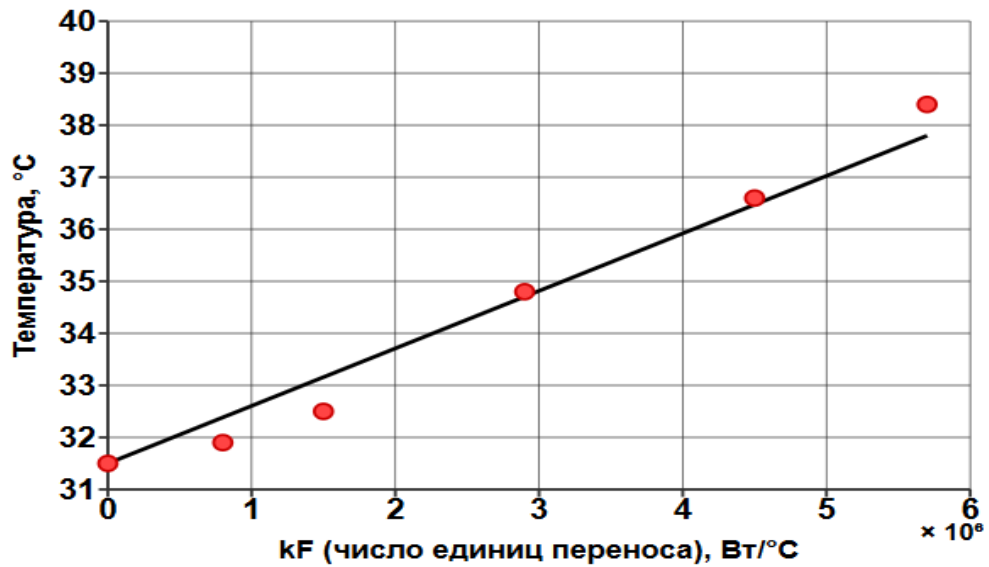


Рисунок 3.5 Результаты расчета температуры охлажденной воды при равномерном распределении воды: [866 866 866 866] кг/с

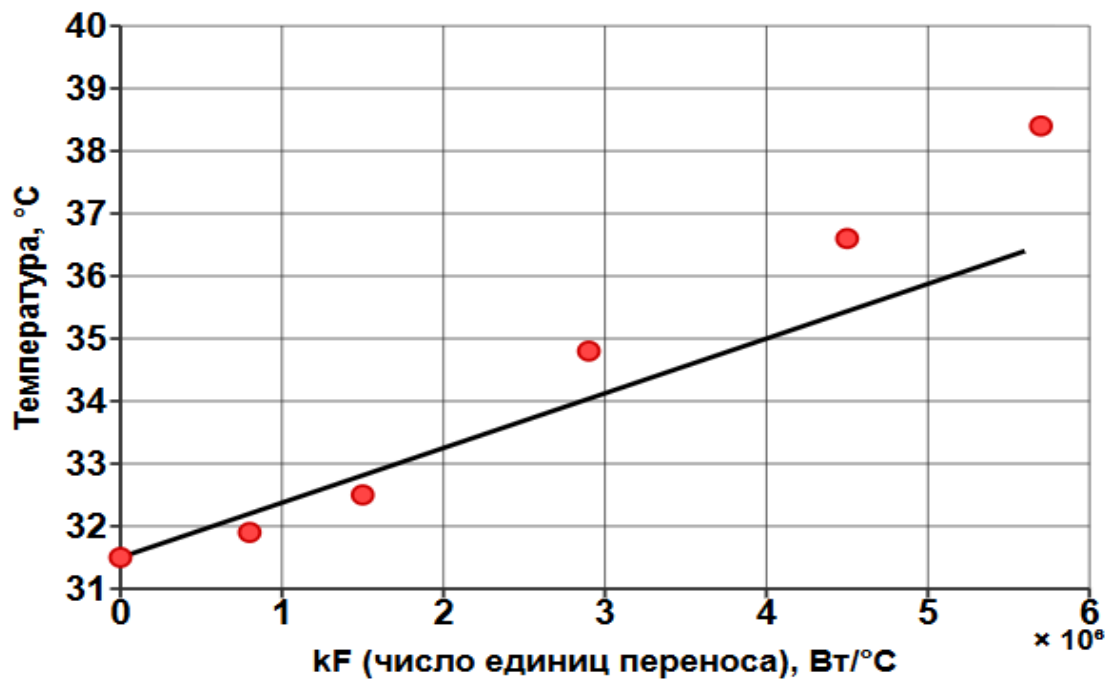


Рисунок 3.6 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воды: [600 966 1300 600] кг/с

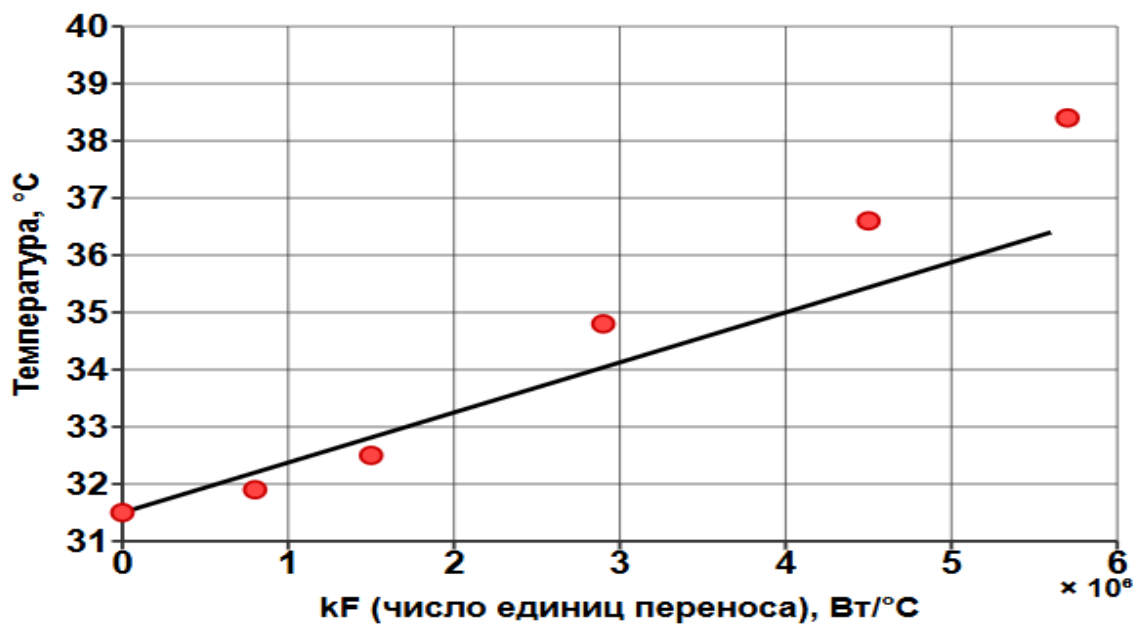


Рисунок 3.7 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воды: [466 1100 1000 1000] кг/с

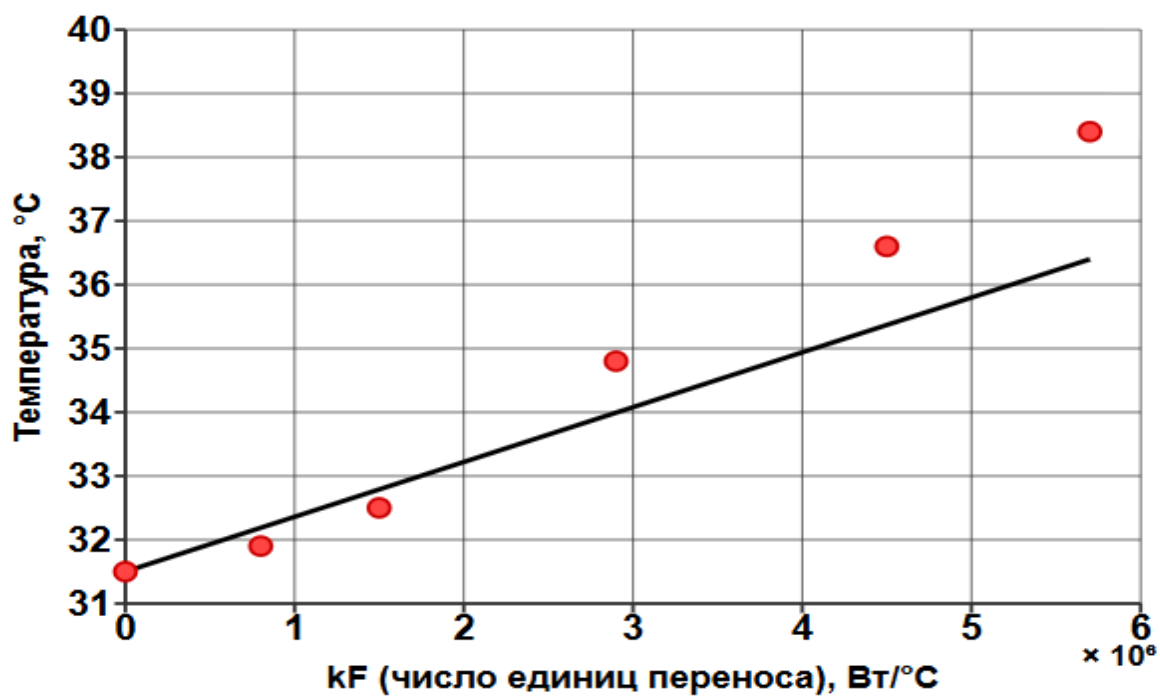


Рисунок 3.8 Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воды: [1100 1100 366 1100] кг/с

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что ухудшение охлаждения циркуляционной воды составляет 3-12°C, что может существенно снижать показатели работы энергетического оборудования.

### **3.2. Анализ влияния скорости ветра на распределение воздуха в башенных градирнях**

Проведенные ранее исследования [138] показали, что неравномерное распределение воздушных и водных потоков по поперечному сечению градирни может вызвать значительное недоохлаждение циркуляционной воды на 5–10°C. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению вакуума в конденсаторе турбины. Известно [38], что ухудшение вакуума на 1 кПа приводит к снижению мощности турбины в конденсационном режиме примерно на 1%. В работе [138] указывается, что повышение температуры циркуляционной воды после градирни может быть вызвано неравномерностью распределения потоков воды и воздуха в её поперечном сечении.

Одним из существенных факторов, влияющих на эффективность работы градирен, являются погодные условия, которые могут значимо влиять на равномерность распределения воздушного потока по сечению и охлаждение циркуляционной воды. В частности, скорость и направление ветра оказывают существенное влияние на распределение воздушного потока, тем самым влияя на общую эффективность работы энергетической установки.

В данном разделе предлагается подход к моделированию влияния ветровых воздействий на эффективность тепломассообменных процессов в башенных градирнях.

Для решения поставленной задачи применяется программный пакет Ansys Fluent, который используется для трёхмерного численного моделирования течения потоков воздуха в градирне при различных значениях скорости ветра. Моделирование осуществляется с использованием структурированной расчётной сетки, состоящей из элементов с характерным

размером 4 м, с применением k-ε модели турбулентности, адаптированной для решения задач внешней аэродинамики промышленных сооружений.

Ветровое воздействие моделируется путем задания профиля скорости на входной границе расчётной области с учётом атмосферного пограничного слоя, а также соответствующих граничных условий для турбулентных характеристик потока. Расчётная область включает как саму градирню, так и достаточную зону окружающего пространства для корректного учёта влияния внешних аэродинамических эффектов

Численный расчет включает в себя следующие этапы:

1. Определение полей скоростей воздушных потоков во внешней для градирен расчётной области, что позволяет визуализировать зоны с различными аэродинамическими характеристиками и области застоя или повышенных скоростей.

2. Определение распределения воздушного потока внутри градирен по поперечному ее сечению с получением массовых расходов для различных значений скорости ветра.

3. Экспорт данных о локальных массовых расходах для каждой ячейки расчетной сетки из Ansys Fluent в формате, пригодном для последующей обработки.

4. Секторальное осреднение воздушных потоков в поперечном сечении градирни, при котором вычисляется интегральный расход воздуха по выделенным секторам путём суммирования потоков от соответствующих внутренних для сектора расчётных ячеек.

Для количественной оценки степени неравномерности распределения потоков воздуха по сечению разработан специальный алгоритм, основанный на статистическом анализе отклонений от среднего значения [142]

**Шаг 1.** Определение среднего расхода воздуха для сектора:

$$G_{\text{ср}} = \frac{G_o}{n},$$

где  $G_0$  – общий расход через поперечное сечение градирни, кг/с;  $n$  – количество секторов.

**Шаг 2.** Вычисление модуля отклонения фактического расхода от среднего для каждого сектора:

$$\Delta_i = |G_i - G_{\text{ср}}|,$$

где  $G_i$  фактический расход через  $i$ -ый сектор, кг/с.

**Шаг 3.** Определение относительного отклонения секторального расхода, выраженное в процентах

$$D_i = \frac{\Delta_i}{G_{\text{ср}}} * 100\%.$$

**Шаг 4.** Суммарное (по всему поперечному сечению) отклонение расхода воздуха по секторам от среднего значения

$$D = \sum_{i=1}^n D_i.$$

Алгоритм расчета представлен на рис. 3.9.

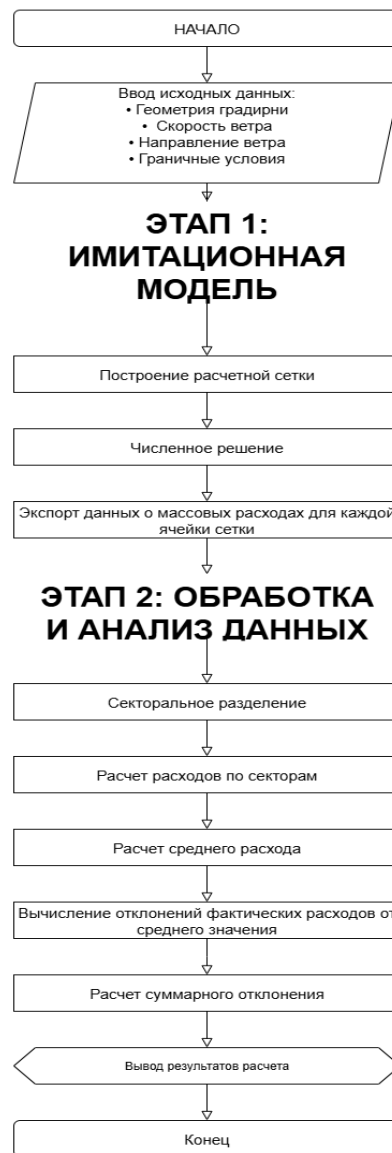


Рисунок 3.9 Алгоритм расчета неравномерности распределения потоков воздуха в градирне

### 3.3. Постановка и решение обратных задач диагностики состояния систем оборотного охлаждения

В контексте математического моделирования градирен принципиальное значение имеет четкое разграничение прямых и обратных задач. Под прямыми задачами в общем случае [101] понимаются задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными будут задачи, в которых известны следствия, а неизвестными выступают причины. В обратных задачах определяющее уравнение и/или начальные, и/или

граничные условия и/или коэффициенты не заданы полностью, но зато 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 заданный набор параметров для каждой конкретной установки может отличаться, что обуславливает возможные 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 [101].

Решение прямой задачи влияния направления и скорости ветра, а также температуры наружного воздуха на распределение потоков теплоносителей внутри градирни рассматривается ранее (см. пп. 2.4, 3.2.). Решение прямой задачи тепломассообмена создает методологическую основу для формулировки и решения обратной задачи диагностики состояния системы оборотного охлаждения.

Система оборотного охлаждения тепловых и атомных электростанций, в частности, включает три критически важные подсистемы: башенная градирня; конденсатор турбины; циркуляционный насос.

При отклонении температуры циркуляционной воды от регламентированных допустимых значений необходима диагностика



технического состояния всех указанных подсистем. Методологически данная задача может быть реализована двумя альтернативными подходами:

Интегральный подход— одновременная диагностика всех трех подсистем в рамках единой обратной задачи;

Последовательный подход— поэтапная диагностика каждой подсистемы отдельно.

С позиций вычислительной эффективности и достоверности результатов предпочтительным представляется последовательный подход, обеспечивающий простоту алгоритмической реализации, однозначность интерпретации результатов и повышенную точность диагностических решений.

Для демонстрации принципиальной возможности постановки и решения обратных задач рассматривается случай диагностики допустимой неравномерности распределения воздуха в поперечном сечении градирни.

**Математическая формулировка обратной задачи:** По заданным значениям температуры охлажденной воды на выходе градирни, известной скорости и направлению ветра, температуре наружного воздуха диагностировать состояние градирни по степени неравномерности распределения воздушных потоков по поперечному сечению градирни.

Разработанный алгоритм решения обратной задачи базируется на результатах решения прямой задачи и включает следующие этапы:

1. Решение прямой задачи и определение температуры охлажденной воды на основе текущих метеоусловий и предполагаемого распределения воздушных потоков;

2. Сопоставление расчетной температуры с экспериментально измеренным значением;

3. При совпадении расчетных и измеренных значений в пределах допустимой погрешности диагностируется удовлетворительное состояние системы распределения воздушных потоков;

4. При существенном расхождении система диагностики сигнализирует о нарушении нормального режима работы и необходимости поиска дефектов.

На рис. 3.10 представлен вариант решения обратной задачи диагностики для тестового примера определения состояния распределения потоков воздуха на основании известной скорости ветра и известной разности температур циркуляционной воды на входе и выходе градирни при заданной скорости ветра. Совпадение неравномерности в виде среднего квадратичного отклонения на графиках показывает, что оборудование работает в штатном режиме. Существенное отличие среднего квадратичного отклонения распределений потоков воздуха на графиках рис. 3.10 а,б, которые показаны штриховыми линиями, свидетельствует о превышении регламентируемой неравномерности распределения расхода воздуха по секторам и о необходимости принятия мер для устранения указанной неравномерности.

