

На правах рукописи



БАДРИЕВ АЙРАТ ИРЕКОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ
ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ
В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ**

05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедрах «Тепловые электрические станции» и «Инженерная кибернетика».

Научный руководитель: **Власов Сергей Михайлович**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Тепловые электрические станции»
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет», г. Казань;

Шарифуллин Вилен Насибович

заслуженный деятель науки РТ,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Инженерная кибернетика»
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет», г. Казань.

Официальные оппоненты: **Зройчиков Николай Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Тепловые электрические станции»
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва;

Ледуховский Григорий Васильевич

доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Тепловые электрические станции»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового
Красного Знамени Теплотехнический
научно-исследовательский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «16» сентября 2021 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» <https://kgeu.ru>.

Автореферат диссертации разослан «16» июня 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
кандидат технических наук, доцент



Власов Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На основании распоряжения Правительства РФ от 9 июля 2020 г. № 1523-р, «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» выдвинуты задачи, обеспечивающие энергосбережение и повышение энергоэффективности ТЭС. Для осуществления поставленных задач, принято решение о реконструкции морально устаревшего энергетического оборудования в соответствии с современными тенденциями. Одним из подходов повышения эффективности является достижение оптимального режима работы оборотного охлаждения градирнями ТЭС. От производительности устройства зависит расход условного топлива на производство электроэнергии, глубина вакуума в конденсаторах и мощность паровой турбины.

В промышленных условиях часто сталкиваются с недоохлаждением воды. Причиной низкой эффективности могут стать характерные крупномасштабным аппаратам неоднородности охлаждения. Поэтому, актуальность заключается в исследовании башенных градирен, работающих в условиях неравномерности распределения воды и воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «УМНИК» и конкурса «50 лучших инновационных идей для Республики Татарстан».

Объект исследования: башенные градирни, функционирующие в условиях неравномерности распределения воды и воздуха.

Предмет исследования: неравномерности распределения плотности орошения и скорости воздуха в башенных градирнях.

Цель и задачи. Цель работы заключается в повышении эффективности охлаждения башенных градирен, функционирующих в условиях неравномерности распределения воды и воздуха.

Для достижения цели, сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ состояния проблемы неравномерности потоков в башенных градирнях.
2. Теоретические и натурные исследования распределения воды и воздуха в башенных градирнях.
3. Анализ влияния неравномерности потоков на степень охлаждения башенных градирен.
4. Разработка методики корректировки рабочих характеристик с учетом неравномерности потоков башенных градирен.
5. Численное моделирование неравномерности потоков воды и воздуха в башенных градирнях.
6. Разработка системы управления башенными градирнями при неравномерности потоков.

Методы исследования: эксперимент, регрессионный и корреляционный анализ; математическое моделирование, метод конечных элементов.

Научная новизна: 1. Установлен и экспериментально подтвержден теоретический закон распределения воды и воздуха в башенных градирнях. 2. Установлено совместное влияние факторов на скорость воздуха в секциях башенной градирни: плотности орошения, аэродинамического сопротивления и скорости ветра. 3. Получена охладительная характеристика с учетом влияния неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни. 4. Разработана математическая модель комплексного учета неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни. 5. Получены результаты численных исследований охлаждения воды при различных скоростях воздуха в башенной градирне.

Практическая значимость: 1. Установлена ветровая характеристика на примере башенной градирни БГ-2600. 2. Разработана методика корректировки рабочих характеристик с учетом неравномерности потоков воды и воздуха башенных градирен. 3. Получены скорректированные рабочие характеристики башенных градирен БГ-2600 и БГ-1600. 4. Разработан алгоритм и программа автоматического регулирования воздухопроводными окнами БГ-2600 в условиях неравномерности распределения воды и воздуха.

На защиту выносятся: 1. Подтвержденные натурными экспериментами теоретические исследования распределения воды и воздуха башенных градирен. 2. Результаты натурального эксперимента неравномерности потоков воды и воздуха башенных градирен. 3. Зависимости скорости воздуха в секциях от плотности орошения, аэродинамического сопротивления и скорости ветра БГ. 4. Результаты методики корректировки рабочих характеристик с учетом неравномерности распределения воды и воздуха башенных градирен. 5. Результаты численных исследований неравномерности потоков воды и воздуха в секции БГ.

Реализация результатов: 1. Скорректированные рабочие характеристики внедрены и применяются при планировании гидравлической нагрузки БГ-2600 НЧ ТЭЦ. 2. Апробирована методика корректировки рабочих характеристик на примере БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ. 3. Внедрена ветровая характеристика и используется при регулировании воздухопроводных окон БГ-2600 НЧ ТЭЦ.

Достоверность и обоснованность подтверждается использованием современных вычислительных средств и методов исследований; натурными и лабораторными экспериментами; сходимостью результатов численных и натуральных исследований; применением поверенных измерительных приборов; согласованностью результатов исследований с результатами других авторов.

Апробация работы. Основные положения, результаты исследования опубликованы и обсуждались на конференциях: XI Международная научно – техническая конференция «Энергия» (г. Иваново, 2016 г.); XI Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2016 г.); XIII Международная научно-техническая конференция «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (г. Саратов, 2016 г.); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2017 г.); XXIII Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения» (г. Казань, 2017 г.); Международная конференция «Энергосбережение. Наука и образование» (г. Набережные Челны, 2017 г.); Международная конференция «Бенардосовские чтения» (г. Иваново, 2019 г.); Международная научно – техническая конференция «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2021 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 20 научных трудах, среди которых: 8 статей в журналах из перечня ВАК; 4 публикации в зарубежных изданиях; 7 материалов докладов конференций; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в проведении литературного обзора, теоретических, численных и натуральных исследований, разработке программного обеспечения, апробации результатов, подготовке публикаций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует 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 ТЭС»; «разрабатываются вопросы водоиспользования и водных режимов». В пунктах 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 и содержание исследования. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 188 наименований. Работа изложена на 177 страницах, состоит из 155 рисунков, 17 таблиц, 48 формул, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

