

## УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора  
по оперативному управлению  
ОАО «Всероссийский дважды ордена  
Трудового Красного Знамени  
Теплотехнический научно-исследовательский  
институт» (ОАО «ВТИ»)



/В.В. Мартынов/

«10» августа 2021 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») на диссертацию Бадриева Айрата Ирековича «**Повышение эффективности охлаждения воды путем рационального распределения потоков в башенных градирнях**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»

### Актуальность темы диссертации

Сегодня, на территории Российской Федерации, более 40 % тепловых электрических станций эксплуатируют башенные испарительные градирни. На производстве охладительные устройства играют важную роль, поскольку от качества охлаждения циркуляционной воды в башенных градирнях зависит выработка электрической энергии. Отмечая постоянно растущие потребности страны в энергии, постепенный износ потребляемых мощностей и рост недовыработки электроэнергии, дефицит площадей на предприятиях для возведения новых сооружений, все более актуальной становится совершенствование уже имеющихся энергетических систем и установок электростанций.

Поэтому тема диссертационной работы Бадриева А.И., посвященная повышению эффективности охлаждения воды в башенных градирнях, работающих при условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха, является весьма актуальной.

### Общая характеристика работы

**Во введении** обоснована актуальность и необходимость проведения исследований, обозначены существующие проблемы, определена основная цель, а также задачи диссертации. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены особенности эксплуатации башенных градирен на тепловых электрических станциях, отражены их разновидности по гидродинамической и аэродинамической производительности. Приведена характеристика работы аппаратов в летнее и зимнее время года. Отражены способы и методы оценки охлаждающей способности, а также известные подходы к построению нормативных характеристик башенных градирен. Кроме того, подробно рассмотрен вопрос причин низкой эффективности работы градирен, что послужило анализу проблемы неравномерности распределения плотности орошения и скорости воздуха внутри аппарата. Обозначена недостаточная проработанность вопроса об учете неравномерности потоков.

**Во второй главе** проведен анализ закона распределения скорости воздуха любых башенных градирен. Посредством метода статистических гипотез по критерию согласия Пирсона установлено, что распределение скорости воздуха в секциях башенных градирен подчиняется нормальному закону распределения или закону Гаусса. Получены натурные данные распределения воздуха в реальной башенной градирне, которые были обработаны статистическими методами. Экспериментально подтверждено, что распределение воздушного потока подчиняется нормальному закону распределения.

Проанализированы частные аэродинамические характеристики на примере башенной градирни. Установлена степень влияния на скорость воздуха в секциях отдельных факторов: перепада температур воды на входе и атмосферного воздуха, коэффициента аэродинамического сопротивления, локальной скорости ветра и плотности орошения, проведен лабораторный анализ связи скорости воздуха и плотности орошения. Указанные факторы были объединены в обобщенное уравнение множественной регрессии, что позволило получить комплексную аэродинамическую характеристику с учетом влияния факторов, характерных для башенных градирен. В свою очередь, разработанная автором характеристика локальной скорости ветра была внедрена на Набережночелнинской ТЭЦ для использования при проведении расчетов охлаждающей способности градирен, что в конечном итоге позволило осуществлять регулирование положения жалюзей воздухопроводных окон градирни.

**В третьей главе** проведен теоретический и экспериментальный анализ закона распределения плотности орошения воды в башенных градирнях. Установлено и подтверждено, что распределение плотности орошения воды подчиняется нормальному закону распределения. Выполнен анализ влияния неравномерности плотности орошения на эффективность испарения. Так, при нормальном законе распределения, с увеличением степени неравномерности, скорость процесса испарения падает. На основании результатов, построены температурная и охладительная характеристики реальной градирни. Такие характеристики получили подтверждение при лабораторном эксперименте.

Рабочие характеристики используются Набережночелнинской ТЭЦ, что подтверждает акт внедрения, приведенный в приложении. На предприятии с их помощью планируют гидравлическую нагрузку на аппарат.

**В четвертой главе** представлена методика корректировки рабочих характеристик башенных градирен с учетом неравномерности распределения воды и воздуха. В целом, порядок корректировки состоит из 2-х этапов:

- 1) построение нормативных характеристик по известным методикам;
- 2) построение скорректированные характеристик башенной градирни.