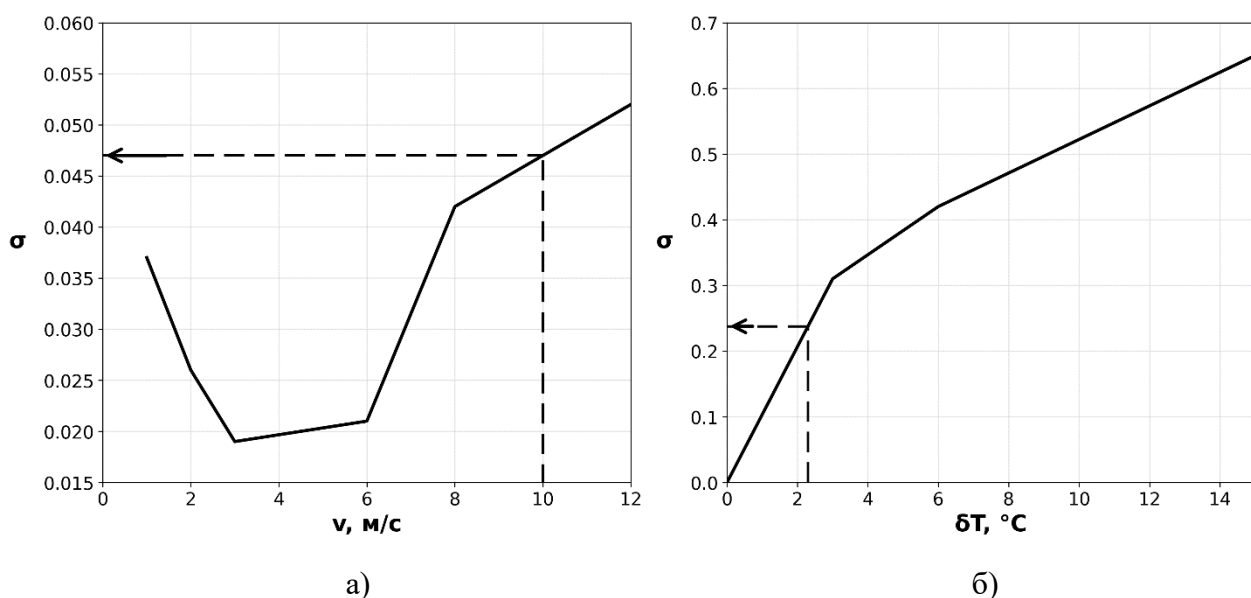


Рисунок 3.10 Порядок численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни: а) – расчетная зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра; б) – зависимость среднего квадратичного отклонения от недоохлаждения циркуляционной воды

Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает расширение круга диагностируемых параметров и включение следующих аспектов:

- диагностика неравномерности распределения потоков циркуляционной воды по поперечному сечению градирни;
- идентификация загрязнения теплообменных поверхностей конденсатора минеральными и органическими отложениями;
- оптимизация углов установки лопастей циркуляционных насосов;
- моделирование различных степеней открытия вентиляционных фрамуг для выравнивания распределения потоков теплоносителей.

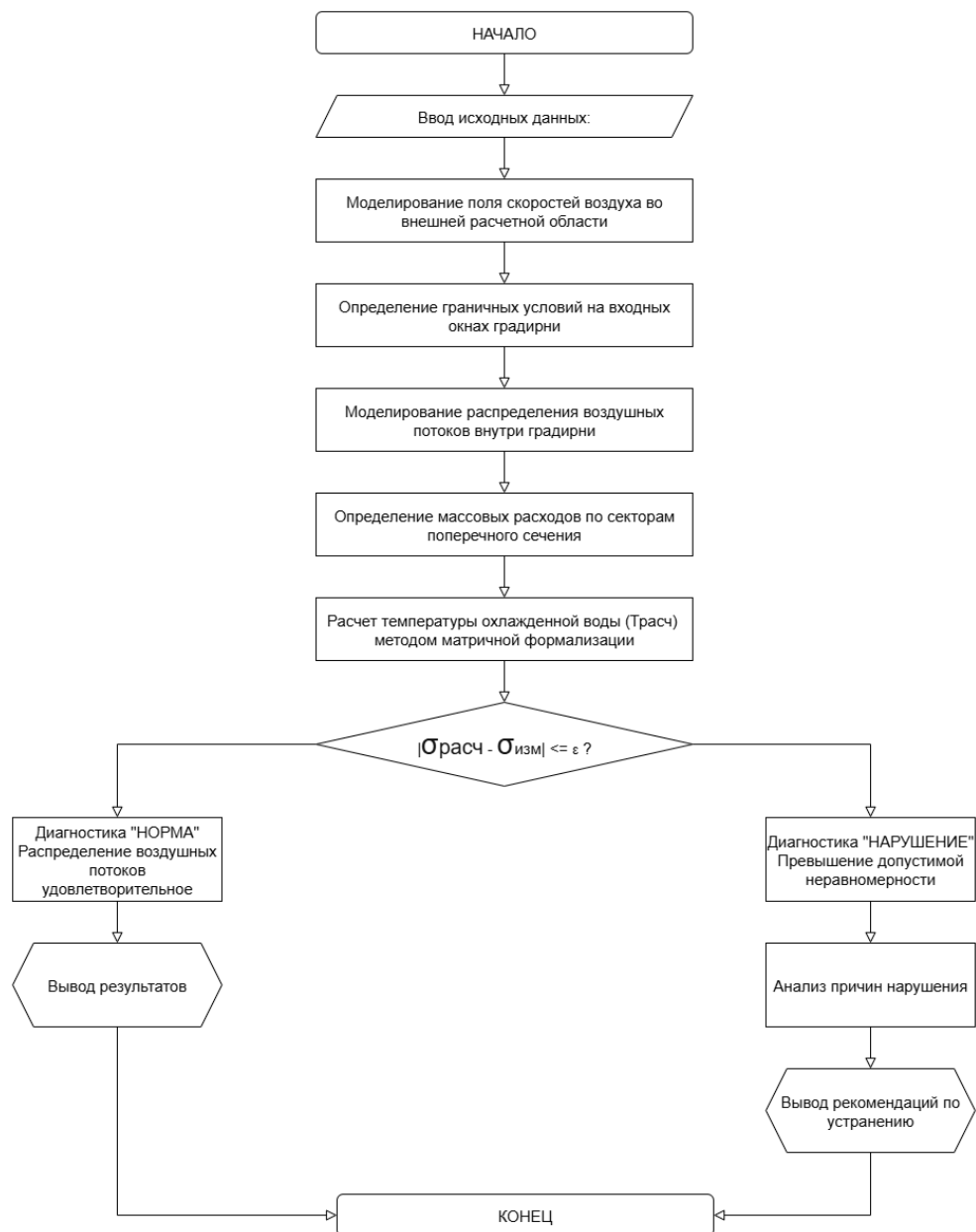


Рисунок 3.11 Алгоритм решения обратной задачи диагностики башенной градирни

### **3.4. Выводы по главе**

1. Проведены расчетные исследования влияния неравномерности распределения воды и воздуха по сечению градирни на эффективность СОО.

2. Разработан подход к исследованию влияния скорости и направления ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни. Определены неравномерности распределения по секторам в поперечном сечении градирни потоков воздуха при различных погодных условиях и скорости ветра. Намечены пути и разработаны рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении за счет управления степенью открытия фрамуг.

3. Сформулирована и решена обратная задачи диагностики неравномерного распределения воздуха по сечению, намечены подходы к решению задач диагностики технического состояния градирни при сочетании нескольких неисправностей в системе оборотного охлаждения.

Материалы главы опубликованы в работах [138,142,143-145].

## **ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Практическая реализация результатов работы проводилась в направлении разработки компьютерной системы мониторинга и диагностики технического состояния башенных градирен, получения свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, адаптации разработанной программной системы для оборудования СОО НВАЭС и Петрозаводской ТЭЦ, использования результатов работы в учебном процессе.

### **4.1. Разработка системы мониторинга и диагностики технического состояния градирен**

#### **4.1.1. Концептуальная модель системы**

Разработанная система мониторинга и диагностики градирни представляет собой интегрированное программно-аппаратное решение, построенное на принципах микросервисной архитектуры [118]. Концептуальная основа системы базируется на современных подходах к проектированию распределенных систем, где каждый функциональный компонент реализован в виде независимого сервиса, обеспечивающего полный жизненный цикл данных от сбора до представления результатов диагностики.

Архитектурное решение системы обусловлено необходимостью обеспечения высокой степени отказоустойчивости и масштабируемости в условиях критически важной инфраструктуры тепловой электростанции. Микросервисная архитектура позволяет достичь декомпозиции сложной системы мониторинга на логически обособленные модули, каждый из которых отвечает за состояние конкретного типа технологического оборудования. Такой подход обеспечивает возможность независимого развития, тестирования и развертывания отдельных компонентов системы без нарушения функционирования других модулей [118].

Фундаментальным принципом построения системы является доменно-ориентированное проектирование при котором границы микросервисов определяются на основе бизнес-доменов контролируемого оборудования [119]. Данный подход обеспечивает минимальную связанность между различными компонентами системы. Автономность развертывания достигается за счет инкапсуляции всех необходимых ресурсов, включая базы данных и бизнес-логику, в рамках отдельных сервисов [122].

Система построена на основе четырехуровневой архитектуры, обеспечивающей последовательную обработку данных от физических датчиков до пользовательских интерфейсов. Уровень сбора данных реализует функции первичного получения измерительной информации с применением современных промышленных датчиков и средств автоматизации. Данный уровень характеризуется высокой степенью территориальной распределенности и требует обеспечения надежного функционирования в условиях промышленной среды с повышенными электромагнитными помехами и температурными воздействиям.

Уровень передачи данных реализован на основе стандартных промышленных протоколов связи, обеспечивающих надежную доставку измерительной информации в условиях ограниченной пропускной способности промышленных сетей. Применение протокола JSON/HTTP для взаимодействия веб-компонентов обеспечивает универсальность и простоту интеграции с существующими информационными системами предприятия. Интеграция с системами автоматизации осуществляется через стандартизированные протоколы Modbus TCP/IP и OPC UA, что гарантирует совместимость с широким спектром промышленного оборудования различных производителей.

Уровень обработки данных представляет собой совокупность специализированных микросервисов, каждый из которых реализует алгоритмы диагностики и анализа для определенного домена оборудования.

Архитектура микросервисов обеспечивает горизонтальную масштабируемость системы за счет возможности независимого масштабирования наиболее нагруженных компонентов. Взаимодействие между микросервисами осуществляется через RESTful API, что обеспечивает слабую связанность компонентов и упрощает процедуры тестирования и отладки [121].

Согласно представленной архитектурной диаграмме, система включает три основных домена оборудования, каждый из которых реализован в виде отдельного микросервиса. Микросервис градирни осуществляет комплексный мониторинг теплообменных процессов, включая анализ температурных режимов охлаждающей воды, эффективности испарительного охлаждения и гидравлических характеристик оросительной системы. Микросервис конденсатора обеспечивает контроль процессов конденсации пара, мониторинг вакуумного режима и анализ эффективности теплопередачи в поверхностях нагрева. Микросервис насосно-вакуумного оборудования реализует диагностику механических систем, включая анализ вибрационных характеристик, энергетических показателей и параметров подшипниковых узлов.

Каждый микросервис включает собственную систему управления данными на базе PostgreSQL, что обеспечивает автономность функционирования и исключает возможность каскадных отказов при недоступности централизованных ресурсов. Такой подход соответствует принципам распределенной обработки данных и позволяет оптимизировать схемы хранения под специфические требования каждого домена оборудования.

Уровень представления реализован в виде единого веб-приложения, построенного на современных технологиях React и обеспечивающего унифицированный доступ ко всем функциональным возможностям системы. Применение паттерна API Gateway позволяет абстрагировать клиентские

приложения от сложности внутренней архитектуры микросервисов и обеспечивает централизованное управление аутентификацией, авторизацией и маршрутизацией запросов.

Интеграция с существующими системами автоматизации электростанции осуществляется через специализированную систему управления NMIweb, которая выполняет функции адаптера между разработанной системой мониторинга и корпоративными информационными системами предприятия. Данное решение обеспечивает минимальное воздействие на существующую IT-инфраструктуру при максимальном использовании доступных данных и ресурсов.

Применение микросервисной архитектуры обеспечивает существенные преимущества в области масштабируемости, надежности и технологической гибкости системы. Возможность независимого масштабирования отдельных сервисов позволяет оптимально распределять вычислительные ресурсы в зависимости от текущей нагрузки и требований к производительности [15]. Изоляция отказов на уровне отдельных микросервисов минимизирует влияние локальных сбоев на общую работоспособность системы, что критически важно для промышленных применений. Технологическая независимость микросервисов обеспечивает возможность выбора оптимальных инструментов и платформ для решения специфических задач каждого домена, а также упрощает процедуры модернизации и развития системы [16].

#### **4.1.1.1. Описание функциональных модулей системы**

Архитектурная диаграмма системы представлена на рис. 4.1. Согласно архитектурной диаграмме система включает в себя как реализованные (отмечены зеленым), так и перспективные модули (отмечены красным).



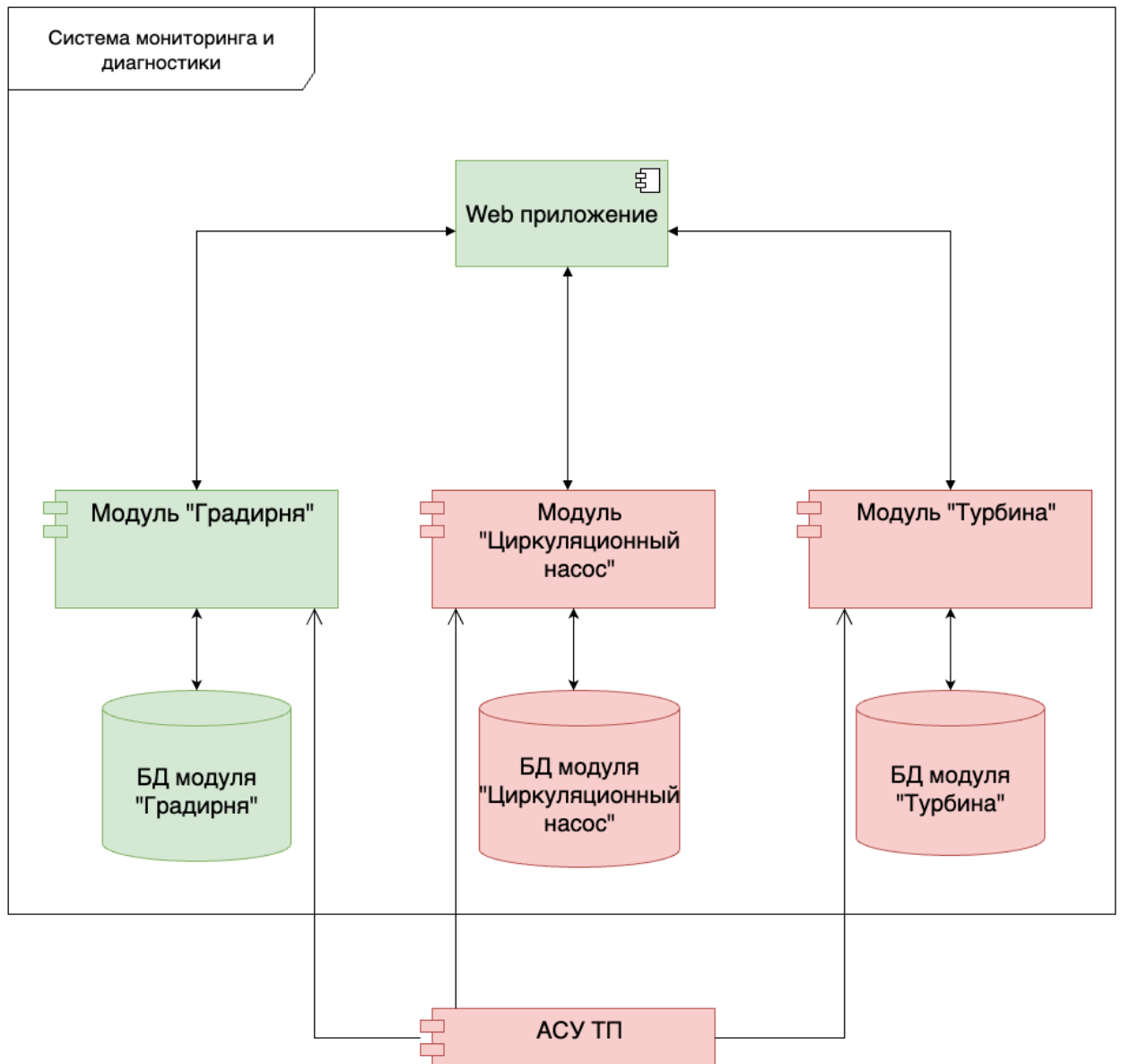


Рисунок 4.1 Архитектурная диаграмма системы

Центральным компонентом системы является веб-приложение, реализованное на базе современных технологий JavaScript и React, которое выполняет функции единой точки доступа для операторского персонала. Данное приложение обеспечивает унифицированный пользовательский интерфейс для взаимодействия со всеми микросервисами системы через стандартизированные API.

Архитектура предусматривает три специализированных микросервиса обработки данных, каждый из которых реализован в виде отдельного Python-контейнера с собственной системой управления данными. Микросервис

градирни осуществляет комплексный анализ тепломассообменных процессов в башенных и вентиляторных градирнях, включая расчет коэффициентов теплопередачи, анализ эффективности испарительного охлаждения. Алгоритмическая база данного модуля включает математические модели расчета тепломассобмена, представленные в предыдущих разделах диссертации, а также метод статистической обработки временных рядов.

Микросервис конденсатора реализует специализированные алгоритмы мониторинга конденсационных установок паровых турбин, обеспечивая контроль вакуумного режима, анализ загрязнения теплообменных поверхностей и диагностику воздушных присосов. Функциональность модуля охватывает расчет коэффициентов теплопередачи в трубных пучках, анализ распределения температурных полей и выявление локальных нарушений циркуляции охлаждающей среды. Интеграция с системами химического контроля позволяет коррелировать параметры теплообмена с качественными характеристиками охлаждающей воды.

Микросервис «Циркуляционный насос» специализируется на мониторинге энергохарактеристик циркуляционного насоса.

Каждый микросервис оснащен собственной базой данных PostgreSQL, что обеспечивает оптимизацию структуры хранения данных под специфические требования предметной области. Градирный модуль оперирует преимущественно временными рядами теплотехнических параметров с высокой частотой дискретизации, что требует эффективных механизмов сжатия и индексации. Конденсаторный модуль характеризуется комплексными многомерными данными о распределенных параметрах теплообмена, требующими специализированных пространственных индексов. Насосно-вакуумный модуль работает с высокочастотными вибрационными сигналами, что предъявляет особые требования к производительности операций записи и буферизации данных.

#### 4.1.1.2. Принципы построения системы

При разработке системы были заложены следующие основополагающие принципы:

- **Модульность архитектуры.** Система построена по модульному принципу, что обеспечивает возможность независимой разработки, тестирования и сопровождения отдельных компонентов. Каждый модуль выполняет четко определенные функции и взаимодействует с другими через стандартизированные интерфейсы.

- **Масштабируемость.** Архитектура системы позволяет добавлять новые модули мониторинга без существенной переработки существующих компонентов. Это обеспечивает возможность расширения функциональности системы по мере развития технологических процессов электростанции.

- **Отказоустойчивость.** Система спроектирована с учетом требований высокой надежности промышленных объектов. Предусмотрены механизмы резервирования критически важных компонентов и автоматического восстановления работоспособности при отказах.

