

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Власов С.М.
доктор технических наук,
профессор Шарифуллин В.Н.

Казань – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ	9
1.1 Особенности эксплуатации башенных градирен на ТЭС.....	9
1.2 Анализ охлаждающей мощности башенных градирен.....	13
1.3 Причины низкой эффективности башенных градирен	23
1.4 Неравномерности распределения потоков в башенных градирнях.....	29
1.4.1 Неравномерности распределения воздуха	30
1.4.2 Неравномерности орошения воды	38
1.5 Выводы по главе.....	42
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ	44
2.1 Теоретический анализ распределения воздуха в башенных градирнях.....	44
2.2 Экспериментальный анализ неравномерности распределения воздуха башенных градирен.....	46
2.3 Частные аэродинамические характеристики башенной градирни	52
2.3.1 Влияние перепада температур на скорость воздуха	54
2.3.2 Влияние коэффициента сопротивления на скорость воздуха	54
2.3.3 Ветровая характеристика	56
2.3.4 Анализ зависимости скорости воздуха от плотности орошения	62
2.3.5 Анализ аэродинамической характеристики на лабораторной модели. .	64
2.4 Обобщенная аэродинамическая характеристика башенной градирни.....	67
2.5 Выводы по главе.....	68
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ОРОШЕНИЯ В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ.....	70
3.1 Теоретический анализ распределения плотности орошения в башенных градирнях	70
3.2 Влияние неравномерности плотности орошения на эффективность процесса испарения в башенных градирнях	72
3.3 Экспериментальный анализ неравномерности плотности орошения башенных градирен.....	74

3.4 Температурная и охладительная характеристики башенной градирни в условиях неравномерности потоков	80
3.5 Анализ температурной и охладительной характеристики башенной градирни на лабораторной модели.....	82
3.6 Выводы по главе.....	86
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА КОРРЕКТИРОВКИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА	87
4.1 Построение нормативных характеристик	87
4.2 Построение скорректированных характеристик	88
4.3 Рабочие характеристики башенной градирни БГ-2600.....	89
4.4 Рабочие характеристики башенной градирни БГ-1600.....	98
4.5 Выводы по главе.....	107
ГЛАВА 5. МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА.....	108
5.1 Общие мероприятия по снижению неравномерности потоков.....	108
5.2 Численное моделирование степени охлаждения башенной градирни.....	109
5.2.1 Построение сеточной модели секции	109
5.2.2 Методика численного расчета	112
5.2.3 Результаты моделирования.....	114
5.3 Разработка системы управления охлаждением башенной градирни	122
5.3.1 Техническая реализация системы управления	122
5.3.2 Математическая модель и алгоритм управления окнами.....	126
5.4 Техничко-экономический расчет	130
5.5 Выводы по главе.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ХАРАКТЕРИСТИКА БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СВИДЕТЕЛЬСТВО ПРОГРАММЫ ЭВМ	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ДИПЛОМЫ И ГРАМОТЫ	174

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одной из приоритетных задач государственной программы «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. N 1715 – р), является осуществление перехода к рациональному использованию топливно – энергетических ресурсов, достигаемое путем совершенствования теплоэнергетических систем и установок. На тепловых электрических станциях, особое внимание всегда уделялось вопросам повышения эффективности и энергосбережения башенных градирен. Именно применение технологической системы циркуляционного водоснабжения с градирнями, характеризующаяся многократным использованием оборотной технической воды, позволило сократить растущий недостаток и тепловое загрязнение водных ресурсов промышленных предприятий [44,70].

На производстве, градирни требуют особого внимания, поскольку степень проблемы недоохлаждения технологического оборудования и механизмов производства, увеличения расхода топлива на выработку электроэнергии, снижения располагаемой мощности станции определяется эффективностью аппарата [15,100]. Вместе с тем, исследования отечественных ученых – классиков Бермана Л.Д., Арефьева А.Н., Фарфоровского Б.С., Джанибекова Г.Г., Корбуша К.И. Пономаренко В.С., Арефьева Ю.И. [3,15,47,68,100,123] и других, внесших фундаментальный вклад в теорию и практику изучения градирен, показали: снижение конечной температуры воды на 1 °С приводит к повышению вакуума конденсатора на 0,5 %, повышению мощности турбины на 0,4 %, а также уменьшению до 2 грамм расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии. Поэтому, вопрос повышения эффективности охлаждения оборотной воды градирнями всегда носит актуальный характер [33,73,74,76,79].