На примере двух башенных градирен типов БГ-1600 и БГ-2600 продемонстрировано применение предложенной методики. Показано, что неравномерности распределения воды и воздуха приводят к спаду охлаждающей способности аппаратов. Таким образом, методика корректировки рабочих характеристик была успешно апробирована, о чем свидетельствует акт использования результатов, приведенный в приложении.

**В пятой главе** предложены организационно-технические мероприятия, позволяющие снизить неравномерности потоков воды и воздуха. Выполнено численное моделирование охлаждения воды в секции при неравномерности распределения потоков. Построена сеточная модель, проведено исследование сеточной сходимости. Получены результаты расчета конечной температуры воды при различных скоростях воздуха. Установлено, что при плотности орошения  $3,41 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$  оптимальное охлаждение воды достигается при подаче воздуха со скоростью 3 м/с.

На основании результатов численного моделирования, разработана программа управления и алгоритм рационального распределения потоков циркуляционной воды и воздуха в секциях башенной градирни. Проведен технико-экономический расчет, по которому внедрение системы управления потоками позволит сократить финансовые потери до 2,2 млн. руб./год на один турбоагрегат, а для всех 11 турбоагрегатов станции до 24 млн. руб./год.

**В заключении** диссертации приведены выводы и результаты, которые в полной мере отражают содержание работы.

**В приложениях** представлены: характеристики башенной градирни; иллюстрации технического состояния аппарата; внешний вид измерительных приборов и свидетельства об их поверке; акты внедрения и использования результатов; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; дипломы и грамоты, полученные в результате апробации результатов.

### **Научная новизна основных положений и результатов диссертации**

В диссертации отражены результаты работы, обладающие следующей *научной новизной*:

1) теоретически и экспериментально установлено, что распределения потоков воды и воздуха в башенных градирнях подчиняются нормальному закону распределения (закону Гаусса);

2) установлено комплексное влияние на скорость воздушного потока в каждой секции башенной градирни таких факторов как аэродинамическое

сопротивление, локальная скорость ветра и плотность орошения, учитывая неравномерности распределения потоков;

3) установлено снижение испарительной мощности башенных градирен с увеличением расхода воды при неравномерности распределения потоков (охлаждающая характеристика);

4) получена математическая модель, позволяющая системно учитывать неравномерности распределения потоков циркуляционной воды и воздуха по сечению башенной градирни;

5) получены результаты численных исследований, подтверждающих необходимость рационального распределения потоков с целью достижения оптимального охлаждения воды в башенных градирнях.

### **Практическая значимость полученных результатов**

В числе наиболее значимых результатов, имеющих *практическую ценность*, следует отметить:

1. полученную ветровую характеристику, которая используется при настройке жалюзи воздухоподводящих окон башенной градирни;

2) разработанную методику для корректировки рабочих характеристик башенных градирен, функционирующих при условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха;

3) полученные с применением методики скорректированные рабочие характеристики башенных градирен типов БГ-1600 и БГ-2600, которые используются при планировании подачи воды на устройства;

4) разработанный алгоритм и программу управления потоками с целью их рационального распределения и повышения эффективности охлаждения воды в башенных градирнях.

### **Достоверность и обоснованность выводов и результатов**

В представленной диссертационной работе использованы современные методы исследования и вычислительные пакеты, такие как «ANSYS Fluent», «SPSS Statistics» и т.д. Натурные экспериментальные данные подтверждены достаточной сходимостью при сравнении с результатами лабораторных и численных результатов. В процессе проведенных исследований, применялись соответствующие метрологическим требованиям измерительные приборы, свидетельства о поверке которых представлены в приложении диссертации. Стоит отметить, что результаты автора имеют достаточную согласованность с результатами других авторов. Таким образом, перечисленные утверждения вполне подтверждают *достоверность и обоснованность* выводов, а также результатов диссертации.

## Соответствие паспорту специальности

Диссертация и автореферат соответствуют *паспорту специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»* в части формулы:

«в рамках специальности проводятся работы по совершенствованию действующих и обоснованию новых типов и конструкций основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций» и «разрабатываются вопросы водоиспользования и водных режимов»,

а также по пунктам области исследований:

2. Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций.