- **Открытость интерфейсов.** Использование стандартных промышленных протоколов и открытых интерфейсов обеспечивает совместимость с существующими системами автоматизации электростанции и возможность интеграции с системами верхнего уровня.

#### 4.1.1.3. Функциональная архитектура

Функциональная архитектура системы мониторинга градирни включает следующие основные подсистемы:

**1. Подсистема сбора и предварительной обработки данных** выполняет функции:

- Непрерывный сбор данных с датчиков температуры, расхода, давления;
- Первичная фильтрация и валидация измерительной информации;
- Синхронизация данных от различных источников;

- Формирование унифицированных структур данных.

## **2. Подсистема диагностики и анализа реализует:**

- Алгоритмы расчета интегральных показателей эффективности;
- Методы выявления аномальных режимов работы;
- Прогнозирование развития неисправностей;
- Формирование диагностических заключений.

## **3. Подсистема визуализации и пользовательского интерфейса обеспечивает:**

- Отображение текущего состояния градирни;
- Представление трендов основных параметров;
- Визуализацию результатов диагностики;
- Формирование отчетов и документации.

## **4. Подсистема архивирования и управления данными включает:**

- Долговременное хранение измерительной информации;
- Систему управления базами данных;
- Механизмы резервного копирования;
- Средства экспорта и импорта данных.

### **4.1.2. Алгоритмы диагностики технического состояния**

#### **4.1.2.1. Методология диагностического анализа**

Диагностика технического состояния градирни основана на комплексном анализе измеряемых параметров и расчете интегральных показателей эффективности. Разработанная методология включает несколько уровней анализа данных.

**Первый уровень - контроль превышения нормативных границ.** На этом уровне осуществляется непрерывное сравнение измеряемых параметров с установленными нормативными значениями. Система автоматически выявляет случаи превышения предельно допустимых значений и формирует соответствующие предупреждения.

### **Второй уровень - анализ интегральных показателей.**

Рассчитываются комплексные показатели эффективности работы градирни, учитывающие взаимосвязь различных параметров. Основным интегральным показателем является индекс технического состояния, характеризующий отклонение фактических параметров от оптимальных значений.

**Третий уровень - трендовый анализ.** Исследуется динамика изменения параметров во времени для выявления скрытых тенденций деградации технического состояния. Применяются методы математической статистики и цифровой обработки сигналов для выделения значимых трендов на фоне случайных флуктуаций.

#### **4.1.2.2. Алгоритм расчета индекса технического состояния**

Центральным элементом системы диагностики является алгоритм расчета индекса технического состояния градирни. Данный показатель представляет собой безразмерную величину, характеризующую степень отклонения фактического режима работы от оптимального.

Индекс технического состояния  $K$  определяется как отклонение текущего значения параметра от нормативного, отнесенное к нормативному значению и рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{(P_i - P_i^H),}{P_i^H}$$

где  $P_i$  - текущее значение  $i$ -го контролируемого параметра,  $P_i^H$  - нормативное значение  $i$ -го параметра.

Основным контролируемым параметром является температура охлаждающей воды на входе и выходе из градирни.

#### **4.1.2.3. Алгоритмы выявления аномальных режимов**

Для своевременного обнаружения нештатных ситуаций в работе градирни реализован комплекс алгоритмов выявления аномалий, основанный на статистических методах анализа данных.

1. **Алгоритм контроля статистических границ** основан на принципе "трех сигм" и предназначен для выявления резких отклонений параметров от нормальных значений. Границы нормального диапазона определяются как:

- Верхняя граница:  $\mu + 3\sigma$ ,
- Нижняя граница:  $\mu - 3\sigma$ ,

где  $\mu$  - математическое ожидание параметра,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение.

2. **Алгоритм анализа взаимосвязей параметров** основан на контроле корреляционных зависимостей между различными измеряемыми величинами. Нарушение устойчивых корреляционных связей может свидетельствовать о развитии неисправностей в оборудовании.

#### 4.1.2.4. Система классификации состояний оборудования

Разработана трехуровневая система классификации технического состояния градирни:

**"Нормальное состояние"** - все контролируемые параметры находятся в пределах установленных нормативов, индекс технического состояния не превышает 1.0, отсутствуют значимые негативные тренды.

**"Состояние с отклонениями"** - отдельные параметры выходят за границы оптимального диапазона, но остаются в пределах допустимых значений, индекс технического состояния находится в диапазоне 1.0-1.2.

**"Критическое состояние"** - один или несколько параметров превышают предельно допустимые значения, индекс технического состояния превышает 1.2, наблюдаются устойчивые негативные тренды.

#### 4.1.3. Программная реализация системы

##### 4.1.3.1. Технологические и архитектурные решения

Программная реализация системы мониторинга градирни выполнена с использованием современного технологического стека, обеспечивающего высокую производительность, масштабируемость и удобство сопровождения

в условиях промышленной эксплуатации. Архитектурное решение основано на разделении ответственности между клиентской и серверной частями системы с четким определением интерфейсов взаимодействия [25].

Серверная часть системы реализована на базе микросервисной платформы с использованием языка программирования Python и современных фреймворков для разработки распределенных систем. Выбор Python обусловлен его широкими возможностями в области научных вычислений, наличием развитой экосистемы библиотек для анализа данных, а также высокой продуктивностью разработки [26]. Каждый микросервис построен на основе асинхронного веб-фреймворка FastAPI, обеспечивающего высокую производительность обработки входящих запросов.

Система управления данными реализована на основе объектно-реляционной СУБД PostgreSQL, выбор которой обусловлен высокой надежностью, поддержкой сложных типов данных и расширенными возможностями индексации временных рядов. Каждый микросервис использует собственную схему базы данных, что обеспечивает изоляцию данных и возможность независимой оптимизации структур хранения.

Обработка временных рядов измерительных данных реализована с использованием специализированных библиотек NumPy и Pandas, обеспечивающих эффективные операции над многомерными массивами и табличными структурами данных. Алгоритмы цифровой обработки сигналов реализованы на базе библиотеки SciPy, включающей широкий спектр методов фильтрации, спектрального анализа и статистической обработки.

Межсервисное взаимодействие организовано на основе RESTful API с использованием JSON для сериализации данных. Каждый микросервис предоставляет стандартизированные конечные точки для получения исторических данных, выполнения аналитических запросов и настройки параметров диагностических алгоритмов. Аутентификация и авторизация реализованы с использованием JWT-токенов, обеспечивающих безопасное

взаимодействие между компонентами системы без необходимости централизованного хранения сессий

Система кэширования построена на основе Redis, обеспечивающего высокопроизводительное хранение часто запрашиваемых данных в оперативной памяти. Кэширование применяется для результатов сложных аналитических вычислений, агрегированных показателей и конфигурационной информации, что значительно снижает нагрузку на базы данных и повышает отзывчивость системы.

Клиентская часть системы разработана на базе библиотеки React, обеспечивающей создание интерактивных пользовательских интерфейсов с высокой отзывчивостью и эффективным управлением состоянием приложения. Использование компонентного подхода позволяет создавать переиспользуемые элементы интерфейса и упрощает поддержку кода. Управление состоянием приложения реализовано с использованием встроенных хуков React, что обеспечивает предсказуемость поведения интерфейса и упрощает отладку.

Визуализация данных реализована с использованием библиотеки Recharts, специально адаптированной для построения интерактивных графиков и диаграмм в React-приложениях [37]. Библиотека обеспечивает высокую производительность при отображении больших объемов данных и поддерживает широкий спектр типов визуализации, включая временные ряды, точечные диаграммы и тепловые карты.

#### **4.1.3.2. Модульная архитектура программного обеспечения**

Программное обеспечение системы построено по модульному принципу, что обеспечивает гибкость разработки и упрощает сопровождение. Основными модулями являются:

**Модуль управления приложением** выполняет функции координации работы всех компонентов системы. Он управляет состоянием приложения,



обрабатывает пользовательские действия и обеспечивает навигацию между различными разделами системы.

**Модуль боковой панели навигации** реализует интерфейс навигации по функциональным разделам системы. Компонент поддерживает иерархическую структуру меню и обеспечивает интуитивно понятную навигацию.

**Модуль диагностики градирни** является центральным компонентом системы диагностики. Он реализует алгоритмы расчета индексов технического состояния, визуализацию результатов диагностики и формирование диагностических сообщений.

**Модуль анализа трендов** обеспечивает анализ временных зависимостей контролируемых параметров. Компонент позволяет пользователю выбирать интересующие параметры и отображать их динамику в виде интерактивных графиков.

**Модуль схематического представления** предоставляет графическое представление конструкции градирни с возможностью интерактивного взаимодействия с элементами схемы.

#### 4.1.3.3. Конфигурационная система

Для обеспечения гибкости настройки системы под различные типы градирен разработана конфигурационная система, которая позволяет:

- Определять состав контролируемых модулей оборудования;
- Настраивать параметры диагностических алгоритмов;
- Конфигурировать пользовательский интерфейс;
- Управлять доступом к различным функциональным возможностям;

Конфигурационная система построена на принципах декларативного описания, что упрощает настройку и адаптацию системы под конкретные условия эксплуатации.

#### 4.1.4. Пользовательские интерфейсы системы

##### 4.1.4.1. Главный интерфейс и система навигации

Главный интерфейс системы мониторинга градирни построен по принципу дашборд-приложения с боковой панелью навигации. Интерфейс разделен на несколько функциональных зон:

**Область навигации** расположена в левой части экрана и содержит:

- Логотип системы в верхней части панели
- Иерархическое меню с основными разделами системы
- Кнопку "Назад" для возврата к предыдущему уровню навигации (при нахождении в подразделе)
- Индикаторы состояния активных разделов

**Основная рабочая область** занимает центральную и правую части экрана и предназначена для отображения содержимого выбранного раздела. Область динамически изменяется в зависимости от активного модуля и может содержать графики, схемы, таблицы данных или диагностические панели.

Система навигации поддерживает двухуровневую структуру меню:

- Первый уровень - основные функциональные модули (Турбина, Градирня, Циркуляционный насос)
- Второй уровень - специализированные разделы каждого модуля (Схема, Тренды, Диагностика)

Макет главного интерфейса представлен на рис. 4.2

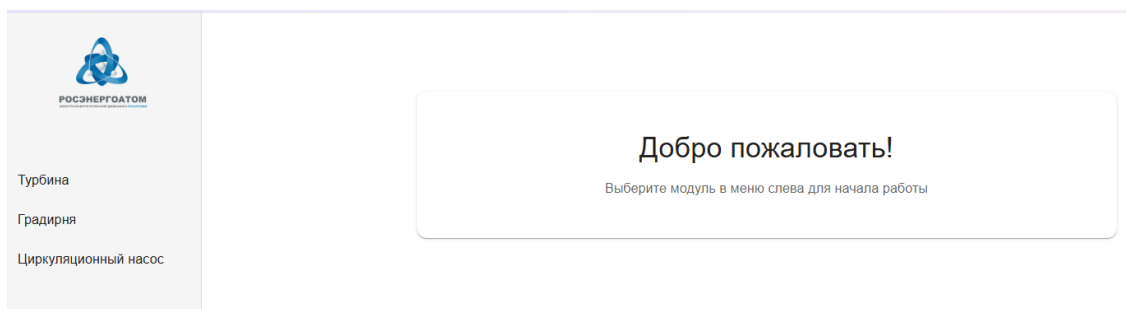


Рисунок 4.2 Главный экран интерфейса

#### 4.1.4.2. Интерфейс модуля диагностики градирни

Модуль диагностики градирни представляет собой комплексную панель мониторинга, включающую несколько взаимосвязанных компонентов визуализации.

**Панель температурного мониторинга** отображает график изменения температуры охлаждающей воды во времени. График включает:

- Основную кривую изменения температуры с точками данных;
- Горизонтальные линии нормативных границ (верхний и нижний пределы);
- Цветовую индикацию критических отклонений;
- Интерактивные подсказки с детальной информацией при наведении курсора;

**Панель индексов технического состояния** визуализирует динамику изменения расчетного индекса технического состояния градирни. Особенности представления:

- Основная кривая индекса с выделением критических точек
- Цветовые зоны, соответствующие различным уровням технического состояния
- Пороговые линии для зон "норма", "внимание" и "критическое состояние"
- Масштабируемая временная ось с возможностью детализации периодов

**Журнал диагностических сообщений** представляет хронологический список всех выявленных отклонений и аномалий. Каждое сообщение содержит:

- Временную метку события
- Описание выявленного отклонения с указанием конкретных значений параметров
- Уровень критичности (предупреждение или критическое состояние)
- Рекомендации по устранению выявленных проблем
- Цветовую индикацию уровня важности сообщения

Интерфейс модуля диагностики представлен на рис. 4.3



НАЗАД

Схема

Тренды

Диагностика

## Диагностика системы охлаждения

Период

Месяц

Неделя

Месяц

Квартал

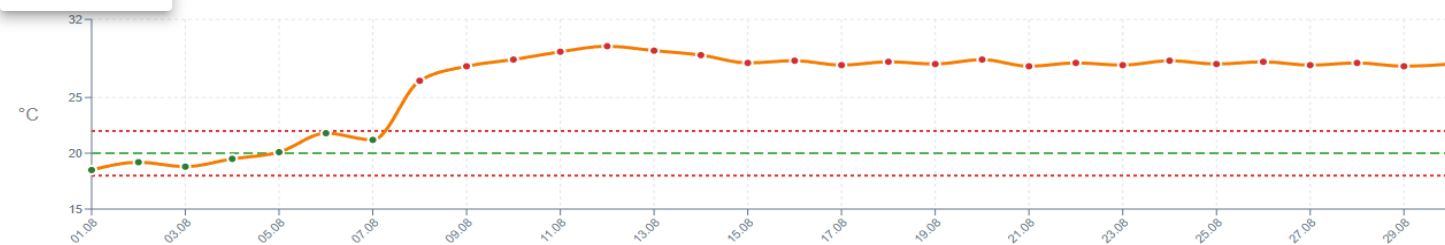
Критично: 23

Внимание: 0

Норма: 7 дней

температура охлаждающей воды

Норма: 18°C - 22°C (оптимально: 20°C)



## Индекс технического состояния (ИТС)

Оптимально: 0.90 - 1.10 | Критично: <0.75 или >1.25

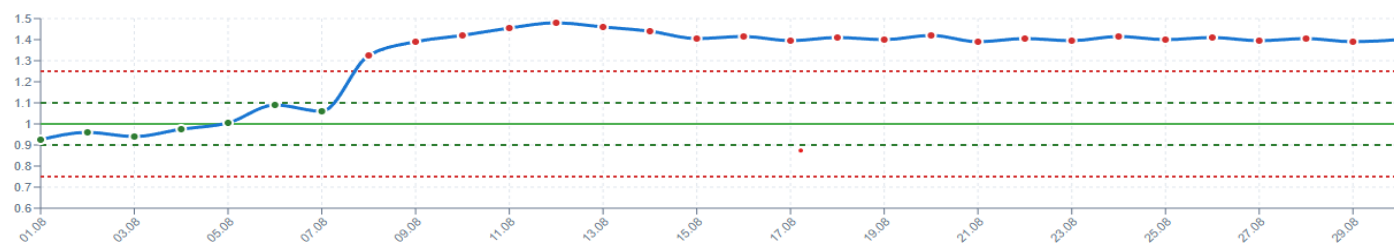


Рисунок 4.3

Интерфейс модуля диагностики

#### 4.1.4.3. Интерфейс анализа трендов

Модуль анализа трендов предоставляет пользователю гибкие средства для исследования динамики изменения различных параметров градири.

**Панель выбора параметров** включает:

- Выпадающий список доступных для анализа параметров
- Кнопку добавления выбранного параметра к анализируемым
- Область отображения активных параметров в виде цветных меток
- Возможность удаления параметров из анализа

**Область визуализации трендов** динамически адаптируется под количество выбранных параметров:

- Каждый параметр отображается отдельным графиком с индивидуальным масштабированием;
- Графики синхронизированы по временной оси;
- Для каждого параметра отображаются пороговые значения;
- Поддерживается масштабирование и панорамирование графиков

**Система конфигурации параметров** позволяет настраивать:

- - Цветовые схемы для различных параметров;
- - Диапазоны отображения значений;
- - Пороговые значения для каждого параметра;
- - Единицы измерения и форматирование данных;

Интерфейс анализа трендов представлен на рис. 4.4

## Система мониторинга параметров

Выберите контролируемый параметр:

Температура охлаждающей воды ▾

ДОБАВИТЬ

Температура охлаждающей воды ✕

Температура охлаждающей воды

Критический уровень



Последнее измерение: 29.6 °C

Обновлено: 12.08 в 08:00

Рисунок 4.4 Интерфейс анализа трендов

### 4.1.5. Схематический интерфейс

Модуль схематического представления обеспечивает графическую визуализацию конструкции и состояния градирни.

**Основное изображение схемы** представляет техническую схему градирни с выделением основных конструктивных элементов. Изображение поддерживает:

- Масштабирование для детального рассмотрения отдельных элементов;
- Интерактивное взаимодействие с активными зонами схемы;
- Наложение индикаторов состояния на соответствующие элементы;
- Всплывающие подсказки с технической информацией;

**Панель легенды** содержит расшифровку условных обозначений и цветовых кодов, используемых на схеме. Включает описание различных состояний оборудования и их графического представления.

Схематический интерфейс представлен на рис. 4.5.

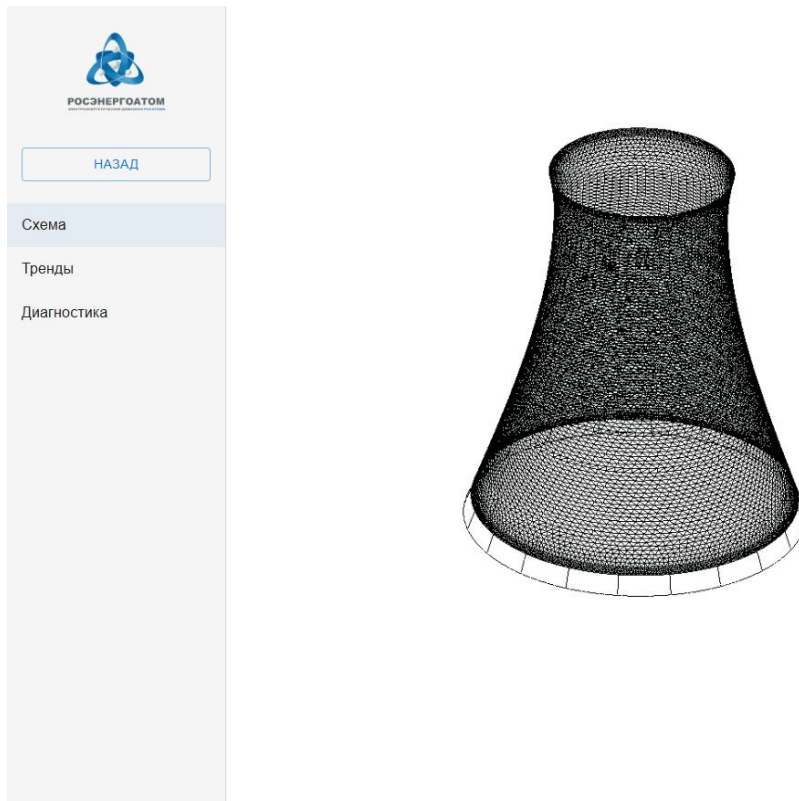


Рисунок 4.5      Схематический интерфейс системы

## 4.2. Система мониторинга и диагностики градирен Нововоронежской АЭС

В рамках настоящей работы были проведены комплексные исследования оборудования систем оборотного охлаждения энергоблоков №4 Нововоронежской АЭС. Выбор данных объектов обусловлен их репрезентативностью для современной атомной энергетики России, а также различиями в конструктивных решениях и режимах эксплуатации, что позволяет получить более полную картину процессов, протекающих в СОО различных поколений энергоблоков.

