

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Фомичева Максима Дмитриевича**

«Моделирование, расчет и совершенствование процессов тепломассообмена в башенных градирнях ТЭС и АЭС», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы (технические науки)

**Актуальность темы.** Большинство систем водяного охлаждения электростанций оснащаются башенными градирнями, позволяющими решать проблемы обеспечения цикла тепловой электрической станции холодным источником. В качестве таких проблем можно обозначить ограничения водных ресурсов, экологическое загрязнение окружающей среды, относительно малозатратную и доступную технологию, в сравнении, например, с организацией прудов охладителей.

Несмотря на хорошую изученность как самих градирен, так и происходящих в них процессов, при эксплуатации возникает достаточно много связанных с их обслуживанием научных проблем. К этим проблемам относятся: оценка состояния и диагностирование внутренних элементов градирен; обмерзание входных окон и распределяющих элементов зимой; недостаточное охлаждение воды летом, приводящее к ограничению мощности турбин; влияние ветра (воздушных потоков), приводящее к нарушению газодинамики внутри градирни, в частности, к неравномерности потоков воздуха по сечению и др.

Ввиду того, что градирня является элементом системы охлаждения конденсационной установки турбины, от эффективности градирни зависит вакуум в конденсаторе, экономичность и надежность турбины в целом. В связи с изложенным, исследования градирен с целью их совершенствования является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы диссертации.** Применительно к процессам, происходящим в градирнях, к настоящему времени хорошо изучены процессы тепломассообмена, испарительного охлаждения воды в потоке воздуха, вопросы расчета, разработки и эксплуатации градирен. Исследованы вопросы оценки необходимых расходов воздуха для охлаждения воды, влияния температуры, влажности воздуха, барометрического давления. В нормативной литературе даются обоснованные рекомендации по величине «продувки» (добавления воды для снижения ее солесодержания) градирен и т.д.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана комбинированная модель башенной градирни на основе интеграции матричного трехпоточного описания тепломассообмена и имитационной модели аэродинамических процессов, (модель) учитывающая фазовые переходы в теплоносителе и влияние ветровых воздействий на распределение потоков воздуха в поперечном сечении градирни.
2. Сформулирована и решена обратная задача диагностирования состояния охлаждающей способности градирни, позволяющая учитывать неравномерность распределения потоков теплоносителей в поперечном сечении градирни.

**Степень достоверности и обоснованности 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.

**В первой главе** диссертации автором выполнен обзор и сравнение градирен различных типов, представлены их достоинства и недостатки, описаны особенности происходящих в градирнях процессов. Представлено описание метода матричной формализации, применяемого для расчета теплообменного оборудования со сложной структурой потоков. Показано, что данный метод не использовался до настоящего времени для описания

теплообменных процессов между водой и воздухом с различной относительной влажностью. Проанализированы также работы, в которых описаны результаты расчетов градирен с неравномерной подачей воздуха и воды по сечению устройства. Представлено сравнение различных методов поперечного расчета градирен: численное моделирование, аналитические расчеты, использование нейронных сетей. Отдельно рассмотрены работы, в которых анализируется влияние ветра на эффективность градирен. В заключении главы сформулированы выводы и поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** диссертации разработана методика комбинированного подхода к расчету теплообменных процессов. На первом этапе методики проводится расчет газодинамики внутри градирни численными методами, что позволяет получить распределение скоростей и расхода воздуха по выбранному сечению. На втором этапе расчет теплообмена проводится методом матричной формализации с учетом полученной неравномерности расходов воздуха и использованием законов сохранения энергии и массы. Система четырех дифференциальных уравнений описывает изменение температур воды, воздуха, водяных паров и концентрации водяных паров в воздухе по мере движения теплоносителей. При этом температуры воздуха и водяных паров должны соответствовать друг другу. В постановке задачи не учитывается капельный унос жидкости и изменение расхода жидкости из-за увеличения влажности воздуха. Последний фактор, по-видимому, является крайне малозначимым, поэтому автор его и не упоминает. Расчеты в рамках комбинированной модели ведутся итерационным методом до совпадения заданной и получаемой тепловой нагрузки градирни.

