

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГБОУ ВО «КНИТУ»

д.т.н. Гильмуллин И.М.



ОТЗЫВ

ведущей организации –
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»
на диссертацию **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 диссертационной работы

В настоящее время энергетический сектор сталкивается с необходимостью модернизации существующего оборудования и внедрения современных подходов к управлению технологическими процессами. Одним из узких мест в обеспечении устойчивой работы генерирующих мощностей является состояние вспомогательных систем, в частности, контуров обратного водоснабжения, от надежности функционирования которых напрямую зависит возможность реализации номинальных параметров основного энергетического оборудования.

Градирни башенного типа, широко применяемые на тепловых и атомных электрических станциях, были спроектированы и введены в эксплуатацию несколько десятилетий назад. За прошедший период накоплен значительный опыт их эксплуатации, выявлены характерные дефекты и

режимные ограничения. Вместе с тем, существующие методики расчета и контроля работы данного оборудования зачастую базируются на упрощенных инженерных подходах, не учитывающих в полной мере реальную сложность протекающих физических процессов и фактическое техническое состояние оборудования после многолетней эксплуатации.

Эффективность работы турбоустановок напрямую определяется температурой циркуляционной воды на входе в конденсатор. Повышение температуры охлажденной воды влечет за собой снижение термодинамического КПД цикла и увеличение удельного расхода топлива. Для энергоблоков большой мощности даже незначительные отклонения температуры циркуляционной воды от оптимальных значений выражаются в существенных дополнительных затратах топливно-энергетических ресурсов, что подчеркивает критическую важность обеспечения расчетных параметров работы систем обратного охлаждения.

Климатические изменения последних лет, проявляющиеся в увеличении повторяемости экстремальных погодных явлений, создают дополнительные вызовы для эксплуатации градирен. Периоды аномально высоких температур снижают охлаждающую способность оборудования именно в моменты максимальной электрической нагрузки энергосистемы, что создает критические ситуации для энергоснабжения регионов.

С точки зрения эксплуатационного персонала остро стоит проблема отсутствия инструментов оперативной диагностики, позволяющих без остановки оборудования оценить фактическое состояние внутренних устройств градирни. Традиционные методы контроля, основанные на периодических осмотрах, не обеспечивают необходимой оперативности выявления развивающихся дефектов.

В данном контексте разработка научно обоснованных методов математического описания работы градирен с учетом реальных условий эксплуатации и создание на их основе систем диагностики технического состояния представляется своевременной и востребованной практической задачей, решение которой вносит вклад в обеспечение энергетической безопасности страны и повышение экономической эффективности функционирования генерирующих предприятий.

Структура, объем и основное содержание диссертации.

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

Во введении автор обосновывает выбор темы и ее актуальность для современной теплоэнергетики, определяет цель работы и формулирует задачи, требующие решения. Приведены сведения о научной новизне полученных результатов, их теоретическом и прикладном значении. Изложены защищаемые положения, представлена информация об апробации результатов на конференциях, публикациях автора и внедрении разработок на энергетических предприятиях.

В первой главе автором проанализирована роль охладительных систем в обеспечении функционирования генерирующего оборудования электростанций, рассмотрены конструктивные особенности башенных градирен и условия их эксплуатации. Выполнен детальный анализ литературных источников по моделированию процессов тепломассообмена в охладительном оборудовании, рассмотрены существующие расчетные методики и выявлены их недостатки. Обоснована перспективность применения матричного подхода для описания процессов в многопоточных теплообменных системах. По результатам анализа сформулированы задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена построению математического описания процессов в башенной градирне. Разработана матричная модель, отличающаяся выделением водяного пара как самостоятельного модельного потока, что обеспечивает более детальное описание испарительного охлаждения. Получена система дифференциальных уравнений для расчета температурных полей теплоносителей и влагосодержания воздуха. Адекватность модели подтверждена сопоставлением расчетных данных с экспериментальными результатами. Проведено исследование влияния пространственной неравномерности распределения потоков на эффективность охлаждения путем разделения сечения градирни на секторы. Для учета метеорологических условий разработана комбинированная модель, объединяющая аналитическое описание тепломассопереноса с численным моделированием аэродинамики в программном комплексе Ansys Fluent. Проведена валидация комбинированной модели по нормативным данным.

Третья глава демонстрирует практическое применение разработанной математической модели. Исследовано влияние ветровой нагрузки на работу градирни, получены количественные оценки роста неравномерности воздушных потоков. Разработан алгоритм управления воздухозаборными устройствами для компенсации негативного влияния ветра. Значительное внимание уделено постановке обратных задач диагностики. Предложена методика определения фактического распределения воздуха в градирне в зависимости от измеряемых эксплуатационных параметров, что позволяет выявлять нарушения нормального режима работы оборудования без его остановки.