Энергоблок №4 Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-440 представляет собой типовой проект второго поколения отечественных АЭС. Система оборотного охлаждения данного блока включает башенные градирни традиционной конструкции, что делает полученные экспериментальные



данные применимыми для значительного числа действующих энергоблоков аналогичного типа.

Основными задачами исследований являлись:

1. Создание математической модели влияния ветровых характеристик на аэродинамические процессы в башенных градирнях, включающей:
  - Исследование зависимости распределения воздушных потоков от скорости и направления ветра в диапазоне 0-15 м/с;
  - определение критических скоростей ветра, при которых возникает максимальная неравномерность потоков теплоносителей;
2. Создание интегрированной модели влияния комплекса метеорологических факторов на эффективность работы градирен.
3. Экспериментальная проверка адекватности созданных математических моделей.

По результатам экспериментальных исследований были разработаны и верифицированы математические модели оборудования СОО, учитывающие специфические особенности конструкции и режимов эксплуатации энергоблоков различных поколений. Полученные модели позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать эффективность работы систем охлаждения при различных внешних воздействиях и эксплуатационных нагрузках, что создает основу для оптимизации режимов работы и повышения энергетической эффективности АЭС.

Основные технические характеристики башенных испарительных градирен энергоблока №4 НАЭС представлены в табл. 4.1.

**Таблица. 4.1 Основные технические характеристика башенных испарительных градирен**

№	Технические характеристики	Единицы
1	Площадь орошения	4000 м <sup>2</sup>
2	Высота оросителя	2,45 м
3	Номинальная плотность орошения	508 м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ч
4	Максимальный расход воды на градирню	32000 м <sup>3</sup> /ч
5	Номинальный расход воды на градирню	28000 м <sup>3</sup> /ч

Окончание таблицы 4.1

№	Технические характеристики	Единицы
6	Среднегодовая температура воды в чаше градирни	22,6 °С
7	Высота башни	91047 мм
8	Диаметр опорного кольца башни	80000 мм
9	Диаметр наименьшего кольца башни	40600 мм
10	Диаметр верхнего кольца башни	43424 мм
11	Высота воздушных окон	5500 мм
12	Ёмкость бассейна	10000 м <sup>3</sup>
13	Создаваемый напор перед соплами	1 м. вод.ст.
14	Количество разбрызгивающих сопел	3640 шт.

На основе технических характеристик можно выделить следующие ключевые особенности градирни энергоблока №4:

Геометрические параметры:

- Отношение высоты к диаметру основания:  $H/D = 91,047/80 = 1,14$
- Степень сужения башни:  $D_{\min}/D_{\max} = 40,6/80 = 0,51$
- Удельная площадь орошения:  $4000/1440 = 2,78 \text{ м}^2/\text{МВт}$

Гидравлические характеристики:

- Удельная плотность орошения при номинальном режиме:  $28000/4000 = 7 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
- Количество сопел на единицу площади:  $3640/4000 = 0,91 \text{ шт}/\text{м}^2$
- Высота слоя воды в бассейне:  $10000/4000 = 2,5 \text{ м}$

Аэродинамические особенности:

- Площадь воздушных окон:  $\pi \times 80 \times 5,5 = 1382 \text{ м}^2$
- Отношение площади окон к площади орошения:  $1382/4000 = 0,35$
- Скорость воздуха в окнах при номинальном режиме:  $\sim 3,5 \text{ м}/\text{с}$

В современных условиях эксплуатации башенных градирен атомных электростанций особую актуальность приобретает проблема комплексного учета влияния метеорологических факторов на эффективность теплообменных процессов. Многолетний опыт эксплуатации энергоблоков Нововоронежской АЭС свидетельствует о том, что вариации температуры и влажности наружного воздуха, наряду с динамикой ветровых характеристик,

оказывают определяющее воздействие на характер распределения воздушных потоков в башенных градирнях, что непосредственно отражается на температурном режиме циркуляционной воды и, как следствие, на общей эффективности работы турбоустановок.

Результаты фундаментальных исследований, представленные в разделах 2.2 и 2.4, убедительно продемонстрировали критическую зависимость охлаждающей способности градирен от равномерности распределения теплоносителей по поперечному сечению установки. Установлено, что даже незначительная неравномерность может приводить к снижению эффективности охлаждения на 6-7%, что представляет серьезную угрозу для стабильной работы энергоблоков АЭС. Среди факторов, определяющих характер распределительных процессов, ветровое воздействие занимает особое место, поскольку способно кардинально нарушать естественную циркуляцию воздушных масс и формировать локальные зоны с аномальной интенсивностью теплообмена.

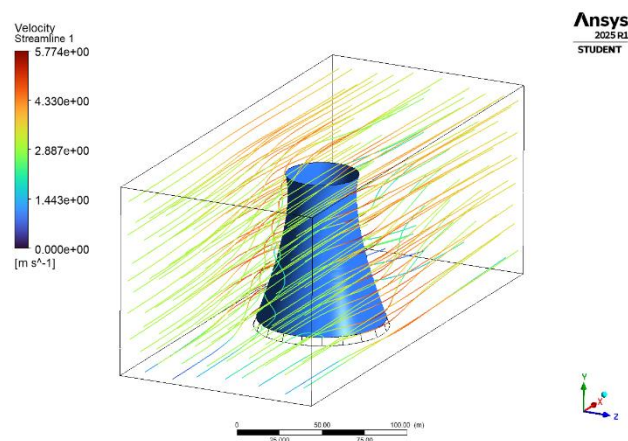
В контексте эксплуатационных особенностей Нововоронежской АЭС данная проблематика приобретает дополнительную сложность, обусловленную необходимостью обеспечения оптимальных режимов работы энергоблоков различных технологических поколений. Каждый из эксплуатируемых блоков характеризуется специфическими требованиями к параметрам системы технического водоснабжения, что предъявляет повышенные требования к точности моделирования ветрового воздействия и разработке дифференцированных методов диагностики технического состояния оборудования градирни.

Для решения обозначенного комплекса задач в настоящем разделе разрабатывается современная математическая модель, интегрирующая влияние скорости и направления ветра на аэродинамические процессы в башенных градирнях с возможностью последующей формулировки обратных задач диагностики состояния оборудования систем оборотного охлаждения.

Методологическую основу проводимых исследований составляет алгоритм постановки и решения обратных задач диагностики, детально представленный в разделе 2.5, что обеспечивает системность подхода и преемственность разработанных методов.

Решение прямой задачи влияния ветровых характеристик на распределение воздушных потоков в башенной градирне осуществляется с применением современного программного комплекса Ansys Fluent, обеспечивающего высокую точность моделирования сложных аэродинамических процессов. Для комплексного анализа тепломассообменных явлений применяется матричная формализация представления тепловых и материальных балансов, подробно изложенная в разделе 2.1.

Первый этап численного моделирования внешней расчетной области градирни, выполняемый в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 3.11, иллюстрируется результатами, показанными на рис. 4.6.



**Рисунок 4.6 Внешний вид башенной градирни и результаты первого этапа моделирования внешней расчетной области градирни в виде линий тока воздуха снаружи градирни**

Физический механизм работы башенной градирни основан на принципе естественной тяги, возникающей вследствие различий плотности нагретых и

холодных воздушных масс. Поступление атмосферного воздуха осуществляется через систему нижних вентиляционных окон, после чего воздушный поток поднимается по внутреннему объему конструкции. Охлаждаемая вода, подаваемая через верхнюю распределительную систему, движется навстречу восходящему воздушному потоку, обеспечивая противоточный теплообмен. Интенсивная передача тепла происходит за счет температурного градиента и частичного испарения воды, после чего охлажденная вода аккумулируется в сборном бассейне для последующей подачи циркуляционными насосами в турбинный конденсатор.

Комплексный анализ влияния метеорологических условий — включая скорость и направление ветра, а также температуру окружающего воздуха — на характер распределения теплоносителей внутри градирни реализуется посредством многоэтапного подхода.

На первом этапе выполняется детальное моделирование аэродинамической картины во внешнем пространстве, окружающем градирню. Основная цель данного этапа заключается в получении высокоточных граничных условий, которые впоследствии используются при расчете внутренних потоков. В рамках численной модели нижние воздухозаборные окна градирни задаются как внутренние интерфейсы (тип «interior»), тогда как для внешних границ расчетной области применяется граничное условие «PressureOutlet», обеспечивающее естественный выход воздуха за пределы моделируемой зоны.

По достижении установившегося режима моделирования из расчетной области экспортируются детальные распределения скоростей и полного давления на поверхности воздухозаборных окон. Полученные данные формируют граничные условия для второго этапа — моделирования внутренней аэродинамики градирни. Результаты первого этапа наглядно демонстрируются на рис. 4.6, где визуализированы линии тока воздушного потока, обтекающего внешнюю поверхность градирни.

Второй этап моделирования посвящен расчету внутреннего объема градирни с основной целью детального анализа неравномерности распределения воздушных потоков в пределах конструкции. Граничные условия для данного этапа формируются на основе результатов первого этапа — полей давления и скоростей воздуха в зонах воздухозаборных окон.

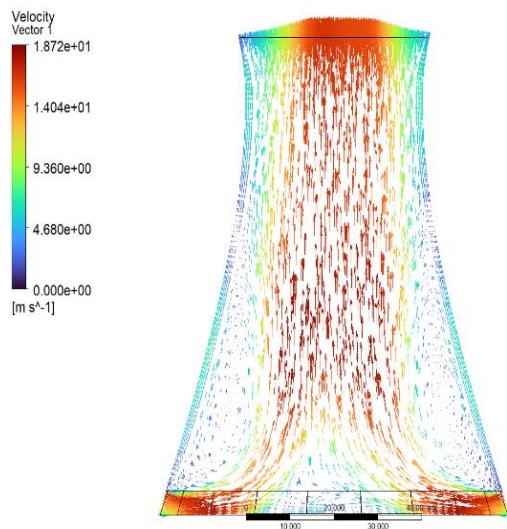
В рамках второго этапа решается прямая задача, охватывающая расчет пространственного распределения воздушных потоков, определение массовых расходов через выделенные участки поперечного сечения и идентификацию зон с ослабленной циркуляцией воздуха, которые могут указывать на формирование застойных областей. Полученные данные позволяют провести комплексную оценку потенциальных проблем в функционировании системы охлаждения, связанных с нарушением равномерности воздушного потока.

Численные расчеты были проведены для широкого диапазона скоростей ветра: 1, 2, 3, 6, 9 и 12 м/с. Такой спектр параметров обеспечивает возможность всестороннего анализа влияния ветровой нагрузки в условиях как слабого, так и интенсивного ветра, что критически важно для оценки устойчивости и эффективности функционирования градирни при различных метеорологических сценариях.

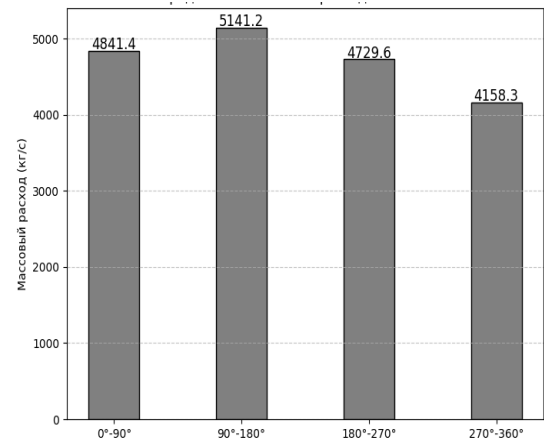
На рис. 4.7 представлены характерные распределения скоростей воздуха в объеме градирни при трех репрезентативных скоростях ветра: 1 м/с (рис. а), 3 м/с (рис. в) и 12 м/с (рис. д). Параллельно приведены соответствующие графики распределения массовых расходов воздуха по секторам поперечного сечения градирни: 1 м/с (рис. б), 3 м/с (рис. г) и 12 м/с (рис. е).

Полученные результаты моделирования обеспечивают не только наглядную визуализацию внутренней структуры воздушных потоков, но и количественную оценку степени неравномерности распределения с выявлением зависимости характера течения от интенсивности ветра. Такой комплексный подход гарантирует глубокое понимание аэродинамических

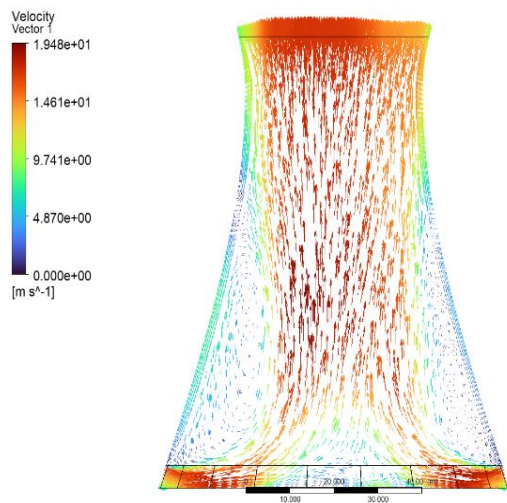
процессов внутри градирни, что служит основой для дальнейшего совершенствования конструктивных решений и оптимизации эксплуатационных режимов.



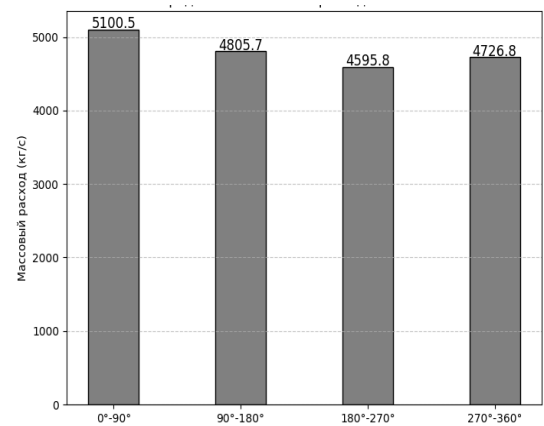
а)

Ans  
20  
STUDE

б)



в)

Ans  
20  
STUDE

г)

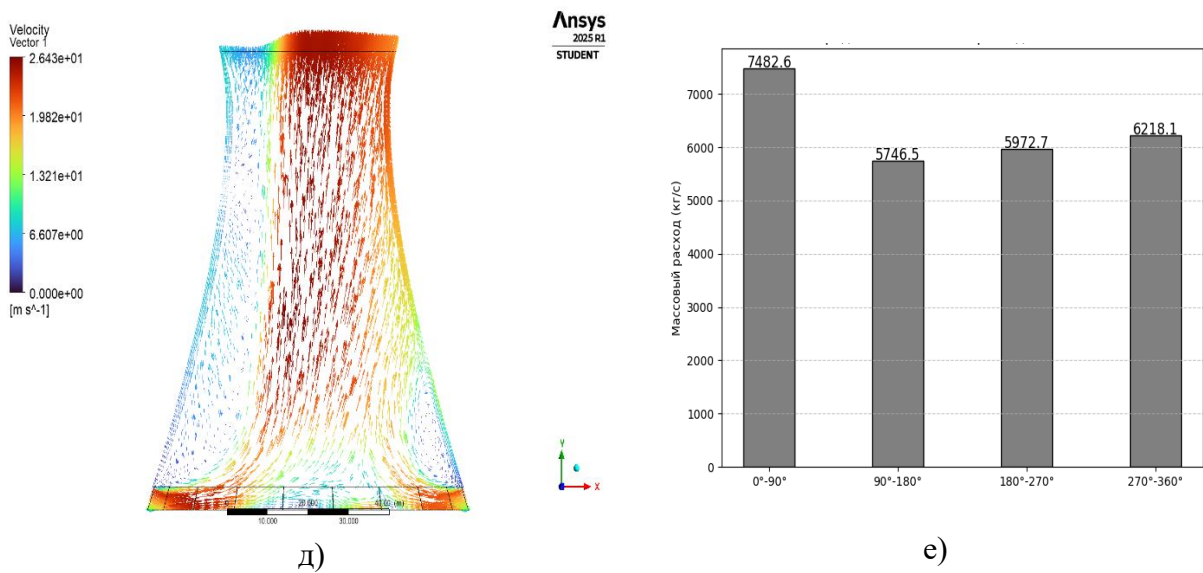


Рисунок 4.7 Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде полей скоростей воздуха внутри градирни (а), в), д)) и распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении (б), г), е)) градирни при разных скоростях ветра: а),б) – 1; в),г) – 3; д),е) – 12 м/с

Неравномерность распределения при больших скоростях ветра оказывает непосредственное влияние на техническое состояние градирни, что находит отражение в соответствующих индексах диагностической системы. При превышении критических параметров отклонения ветра в журнале сообщений системы диагностики отображается соответствующее уведомление, представленное на рисунке 4.8.

Журнал сообщений

01.08.2023:	Индекс охлаждения (0.92) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
01.08.2023:	Температура охлаждающей воды (23°C) вне нормативных границ. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
02.08.2023:	Индекс охлаждения (0.93) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
08.08.2023:	Индекс охлаждения (1.08) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
09.08.2023:	Индекс охлаждения (1.06) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
15.08.2023:	Индекс охлаждения (0.93) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.
16.08.2023:	Индекс охлаждения (0.91) вне оптимального диапазона. Рекомендация: скорректируйте положение воздухозаборных окон, либо проверьте неисправности оросительной системы.

Рисунок 4.8 Журнал сообщений в системе диагностики



Влияние выявленной неравномерности также находит отражение в индексе технического состояния градирни, детальное описание которого приведено в соответствующем разделе, а графическое представление показано на рисунке 4.9.

