

ОТЗЫВ

официального оппонента Пазушкиной Ольги Владимировны
на диссертационную работу Фомичева Максима Дмитриевича
**«Моделирование, расчет и совершенствование процессов теплообмена
в башенных градирнях ТЭС и АЭС»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы»

Актуальность темы диссертационного исследования

Системы оборотного охлаждения, среди различных типов которых широко применяются системы с башенными градирнями, являются неотъемлемой частью технологического цикла тепловых и атомных электростанций. Они обеспечивают отвод низкопотенциальной теплоты конденсаторов турбин, что определяет экономичность и надежность работы энергоблоков. Эффективность систем оборотного охлаждения влияет на вакуум в конденсаторе, а значит на удельный расход топлива на выработку электроэнергии и максимальную электрическую мощность энергоблока. Существующие методы расчета градирен не в полной мере учитывают влияние температурно-влажностных параметров атмосферы и ветровой нагрузки. Кроме того, остро стоит проблема своевременной диагностики технического состояния оборудования, так как загрязнение и обмерзание элементов градирен могут приводить к аварийным остановам и требуют разработки методов обнаружения дефектов по косвенным признакам. Таким образом, тема диссертационного исследования Фомичева М.Д., направленного на решение актуальной научно-технической проблемы повышения эффективности и надежности функционирования энергетических систем и комплексов за счет совершенствования процессов в башенных градирнях, является актуальной.

Оценка содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований. Работа представлена на 145 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения.

Цель диссертационного исследования, сформулированная соискателем, заключается в повышении эффективности функционирования ТЭС и АЭС за счет совершенствования эксплуатации и диагностики технического состояния башенных градирен на основе их математических моделей.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, изложены цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов работы. Представлены положения, выносимые на

защиту, степень достоверности полученных результатов и личный вклад автора, применяемые в работе методы исследования, сведения об апробации результатов работы, их внедрении и публикациях по тематике исследования.

В первой главе рассмотрены роль и место систем оборотного охлаждения в структуре современных тепловых и атомных электрических станций, раскрыты особенности эксплуатации башенных градирен в различных климатических условиях. Рассмотрены проведенные ранее другими авторами исследования процессов тепломассообмена в градирнях. На основе проведенного анализа и обзора литературных источников автор формулирует цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнена разработка математических моделей тепломассообменных процессов в башенной градирне. На начальном этапе автором предложена матричная модель тепломассообмена, учитывающая поток водяных паров в воздухе и позволяющая оценить влияние на интенсивность процесса неравномерности распределения потоков воздуха и воды в поперечном сечении градирни. Матричная математическая модель верифицирована по экспериментальным данным. Для учета внешних факторов, определяющих распределение воздуха в градирне, автором разработана комбинированная модель, интегрирующая матричную математическую модель с программным пакетом Ansys Fluent. Представленный алгоритм расчета сочетает аналитические методы и численное моделирование. Установлено, что предложенная комбинированная модель адекватно отражает реальный процесс тепломассопереноса в башенной градирне, что подтверждается нормативными данными.

В третьей главе представлено применение разработанных моделей для решения практических задач диагностики и оптимизации работы градирен. Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния скорости ветра на эффективность функционирования градирни. Предложен алгоритм управления фрамугой для устранения неравномерного распределения воздушных потоков. Поставлена и решена обратная задача диагностики состояния охладительной способности башенной градирни в виде алгоритма определения распределения воздуха в поперечном сечении градирни по известным параметрам скорости ветра и недоохлаждения воды.

В четвертой главе обобщены результаты научных исследований. Показано, что разработанная методика диагностики технического состояния охладительной способности градирни и реализующий ее программный модуль приняты к рассмотрению в филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» (АО «НВАЭС») в составе комплексной системы

мониторинга технико-экономических показателей. Для Петрозаводской ТЭЦ выполнен расчет теплогидравлических и аэродинамических характеристик градирни с определением наиболее эффективных режимов работы. Установлено, что прогнозируемый годовой эффект от внедрения разработанного комплекса мероприятий составит 4540 тонн условного топлива.