Несмотря на это, на производстве часто сталкиваются с недоохлаждением оборотной воды. В первую очередь, проблема довольно остро проявляется в летнее время года. При нагретой температуре наружного воздуха, всасываемого в вытяжной башни, аппарат не обеспечивает максимально эффективного

теплосъема. Для того, чтобы достичь заданной температуры охлаждения, производственники вынуждены снижать гидравлическую нагрузку на аппарат. А при работе в режиме пониженной производительности всех аппаратов, проблема приобретает уже более глобальный масштаб. Вместе с тем необходимо отметить, что немаловажную роль играет и крупномасштабность башенных градирен. В таких устройствах не исключено возникновение неравномерности потоков, а также ее неблагоприятное влияние на охлаждающую способность [109]. Поэтому, актуальным явилось исследование башенных испарительных градирен, работающих при условиях неравномерности потоков воды и воздуха.

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 исследования. Цель работы заключается в повышении эффективности охлаждения башенной градирни, функционирующей 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 исследования.

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 работы.

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.

Положения, выносимые на защиту.

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 башенной градирни.

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 башенной градирни.

Реализация результатов работы.

1. Скорректированные рабочие характеристики внедрены и применяются при планировании гидравлической нагрузки БГ-2600 НЧ ТЭЦ (*акт внедрения*).

2. Апробирована методика корректировки рабочих характеристик на примере БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ (*акт использования результатов*).

3. Внедрена ветровая характеристика и служит для регулирования воздухопроводных окон БГ-2600 НЧ ТЭЦ (*акт внедрения*).

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 и результаты исследования опубликованы и обсуждались на конференциях и конкурсах: XI международная научно–техническая конференция «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2016 г.); XI международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, КГЭУ, 2016 г.); XIII международная научно–техническая конференция «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (г. Саратов, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2016 г.); международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, НИУ «МЭИ», 2017 г.); международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения» (г. Казань, КНИТУ – КАИ, 2017 г.); международная конференция «Энергосбережение. Наука и образование» (г. Набережные Челны,

КФУ, 2017 г.); конкурс программы «УМНИК» (г. Москва, 2017 г.); конкурс «50 лучших инновационных идей для РТ» (г. Казань, 2017 г.); международная конференция «Бенардосовские чтения» (г. Иваново, ИГЭУ, 2019 г.); Международная научно–техническая конференция «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, НИУ «МЭИ» 2021 г.).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 19 научных трудах, среди которых: 7 статей в журналах из перечня ВАК; 4 публикации в зарубежных изданиях «Scopus» и «Web of Science»; 7 материалов докладов с очным участием в международных и всероссийских конференциях; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в проведении литературного обзора, теоретических, численных и натурных 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 и 5 приложений.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ

1.1 Особенности эксплуатации башенных градирен на ТЭС

На тепловых электростанциях, в качестве охладителей оборотного водоснабжения большее распространение получили испарительные градирни башенного типа [31]. В сравнении с существующими способами охлаждения, таких как охлаждение с помощью водоема или брызгательного бассейна, башенные градирни занимают меньшую площадь на территории производства, обеспечивают сохранение объемов водных ресурсов и исключают их вредного загрязнения [44,70]. На сегодняшний день, около 40 % ТЭС России применяют и вводят в эксплуатацию башенные испарительные градирни. Аппарат является главным оборудованием в цикле оборотной системы и служит охладительным устройством конденсаторов турбин замкнутой схемы потока технической воды на производстве. Простейшая одноконтурная схема оборотного охлаждения ТЭЦ приведена на рисунке 1.1.