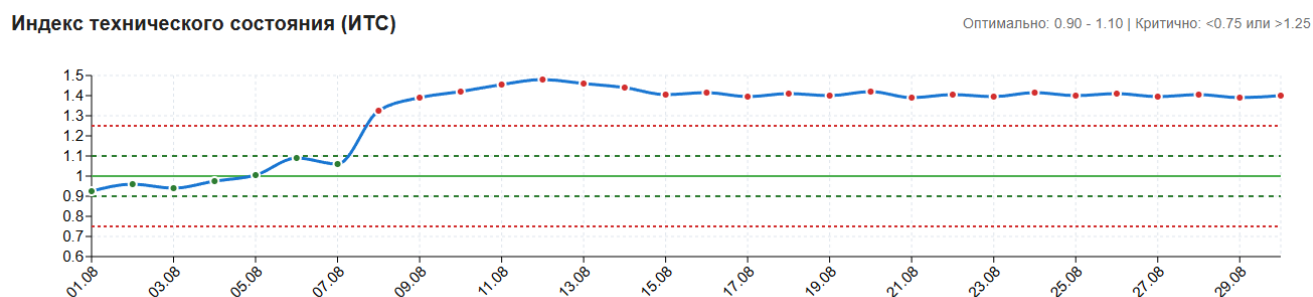


Рисунок 4.9 Экранная форма модуля диагностики

Результаты второго этапа решения прямой задачи, отражающие распределение массового расхода воздуха по поперечному сечению градирни, были получены для всех рассмотренных скоростей ветра и сведены в таблицу 4.2. Эти данные позволяют провести комплексный анализ степени равномерности воздушного потока внутри конструкции при различных условиях внешней среды.

**Таблица. 4.2 Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении градирни при различных скоростях ветра**

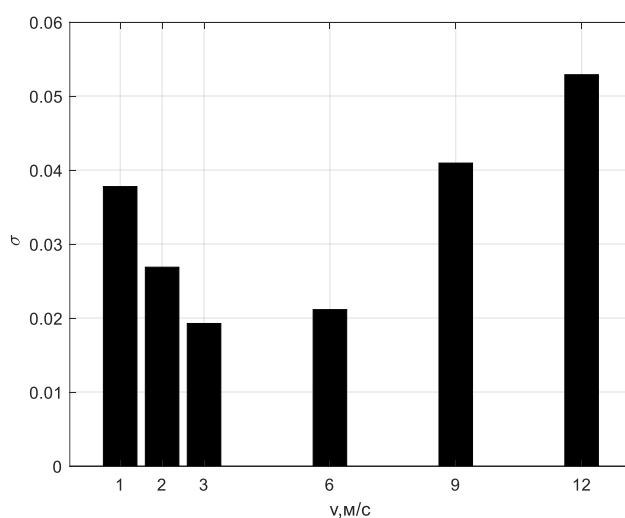
Скорость ветра, м/с	Массовый расход, кг/с				Суммарный расход, кг/с
	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	
1	4841,3551	5141,2289	4729,5524	4158,281	18870,4
2	5035,7469	4372,4252	4919,471	4663,4834	18991,1
3	5100,5319	4805,7128	4595,7931	4726,7836	19228,8
6	5171,8503	5309,139	4888,6725	5492,8107	20862,5
9	6308,5102	5003,4566	5825,6847	5854,555	22992,2
12	7482,5753	5746,5153	5972,6528	6218,093	25419,8

Для численной оценки степени неоднородности распределения воздушных потоков в поперечном сечении градирни применяются

статистические методы: рассчитываются дисперсия и среднеквадратичное отклонение соответствующих распределений [102,103]. Эти показатели дают возможность объективно сравнивать различные режимы работы градирни с точки зрения аэродинамической устойчивости и эффективности теплообмена.

На рис 4.10. представлена диаграмма, отображающая зависимость значения среднеквадратичного отклонения от скорости ветра. График выполнен в форме столбчатой диаграммы, что позволяет наглядно проследить тенденцию изменения равномерности воздушного потока в зависимости от увеличения ветровой нагрузки.

Анализ полученных результатов показывает, что наилучшая равномерность распределения воздуха, соответствующая минимальному значению среднеквадратичного отклонения, наблюдается при скорости ветра в диапазоне от 3 до 6 м/с. В этом диапазоне создаются наиболее благоприятные условия для стабильной циркуляции воздушного потока в пределах градирни, что положительно сказывается на эффективности охлаждения циркуляционной воды. Данные выводы могут быть полезны как для проектирования новых установок, так и для оптимизации режимов эксплуатации существующих градирен в зависимости от метеоусловий.



**Рисунок 4.10 Зависимость среднего квадратичного отклонения распределения расходов воздуха по поперечному сечению градирни от скорости ветра**

Распределение воздушного потока по выделенным секторам поперечного сечения, полученное на втором этапе моделирования,

предоставляет основу для дальнейшего анализа в рамках матричного метода решения задачи тепломассообмена в башенной градирне. Используя данные распределения, можно вычислить температуру охлажденной воды на выходе из градирни с учетом реального характера взаимодействия воздушного и водяного потоков.

#### **4.3. Повышение эффективности функционирования градирни ст. №2 Петрозаводской ТЭЦ**

Целью настоящего раздела является повышение функционирования градирни на основе результатов расчетно-экспериментальных исследований технического состояния градирни БГ-1600 ст. №2 Петрозаводской ТЭЦ, включающих:

- моделирование аэродинамических характеристик градирни при различных режимах эксплуатации;
- оценку влияния метеорологических факторов на эффективность охлаждения циркуляционной воды;
- анализ неравномерности распределения теплоносителей по поперечному сечению установки (п. 3.3);
- идентификацию основных причин снижения тепловой эффективности градирни;
- разработку рекомендаций по оптимизации режимов работы оборудования.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.3

**Таблица. 4.3 Исходные данные для расчета**

Показатель	Значение
Расход воды, подаваемой на градирни, м <sup>3</sup> /ч	12480
Температура исходной воды, °С	37
Плотность орошения, м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )	7,8
Влажность воздуха, %	20
Удельная тепловая нагрузка, Мкал/(ч·м <sup>2</sup> )	61

Согласно алгоритму комбинированной математической модели, представленной в разделе 2.4, для детального анализа аэродинамических и тепломассообменных процессов в градирне БГ-1600 была разработана трехмерная сеточная модель, учитывающая геометрические особенности конструкции и граничные условия эксплуатации. Дискретизация расчетной области выполнена с использованием структурированной сетки, обеспечивающей оптимальное соотношение между точностью расчетов и вычислительными затратами.

Общее количество ячеек в модели составляет 10 580, что позволяет достичь приемлемого уровня точности при расчёте и адекватно описывать сложные физические процессы внутри градирни.

Внешний вид градирни БГ-1600 приведена на рис 4.11. Сеточная модель градирни приведена на рис. 2.8.

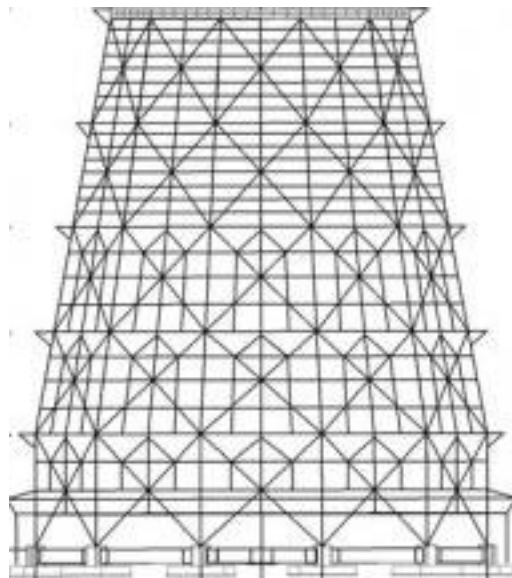


Рисунок 4.11 Внешний вид градирни БГ-1600

В нижней части башенной градирни предусмотрены специальные приточные окна, обеспечивающие подачу атмосферного воздуха внутрь конструкции. В рамках настоящего исследования рассматривался идеализированный случай, при котором окна полностью открыты, а влияние бокового ветрового обдува отсутствует.

Моделирование аэродинамики внутри градирни выполнялось в среде *Ansys Fluent*, где для корректного описания движения воздушных потоков были заданы соответствующие граничные условия. Расчетная область ограничивалась поверхностями с predetermined параметрами на входе и выходе воздушного потока. Для обеспечения движения воздуха без учёта бокового ветра были выбраны типовые граничные условия: *pressure inlet* (вход по давлению) и *pressure outlet* (выход по давлению).

Граничное условие *pressure inlet* использовалось для задания параметров на входной поверхности, через которую воздух поступает в объём градирни. Это условие позволяло определить статическое давление, температуру и состав воздуха на входе, а также задать режим постоянного расхода. В рассматриваемом случае воздух поступал внутрь конструкции за счёт разности температур и давления между внутренним и внешним объёмами.

Выход воздуха из градирни моделировался с использованием граничного условия *pressure outlet*, которое позволяет задать давление на выходной границе и обеспечить согласование расчётной области с атмосферными условиями. Это позволяет учитывать естественный выброс воздуха в окружающую среду при заданной температуре и плотности.

Результаты моделирования внутренней аэродинамики градирни представлены на рисунке 4.12 в виде распределения линий тока. Эти данные позволили определить характер движения воздуха и количественные значения массового расхода в зависимости от температуры атмосферного воздуха. Значения расхода воздуха, полученные в результате численного эксперимента, приведены в таблице 4.4. и на рисунке 4.13.

Согласно расчётному алгоритму (рис. 2.7), на основе полученного массового расхода воздуха на первом этапе была выполнена дальнейшая оценка тепловой эффективности градирни. На втором этапе анализа применялась матричная модель тепломассообмена, подробно описанная в

предыдущем разделе, для определения охлаждающей способности при различных температурных условиях.

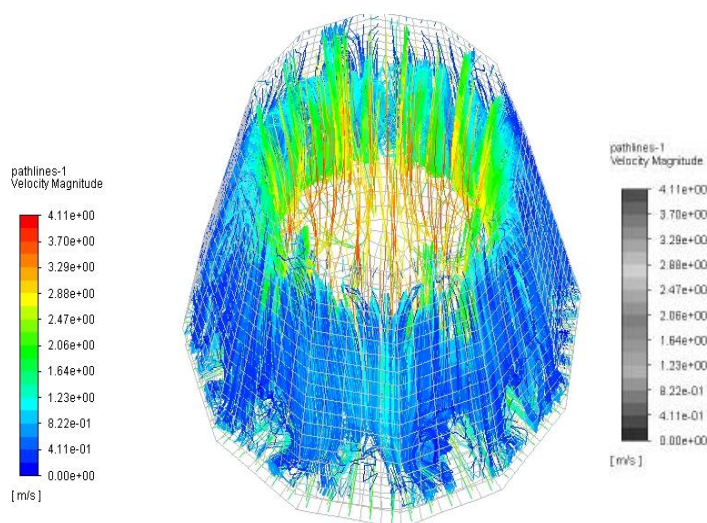


Рисунок 4.12 Результаты моделирования движения воздуха в градирне БГ-1600

Таблица. 4.4 Результаты расчета расхода воздуха через градирню БГ-1600 при разных температурах наружного воздуха

$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$G \text{ кг/с}$
35	2030.498
30	2046,235
25	2054.644
20	2126.289
15	2172.89
10	2195.885
5	2241.216
0	2263.438
-5	2331.692
-10	2374.482
-15	2416.339
-20	2457.649
-25	2517.695

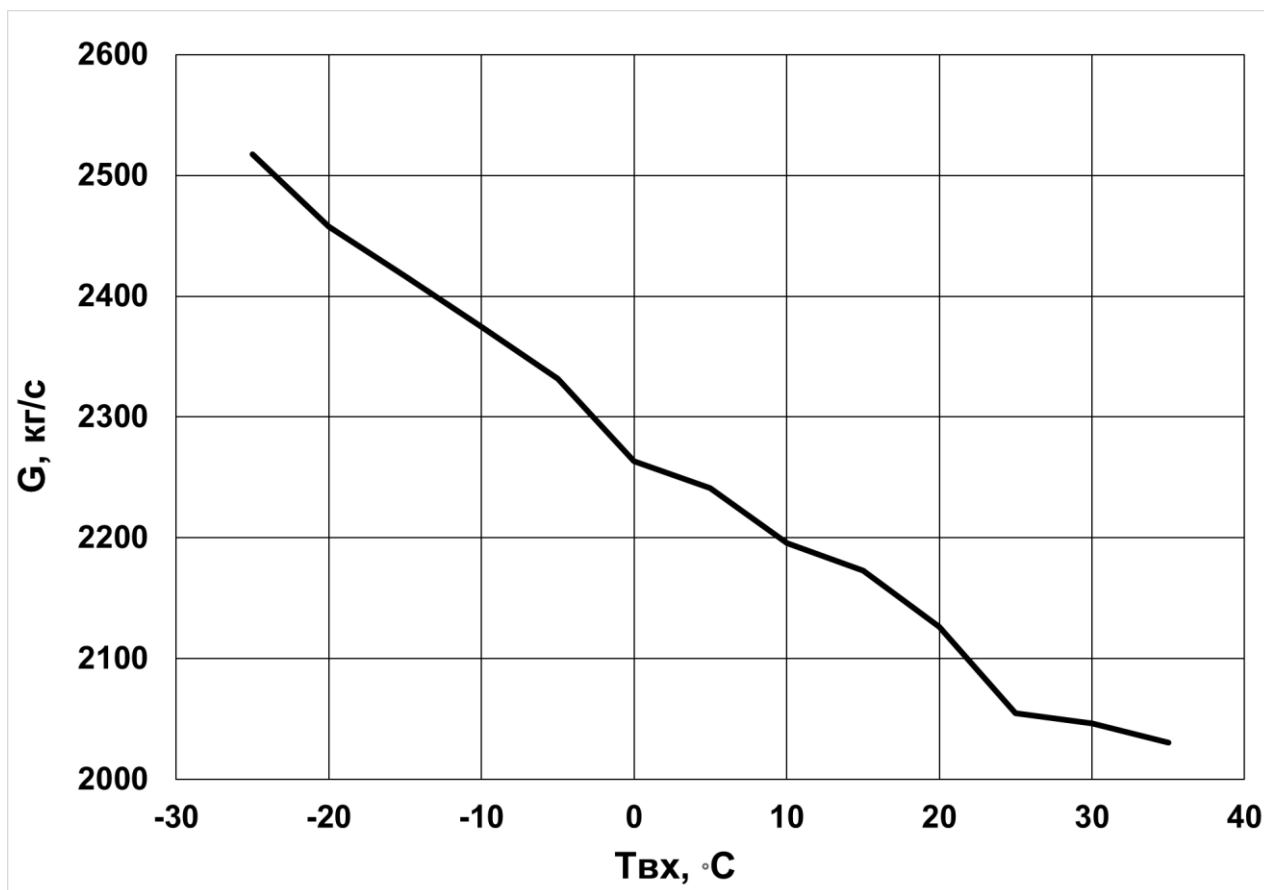


Рисунок 4.13 Зависимость расхода воздуха в градирне от температуры наружного воздуха

Результаты выполненного расчетного анализа приведены на рисунке 2.9. На рисунке 2.9. а) представлены зависимости температуры охлаждаемой воды от определяющей координаты процесса, выбранной в виде размерного параметра переноса, который определяется произведением коэффициента теплопередачи  $k$  и площади поверхности теплообмена  $F$  [135]. Такие зависимости приведены для различных значений температуры наружного воздуха. В качестве контрольных данных использованы нормативные значения температуры, полученные по номограммам [116], которые отображены в виде точек.

Сравнение расчетных данных с нормативными значениями демонстрирует, что предложенная комбинированная модель адекватно отражает реальное течение процессов в башенной градирне и может быть использована для инженерных расчетов.

На рисунке 2.9. б представлены изменения температуры воздуха вдоль той же определяющей координаты для различных температур окружающей среды. Поскольку для отрицательных температур отсутствуют нормативные показатели для градирни типа БГ-1600, расчетные исследования были ограничены диапазоном положительных температур атмосферного воздуха.

Результаты расчётов, выполненных с использованием комбинированной модели, включающей матричное описание фазового перехода и модель воздушного потока, реализованную в программном комплексе Ansys Fluent, представлены в таблице 4.5. Для сопоставления в таблицу также включены нормативные значения температуры охлаждённой воды, рассчитанные по номограммам. Отклонение между расчётными и нормативными данными составляет порядка 6–7%, что соответствует допустимому уровню расхождений, характерному для экспериментальных исследований, и подтверждает достоверность полученных результатов.

**Таблица. 4.5 Сопоставление расчетных и нормативных данных охлаждения воды в градирне**

$t_{\text{возд}}$	$G$ , кг/с	$\Delta t$ (расч.)	$\Delta t$ (норм.)
35	2030.498	6.3	6.8
30	2051.235	6.3	7.1
25	2054.644	6.7	7
20	2126.289	8.8	8.8
15	2172.89	8.2	8.1
10	2195.885	7.5	7.2
5	2241.216	9	8.6
0	2263.438	6	5.7

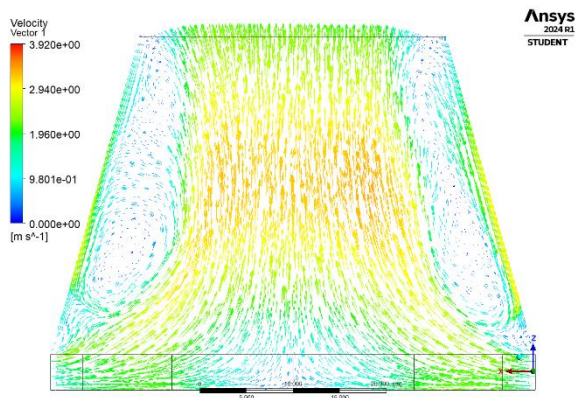
Результаты расчётов температуры охлаждённой воды свидетельствуют о корректности аппроксимации нормативных значений, полученных с использованием комбинированной модели, что подтверждает её



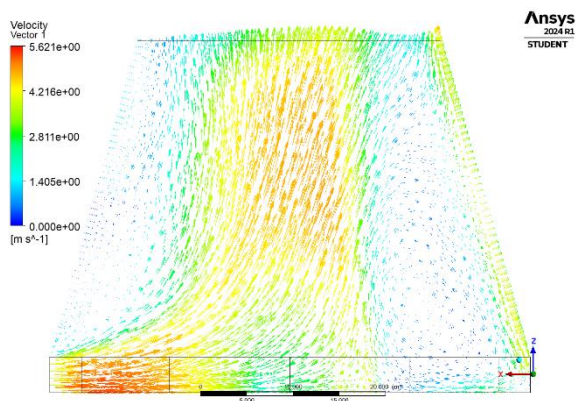
применимость для инженерных расчётов и анализа эффективности работы градирни.