Четвертая глава содержит описание практической реализации научных результатов. Представлена разработанная система мониторинга и диагностики с описанием ее функциональных возможностей, программный модуль которой принят к рассмотрению на Нововоронежской АЭС концерна Росэнергоатом. Приведены результаты расчетов для Петрозаводской ТЭЦ ТГК-1 с определением рациональных режимов работы градирни и оценкой экономического эффекта. Отражено внедрение разработанных методик в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИГЭУ».

В заключении обобщаются основные результаты исследования, сформулированы выводы о достижении поставленной цели и подтверждается практическая ценность разработанных моделей и методик для повышения эффективности работы охладительных систем энергетических объектов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертации применены общепринятые методы математического моделирования процессов тепломассопереноса, включая матричный метод для описания многопоточных систем, численные методы решения дифференциальных уравнений и современные инструменты CFD-моделирования. Все теоретические положения подкреплены расчетно-экспериментальными исследованиями на реальных объектах энергетики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: согласованием результатов моделирования с экспериментальными данными и нормативными расчетами; подтверждением работоспособности разработанных методик в ходе их практической реализации на Нововоронежской АЭС и Петрозаводской ТЭЦ; получением свидетельств о

государственной регистрации программ для ЭВМ, что документально подтверждает оригинальность программных разработок.

Научные положения, выносимые на защиту, прошли экспертную оценку в процессе представления на научно-технических конференциях различного уровня; в их публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных для опубликования основных результатов диссертационных исследований.

Результаты работы отражены в публикациях автора, включая статьи в ведущих научных журналах и материалах конференций, что свидетельствует об их апробации научным сообществом и подтверждает достоверность и обоснованность сделанных выводов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Автором создан гибридный подход к моделированию башенных градирен, в котором матричное описание процессов тепломассопереноса с учетом испарения воды сочетается с CFD-моделированием движения воздушных масс. Такая интеграция позволяет одновременно учитывать влияние внешних метеорологических факторов, в частности ветра, на аэродинамическую картину течения и связанную с ней неравномерность распределения потоков по сечению аппарата. Особенностью предложенного подхода является рассмотрение водяного пара как отдельного модельного потока в системе уравнений тепломассообмена, что отличает данную модель от традиционных инженерных методик расчета градирен.

Существенным элементом научной новизны является постановка и решение обратной задачи идентификации технического состояния градирни. В отличие от прямых задач расчета выходных параметров по заданным входным условиям, предложенная методика позволяет по доступным измерениям определять характер распределения воздушных потоков в поперечном сечении аппарата. Разработанный алгоритм численного решения обратной задачи создает методологическую основу для построения систем диагностики, способных выявлять отклонения от нормальной работы оборудования без проведения прямых измерений внутри градирни.

Предложенные решения представляют собой оригинальную комбинацию методов матричной формализации, численного моделирования и теории обратных задач, адаптированную к специфике систем оборотного охлаждения электростанций. Практическая реализация разработанных

подходов на действующих энергетических объектах свидетельствует о достаточной зрелости и работоспособности предложенных научных решений.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

Значимость выполненной работы определяется вкладом в развитие методов математического моделирования теплоэнергетического оборудования и диагностики технического состояния.

Автором обоснована целесообразность применения комбинированного подхода к моделированию систем оборотного охлаждения с башенными градирнями, сочетающего матричное описание тепломассообменных процессов с численным моделированием аэродинамики. Выделение водяных паров, содержащихся в воздухе, в отдельный модельный поток позволяет более детально описывать физику процесса испарительного охлаждения. Данный подход может быть распространен на другие типы охладительного оборудования и аппараты с фазовыми переходами.

Разработанная автором методология решения обратных задач позволяет по доступным эксплуатационным параметрам идентифицировать внутренние характеристики оборудования, недоступные для прямого измерения. Это направление исследований открывает перспективы создания интеллектуальных систем мониторинга технического состояния без применения дорогостоящих средств прямого контроля.

Предложенная методика диагностики градирен, учитывающая комплексное влияние внешних метеорологических факторов на эффективность тепломассообмена, развивает теоретические представления о механизмах функционирования охладительных систем в изменяющихся условиях эксплуатации. Установленные количественные зависимости между параметрами ветровой нагрузки, неравномерностью распределения потоков и показателями охлаждения обогащают научные знания в области проектирования и эксплуатации систем технического водоснабжения электростанций.