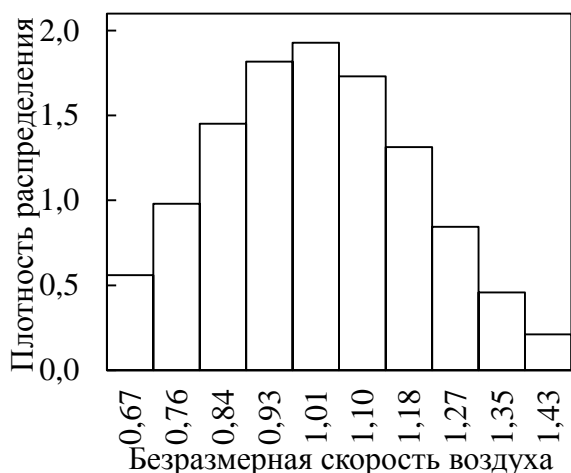
Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель, основные задачи исследования, выносимые на защиту положения, научная новизна, практическая значимость и реализация результатов работы.

В первой главе отражен аналитический обзор публикаций, посвященных проблеме неравномерности потоков в градирнях. Рассмотрены особенности эксплуатации башенных градирен на ТЭС. Отмечено существенное отклонение их рабочих характеристик от нормативных, особенно в летнее время года. К причинам низкой эффективности башенных градирен относят неравномерности потоков, возникающие из-за неисправности ее конструктивных элементов.

В трудах Арефьева Ю.И., Бермана Л.Д., Братуты Э.Г., Гельфанда Р.Е., Гильфанова К.Х., Дашкова Г.В., Доброго К.В., Калатузова В.А., Лаптева А.Г., Пономаренко В.С., Пушнова А.С., Свердлина Б.Л., Солодухина А.Д., Al – Waked, Behnia M., Christiansen J.E., Gurgenci H., Kranc S.C., Xia L., Sun F., Wang K., Williamson N., Li X., Zhao Y., а также других авторов, отражены теоретические, численные, экспериментальные исследования потоков воды и воздуха градирен. Выявлены завихрения воздушных потоков, приводящие к ее неравномерности. Отмечены факторы, влияющие на распределение воздуха, проанализировано воздействие ветра. Установлено, что башенным градирням и ее лабораторным моделям характерна критическая скорость ветра. Несмотря на исследования влияния аэродинамического сопротивления, перепада температур поступающей воды и атмосферного воздуха, не учтена плотность орошения и совместное воздействие всех факторов на расход воздуха в секциях башенных градирен.

В работах, посвященных исследованию орошения воды башенных градирен проанализированы неравномерности, однако, например, в локальной зоне сопла, водораспределительной системы, оросителя. На основании анализа публикаций, выдвинута идея учета неравномерности потоков по сечению башенной градирни, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрен теоретический анализ и экспериментальное исследование неравномерности потока воздуха башенных градирен. Выдвинуто



предположение, что скорость воздуха в секциях подчиняются нормальному закону распределения. С целью проверки, введен единый показатель безразмерной скорости воздуха башенных градирен, построена гистограмма ее плотности распределения (рис. 1). Средняя величина безразмерной скорости воздуха $W_{cp} = 1$, а дисперсия безразмерной скорости воздуха σ^2_w будет общей для любой скорости воздуха. Гистограмма была подвергнута проверке методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона. Установлено, что распределение воздуха в башенных градирнях подчиняется теоретическому закону нормального распределения и представляется функцией:

Рис. 1 – Плотность распределения безразмерной скорости воздуха БГ

$$F(W) = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(W-1)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right], \quad (1)$$

где W – безразмерная скорость воздуха; σ^2_w – дисперсия W .

Проведено натурное экспериментальное исследование неравномерности распределения воздуха по сечению градирни БГ-2600 НЧ ТЭЦ. В летнее время года, при атмосферной температуре 25-31 °С, гидравлической нагрузке аппарата 8400-12000 т/ч, проведены измерения скорости воздуха в подросительном пространстве 12-ти секций градирни. В качестве средств измерения применялись цифровые анемометры модели АТТ. По паспорту, их погрешность составляет до 4 %. Воспроизводимость экспериментов подтверждена проверкой по критерию Кохрена. Распределения скорости воздуха по сечению представлены в виде гистограмм по секциям (рис. 2) и по радиусам секций (рис. 3).

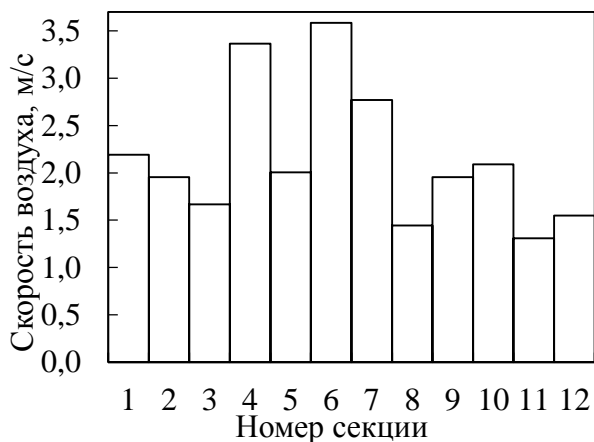


Рис. 2 – Посекционное распределение скорости воздуха в БГ-2600

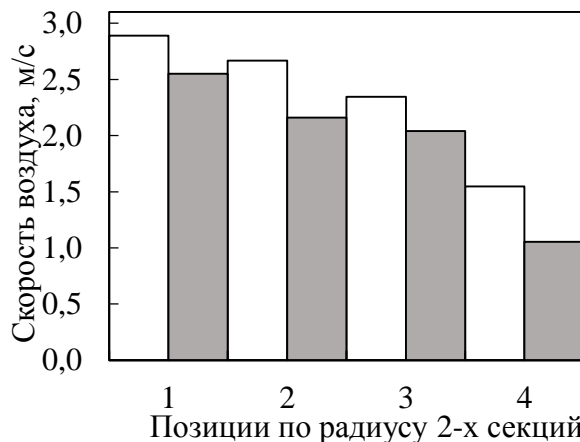


Рис. 3 – Радиальное распределение скорости воздуха в 2-х секциях БГ-2600

При средней скорости воздуха 2,16 м/с, среднеквадратичное отклонение составило 0,45 м/с, неравномерность распределения воздушного потока 21 %.