Расчеты влияния скорости ветра на аэродинамические характеристики градирни выполнены согласно алгоритму комбинированной математической модели, представленному в разделе 0. Численное моделирование проводилось для трех характерных режимов ветрового воздействия, соответствующих типичным метеорологическим условиям эксплуатации башенной градирни на Петрозаводской ТЭЦ.

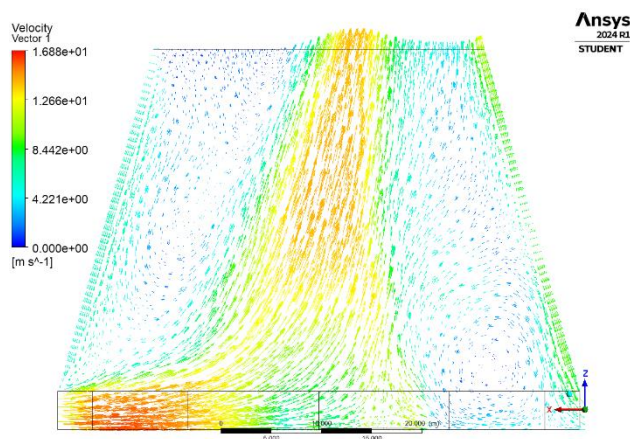
Рис. 4.14 иллюстрирует результаты моделирования в виде поля скоростей воздуха, где цвет и направление линий соответствуют значениям вектора скорости воздуха в соответствующих точках при различных скоростях ветра: 0 (а), 4 (б) и 12 (в) м/с. Анализ направлений и скоростей потоков показывает, что с увеличением скорости ветра распределение воздушных потоков по градирне становится более неравномерным.



а)



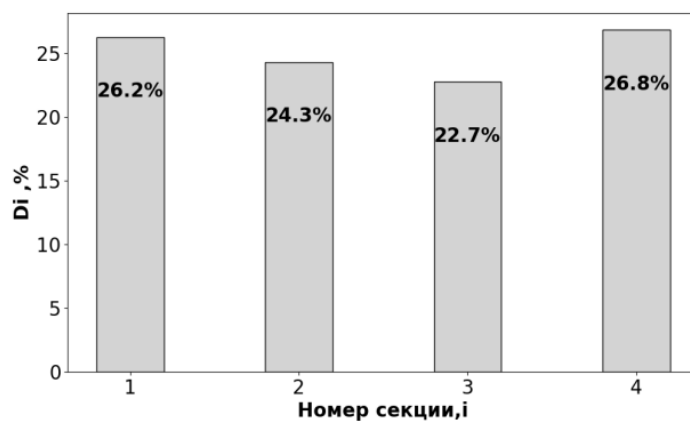
б)



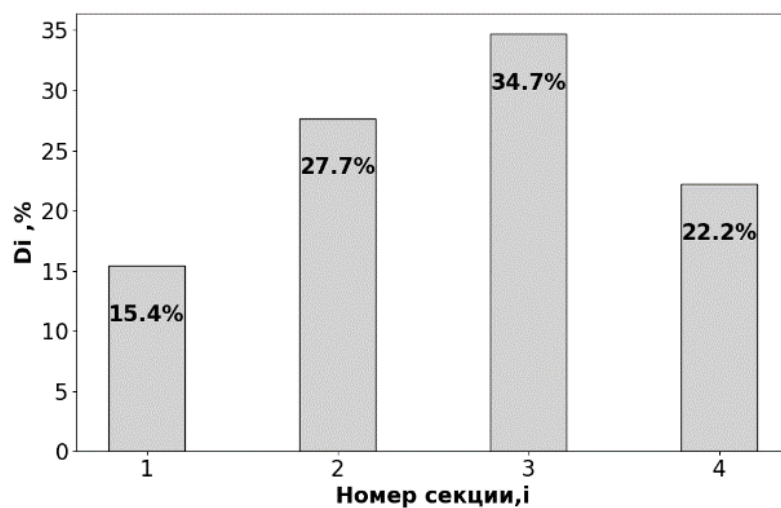
в)

Рисунок 4.14 Визуализация направления и скорости движения воздуха внутри градирни при различных скоростях ветра: а) – 0; б) – 4; в) – 12 м/с

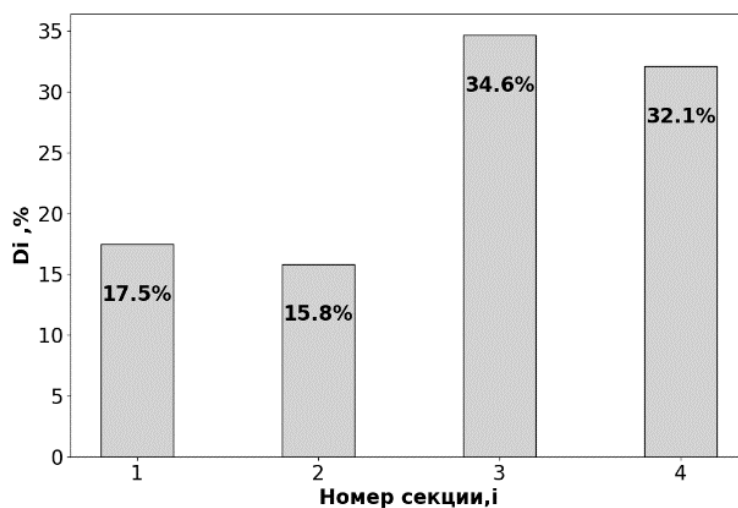
Для количественной оценки неравномерности распределения воздушных потоков сечение градирни условно разделяется на четыре сектора с равными площадями. Результаты, представленные 4.14, позволяют рассчитать расходы воздуха в вертикальном направлении для каждого из этих четырех секторов. На 4.15. приведены значения расхода воздуха для выделенных секторов в виде массовых долей от общего расхода при различных скоростях ветра. Эти зависимости показывают, что с увеличением скорости ветра неравномерность распределения воздушных потоков



а)



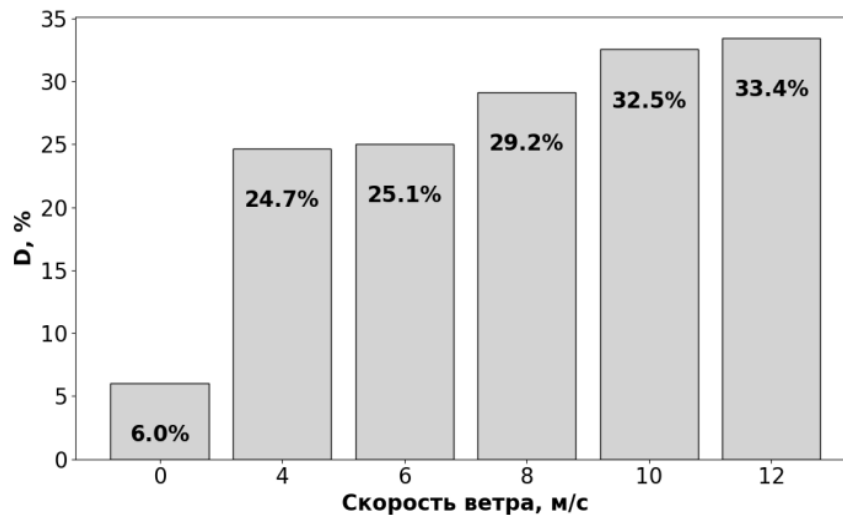
б)



в)

**Рисунок 4.15 Распределение потоков воздуха по четырем секторам, выделенным в горизонтальном сечении градирни, при разных скоростях ветра: а) – 0; б) – 4; в) – 12 м/с**

На 4.16 приведена зависимость суммарного отклонения расхода по секторам от скорости ветра. Представленная зависимость позволяет количественно оценить увеличение неравномерности потоков с увеличением скорости ветра.



**Рисунок 4.16 Зависимость общей неравномерности распределения воздуха по сечению градирни от скорости ветра**

Экспериментальные исследования, проведенные на градирне БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ [50], показали, что при средней скорости ветра 3,75 м/с неравномерность распределения воздушного потока составила 28,4%. Эти экспериментальные данные, с учетом погрешностей измерений, достаточно хорошо согласуются с расчетными результатами, полученными в рамках предложенной модели при скорости ветра 4 м/с, что подтверждает адекватность модели для описания реального процесса. Данные результаты подчеркивают перспективность использования этой модели для прогнозирования мер, направленных на минимизацию воздействия ветра на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

Кроме того, в разделе 3.1 доказано, что такая неравномерность распределения может привести к значительному недоохлаждению циркуляционной воды, ухудшению вакуума в конденсаторе и снижению общей эффективности работы энергетического блока.

Для устранения неравномерного распределения воздушных потоков в поперечном сечении градирни, вызванного ветровой нагрузкой, предлагается закрывать фрамуги, расположенные на противоположной стороне от направления ветра, согласно предварительно заданному алгоритму. Эффективность этих мероприятий продемонстрирована на следующем

расчетном примере. В качестве теста предложено закрывать фрамуги с южной стороны при северном ветре. Эффективность данного подхода была проверена через тестовые расчеты в рамках предложенной модели. На рисунке 4.17 приведены результаты, аналогичные тем, что представлены на 4.16, но при закрытых фрамугах. Проведенные расчеты показали значительное сокращение (примерно в два раза) неравномерности воздушных потоков при закрытии фрамуг в соответствии с предложенным алгоритмом при различных скоростях ветра. Эти результаты показывают возможность управления неравномерностью потоков воздуха с помощью регулирования положения фрамуг.

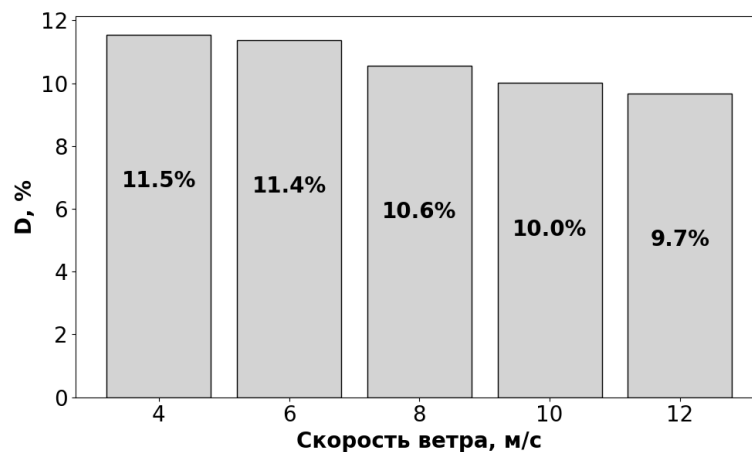


Рисунок 4.17 **Общая неравномерность распределения воздуха по сечению градирни в зависимости от скорости ветра при закрытии фрамуг по определенному алгоритму**

Важно отметить, что для каждой градирни, а также для каждого направления и скорости ветра, существует свое оптимальное решение по уменьшению неравномерности воздушных потоков. Это решение должно разрабатываться с учетом конкретных условий, связанных с особенностями эксплуатации. Определение таких оптимальных решений следует проводить для каждой ситуации индивидуально, принимая во внимание расположение зданий на станции. Результаты должны быть оформлены в виде инструкций для оперативного управления технологическим оборудованием с учетом актуальных погодных условий.

#### **4.3.2. Технико-экономический расчет результатов внедрения на Петрозаводской ТЭЦ**

В рамках комплексного исследования оборудования системы оборотного охлаждения Петрозаводской ТЭЦ выполнен детальный анализ влияния неравномерности распределения потоков воды и воздуха в башенной градирне на выработку электроэнергии турбоагрегатов ПТ-60-130/13 и Т-110/120-130. Данное исследование направлено на оценку энергетических потерь, обусловленных неоптимальными режимами работы градирни, и разработку рекомендаций по повышению эффективности системы охлаждения.

В соответствии с методикой [4], базирующейся на анализе энергетических характеристик конденсационного оборудования, определялись значения давления отработавшего пара в конденсаторах исследуемых турбоагрегатов. Расчет осуществлялся на основе следующих параметров:

- расход охлаждающей воды через конденсатор,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- расход пара в конденсатор,  $\text{т}/\text{ч}$ ;
- фактическая температура охлаждающей воды на входе в конденсатор,  $^{\circ}\text{C}$ .

Энергетические характеристики конденсаторов представлены на рисунке 4.18, демонстрирующем зависимость давления отработавшего пара от указанных эксплуатационных параметров.

Энергетическая характеристика конденсатора КГ2-6200-1

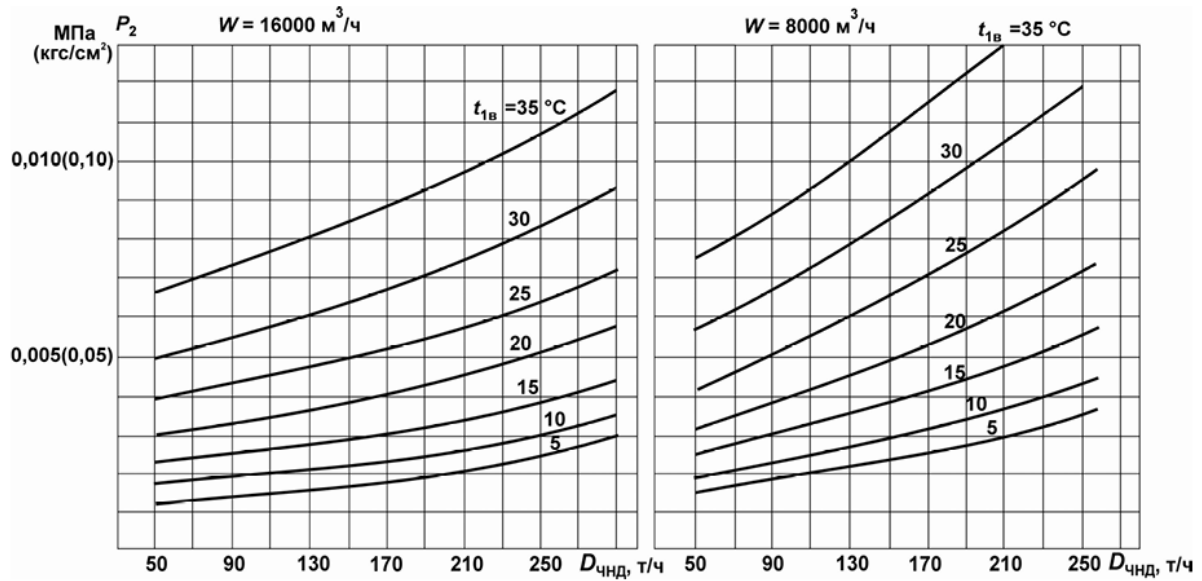


Рисунок 4.18 Энергетические характеристики конденсатора паровой турбины Т-110/120-130

На следующем этапе, по давлению пара определялась поправка к вырабатываемой мощности  $\Delta N_{p2}$  по фактическому и нормативному давлению пара в конденсаторе.

Далее по  $\Delta N_{p2}$  определялся недовыработка электроэнергии на расход условного топлива.

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta N_{H-\phi} \cdot \tau_{\text{раб}}, \quad (4.1)$$

В условиях резерва установленной мощности  $N_{\text{уст}}$  в энергосистеме, целесообразно перевести недовыработку электроэнергии на расход условного топлива. Изменение расхода тепла на выработку электроэнергии  $\Delta Q_{\mathcal{E}}$  рассчитывается по следующей формуле:

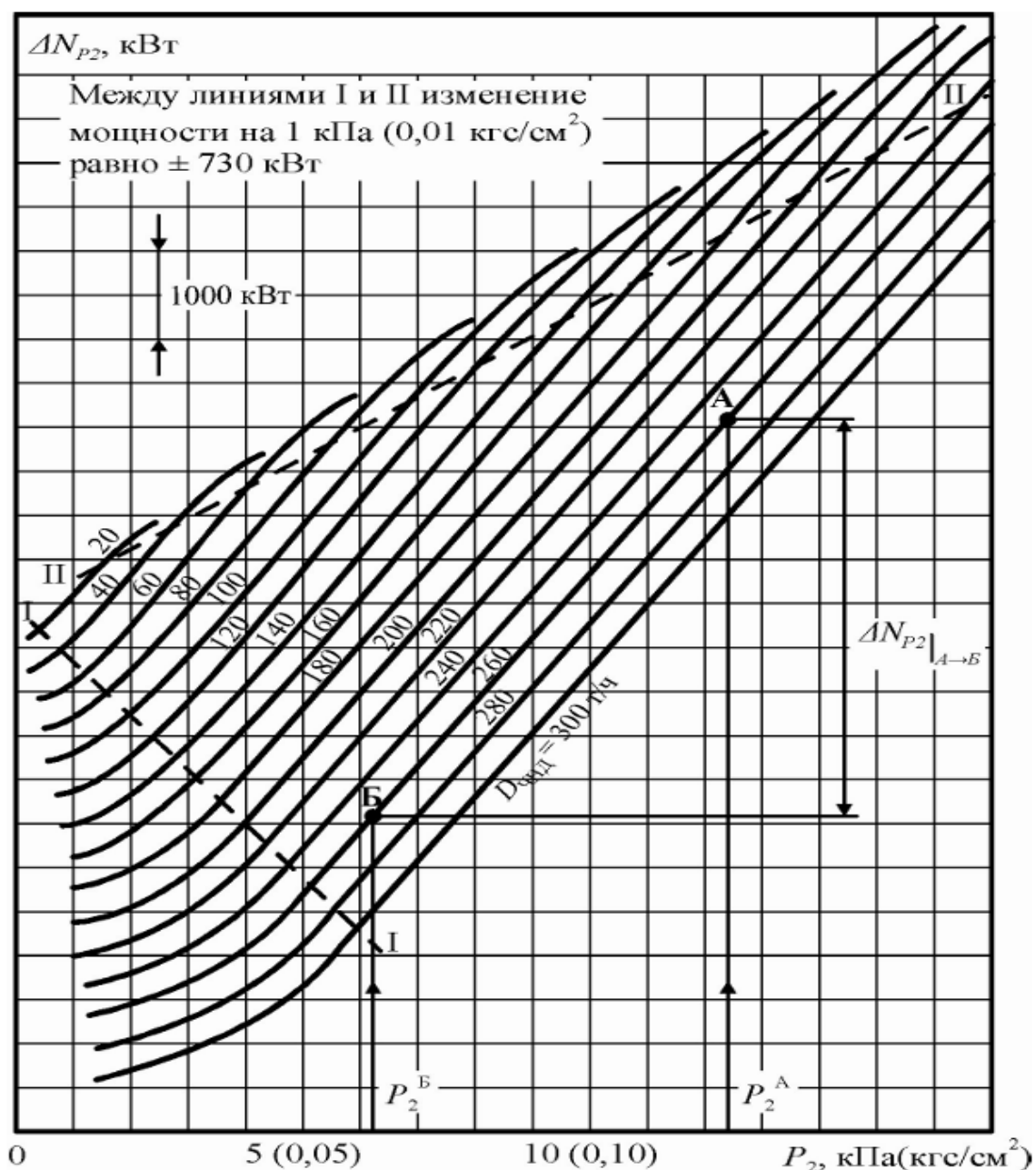
$$\Delta Q = \Delta \mathcal{E} \cdot q^{\text{бр}(\phi)} \cdot 10^{-6}, \text{ Гкал} \quad (4.2)$$

где,  $q^{\text{бр}(\phi)}$  – фактический удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии, ккал/кВт·ч.