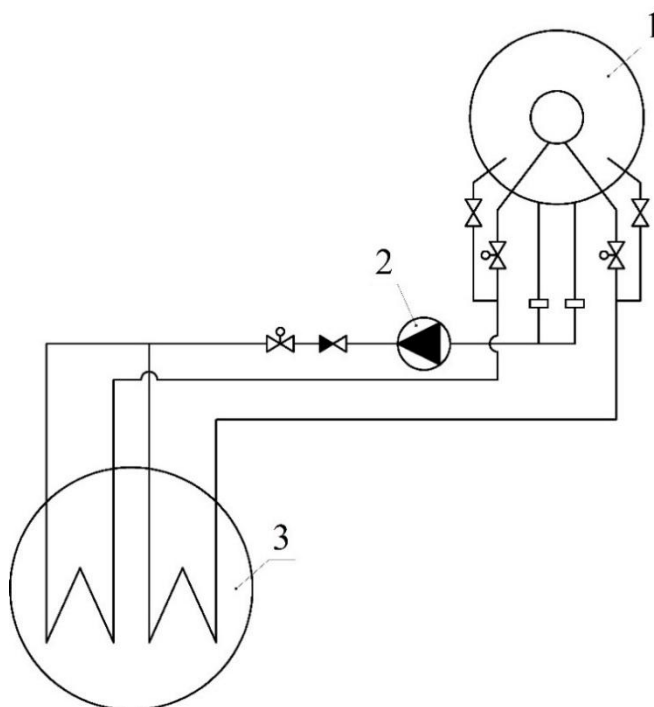


Рисунок 1.1 – Одноконтурная схема оборотной системы ТЭЦ, где:
1 – башенная градирня; 2 – циркуляционный насос; 3 – конденсатор.

Циркуляционная система, изображенная на рисунке 1.1, представляет собой схему с многократным использованием технической воды. Ее принцип действия таков: вода, охлажденная в градирне, с помощью циркуляционного насоса, напором подается в конденсатор, откуда возвращается вновь на следующий цикл охлаждения. Таким образом, башенные градирни позволяют достичь требуемых установленных нормативов для поддержания вакуума в конденсаторе самым экономичным способом.

Еще одной особенностью, которой обладают башенные градирни – это их крупномасштабность. Гигантские охлаждающие башни могут достигать до 202 метров высоты и диаметра до 142 метров [152,155]. Такого рода габариты необходимы для создания мощной естественной тяги атмосферного воздуха внутри аппарата и охлаждения больших объемов циркуляционной воды.

На тепловых электростанциях России, современные башенные градирни сооружают производительностью от 8500 до 30000 м³/ч [111]. Разновидность башен с указанными габаритами (в метрах), без обшивки (верхний ряд) и с обшивкой (нижний ряд) представлены на рисунке 1.2.

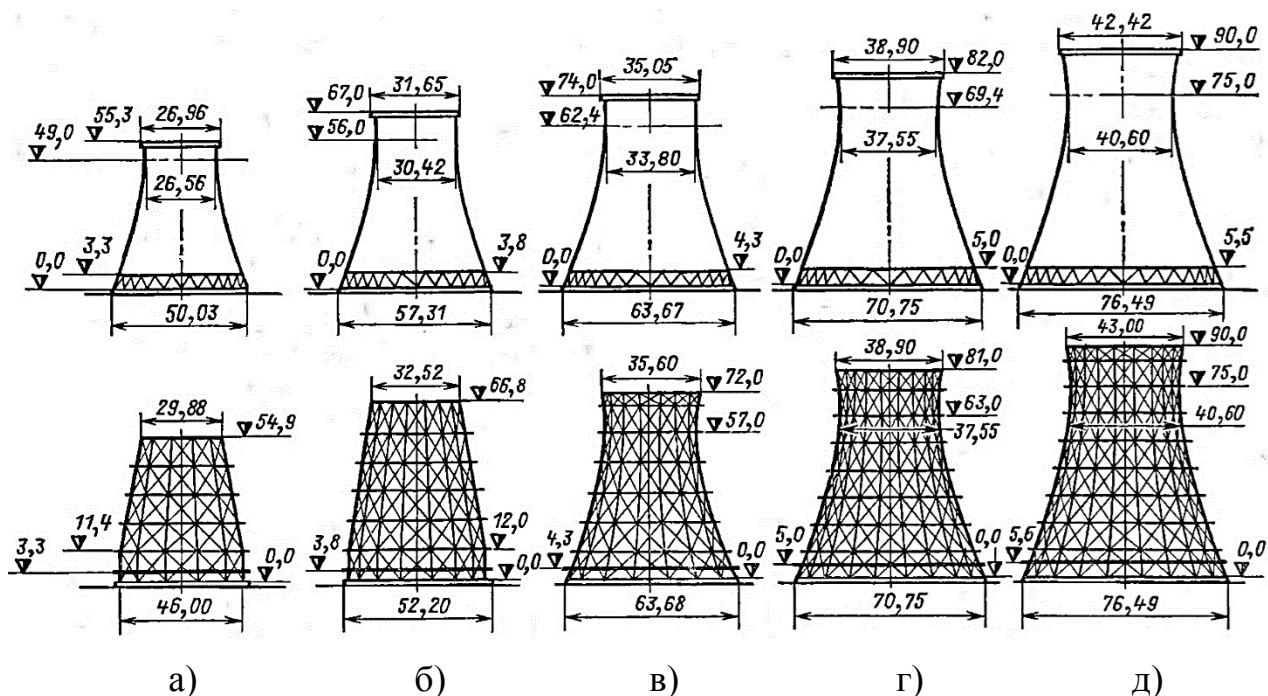


Рисунок 1.2 – Башенные градирни ТЭС, производительностью:
 а) 8500 – 11000 м³/ч; б) 11500 – 14500 м³/ч; в) 15000 – 18000 м³/ч;
 г) 18500 – 22500 м³/ч; д) 23000 – 30000 м³/ч.