В заключении сформулированы основные результаты в соответствии с целью исследования и поставленными задачами, показано, что разработанные математические модели и методики диагностики обладают практической ценностью для повышения эффективности эксплуатации систем оборотного охлаждения с башенными градирнями, приведены рекомендации по дальнейшему научному и практическому использованию предложенных технических решений.

В приложениях представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и документы, подтверждающие практическую реализацию диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях. Автором предложена комбинированная модель, интегрирующая матричное математическое описание процессов тепломассопереноса с численным моделированием аэродинамики в программном пакете Ansys Fluent и учитывающая фазовые переходы в теплоносителе и влияние ветровых воздействий на распределение потоков воздуха в поперечном сечении градирни. Сформулирована и решена обратная задача диагностики технического состояния градирни, позволяющая определять характер распределения воздушных потоков в поперечном сечении по косвенным измеряемым параметрам – скорости ветра и недоохлаждению циркуляционной воды. Разработана система диагностики охладительной способности градирни на основе решения обратных задач, позволяющая идентифицировать возможные неисправности оборудования и отклонения от номинальных условий работы с целью решения задачи повышения надежности и эффективности работы систем оборотного охлаждения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждается комплексным подходом к исследованию и применением апробированных методов математического моделирования процессов тепломассопереноса.

Практическая проверка разработанных математических моделей и алгоритмов проведена на действующем оборудовании тепловых и атомных электрических станций с получением положительных результатов.

Обоснованность выводов подтверждается:

- проведением валидации разработанных моделей с нормативными данными;

- внедрением разработанной методики диагностики технического состояния охладительной способности градирни на производственных объектах в составе комплексной системы мониторинга технико-экономических показателей;

- получением свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Значимость результатов работы для науки и практики.

Теоретическая значимость работы заключается: во-первых, в развитии методов комбинированного моделирования тепломассообменных процессов и разработке комбинированной модели, интегрирующей аналитическое описание процессов тепломассопереноса с численным моделированием аэродинамики в программном пакете Ansys Fluent, что позволяет учитывать влияние внешних факторов на распределение воздушных потоков и обеспечивает высокую точность инженерных расчетов, сопоставимую с нормативными данными; во-вторых, в разработке математического описания градирни как многопоточного теплообменного аппарата с учетом фазовых переходов в теплоносителях; в-третьих, в математической постановке и решении обратных задач для систем оборотного охлаждения с башенными градирнями с целью развития диагностики оборудования систем оборотного охлаждения.

Практическая значимость работы определяется разработкой и адаптацией для практического использования на ТЭС и АЭС программного комплекса диагностики технического состояния башенных градирен, который позволяет производить оценку охладительной способности оборудования путем решения обратных задач тепломассообмена; внедрением результатов исследования на Петрозаводской ТЭЦ, что обеспечивает повышение эффективности ее работы за счет снижения температуры воды на выходе из системы оборотного охлаждения, годовой экономический эффект при этом составляет 4540 тонн условного топлива; использованием результатов в учебном процессе ИГЭУ.

Замечания и вопросы по диссертации

1. В работе предложена математическая модель, учитывающая водяные пары как отдельный поток. Хотелось бы получить более детальное обоснование выбора именно трехпоточной схемы моделирования. Как именно модель

учитывает фазовый переход в теплоносителе? Проводилось ли сравнение с классическими двухпоточными моделями для оценки степени влияния выделения паровой фазы в отдельный поток на точность расчетов?

2. В диссертации представлено сопоставление разработанной комбинированной модели с номограммами ОРГРЭС и экспериментальными данными. Номограммы составлены для «идеальных» условий – чистый ороситель, равномерное распределение воды по сечению, штиль и т.п. Модель, напротив, создана для того, чтобы учитывать засорение, неравномерность подачи воды, влажность, ветер. Можно ли в случае верификации модели по номограммам, которые эти неравномерности не учитывают, быть уверенным, что модель корректно описывает влияние этих неравномерностей?

3. В работе обосновывается выбор разбиения на 4 сектора исследованием сходимости (рис. 2.6), где показано, что при $n=4$ отклонение температуры не превышает $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в сравнении с $n=8$). Чувствительна ли к такому сравнительно грубому разбиению обратная задача диагностики? Не теряется ли при таком осреднении по секторам информация о локализации проблемных зон?