Далее рассчитывается расход топлива:

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_3}{7 \eta_{\kappa(\phi)}^{\text{netto}} \eta_{\text{TP}}^{\phi}}, \text{ T.y.T} \quad (4.3)$$

где  $\eta_{k(\Phi)}^{\text{нето}}$  – фактический КПД нетто по группе котлов,  $\eta^{\Phi}$  – КПД теплового потока.



**Рисунок 4.19 Поправка к вырабатываемой электрической мощности на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе турбоагрегата типа Т-110/120-130**

Результаты расчета представлены в табл. 4.6.



**Таблица. 4.6 Оценка влияния неравномерности потоков теплоносителей на расход условного топлива для турбины Т-110/120-130**

Параметры	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
$W$ , т/ч	9724,46	11516,04	9538,01	9,8	714,32	1660,7	115,06	5356,33	8687,2	4454	9258,3	1538,5
$D_2$ , т/ч	64,96	66,18	53,81	—	1,18	—	—	122,23	189,91	21,4	38,71	8,3
$T_1^\Phi$	15,83	15,24	14,78	17,7	21,32	19,63	27,69	26,38	25,07	18,0	15,13	14,69
$T_1^H$	13,53	12,79	12,48	15,9	19,92	18,23	26,29	24,68	22,87	16,4	12,73	13,29
$\tau_{\text{раб}}$ , ч.	744	672	624	—	7	—	—	451	622	361	720	165
$P_2^\Phi$ , кгс/см <sup>2</sup>	0,027	0,026	0,025	—	—	—	—	0,062	0,075	0,027	0,027	—
$P_2^H$ , кгс/см <sup>2</sup>	0,023	0,022	0,021	—	—	—	—	0,056	0,066	0,025	0,024	—
$\Delta N_{p2}$ , кВт	415,00	413,00	410,00	—	—	—	—	674	928	202	340	—
$\Delta \mathcal{E}$ , кВт	316944	286272	265824	—	—	—	—	309386	581570	7112	25128	—
$\Delta B$ , т.у.т.	199,91	175,29	153,22	—	—	—	—	379,58	720,82	43,23	139,46	—
$\Delta B$ , т.у.т./год	1811,5											

По данному алгоритму были посчитаны перерасходы топлива и оставшихся паровых турбин, суммарные результаты расчета сведены в табл. 4.7

**Таблица. 4.7 Суммарные результаты расчета**

ПТ	Перерасход топлива, т.у.т./год
Т-110/120-130 №1	1811,51
Т-110/120-130 №2	1979,93
ПТ-60-130/13	748,56
<b>Итого</b>	<b>4540</b>

Проведенные расчеты показали значительное влияние неравномерности потоков в башенной градирне на энергетические показатели турбоагрегатов. Установлено, что отклонение от оптимальных режимов охлаждения приводит к:

- Повышению давления отработавшего пара в конденсаторах турбин;
- Снижению электрической мощности турбоагрегатов;
- Дополнительному расходу условного топлива на компенсацию недовыработки электроэнергии.

Суммарный перерасход условного топлива по исследуемым турбоагрегатам составляет **4540 т.у.т./год**, что свидетельствует о существенном экономическом ущербе от неоптимальных режимов работы системы оборотного охлаждения.

На основании результатов исследования сформулированы технические решения по повышению эффективности охлаждения в условиях неравномерности потоков башенной градирни. Комплекс мероприятий предусматривает: восстановление проходимости каналов блоков орошения, устранение деформаций оросительного оборудования, модернизацию водораспределительной системы. Численное моделирование обосновало необходимость внедрения системы регулируемого распределения воздушных потоков по секциям градирни.

#### **4.4. Выводы по главе**

1. Разработана система мониторинга и диагностики градирни, представляющая интегрированное программно-аппаратное решение, построенное на принципах микросервисной архитектуры. Концептуальная основа системы базируется на современных подходах к проектированию распределенных систем, где каждый функциональный компонент реализован в виде независимого сервиса, обеспечивающего полный жизненный цикл данных от сбора до представления результатов диагностики.

2. Представлены результаты реализации разработанного комплекса на Нововоронежской АЭС.

3. 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.

Материалы главы опубликованы в работах [131,132,133,144].

## 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 оборотного охлаждения на основе представленных математических моделей, получены три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

4. Разработанная методика диагностики технического состояния охлаждающей 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 позволят 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.

## БИБЛОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Буров, В. Д.** Тепловые электрические станции / Буров В. Д, Дорохов Е. В., Елизаров Д. П. и др. // Под ред. В. М. Лавыгина, А. С. Седлова, С. В. Цанева. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: «Издательский дом МЭИ», 2007. — 466 с.
2. **Абрамов, Н.Н.** Водоснабжение: Учебник для вузов.- 3-е изд., перераб. И доп. М.: Стройиздат, 1982. - 440 с., ил.
3. **Пономаренко, В.С.** Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. // Под общей редакцией В.С. Пономаренко.-М Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
4. **Ледуховский, Г.В.** Энергетические характеристики оборудования ТЭС / Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. – Иваново, 2014. – 232 с.
5. **Лаптев, А.Г.** Устройство и расчет промышленных градирен: монография / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2004. – 180 с.
6. **Калатузов, В.А.** Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения / Калатузов В.А., Павлов В.А. // Электрические станции. – 1987.–№4, -С. 18-22.
7. **Рыжкин, В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
8. **Крылов, О.В.** Ограниченность ресурсов как причина предстоящего кризиса / О. В. Крылов; Вестник РАН, 2000. – Т. 70. – № 2. – С. 136 – 146.
9. **Данилов – Данильян, В.И.** Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России / В. И. Данилов – Данильян. – Москва: ООО «Типография ЛЕВКО», 2009. – 88 с.
10. **Арефьев, Ю.И.** Аэродинамический расчет башенных градирен при реконструкции/ Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С.//Электрические станции, 2000. - №9 — С. 14-20.

11. **Солодухин, А.Д.** Аэродинамические методы повышения охлаждающей способности башенных испарительных градирен ТЭС И АЭС / А. Д. Солодухин, В. Ф. Давиденко [и др.]; Труды VI Минского международного форума, 19 – 23 мая 2008. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова, 2008. – Т. 10. – С. 192 – 201

12. **Лаптев, А.Г.** Сравнительные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочных регулярных насадок в градирнях / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева; Вестник технологического университета, 2017. – Т.20. – № 18. – С. 71 – 74.

13. **Галустов, В.С.** Современные методы, системы и оборудование охлаждения оборотной воды/Галустов В.С., Беличенко Ю.П. // М.: ЦИНТИНефтемаш. 1988. 72 с.

14. **Клименко, А.В.** Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / Клименко, А.В, Зорина В.М // 3-е издание, издательство МЭИ, 2004г. – 632 с., кн.4.

15. **Интерфакс.** Ростовская АЭС ввела в строй на третьем энергоблоке вентиляторные градирни [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax-russia.ru/south-and-north-caucasus/news/rostovskaya-aes-vvela-v-stroy-na-tretem-energobloke-ventilyatornye-gradirni> (дата обращения: 05.04.2025).

16. **Власов, А.В.** и др. Особенности работы башенных испарительных градирен в летний период и аэродинамика воздушных потоков вблизи них / Власов А. В., Воронов Е. О., Дашков Г.В. и др. // Тепломассообмен- 95. АНК ИТМО, Минск, 1995, с.23-27

17. **Дмитриева, О.С.** Тепломассообмен в градирнях вихревого типа с распылителями: Автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – К., 2012.

18. **Комелик, В.В.** Анализ работы градирен с распылительными форсунками / Комелик В.В., Орлик В.Н., Зеленцов В.В. // Хим. промышленность, 2001, №10

19. **Присяжная, С. П.** Разработка технологии в охладителях градирни за счет интенсификации тепломассообменных процессов в оросителе / С. П.

Присяжная, И. М. Присяжная, Ю. В. Хондошко // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2018. – № 81. – С. 102-108. – EDN YXHSSH

20. **Калатузов, В.А.** Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения / Калатузов, В.А., Павлов, В.А. // Электрические станции.–1987, №4 -С.18-22.

21. **Пособие** по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84 „Водоснабжение, Наружные сети и сооружения”)/ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989 - 190 с.

22. **Калатузов, В.А.** Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями/Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.–Иваново, 2003: – 113 с.

23. **Федяев, В.Л.** О модернизации миниградирен / В.Л. Федяев, И.В. Моренко, Р.Ф. Гайнуллин, Р.Ф. Гайнуллина // Труды Академэнерго. - 2008. - № 3. -С. 40-49.

24. **Пат. 2355967** Российская Федерация, МПК F28C1/00. Вентиляторная градирня / Ф. М. Давлетшин ; заявитель и патентообладатель Ф. М. Давлетшин. 2007121527/06 ; заяв. 08.06.2007, опуб. 20.05.2009, Бюл. № 21 (III ч.).

25. **Пушнов, А.С.** Возможности совершенствования аэродинамики градирен / А. С. Пушнов, М. Г. Беренгартен // Химическая промышленность. - 2007. - №8. С. 382-400.

26. **Гильфанов, К.Х.** Тепло- и массообмен при охлаждении воды в оросителях градирен с принудительной тягой/ К.Х. Гильфанов, Ф.М. Давлетшин, Д.Р. Гилязов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009.-№ 11-12. -С. 33-40.

27. **Походяев, С.Б.** Новые конструктивные решения гибридных градирен / С.Б. Походяев [и др.] // Химия и технология топлив и масел. - 2008. - № 4. - С. 20



28. **Пат. 2076294** Российская Федерация, МПК F28C1/00. Башенная градирня / В. Л. Жданов, В. В. Иванов, Р. Г. Минасян, О. Ш. Оспанов, А. Д. Солодухин, С. П. Фисенко ; заявитель и патентообладатель академический научный комплекс «Институт тепло-массообмена им. А. В. Лыкова» Академия наук Белурусии. 50121839/09 ; заяв. 01.10.1991, опуб. 27.03.1997, Бюл. № 21 (III ч.).

29. **Акулова, Л.Г.** Аэродинамика высокопроизводительных градирен современных ТЭС / Л. Г. Акулова, Л. Э. Родэ. - М.: Энергия, 1972. - 51с.

30. **Акулова, Л. Г.** Аэродинамические исследования башенных градирен / Л. Г. Акулова, Л. Э. Родэ. - М.: Энергия, 1972. - 11 с.

31. **Недвиг, Ю.С.** Натурные исследования работы разбрызгивающих форсунок с гидровентильторами на градирне №5 ТЭЦ-22 АООТ «МОСЭНЕРГО» / Ю. С. Недвиг, К. В. Пилипенко; Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000. – Т. 236. – С. 248 – 253.

32. **Пушнов, А.С.** Компонировка оросителя градирни с учетом неравномерности поля скоростей воздушного потока / А. С. Пушнов, А. С. Рябушенко; Теплоэнергетика, 2016. – № 7. – С. 74 – 79.

33. **Седлов, А.С.** Повышение охлаждающей способности градирен ТЭС с использованием аэродинамических завихрителей / А. С. Седлов, А. М. Латыпов [и др.]; Новое в российской электроэнергетике, 2019. – № 2. – С. 6 – 15.

34. **Гладков, В.А.** Вентиляторные градирни / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко ; под ред. В. А. Гладкова. - М.: Стройиздат, 1976.-216 с.

35. **Фарфоровский, Б. С.** Повышение производительности градирни путем реконструкции / Б. С. Фарфоровский; Электрические станции, 1947. – № 9. – С. 50.

36. **Хвостиков, А.С.** Модернизация башенных градирен эксплуатируемых в сложных климатических условиях / А. С. Хвостиков, К. С. Богданов; Энергосбережение и водоподготовка, 2019. – № 5(121). – С. 22 – 26.

37. **Волков, А.В.** Проблемы эксплуатации башенных градирен в системах оборотного водоснабжения ТЭЦ и пути их решения / Волков А.В., Наумов А.В. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл. шестнадцатой Междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2010. – Т.2. С.482- 483.

38. **Ледуховский, Г.В.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС / Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. // – Иваново, 2015. – 468 с.

39. **Пушнов, А.С.** Канальная модель аэродинамики градирни / А. С.Пушнов; Энергетика, 2011. – Т. 57. – №1. – С. 60 – 70.

40. **Лаптев, А.Г.** Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах / Лаптев, А.Г., Башаров, М.М., Лаптева, Е.А.–Казань: ТНТ: 2021. – 288 с.

41. **Лаптев, А.Г.** Сопряженное физическое и математическое моделирование процесса испарительного охлаждения в градирнях / Лаптев, А.Г., Данилов В.А., Вишнякова И.В. // Научная сессия. /КХТИ. Казань, 1998.

42. **Доброго, К.В.** Моделирование башенной испарительной градирни и влияния аэродинамических элементов на ее работу в условиях ветра / Доброго К. В., Хеммасиан Кашани М. М., Ласко Е. Е. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-bashennoy-isparitelnoy-gradirni-i-vliyaniya-aerodinamicheskikh-elementov-na-ee-rabotu-v-usloviyah-vetra> (дата обращения: 04.04.2025).

43. **Лаптев, А.Г.** Модели тепломассообмена в многофазных средах и расчет промышленных аппаратов // Вестник КГЭУ. 2009. №3.

44. **Дьяконов, С.Г.** Математическое моделирование массопереноса в промышленных экстракторах на основе исследования лабораторного макета / Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г., Зайкова О.В. // Изв. 113 вузов. Химия и хим. технология. 1994. - Т.37. - № 3. - С.98-104.

45. **Колесников, С.В.** Разработка способов повышения эффективности оборотных систем водоснабжения ТЭЦ с градирнями: Автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – И., 2004.

46. **Ведьгаева, И.А.** Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой: Автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – К., 2003

47. **Majumdar, A.** Numerical modelling of wet cooling towers—Part 1: mathematical and physical models / Majumdar A., Singhal A., Spalding, D. // Journal of Heat Transfer 105 (1983) 728–735.

48. **Majumdar, A.** Numerical modelling of wet cooling towers—Part 2: application to natural and mechanical draft towers / Majumdar A., Singhal A., Reilly H., Bartz J. // Journal of Heat Transfer 105 (1983) 736–743.

49. **Жуков, В.П.** Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 2. – С. 62-69.

50. **Бадриев, А.И.** Анализ нормальности распределения потоков в башенных испарительных градирнях / Бадриев А. И., Власов С.М., Чичирова Н.Д. // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2021. – Т. 13, № 1 (49). – С. 236.

51. **Иванов, В.Б.** Градирня. Эффективность. Энергосбережение. Экономичность / В. Б. Иванов // Экологические системы. - 2008. - № 12. - С. 1-6

52. **Пономаренко, В.С.** Технологические расчёты башенных градирен / Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. // Водоснабжение и санитарная техника. - 2000. - № 7. - С. 17-20.

53. **Petruchik, A.I.** Simulation of cooling of water droplets and film flows in large natural wet cooling towers/ A.I. Petruchik, A.D. Solodukhin, S.P. Fisenko //J. Eng. Phys. Thermophys. 74 (1). - 2001. - P. 62-68.

54. **Калатузов, В. А.** Регулирование подачи и распределения воздуха – главное условие эффективности работы градирен / В. А. Калатузов; Промышленная энергетика, 2010. – №6. – С. 20 – 23.

55. **Smrekar, J.** Improving the efficiency of natural draft cooling towers / Smrekar J, Oman J, Širok B. // Energy Conversion and Management. 2006;47:10861100.

56. **Доброго, К. В.** Моделирование башенной испарительной градирни и влияния аэродинамических элементов на ее работу в условиях ветра / К. В. Доброго, М. М. Хеммасиан Кашани, Е. Е. Ласко; Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2014. – №6. – С. 47 – 60

57. **Li, X.** Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution/ Li, X., Xia, L., Gurgenci, H., Guan, Zh. //International Journal of Heat and Mass Transfer /Volume 107,2017. –p.71-280, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.046>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793101632066X>)

58. **Chen, X.** New retrofit method to improve the thermal performance of natural draft wet cooling towers based on the reconstruction of the aerodynamic field / Chen, X., Sun, F., Chen, Y., Gao, M. //International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, vol. 132, pp. 671 – 680. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.047.

59. **Armando F.** Heat and Mass Transfer in an Indirect Contact Cooling Tower: CFD Simulation and Experiment. Numerical Heat Transfer Part A-applications / Facão, Jorge & Oliveira, Armando // NUMER HEAT TRANSFER PT A-APPL. 2008. 54. 933-944. 10.1080/10407780802359104.

60. **Павленко, А.Н.** Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин,

В. Ю. Чехович, В. Е. Жуков, С. Сандер, П. Хоуптон; Теоретические основы химической технологии, 2009. – Т. 43. – № 1. – С. 3 – 13.

61. **Николаева, О.С.** Гидравлический расчет напорной водораспределительной системы градирни (на примере вентиляторной градирни Мутновской ГеоЭС) / О. С. Николаева, Б. Л. Свердлин, К. В. Пипиленко; Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2010. – Т. 260. – С. 78 – 85.

62. **Williamson, N.** Comparison of a 2D axisymmetric CFD model of a natural draft wet cooling tower and a 1D model / Williamson, N., Behnia, M., Armfield, S. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, vol. 51, pp. 2227–2236.

63. **Zhang, G.** Water distribution below a single spray nozzle in a natural draft wet cooling tower / Zhang, G., Zheng, Y., Chen, Q. // The 14th IFToMM World Congress. Taiwan, October 25 – 30, 2015, pp. 582 – 588.

64. **Гильфанов, К. Х.** Повышение эффективности охлаждения воды и исследование градирен как объекта управления: монография / К.Х. Гильфанов, Ф. М. Давлетшин, Д. Р. Гилязов. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2009. – 185 с.

65. **Чичиров, А.А.** Моделирование и анализ процессов при функционировании системы оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, И. И. Галлеев, А. И. Муртазин, А. Ю. Смирнов, М. А. Волков; Труды Академэнерго, 2009. – № 2. – С. 64 – 80.

66. **Шарифуллин, В.Н.** Анализ влияния неравномерности распределения плотности орошения на процесс в башенной градирне / В. Н. Шарифуллин, А. И. Бадриев, А. В. Шарифуллин; Известия вузов. Проблемы энергетики, 2013. – № 11/12. – С. 24 – 26.