Обработка экспериментальных данных неравномерности распределения воздуха БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ показала, что при средней скорости воздуха 3,75 м/с, среднеквадратичное отклонение составило 1,06 м/с, а степень неравномерности распределения воздуха – 28,4 %. Натурные эксперименты свидетельствуют о значительной неравномерности распределения воздуха в башенных градирнях БГ-2600 и БГ-1600.

Методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона, выполнена проверка распределений воздуха БГ-2600 и БГ-1600 при их средних скоростях 2,16 м/с и 3,75 м/с. Подтверждено, что распределение скоростей воздуха башенных градирен подчиняется нормальному закону распределения.

Проведен анализ причин возникновения неравномерности распределения воздуха. Выявлены внутренние и внешние факторы, влияющие на изменение скорости воздуха в секциях градирни. К ним отнесены: перепад температур воды и атмосферного воздуха, коэффициент аэродинамического сопротивления, плотность орошения и скорость ветра. Проведен анализ влияния каждого из факторов на скорость воздуха на примере БГ-2600.

Первым рассмотрена зависимость скорости воздуха от перепада температур поступающей воды и атмосферного воздуха $w = f_1(\Delta t)$. Анализ аэродинамической характеристики свидетельствует, что Δt не оказывает значительного влияния на распределение воздушного потока по секциям, поскольку перепад температуры атмосферного воздуха градирни является общим для всех секций.

В качестве второго фактора рассмотрена зависимость скорости воздуха от коэффициента аэродинамического сопротивления $w = f_2(\zeta)$. Для отдельных секций, перепад атмосферного давления, высота башни и средняя плотность воздуха являются одинаковыми. Поэтому, коэффициенты аэродинамического сопротивления каждой секции определяются по формуле:

$$\zeta = C / w^2. \quad (2)$$

где $C = 2\Delta P/\rho$ – сила тяги башни, Па; w – скорость воздуха, м/с.

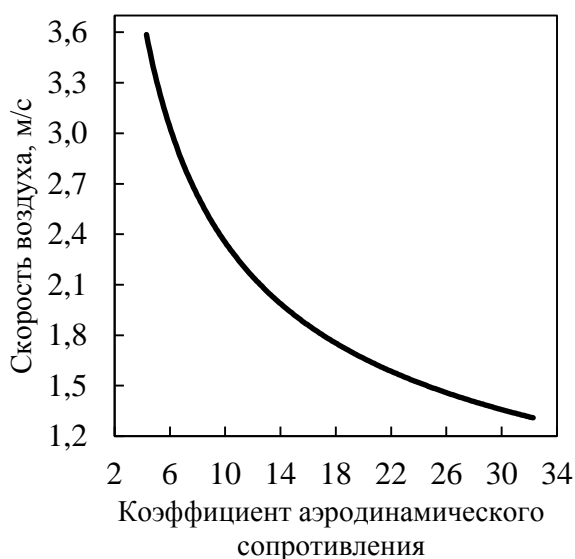


Рис. 4 – Скорость воздуха БГ-2600 при аэродинамическом сопротивлении

На основании данных эксперимента распределения скорости воздуха, по формуле (2) получена аэродинамическая характеристика при коэффициенте аэродинамического сопротивления секции башенной градирни с силой тяги 21,57 Па (рис. 4). Так, значения коэффициентов в разных секциях могут отличаться до 6-ти раз. Установлено, что одной из причин неравномерности распределения воздуха является весомый разброс коэффициента аэродинамического сопротивления по секциям башенной градирни БГ-2600.

В качестве третьего фактора влияния на распределение скорости воздуха по секциям, проанализирована плотность орошения воды $w = f_3(q)$.

С установлением регрессионной связи плотности орошения и скорости воздуха, построена аэродинамическая характеристика при неравномерности потоков (рис. 5), которая описывается уравнением с коэффициентом корреляции 0,75:

$$w = -1,073 \cdot q + 5,79 \quad (3)$$

где w – скорость воздуха, м/с; q – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

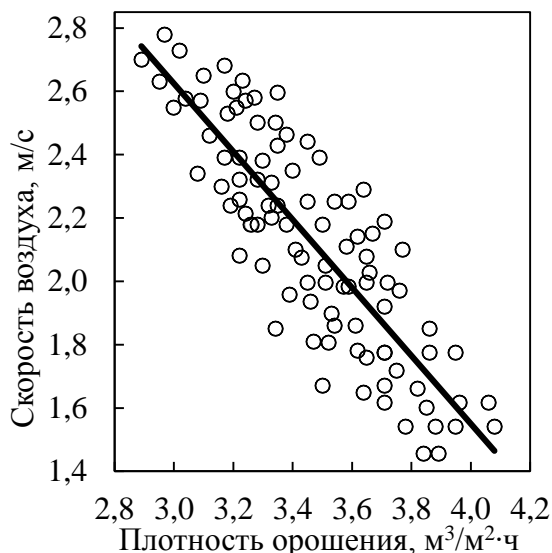


Рис. 5 – Скорость воздуха при плотности орошения БГ-2600

Для подтверждения аэродинамической характеристики башенной градирни, проведены лабораторные эксперименты. Получена подобная зависимость скорости воздуха при плотности орошения воды лабораторной установки. Аналогичность лабораторных и натуральных результатов подтверждает воздействие плотности орошения на скорость воздуха в секциях.