В качестве примера, на рисунке 1.3 представлены башенные градирни на этапе строительства Нижнекамской ТЭЦ – 2 (2014 г.).



Рисунок 1.3 – Башенные градирни на этапе строительства

Отметим, что от размеров башенной градирни зависит не только ее гидравлическая и аэродинамическая производительность. Развиваемая скорость паровоздушной смеси внутри аппарата, создаваемая разностью температур воздуха в башенной градирне и окружающей среды (эффект естественной тяги) определенно зависит от высоты и формы и позволяет судить об эффективности количественного уноса влаги и скорости процесса испарения. С другой стороны, большое расстояние от основания до устья башни обусловлено противостоянием к образованию рециркуляции паровоздушной смеси. Это объясняется тем, что подвод теплого воздуха к вновь охлаждающей воде в значительной степени снизило бы охлаждающую мощность аппарата.

Особое значение имеет диаметр башенной градирни. От нее зависит площадь орошения, согласно которой можно судить о ее производительности. Площадь орошения позволяет определить площадь оросительного устройства, а

значит и площадь непосредственного контакта охлаждаемой жидкости и охлаждающего атмосферного воздуха [74,80,81].

Поскольку атмосферный воздух является хладагентом в процессе испарения, на эффективность башенных испарительных градирен влияет и внешние метеорологические показатели: температура и относительная влажность атмосферного воздуха, скорость и направление ветра. Поэтому, в зависимости от времени года, на тепловых электрических станциях охладительный аппарат функционирует при разных режимах эксплуатации и, как правило, разделяют их на летний и зимний режимы.

Зимний режим работы градирен благоприятен для достижения оптимальных технологических параметров. Холодный поток атмосферного воздуха, всасываемый в вытяжную башню, обеспечивает необходимый перепад температуры и теплосъем. Однако, вместе с тем, происходит и обледенение конструктивных элементов градирни. Наиболее важным вопросом является процесс обрастания наледи на оросительном устройстве. Ввиду образования льда на поверхности оросителя уменьшается поверхность контакта воды и воздуха, а также происходит физическое разрушение ее блоков. Вместе с тем, существует проблема льдообразования на входе воздухопроводных окон, что затрудняет проникновение воздушного потока в аппарат. В совокупности, образование наледи на конструктивных элементах приводит к снижению расхода воздуха и, вследствие, к спаду эффективности охлаждения градирни.

В летнее время года конструктивные элементы не подвержены их явному нарушению. Несмотря на это, ограничения по возможности поддержания заданного уровня охлаждения существуют. Причиной тому, является горячий воздух, затягиваемый в башню. Поэтому, с технологической точки зрения, самым напряженным временем года для аппарата является летний период. Отметим, что, в летнее время года, при высоких температурах атмосферного воздуха, преобладающим процессом отвода тепла от воды является испарение (до 90 %). Зимой, при низких температурах наружного воздуха испарению приходится малая доля (до 20 %), поскольку преобладающим является процесс

теплоотдачи непосредственного контакта охлаждаемой воды и поступающего воздуха (до 70 %) [15]. Именно в летнее время года, башенные градирни становятся «уязвимым местом» производства. С повышением температуры наружного воздуха, падает и охладительная мощность аппарата. В конечном счете, снижается уровень разряжения конденсатора, и, следовательно, мощность паровых турбин [16].

Если учесть нормативные показатели к охлаждению оборотной воды градирнями на ТЭЦ (как правило, это перепад температуры 11 – 12 °С и температура охлажденной воды не выше 28 °С), часто в летнее время года, аппараты не справляются с поставленной задачей [75]. Так, в условиях низкой эффективности аппарата, для достижения требуемой температуры охлаждения прибегают к снижению расхода воды. Однако, понижение гидравлической нагрузки сопровождается значительным спадом теплосъема башенной градирни. К тому же, путем перераспределения объема воды на соседние охладители, создаются дополнительные затраты на электроэнергию циркуляционных насосов и на введение в эксплуатацию дополнительных градирен [117]. Поэтому, востребованность в резервах повышения охлаждающей мощности башенных градирен в условиях низкой эффективности становится очевидной.