67. **Шарифуллин, В.Н.** Аэродинамические характеристики башенной градирни в условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха / В. Н. Шарифуллин, А. И. Бадриев; Теплоэнергетика, 2019. – № 8. – С. 46 – 52.

68. **Шарифуллин, В.Н.** Влияние неравномерности орошения на интенсивность процесса в испарительной градирне / В. Н. Шарифуллин, А. И. Бадриев; Промышленная энергетика, 2014. – № 6. – С. – 30 – 32.

69. **Шарифуллин, В. Н.** Оптимизация системы оборотного охлаждения по расходу циркуляционной воды / В. Н. Шарифуллин, А. И. Бадриев, А. В. Шарифуллин; Промышленная энергетика, 2016. – № 7. – С. 30 – 33.

70. **Жуков, В.П.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин. – Иваново, 2009. – 176 с.

71. **Jiang, L.** The effects of water droplet diameter distribution in the rain zone on the cooling capacity and water-splashing noise for natural draft wet cooling towers / Jiang, L., Han, Q., Wang, N., Gao M., He, S., Guan, H., Tan, X. // International Journal of Thermal Sciences, vol. 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106875

72. **Kong, Y.** Wind leading to improve cooling performance of natural draft air-cooled condenser / Kong, Y., Wang, W., Huang, X., Yang, L., Du, X., Yang, Y. // Applied Thermal Engineering, 2018, pp. 63 – 83. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.100.

73. **Kranc, S. C.** Optimal spray patterns for counter flow cooling towers with structured packing / Kranc, S. C. // Applied Mathematical Modelling, 2007, vol. 31, no 4, pp. 676 – 686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.11.027>.

74. **Li, X.** novel method integrating windbreak walls with water distribution to mitigate the crosswind effects on natural draft dry cooling towers / Li, X., Dong, P. A // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 205, 2020, pp. 104318. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104318.

75. **Li, X.** Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution / Li, X., Xia, L., Gurgenci, H., Guan, Zh. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, vol. 107, pp. 271 – 280.

76. **Liao, H. T.** Impacts of tower spacing on thermo-flow characteristics of natural draft dry cooling system / Liao, H. T., Yang, L. J., Wu, X. P., Du, X. Z.,

Yang, Y. P // International Journal of Thermal Sciences, 2016, vol. 102, pp.168 – 184. DOI: /10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.019.

77. **Wang, W.** A performance enhancement of a natural draft dry cooling tower in crosswind via inlet flow field reconstruction / Wang, W., Lyu, J., Zhang, H., Liu, Q., Yue, G., Ni, W. A // Energy & Buildings, 2018, vol. 164, pp. 121 – 130. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.003.

78. **Zhai, Z.** Improving cooling efficiency of dry – cooling towers under cross – wind conditions by using wind – break methods / Zhai, Z., Fu, S // Applied Thermal Engineering, 2006, vol. 26, № 10, pp. 1008 – 1017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.016.

79. **Zhang, G.** Water distribution below a single spray nozzle in a natural draft wet cooling tower / Zhang, G., Zheng, Y., Chen, Q. // The 14th IFToMM World Congress. Taiwan, October 25 – 30, 2015, pp. 582 – 588

80. **Zhang, Z.**, Numerical simulation on the three kinds of water droplet diameter treatments in rain zone of wet cooling towers/ Zhang, Z., Zhang, D., Han, Q., Wu, F., Gao, M., He, S. // International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 170, 2021, pp. 121054.

81. **Zhao, L.** Fluctuating wind pressure distribution around full-scale cooling towers / Zhao, L., Ge, Y., Kareem, A. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, vol. 165, pp. 34 – 45. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.02.016.

82. **de Villiers, E.** Analysis of Heat, Mass, and Momentum Transfer in the Rain Zone of Counterflow Cooling Towers. / de Villiers, E., and Kroger, D. G. // ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. October 1999; 121(4): 751–755. <https://doi.org/10.1115/1.2818537>

83. **Al – Waked, R.** CFD simulation of wet cooling towers / Al – Waked, R., Behnia, M. // Applied Thermal Engineering, 2006, vol. 26, № 4, pp. 382 – 395.

84. **Guo, Q.** New explicit analytical solutions of equations for heat and mass transfer in a cooling tower energy system / Guo Q, Qi X, Sun P, Guo P. // Advances in Mechanical Engineering. 2019;11(12). doi:10.1177/1687814019896147

85. **Hosoz, M.** Performance prediction of a cooling tower using artificial neural network / Hosoz, M, Ertunc, H M, and Bulgurcu, H. // United Kingdom: N. p., 2007. Web. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2006.06.024.
86. **Katinas, C.** Assessing parallel path cooling tower performance via artificial neural networks / Katinas, C., d'Entremont, B., Ray, W., Willis, M., & Reichardt, T. // Annals of Nuclear Energy, 192, Article 109993. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109993>
87. **Razafindrakoto E.** N3S-AERO: a multidimensional model for numerical simulation of flows in cooling towers / Razafindrakoto E., Denis C. // in: The 11th IAHN Cooling Tower Symposium, Cottbus, Germany, 1998, pp. 1-12.
88. **Систер, В.Г.** Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов / В. Г Систер, Ю. И. Мартынов. - Калуга: Изд. Н.Бочкаревой, 1998г.- 508с.
89. **Мандрыкин, Г.П.** Диагностирование и расчет тяги и суммарного коэффициента аэродинамического сопротивления башенной градирни / Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. - 2000. - Т. 236. - С. 225-229.
90. **Спицын, И. П.** Некоторые вопросы гидравлики водораспределительных систем башенных градирен / И. П. Спицын; Ленинградский гидрометеорологический институт. Межведомственный сборник, издание ЛПИ, 1978. – Вып. 67. – С 38 – 53.
91. **Сосновский, С.К.** Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторных и башенных градирнях / С. К. Сосновский, В. П. Кравченко; Энергетика и электрификация, 2008. – №3. – С. 37 – 44.
92. **Даутов, Р.Г.** Повышение эффективности процесса охлаждения в градирне / Р. Г. Даутов, С. А. Вилохин; Вестник Казанского технологического университета, 2013. – № 5. – Т. 16. – С. 190 – 192.



93. **Fisenko S.P.** Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower / S.P. Fisenko et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer 45. - 2002. - P. 4683-4694.

94. **Петросян, В.Г.** Анализ возможности повышения эффективности охлаждения воды в испарительных градирнях Армянской АЭС / В. Г. Петросян, Э. А. Егоян; Теплоэнергетика, 2015. – № 10. – С. 30 – 36.

95. **Федяев, В.Л.** Математическое моделирование и оптимизация градирен / В. Л. Федяев // Труды Академэнерго. – 2009. – № 3. – С. 91-107. – EDN KVKOBX

96. **Берман, Л.Д.** К определению коэффициента массоотдачи при расчете конденсации пара, содержащего примесь воздуха. "Теплоэнергетика", 1969, № 10, с. 68-71.

97. **Жуков, В.П.,** Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок / Жуков, В.П., Барочкин Е.В. - Иваново, 2009. - 176 с.

98. **Вентцель, Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. - М.:Дрофа, 2004. - 207 с.

99. **Корн Г.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Корн Г., Корн Т. - М.:Высш. шк., 1973. - 500 с.

100. **Моисеев, Н.Н.** Математические задачи системного анализа. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. - 488 с.

101. **Самарский, А.А.** Численные методы решения обратных задач математической физики / Самарский, А.А. Вабищевич П.Н. . –М.: Издательство ЛКИ, 2009. — 480 с.

102. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Высш.шк, 2006. – 575 с.

103. **Таха, Х.** Введение в исследование операций – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

104. **Исаченко, В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

105. **Справочник** по теплообменникам: В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др.— М.: Энерго-атомиздат, 1987. — 560 с.
106. **Касаткин, К.А.** Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин и др // Вестник ИГЭУ. - 2018. - №. 5. - С. 61-67.
107. **Павленко, А. Н.** Разделение смесей и распределение жидкости на структурированной насадке в крупномасштабной модели дистилляционной колонны / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, В. Ю. Чехович, В. Е. Жуков, С. Сандер, П. Хоуптон, А. Ф. Серов, А. Д. Назаров; Теоретические основы химической технологии, 2006. — Т. 40. — № 4. — С. 355 — 365
108. **Берман, Л.Д.** Обобщение опытных данных по тепло- и массообмену при конденсации пара в присутствии не конденсирующих газов. "Теплофизика высоких температур", 1972, №3, с. 587-594.
109. **Берман, Р.Д.** Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Р. Д. Берман. -М.: Госэнергоиздательство, 1949. -440 с.
110. **Лаптева, Е.А.** Модель структуру потока и эффективность пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз / Лаптева, Е.А., Столярова Е.Ю., Лаптев А.Г. // Фундаментальные исследования. 2018. № 11-2. С. 150-154;
111. **Petruchik, A.I.** К анализу экспериментальных данных о тепловой эффективности башенной испарительной градирни / Solodukhin, A & Stolovich, N.N., Fisenko, S // Известия РАН. Серия Энергетика. 142-149.
112. **Чичиров, А. А.** Математическое моделирование материальных потоков в системе оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, И. Ю. Силов, А. Ю. Смирнов, А. И. Муртазин; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2008. — № 5 — 6. — С. 28 — 34.
113. **Pavlenko, A. N.** Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing / Pavlenko, A. N., Zhukov, V. E., Pecherkin, N. I., Chekhovich, V. Y, Volodin, O. A., Shilkin, A., Grossmann C. //

AIChE Journal, 2014, vol. 60, pp. 690 – 705. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.14298>.

114. **Открытое** акционерное общество "Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС". Положение о согласовании и утверждении ограничений установленной электрической мощности тепловых электростанций: РД 153-34.1-09.312-99. – Утверждено Российским акционерным обществом энергетики и электрификации "ЕЭС России" 13.05.1999. – Введено в действие с 02.08.1999.

115. **Иванов, С.П.** Совершенствование тепломассообменных процессов в водооборотных циклах промышленных предприятий: специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Иванов Сергей Петрович. – Уфа, 2012. – 179 с. – EDN QFMYGV.

116. **Указания** по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике (РД 34.09.212): утверждено зам. начальника Главтехуправления Д. Я. Шамараковым 7.02.1980 г. – Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. – Москва: Южтехэнерго, 1981. – 37 с.

117. **FLUENT** Incorporated, FLUENT Users Guide Release 12, Lebanon, New Hampshire, USA, 2009.

118. **Newman, S.** Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media, 2015. 280 p.

119. **Richardson, C.** Microservices Patterns: With Examples in Java. Manning Publications, 2018. 520 p.

120. **Fowler, M.** Microservices: a definition of this new architectural term // Martin Fowler's blog. 2014. URL: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>

121. **Клеппман, М.** Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. СПб.: Питер, 2018. 640 с.

122. **Lewis, J.** Microservices / Lewis J., Fowler M. // ThoughtWorks Technology Radar. 2014

123. **Тимонин, А. С.** Машины и аппараты химических производств: учебное пособие для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др. / Под общей редакцией А. С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой. 2008. – 872 с.

124. **Давлетшин, Ф. М.** Испытания градирен, проводимые холдингом ООО «ТМИМ» / Ф. М. Давлетшин. // ООО «ТМИМ»: [сайт]. – 2006. URL: <http://gradirni.tmim.ru> (дата обращения: 19.08.25).

125. **Сосновский, С. К.** Оптимальные параметры работы градирен / С. К. Сосновский; Технологический аудит и резервы производства, 2012. – № 5/1(7). – С. 5 – 6.

126. **Руководство** по оптимизации оборотной системы водоснабжения электростанций с градирнями (РД 34.22.101): утверждено Научно-техническим советом Минэнерго СССР (протокол № 82 от 12 августа 1981 г.). – Москва: Минэнерго СССР, 1981. – 44 с.

127. **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.

128. **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.

129. **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.

130. **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.

131. **Жуков, В.П.** Моделирование и разработка информационно-диагностического комплекса системы обратного охлаждения электрической станции// В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, С.Д. Горшенин, Р.С. Дударев, Е.А. Шуина // Вестник ИГЭУ. – 2025. – №. 5. – С. 81-91.

132. 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».

133. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684686 Российская Федерация. «Система мониторинга и диагностики градири» : 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».

134. **Фомичев, М.Д.** Математическое моделирование систем обратного 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.

135. **Фомичев, М.Д.** Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в системах обратного 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.

136. **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.

137. **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.

138. **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 2023 года. Том 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 392-395.

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

140. **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.

141. **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.

142. **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.

143. **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.

144. **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.

145. **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 студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 1004. – 1004.



## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Свидетельства о государственной регистрации  
программ для ЭВМ, разработанных по тематике диссертационного  
исследования**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025685094

**«Программный комплекс для моделирования и анализа  
работы градирен»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина» (RU)*

Авторы: *Фомичев Максим Дмитриевич (RU), Жуков  
Владимир Павлович (RU)*



Заявка № 2025683978

Дата поступления 21 августа 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e7c1a6300b15442401670bca2026  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025684686

«Система мониторинга и диагностики градирни»

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (RU)*

Авторы: *Фомичев Максим Дмитриевич (RU), Жуков Владимир Павлович (RU)*



Заявка № 2025683961

Дата поступления 21 августа 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e761a6300b154f2401670bca2026  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Документы, подтверждающие практическую  
реализацию диссертационной работы**

УТВЕРЖДАЮ  
Директор филиала  
АО «Концерн Росэнергоатом»  
«Нововоронежская АЭС»

Д.т.н. В.И. Поваров

« 25 » 2025 г.



### АКТ О ВНЕДРЕНИИ РАБОТЫ N 07/2025-ОТД/13

1. **Наименование научной работы:** Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения.

2. **Автор(ы):** Жуков Владимир Павлович, Фомичев Максим Дмитриевич, Горшенин Сергей Дмитриевич (ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34).

**Краткая характеристика научной работы:** В рамках работы на основе анализа условий эксплуатации и состояния системы оборотного водоснабжения энергетического блока 4 НВАЭС; анализа состава теплообменного оборудования СОО НВАЭС; анализа характерных режимов работы градирни и циркуляционных насосов СОО НВАЭС; создана расчетная матричная комбинированная с использованием пакета ANSYS FLUENT моделей башенной градирни; проведены расчеты башенной градирни СОО Нововоронежской АЭС. В ходе проведенных исследований были выявлены и уточнены причины снижения эффективности функционирования СОО за счет неравномерности распределения воздуха и воды по сечению, показана необходимость проведения дополнительных расчетных исследований с целью уточнения диагностики и исправления указанных дефектов. Для автоматизации проведения расчетов с возможным мониторингом и диагностикой состояния оборудования разработаны алгоритм и пилотный проект программного комплекса диагностики состояния теплообменного оборудования СОО Нововоронежской АЭС: <http://89.169.191.160/>

3. **Степень внедрения:** принята к рассмотрению.

4. **Предполагаемый эффект от использования результатов работы:** Увеличение выработки электрической энергии энергоблоком за счет снижения неравномерности распределения воздуха и воды по сечению градирни, показана необходимость проведения дополнительных расчетных исследований с целью уточнения диагностики и исправления указанных дефектов.

Начальник ОТД

д.т.н. М.Т. Слепов





Публичное акционерное общество «Территориальная генерирующая компания №1»  
(ПАО «ТГК-1»)

Филиал «Карельский»

**Петрозаводская теплоэлектроцентраль  
(ПТЭЦ)**

«27» 02 2023 г.

№ \_\_\_\_\_

Директор Петрозаводской ТЭЦ

ПАО «ТГК-1»

В.А. Карпов

**Акт внедрения**

результатов научно-исследовательской работы  
«Оптимизация работы градирни БГ 1600 ст. № 2»

Научно-исследовательская работа (НИР) «Оптимизация работы градирни БГ 1600 ст. № 2» выполнена коллективом сотрудников Ивановского государственного энергетического университета и ЗАО «Ивэнергосервис»: д.т.н. проф. Барочкин Е.В., д.т.н. проф. Жуков В.П., к.т.н. доц. Барочкин А.Е., асп. Фомичев М.Д.

Работа была направлена на решение следующих задач:

- 1) разработка математической модели тепломассообменных процессов, протекающих в градирне ст. № 2 Петрозаводской ТЭЦ;
- 2) определение температурного перепада охлаждаемой воды и теплового К.П.Д., позволяющих с достаточной полнотой и точностью учитывать влияние основных факторов на эффективность работы градирни и сравнение полученных данных с первоначальными;
- 3) получение аналитических зависимостей для определения теплогидравлических и аэродинамических характеристик оборудования и теплоносителей.

Для решения поставленных задач в рамках НИР было разработано математическое описание оросительной градирни как многопоточного теплообменного аппарата. С помощью матричного метода решения обратных задач по выбору конструктивных и режимных параметров, был выполнен расчет теплогидравлических и аэродинамических характеристик оборудования градирни ст. № 2 Петрозаводской ТЭЦ и определены наиболее эффективные режимы работы данной градирни.

Наиболее важным результатом выполненной НИР является формирование комплекса мероприятий по внесению конструктивных изменений в оросительную установку градирни ст. № 2 Петрозаводской ТЭЦ, что повысит эффективность работы градирни в части снижения температуры воды на выходе из неё, а также будет способствовать снижению капельного уноса.

Среднегодовой эффект от внедрения разработанного варианта комплекса мероприятий оценивается в экономии до 4 540 т.у.т.



**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор ФГБОУ ВО «Ивановский  
государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»  
по научной работе,  
д-р техн. наук., профессор



В.В. Тютиков

08 2025 г.

**АКТ**

**внедрения научно-лабораторного программного комплекса по расчету  
и диагностике систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС  
в учебный процесс университета по кафедре прикладной математики**

Настоящим подтверждается, что в 2024/25 учебном году в процесс подготовки студентов, обучающихся по направлениям 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, внедрена в учебный процесс методика решения прямых и обратных задач диагностирования оборудования СОО, разработанная в рамках выполнения проекта «Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения». Данная методика используется при выполнении лабораторных и научных работ в рамках курсов «Теория принятия решения» и «Математическое моделирование».

Методика решения прямых и обратных задач диагностирования оборудования СОО и реализующий ее программный комплекс разработаны сотрудниками кафедры прикладной математики ИГЭУ (д-р техн. наук, профессор Жуков В.П., аспирант Фомичев М.Д.) в рамках выполнения проекта «Способы повышения эффективности систем оборотного водоснабжения» РТЦ-2 НВАЭС АО «Концерн Росэнергоатом».

Внедрение программного комплекса обеспечивает повышение эффективности изучения студентами методов решения прямых и обратных задач диагностики состояния оборудования энергетических систем.

Акт составлен на кафедре «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».

Заведующий кафедрой ПМ  
д-р техн. наук, доцент

 А.Н. Беляков