Четвертым фактором рассмотрено влияние ветра по окружности башенной градирни на скорость воздуха в секциях $w = f_4(v)$. Проведены эксперименты, в ходе которых цифровым анемометром АТГ выполнены замеры скоростей воздуха при метеорологических направлениях и скоростях ветра 1, 3, 5, 7, 9 м/с. Согласно паспорту анемометров АТГ, погрешность не превышает 4 %. По гистограммам распределений скорости ветра и воздуха установлено, что с возрастанием неравномерности скорости ветра от 20,7 % до 28,7 %, увеличивается степень неравномерности скорости воздуха в секциях от 19,3 % до 25,2 %.

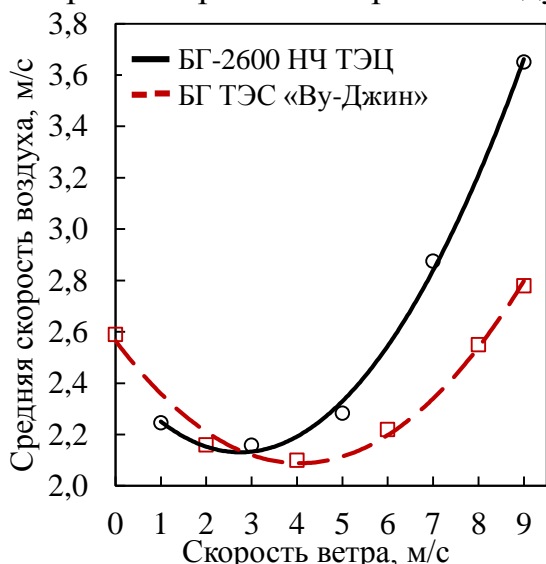


Рис. 6 – Ветровые характеристики башенной градирни БГ-2600

На основании экспериментальных данных, построена ветровая характеристика БГ-2600 в среднеквадратичном приближении (рис. 6). Анализируя зависимость, аэродинамическая производительность снижается при скорости ветра от 1 до 3 м/с, достигает минимума при скорости 3 м/с и возрастает от 3 до 9 м/с. Натурная ветровая характеристика подобна численной характеристике Доброго К. В. и лабораторной характеристике Wang К., отличается лишь критической скоростью. В качестве сравнения, зависимости БГ-2600 и ТЭС «Ву-Джин» (Доброго К. В.) изображены вместе, на рис. 6. Ветровая характеристика

$$w = 0,04 \cdot v^2 - 0,22 \cdot v + 2,43, \quad (4)$$

где w – скорость воздуха, м/с; v – скорость ветра в окружности градирни, м/с.

Результаты эксперимента свидетельствуют о значительном влиянии скорости ветра на скорость воздуха в секциях башенной градирни.

Получена обобщенная аэродинамическая характеристика БГ-2600 в виде уравнения множественной регрессии. Учитывая незначительное влияние перепада температур воды и воздуха Δt в свободном члене уравнения, влияние плотности орошения q , коэффициента аэродинамического сопротивления ζ и скорости ветра v , скорость воздуха в секциях башенной градирни БГ-2600 определяется эмпирической формулой:

$$w = 4,085 - 0,354 \cdot q + 0,226 \cdot v + 0,076 \cdot \zeta \quad (5)$$

где q – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; v – скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$; ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления.

В результате, получена оценка совместного влияния всех факторов на скорость воздуха и на неравномерность его распределения в секциях башенной градирни.

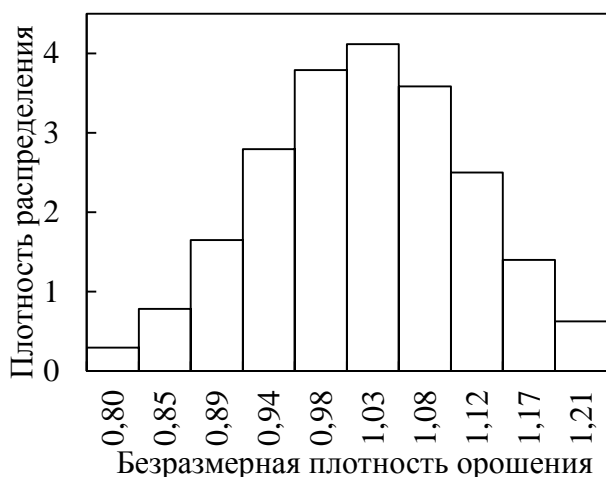


Рис. 7 – Плотность распределения

безразмерной плотности орошения БГ (рис. 7). Среднее значение безразмерной плотности орошения $Q_{\text{ср}} = 1$, а дисперсия – общая для гидравлических нагрузок. Данные гистограммы на рис. 7 подвергнуты проверке методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона. Установлено, что распределение плотности орошения в башенных градирнях подчиняется нормальному закону распределения и представляется функцией:

$$F(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(Q-1)^2}{2 \cdot \sigma_Q^2} \right], \quad (6)$$

где Q – безразмерная плотность орошения, а σ_Q^2 – дисперсия Q .

Предложено учитывать неравномерность орошения по сечению башенной градирни статистической функцией $f(q)$ средней плотности орошения:

$$q_c = \int_{q_1}^{q_2} q \cdot f(q) dq, \quad (7)$$

где q – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $f(q) dq$ – доля сечения башенной градирни.

Если коэффициент массоотдачи башенной градирни H с учетом функции распределения плотности орошения можно представить в виде формулы (8), то связь между интенсивностью испарения и распределением плотности орошения отражается через эмпирический показатель степени m по формуле (9).

По физическому смыслу, m является показателем интенсивности массоотдачи в башенной градирне и определяется по формуле (10):

$$H = \int_{q_1}^{q_2} Bq^n f(q) dq, \quad (8) \quad m = \frac{\ln \int_{q_1}^{q_2} q^n \cdot f(q) dq}{\ln \int_{q_1}^{q_2} q \cdot f(q) dq}, \quad (10)$$

$$h = B \cdot q_c^m, \quad (9)$$

где h – коэффициент массопереноса; B – постоянная величина, n – эмпирический показатель степени плотности орошения.