4. В комбинированной модели представлена интеграция матричной модели теплообмена с программным пакетом Ansys Fluent для моделирования аэродинамики. Хотелось бы понять, какие именно модели турбулентности применялись в расчетах и чем обоснован их выбор для данной конкретной задачи? Проводилась ли верификация результатов CFD-моделирования на экспериментальных данных по распределению скоростей воздуха внутри градирни? Как модель реагирует на изменение направления ветра? Учитывает ли модель инерционность системы? Например, как быстро можно выйти на новый оптимизированный режим работы после изменения положения фрамуг?

5. В диссертации основное внимание уделено башенным градирням. Например, предложен алгоритм закрытия фрамуг для снижения неравномерности воздушных потоков. Насколько применима предложенная методология к другим типам охладительных систем (вентиляторным, гибридным градирням или брызгальным бассейнам), которые имеют принципиально иную аэродинамику? Требуется ли существенная модификация математических моделей для их адаптации к иным конструктивным решениям?

6. Как предлагаемый программный комплекс мониторинга и диагностики (интерфейс которого представлен на рис. 4.2 – 4.5) интегрируется в существующие мнемосхемы и системы сигнализации АСУ ТП действующего энергоблока? Предполагается ли создание нового контура регулирования?

7. Указан среднегодовой эффект 4540 т.у.т. от внедрения разработанного варианта комплекса на Петрозаводской ТЭЦ. В тексте указано «градирня ст. № 2», проводился ли расчет для других градирен этой же станции? Учитывалось ли изменение КПД энергоблока за счет снижения температуры охлажденной воды при выполнении оценки? Как изменение температуры воды влияет на электрическую мощность блока при неизменном расходе пара? Проводилось ли инструментальное подтверждение достигнутой экономии? Например, сравнивались фактические удельные расходы топлива до и после внедрения рекомендаций при аналогичных внешних условиях?

Вышеуказанные вопросы и замечания имеют частный характер, не снижают теоретической и практической ценности работы и целостности ее содержания.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.

По теме диссертации соискателем опубликовано 19 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России, 12 тезисах и полных текстах докладов конференций, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Фомичева Максима Дмитриевича «Моделирование, расчет и совершенствование процессов теплообмена в башенных градирнях ТЭС и АЭС», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технических науки) является завершенной комплексной научно-квалификационной работой, в которой представлены новые технические решения, имеющие научное обоснование и направленные на увеличение энергетической эффективности при эксплуатации башенных градирен, что имеет существенное значение для развития энергетической отрасли.

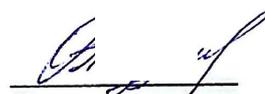
Автором успешно решены поставленные задачи, включая разработку математических моделей теплообмена с учетом фазовых переходов, создание комбинированной модели, интегрирующей аналитические и численные методы, проведение расчетно-экспериментальных исследований и валидацию полученных результатов на основе сопоставления с нормативными данными. Предложенные новые технические решения в области диагностики и оптимизации работы градирен обоснованы теоретически и подтверждены практическими исследованиями на действующем энергетическом оборудовании.

Особую ценность представляет комплексный подход к решению проблемы, включающий разработку математической модели для описания многопоточных систем с фазовыми переходами, методологии решения обратных задач диагностики, программного обеспечения и методики практической реализации результатов на производственных объектах. Полученные результаты имеют существенное значение для развития современных методов эксплуатационного контроля и повышения энергоэффективности систем оборотного охлаждения энергетических станций.

Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, и содержит достаточное количество научно обоснованных результатов, а соискатель, Фомичев Максим Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Официальный оппонент:

доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция им. В.И. Шарапова»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет»,
кандидат технических наук, доцент

 Пазушкина
Ольга Владимировна
«17» февраля 2026 г.

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

Адрес организации: 432027, г. Ульяновск ул. Северный Венец, д. 32,

Телефон: +7 (8422) 77 85 31; +7 917 626 09 58

Адрес электронной почты: o.pazushkina@ulstu.ru

Официальный сайт: <https://ulstu.ru/>

Подпись Пазушкиной О.В. заверяю 

проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет»



 Климовский
Андрей Борисович