Для учета неравномерности скоростей воздуха сечение градирни автор предлагает разбивать на 4 равных сектора. Вероятно, с учетом осевой симметрии башенной градирни ее сечение лучше было разбить на кольца, что продемонстрировано у ряда авторов в литературном обзоре диссертации.

Необходимо отметить, что результаты расчетов градирни как методом матричной формализации, так и комбинированным методом

удовлетворительно согласуются с экспериментальными и нормативными данными.

**В третьей главе** представлены результаты расчета влияния неравномерности потоков воздуха и воды на эффективность охлаждения воды в градирне. На основании приведенных данных можно предположить, что неравномерность распределения теплоносителей в градирне приводит к уменьшению охлаждения воды на 2–3°C.

В главе приведено описание методики по оценке влияния скорости ветра снаружи градирни на распределение воздуха внутри башенных градирен. Расчеты проводятся численными метода в Ansys Fluent. Оценку степени неравномерности расхода воздуха автор предлагает проводить по величине абсолютного значения отклонения локальных скоростей от средней величины, тогда как на рис. 3.10 использует для этой же цели величину среднеквадратичного отклонения.

Представлена также постановка обратной задачи диагностирования состояния систем оборотного охлаждения конденсаторов паровых турбин. Справедливости ради стоит отметить, что диагностирование неисправностей энергетического оборудования само по себе и есть обратная задача, в которой по измеренным или вычисленным значениям функции, например, по отклонению фактического от нормативного значения величины оценивают влияние параметров (факторов), то есть конкретной неисправности.

**В четвертой главе** представлена практическая реализация результатов проведенных исследований. Описан программный комплекс расчета градирен, диагностическая модель градирни. Приведены результаты анализа функционирования градирни на Нововоронежской АЭС. Показано влияние скорости ветра на статистические характеристики распределения скоростей воздуха по сечению внутри градирни. Для Петрозаводской ТЭЦ проведена оценка общей неравномерности потоков воздуха по сечению градирни при различных скоростях ветра. Результаты анализа хорошо согласуются с экспериментальными данными. Обосновано мероприятие, направленное на повышение эффективности градирни за счет прикрытия фрамуг с противоположной стороны от направления ветра. В заключении главы

приведена технико-экономическая оценка повышения эффективности паротурбинной установки за счет совершенствования технического обслуживания градирни.

Основные положения диссертации нашли отражение в публикациях автора, а также доложены на научно-практических конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе в целом.**

1. Как из уравнений 2.1. определить требуемый объем продувки градирни?

2. Почему на рисунках 2.7, 3.2–3.4, 3.6–3.8 расчетные и нормативные значения температур воды отличаются в конечном сечении поверхности теплообмена, а не в начальном (в нижней части градирни)?

3. Снижение температуры воды в градирне должно составлять около 10°C. На с. 47 утверждается, что неравномерное распределение теплоносителей приводит к ухудшению охлаждения циркуляционной воды на 3–12 °C. Что в данном случае имеется ввиду?

4. Почему среднеквадратичное отклонение расходов воздуха по сечению градирни на рис. 4.10 минимально при скорости ветра 3–6 м/с, а общая неравномерность распределения расходов возрастает при увеличении скорости ветра, рис. 4.16?

Отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше. Результаты оригинальны, обладают научной новизной и практически значимы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Фомичева Максима Дмитриевича является законченным научно-квалификационным трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. В диссертации содержится решение научно-технической задачи, имеющей существенное значение для энергетической отрасли страны. В заключении каждой из глав и работы в целом сделаны четкие и обоснованные рекомендации и выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Фомичев Максим Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент,  
Главный научный сотрудник  
кафедры «Турбины и двигатели»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», д.т.н., профессор

Аронсон

Константин Эрленович

16.02.2026 Дата

Сведения:

Адрес организации: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Телефон +7 (343) 375-44-44

e-mail: [k.e.aronson@urfu.ru](mailto:k.e.aronson@urfu.ru)

Подпись Аронсона Константина Эрленовича заверяю

Ученый секретарь

ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет имени  
первого Президента России  
Б.Н. Ельцина»



Морозова  
Вера Анатольевна