По формуле (10) выявлено, что при нормальном законе распределения, с увеличением степени неравномерности орошения, скорость испарения падает.

Проведено натурное экспериментальное исследование неравномерности распределения орошения воды БГ-2600 НЧ ТЭЦ. Выполнены измерения плотности орошения по сечению башенной градирни. Замеры проводились мерным сосудом, установленным на выдвижной трубе, погрешность которой не больше 2,5 %. Воспроизводимость экспериментов подтверждена проверкой по критерию Кохрена. Построены гистограммы распределений плотности орошения по секциям (рис. 8) и по радиусам секций (рис. 9). Неравномерность плотности орошения составила 33 % от среднего значения 3,4 м³/м²·ч.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных при оценке неравномерности орошения воды БГ-1600, установлена неравномерность плотности орошения величиной 15 % при ее среднем значении 6,8 м³/м²·ч.

Методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона, выполнена проверка распределений плотности орошения БГ-2600 и БГ-1600. Подтверждено, что данные подчиняются нормальному закону распределения.

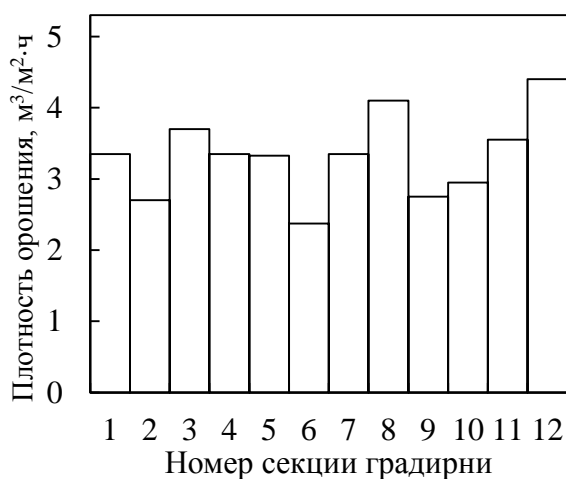


Рис. 8 – Посекционное распределение плотности орошения БГ-2600

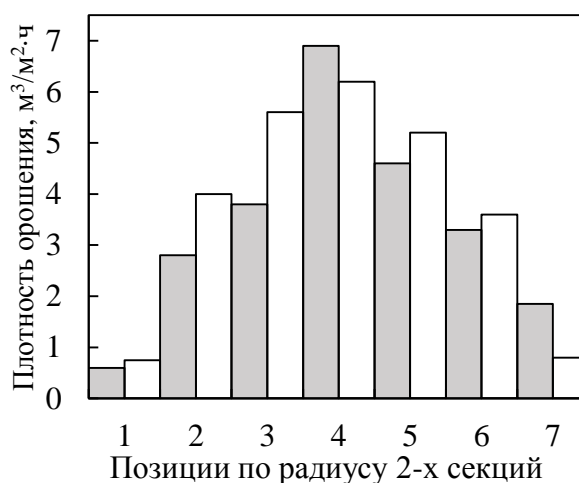


Рис. 9 – Радиальное распределение плотности орошения в 2-х секциях БГ-2600

Выявлены причины неравномерности плотности орошения в башенной градирне: неисправность трубопроводов и сопел ВРС, провисание и частичное разрушение оросителя. В виду причин, необходимо учитывать неравномерность плотности орошения и ее влияние на эффективность башенной градирни.

Проведен экспериментальный анализ охлаждающей способности на примере БГ-2600 в условиях неравномерности плотности орошения. Цифровым термометром проведены измерения перепада температур воды. Погрешность термометра составила 1 %. Получена температурная (рис. 11) и охладительная характеристики (рис. 12) башенной градирни БГ-2600 при неравномерности плотности орошения 33 %.

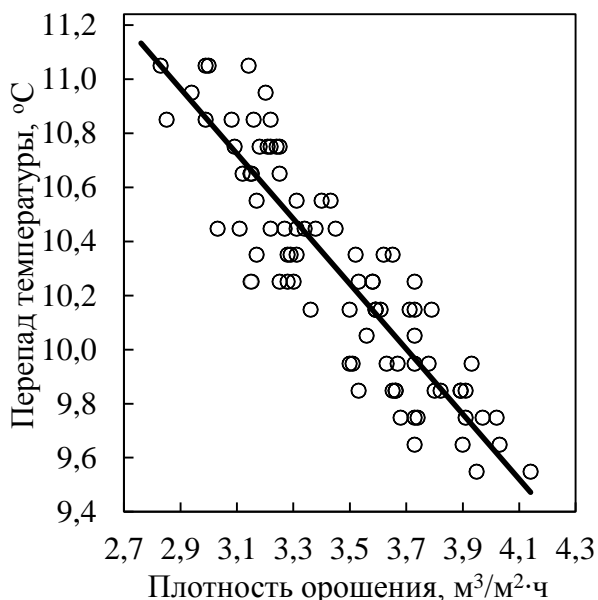


Рис. 11 – Температурная характеристика БГ-2600 при неравномерности орошения

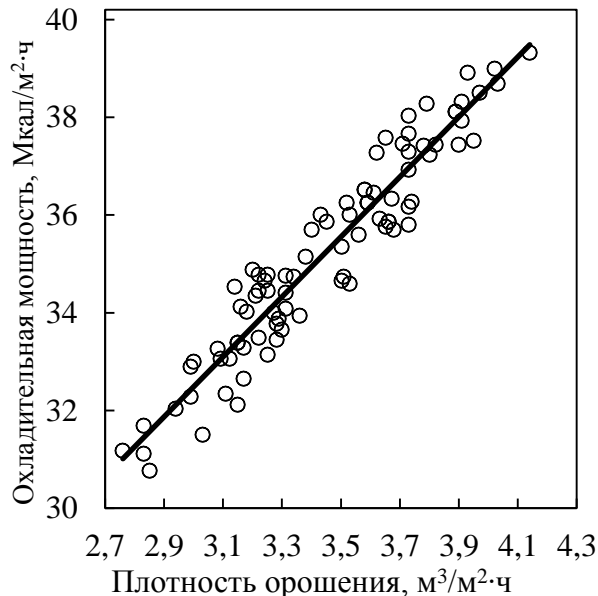


Рис. 12 – Охлаждающая характеристика БГ-2600 при неравномерности орошения

Температурная характеристика башенной градирни БГ-2600 описывается уравнением регрессии с коэффициентом корреляции 0,82:

$$\Delta T = -1,204 \cdot q + 14,41 \quad (11)$$

где ΔT – перепад температур воды, °C; q – плотность орошения, м³/м²·ч.