На разработанные программные комплексы «Система мониторинга и диагностики градирни» и «Программный комплекс для моделирования и анализа работы градирен» получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Разработанные программные комплексы диагностики могут использоваться персоналом атомных и электрических станций для своевременного раннего обнаружения дефектов в системах оборотного водоснабжения, а также для оптимизации режимов работы оборудования указанных систем и повышения энергетической эффективности производства электроэнергии.

В проектных организациях разработанные программные комплексы могут применяться при решении задач разработки нового энергетического оборудования и модернизации существующих систем оборотного водоснабжения.

В научных и наладочных организациях результаты работы рекомендуются для интеграции разработанных алгоритмов диагностики в автоматизированные системы управления технологическими процессами, что позволит обеспечить раннее обнаружение отклонений от нормальных режимов работы и своевременное принятие корректирующих решений. Перспективным направлением является использование предложенной методологии решения обратных задач для формирования критериев оценки качества обслуживания оборудования систем оборотного охлаждения.

Публикации результатов

Материалы диссертации отражены в 19 опубликованных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 12 тезисах и полных текстах докладов конференций. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы: п. 1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и

возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования, п. 2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии, п. 4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

Замечания и вопросы по работе

1. В тексте диссертации и автореферате не указано каким образом рассчитывались коэффициенты теплопередачи между тремя рассматриваемыми фазами (воздухом, водой и водяным паром), а также коэффициент массопередачи в системе уравнений (2.1) на странице 42 диссертации. Так как в диссертации отсутствует подробное описание башенной градирни как объекта исследования (кроме указания направления потоков на рис. 2.1) осталась неясной форма межфазной поверхности (пленка, капли или капли + пленка).

2. Комбинированная модель предполагает интеграцию результатов CFD-моделирования с расчетом тепломассообмена. Хотелось бы понять, как организован обмен данными между этими двумя частями модели. Требуется ли итерационное уточнение решения с учетом взаимного влияния тепловых и аэродинамических процессов или используется односторонняя связь?

3. Для Петрозаводской ТЭЦ определены оптимальные режимы работы градирни с ожидаемым экономическим эффектом. Представляет интерес вопрос о том, насколько полученные рекомендации специфичны для конкретной градирни. Возможен ли перенос результатов на другие объекты или требуется индивидуальная настройка модели для каждой станции?

4. В работе показано влияние неравномерности распределения потоков на эффективность охлаждения. Рассматривалась ли возможность конструктивных решений для выравнивания распределения потоков, помимо управления фрамугами? Какие технические решения могли бы быть наиболее эффективными при модернизации существующих градирен?

5. В диссертации основное внимание уделено влиянию ветровой нагрузки на работу градирни. Интересно было бы узнать, рассматривалось ли влияние других эксплуатационных факторов, таких как частичное засорение оросительных устройств или неравномерность распределения воды по сечению? Насколько предложенная методика диагностики способна различать различные типы неисправностей?

Заключение о работе

Диссертационная работа Фомичева Максима Дмитриевича представляет собой самостоятельное, завершенное, фундаментально и практически значимое исследование, посвященное разработке технических решений в области аэрогидродинамики и тепло- и массообмена в башенных градирнях, разработке усовершенствованной методики их диагностики в системе оборотного водоснабжения ТЭС и АЭС. Полученные автором научные и практические результаты исследования отвечают поставленным целям и задачам, работа содержит обоснованные выводы.

Диссертационная работа Фомичева Максима Дмитриевича на тему «Моделирование, расчет и совершенствование процессов тепломассообмена в башенных градирнях ТЭС и АЭС», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и математическое описание для их расчета, направленные на повышение энергетической эффективности эксплуатации башенных градирен и имеющие важное значение для развития энергетической отрасли страны.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), а ее автор, Фомичев Максим Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и единогласно одобрен на заседании кафедры «Оборудование пищевых производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», протокол № 2 от 09.02.2026 года.

Заведующий кафедрой оборудования
пищевых производств (ОПП) ФГБОУ ВО
«КНИТУ», д.т.н. по специальности 11.00.11.,
профессор

Николаев Андрей
Николаевич

Доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
д.т.н. по специальности 2.6.13., доцент

Дмитриева Оксана
Сергеевна

09 февраля 2026 г.



Сведения о ведущей организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)
Адрес организации: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, тел.: +7 (843) 231-42-16, факс +7 (843) 238-56-94, e-mail: office@kstu.ru, официальный сайт: <https://www.kstu.ru/index.jsp>