3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии и тепла, использования топлива, водных и химических режимов, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду.

6. Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций.

## Структура диссертации и полнота опубликованных результатов

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 188 наименований. Работа изложена на 177 страницах, состоит из 155 рисунков, 17 таблиц, 48 формул, 5 приложений.

Автором, по теме диссертации опубликовано 20 работ. Из них: 8 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и ВО РФ; 4 публикации отражены в зарубежных изданиях, индексируемых в реферативных базах «Scopus» и «Web of Science»; 7 материалов докладов на всероссийских и международных конференциях; одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В опубликованных трудах вполне отражены основные научные результаты.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и отвечает требованиям ВАК при Министерстве науки и ВО РФ. Также необходимо отметить довольно высокий научно-технический уровень выполненной диссертации.

Автором лично и достаточно глубоко выполнен литературный обзор отечественных и зарубежных работ, проведены натурные эксперименты на башенных градирнях, произведены теоретические и численные исследования, разработана программа рационального управления потоками в башенных градирнях, выполнена апробация результатов на конференциях и семинарах высокого уровня, подготовлены публикации в центральных журналах, посвященных энергетической тематике.

## **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанная в диссертационной работе методика корректировки рабочих характеристик может быть использована при анализе охлаждающей способности башенных градирен, работающих при пониженной нагрузке. Предложенная методика позволит получить фактические характеристики башенных градирен, находящиеся в процессе эксплуатации. Стоит отметить, что методика корректировки может применяться для разных типов башенных градирен ТЭС.

Разработанная автором программа автоматического управления воздухопроводными окнами может использоваться для башенных градирен ТЭС с целью рациональной подачи воздушного потока в секции, что позволит повысить охлаждающую способность аппарата.

## **Вопросы, замечания и рекомендации по диссертации**

1. Каким образом получены значения плотности орошения при построении нормативных и уточненных характеристик? Это суммарная характеристика башенной градирни или средневзвешенная величина?

2. В чем заключается физический смысл нормального закона распределения в башенных градирнях?

3. На стр. 6 автореферата отмечено о проверке закона распределения скорости воздуха в секциях градирни. Однако по смыслу, речь идет о законе распределения по сечению градирни.

4. При численном моделировании, расход воды для форсунок градирни задавался одинаковый?

5. Каким образом замерялась скорость воздуха в секциях градирни? С помощью какого прибора?

6. В работе хотелось бы видеть зависимость между располагаемым напором перед каждым соплом и распределением плотности орошения.

## **Заключение**

Несмотря на вышеизложенные вопросы и рекомендации, диссертацию Бадриева А.И. «Повышение эффективности охлаждения воды путем рационального распределения потоков в башенных градирнях» стоит признать завершенной научно-квалификационной работой. Поставленные задачи в диссертации раскрыты достаточно полно и последовательно, выводы и рекомендации обоснованы полученной экспериментальной базой. Новые научные результаты автора имеют существенное значение в развитии научной и практической деятельности. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы и соответствует требованиям ВАК при Министерстве науки и ВО РФ.

Представленная к защите диссертация отвечает требованиям пунктов 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденное Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, в которой

содержится решение научной задачи по повышению эффективности охлаждения воды в башенных градирнях, а ее автор Бадриев Айрат Ирекович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Диссертация, автореферат и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании научно-технического совета ОАО «ВТИ» (протокол № 3 от 10 августа 2021 года). Результаты голосования: «за» – 27 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел.

Научный руководитель  
Научно-технического совета  
ОАО «ВТИ»,  
доктор технических наук

Гринь  
Евгений Алексеевич

Заведующий  
физико-техническим отделением,  
кандидат технических наук

Такташев  
Ринат Нявмянович

Подпись Гриня Е.А. и Такташева Р.Н. заверяю:

руководитель отдела управления  
персоналом ОАО «ВТИ»

Картошкина  
Ирина Анатольевна

Адрес: 115280, Российская Федерация, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14.  
Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового  
Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт».  
Тел.: +7 (495) 137-77-70.  
E-mail: [vti@vti.ru](mailto:vti@vti.ru).  
Сайт: <https://vti.ru>.