В четвертой главе предложена методика корректировки рабочих характеристик башенных градирен с учетом неравномерности потоков воды и воздуха, которая состоит из основных этапов: 1) по номограмме башенной градирни строятся нормативная температурная и охладительная характеристики; 2) с учетом экспериментальной безразмерной дисперсии распределения σ^2 , строятся гистограммы распределения плотности орошения по секциям градирни; 3) рассчитываются нормативные температуры воды t_n и строятся гистограммы перепада температур воды; 4) определяются средневзвешенные значения перепада температур воды $\Delta T_s = \sum \Delta T_i \cdot q_i / \sum q_i$; 5) на основании q и ΔT_s , строятся скорректированные рабочие характеристики.

По методике, выполнена корректировка рабочих характеристик башенной градирни БГ-2600 и БГ-1600. Характеристики БГ-2600 показаны на рис. 13 и 14. Установлено, что неравномерность распределения орошения воды (33 %) и воздуха (20,8 %) БГ-2600 приводят к недоохлаждению воды на 2 °C. Отклонение охладительной характеристики приводит к снижению производительности на 15 Мкал/м²·ч. Для БГ-2600 и БГ-1600, с увеличением расхода воды в условиях неравномерности потоков, наблюдается спад охладительной мощности (рис. 14).

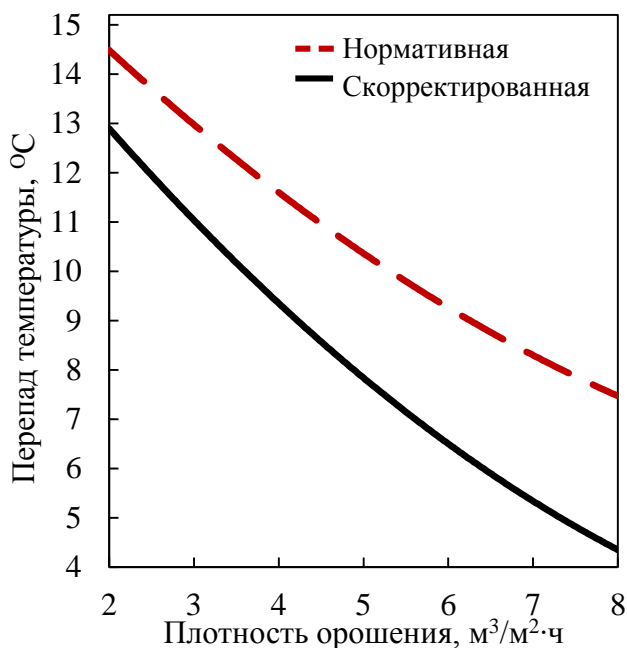


Рис. 13 – Температурные характеристики башенной градирни БГ-2600

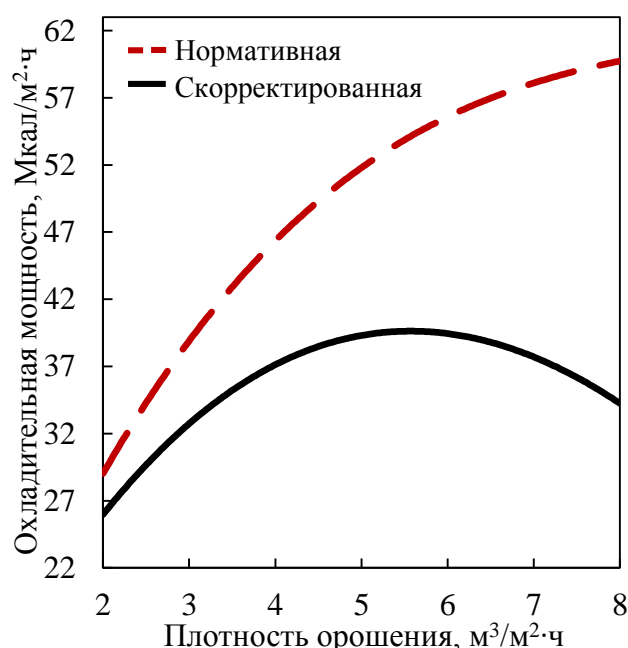


Рис. 14 – Охладительные характеристики башенной градирни БГ-2600

В пятой главе предложены мероприятия для повышения эффективности башенной градирни, в том числе рациональное распределение воздуха при неравномерности потоков. С помощью CFD – пакета «ANSYS Fluent», проведена верификация программы управления воздуховодными окнами башенной градирни с учетом неравномерности потоков, выполнен анализ охлаждения при подаче сильных воздушных потоков в секции с высокой плотностью орошения, а слабых потоков воздуха – в секции с низкой плотностью орошения. Для сеточной модели секции заданы граничные условия входа и выхода воздушного потока – воздуховодный проем и надросительное пространство башенной градирни, проведено исследование сеточной сходимости.

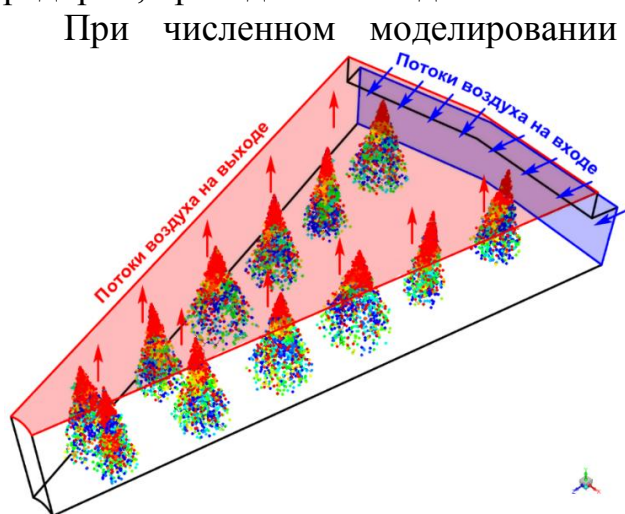


Рис.15 – Расчетная модель секции

орошения секции составило $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, а ее неравномерность – 33 %. На входной границе модели задавались скорости воздуха, вычисленные эмпирической формулой (5) обобщенной аэродинамической характеристики.

При численном моделировании рассмотрена нестационарная задача взаимодействия двух фаз. В качестве первой фазы принят воздушный поток как модель сплошной среды. Вторая фаза – орошаемая вода, представлена в виде дискретной с распылением на мелкие капли воды в диапазоне от 3 до 5 мм и температурой на входе $41,5 \text{ °C}$ (рис. 15). Расчет проводился при использовании «RNG k-ε» – модели.

На первом этапе, для каждого сопла модели задавался расход воды, при котором среднее значение плотности

Получены распределения воздуха секции при входных скоростях: 0,1, 0,82,

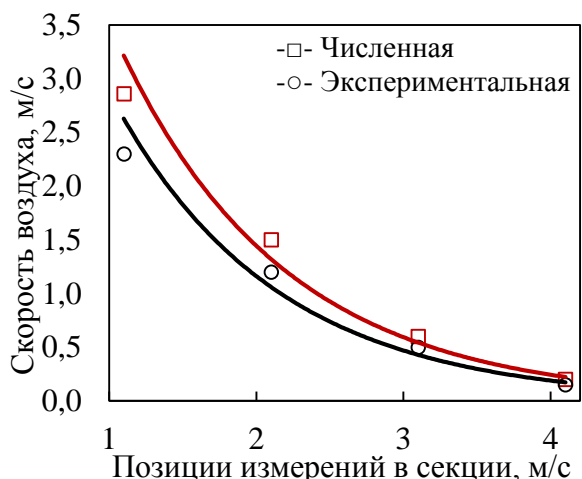


Рис. 16 – Распределение скорости воздуха в секции БГ-2600

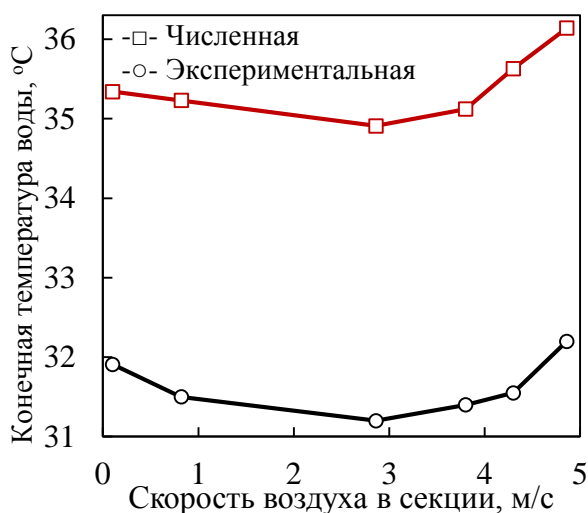


Рис. 17 – Температура охлаждения при скорости воздуха в секции

2,86, 3,80, 4,30 и 4,86 м/с. Для примера, на рис. 16 показано распределение воздуха с входной скоростью 2,86 м/с численного и натурального эксперимента. Так, результаты демонстрируют постепенное снижение скорости воздуха от периферии к центру секции. С усилением заданной скорости, интенсивность воздушного потока во входной области возрастает. Решено выяснить при какой входной скорости воздуха степень охлаждения воды в секции станет наилучшей.

Проведено численное моделирование степени охлаждения воды при входных скоростях воздуха модели секции БГ, получены значения конечных температур воды. В качестве сравнения, зависимость численного моделирования и натурального эксперимента представлены на рис. 17. Так, при плотности орошения $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, ее аэродинамическом сопротивлении и скорости ветра, наилучшее охлаждение воды достигается при входной скорости воздуха 2,86 м/с. Сравнивая результаты конечной температуры воды натурального и численного исследования, расхождение составило 10,63 %.

Предположительно причиной неоднородности охлаждения воды являются нарастающие завихрения потоков с увеличением скорости воздуха в секциях. Это приводит к «запиранию» входной зоны для вновь поступающего воздуха.

Проведено численное моделирование воздушных вихрей в модели секции. По результатам, при малых входных скоростях воздуха 0,1 м/с и 0,82 м/с, потоки безвихревые и не образуют застойных зон в секции, однако, охлаждение воды недостаточно эффективно. При скорости воздуха 2,86 м/с, в секции образуются воздушные вихри, что способствует интенсификации теплообмена между водой и воздухом, и, в тоже время, не возникают воздушные застойные участки. С усилением входной скорости воздуха от 3,8 м/с до 4,86 м/с, в секции нарастают воздушные застойные участки, что препятствует интенсификации охлаждения.

Разработан алгоритм, а также программа автоматического управления воздухопроводными окнами секций башенной градирни при неравномерности потоков воды и воздуха. Организационно-технические мероприятия позволят снизить неравномерности и сократить финансовые потери до 2,2 млн. руб./год в расчете на один турбоагрегат (24 млн. руб./год на 11 турбоагрегатов).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлен и экспериментально подтвержден теоретический закон распределения плотности орошения и скорости воздуха на примере башенных градирен БГ-2600 и БГ-1600. Натурные данные подчиняются нормальному закону распределения. Получены функции распределения безразмерной плотности орошения и безразмерной скорости воздуха башенных градирен.

2. Теоретически обосновано влияние неравномерности плотности орошения на эффективность испарения в башенных градирнях. При нормальном законе распределения плотности орошения, с увеличением дисперсии распределения плотности орошения, установлено снижение интенсивности массопереноса.

3. Экспериментально установлена значительная степень неравномерности распределения плотности орошения при среднем значении $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ (33 %) и воздуха при средней скорости $2,16 \text{ м/с}$ (21 %) БГ-2600. К факторам, влияющим на неравномерность распределения воздуха отнесены: плотность орошения воды, коэффициент аэродинамического сопротивления и скорость ветра. Причинами неравномерности плотности орошения являются неисправности водораспределительной системы и оросителя башенной градирни.

4. Построены аэродинамические характеристики в отдельных секциях градирни БГ-2600 с ее параметрами: плотностью орошения, аэродинамическим сопротивлением и локальной скоростью ветра у воздухопроводных окон. Ветровая характеристика башенной градирни БГ-2600 НЧ ТЭЦ служит для регулирования воздухопроводных окон каждой секций при различных скоростях ветра. Построены экспериментальные температурная и охлаждающая характеристики БГ-2600, которые используются при планировании гидравлической нагрузки.

5. Предложена методика корректировки нормативных характеристик с учетом неравномерности воды и воздуха в башенных градирнях. Построены скорректированные рабочие характеристики на примере градирни БГ-2600. По охлаждающей характеристике установлено, что с увеличением гидравлической нагрузки, происходит необратимое снижение охлаждающей мощности БГ-2600. Методика дополнительно апробирована на башенной градирне БГ-1600.

6. Проведено численное моделирование неравномерности потоков воды и воздуха в градирне БГ-2600. Установлена неоднородность охлаждения воды. Подтверждено, что наилучшая температура охлаждения воды достигается со скоростью воздуха $2,86 \text{ м/с}$ при средней плотности орошения $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$.

7. Разработана математическая модель, учитывающая неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни БГ-2600 комплексно. Разработан алгоритм и программа регулирования воздухопроводными окнами в условиях неравномерности распределения воды и воздуха башенной градирни.

8. Предложены организационно-технические мероприятия для повышения эффективности охлаждения башенных градирен. Мероприятия позволят снизить неравномерности потоков и сократить финансовые потери до $2,2 \text{ млн. руб./год}$ при расчете на один турбоагрегат (24 млн. руб./год для 11-ти турбоагрегатов).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК при Министерстве науки и ВО РФ:

1. Бадриев, А. И. Анализ нормальности распределения потоков в башенных испарительных градирнях / А. И. Бадриев, С. М. Власов, Н. Д. Чичирова; Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2021. – Т. 13, № 1 (49). – С. 132 – 141.

2. Бадриев, А. И. Исследование работы башенной градирни в условиях ее пониженной гидравлической нагрузки / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин, С. М. Власов, Н. Д. Чичирова; Надежность и безопасность энергетики, 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 268 – 273.

3. Бадриев, А. И. Оценка распределения воды и воздуха на лабораторной градирне / А. И. Бадриев, С. М. Власов; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019. – Т. 21. – №5. – С. 71 – 78.

4. 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.

5. 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.

6. Бадриев, А. И. Экспериментальное исследование неоднородности процесса охлаждения воды в башенной градирне / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин; Вестник ИГЭУ, 2016. – №. 6. – С. 15 – 20.

7. 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.

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

Публикации в зарубежных изданиях «Scopus» и «Web of Science»:

9. Badriev, A. I., Makarova, I. V. The water and air distribution law analysis in natural draft cooling towers. 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 2021, pp. 1 – 5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388023.

10. Badriev, A. I., Sharifullin, V. N. Analysis of the controllability of the natural draft cooling tower. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2019, vol. 16, pp. 213 – 215. DOI: 10.1166/jctn.2019.7726.

11. Sharifullin, V. N., Badriev, A. I. Aerodynamic characteristics of the cooling tower under the nonuniform distribution of the water and air flows. Thermal Engineering, 2019, vol. 66, is. 8, pp. 569 – 574. DOI: 10.1134/S0040601519080081.

12. Badriev, A. I., Sharifullin, V. N. The analysis of the process in the cooling tower with the low efficiency. Journal of Physics: Conference Series, Moscow, 2017, vol. 891, pp. 012205. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012205.

Материалы конференций:

13. Бадриев, А. И. Анализ рабочих характеристик при неравномерности распределения потоков в башенной градирне / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин // Международная (XX Всероссийская) научно – техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро – и теплотехнологии». – Иваново: ИГЭУ, 2019. – Т.2. – С. 51 – 53.

14. Бадриев, А. И. Анализ процесса в башенной градирне при низкой эффективности ее работы / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин // Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – Москва: МЭИ, 2017. – Т.2. – С. 57 – 58.

15. Бадриев, А. И. Влияние характеристик градирни на энергосбережение ТЭЦ / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин // Международная конференция «Энергосбережение. Наука и образование». – Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2017. – С. 140 – 142.

16. Бадриев, А. И. Анализ рабочих характеристик башенной градирни на лабораторной установке / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин, С. М. Власов // Международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)». – Казань: КАИ, 2017. – С. 780 – 784.

17. Бадриев, А. И. Управление расходом охлаждающей воды оборотной системы ТЭС / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин; XIII Международная научно – техническая конференция «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов», – Саратов: СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2016. – С. 210 – 215.

18. Бадриев, А. И. Метод анализа влияния гидравлической нагрузки на охлаждающую способность градирни / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин // XI международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2016. – Т.2. – С. 27 – 28.

19. Бадриев, А. И. Способ анализа влияния нагрузки башенной градирни на ее охладительную мощность / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин // XI международная научно – техническая конференция «Энергия». – Иваново: ИГЭУ, 2016. – Т. 1. – С. 45 – 47.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

20. Программа управления воздухопроводными окнами башенной градирни в условиях неравномерности потоков воды и воздуха: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А. И. Бадриев, — № 2019661889; дата регистрации 11.09.2019 г.