1.2 Анализ охладительной мощности башенных градирен

На производстве, главным показателем эффективности работы башенных градирен принято считать конечную температуру охлажденной воды [100]. Однако, это не единственный определяющий фактор. Не менее важным является показатель разницы температур поступающей и охлажденной воды. Своего рода, снижение конечной температуры за счет уменьшения перепада температур воды является экономически нецелесообразным [116,119]. Поэтому, стоит учитывать, что достижение максимальной эффективности башенных испарительных градирен обеспечивается увеличением перепада температур при минимальной конечной температуре охлажденной воды. Отметим, что, в свою очередь, перепад температуры характеризует величину теплосъема башенной градирни.

Так, одним из важнейших технологических параметров, определяющих испарительную мощность является удельная тепловая нагрузка – величина количества тепла, произведенная башенной градирней в единицу времени.

К параметрам, влияющих на тепловую мощность относят также и удельную гидравлическую нагрузку (плотность орошения) [118]. Таким образом, для определения тепловой мощности, или, как часто ее называют охлаждающей мощности, на практике используют уравнение:

$$R = c_p \cdot \rho \cdot F \cdot q \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг · °С); F – площадь сечения башенной градирни, м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; q – плотность орошения, м³/м²·ч; ΔT – перепад температуры, °С.

Из формулы (1), параметры c_p , F и ρ принимают постоянные величины. Поэтому, в конечном счете, можно принять, что охлаждающая способность башенной градирни зависит от двух параметров: перепада температуры ΔT и плотности орошения воды q . Однако, если учесть, что перепад температуры изменяется в ограниченном диапазоне (5 – 20 °С), очевидно, что для повышения охладительной мощности, необходимо повышать гидравлическую нагрузку на аппарат. Поэтому, использование громоздких башенных градирен при малой гидравлической нагрузке, и, следовательно, при сравнимо малом теплосъеме на предприятиях является экономически невыгодным.

Тем не менее, башенные градирни часто эксплуатируются в режиме низкой гидравлической нагрузки. Для достижения требуемой температуры охлаждения и поддержания необходимого вакуума в конденсаторах, производственники вынуждены снижать расход воды на аппарат. Если учесть, что для качественного обеспечения охладительного эффекта башенной градирни, нормой является охлаждающая мощность в диапазоне от 60 до 100 Мкал/м²·ч [101], аппараты не выполняют поставленной задачи и, как правило, работают в пределе от 30 до 40 Мкал/м²·ч [91].

На практике, для анализа охлаждающей мощности и работоспособности башенных градирен, применяют паспортные нормативные характеристики и методики их построения. Нормативная характеристика позволяет оценить охлаждающую способность с целью наиболее экономической эксплуатации башенной испарительной градирни, своевременного обнаружения и устранения причин ухудшения эффективности аппарата. Иными словами, если конечная температура воды отклоняется от установленного нормативного показателя, следует, что башенная градирня функционирует с пониженным потенциалом производительности.

За рубежом, для расчета эффективности охлаждения градирен, как правило, руководствуются уравнением Меркеля [167,175]:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{i' - i}, \quad (2)$$

где K – коэффициент массопередачи, кг/ м²·с; a – удельная поверхность контакта фаз, м²/м³; V — объем охлаждения воды, м³/м²; L — массовый расход воды, кг/с; i' – энтальпия насыщенного воздуха при температуре воды, кДж/кг; i – энтальпия воздушного потока, кДж/кг; t_1 и t_2 — температура воды на входе и выходе, °С.

Основываясь на уравнении Меркеля (2), на практике для удобства оценки охлаждающей способности испарительных градирен, стали использовать номограмму, изображенную на рисунке 1.4 [167]. Методика определения конечной температуры воды по представленной номограмме следующая: исходя из отношения левой части уравнения (2) (KaV/L) или температуры по влажному термометру (wet – bulb temperature, °F), с учетом диапазона охлаждения (cooling range, °F) и отношения массового расхода воды и массового расхода воздуха L/G , рассчитывают температуру охлажденной воды (cold – water temperature, °F).

Однако такая номограмма позволяет произвести только приближенный расчет конечной температуры воды [167]. Стоит отметить, что степень точности определения показателей охлаждающей способности зависит от конструктивных параметров аппарата и его предела охлаждения.

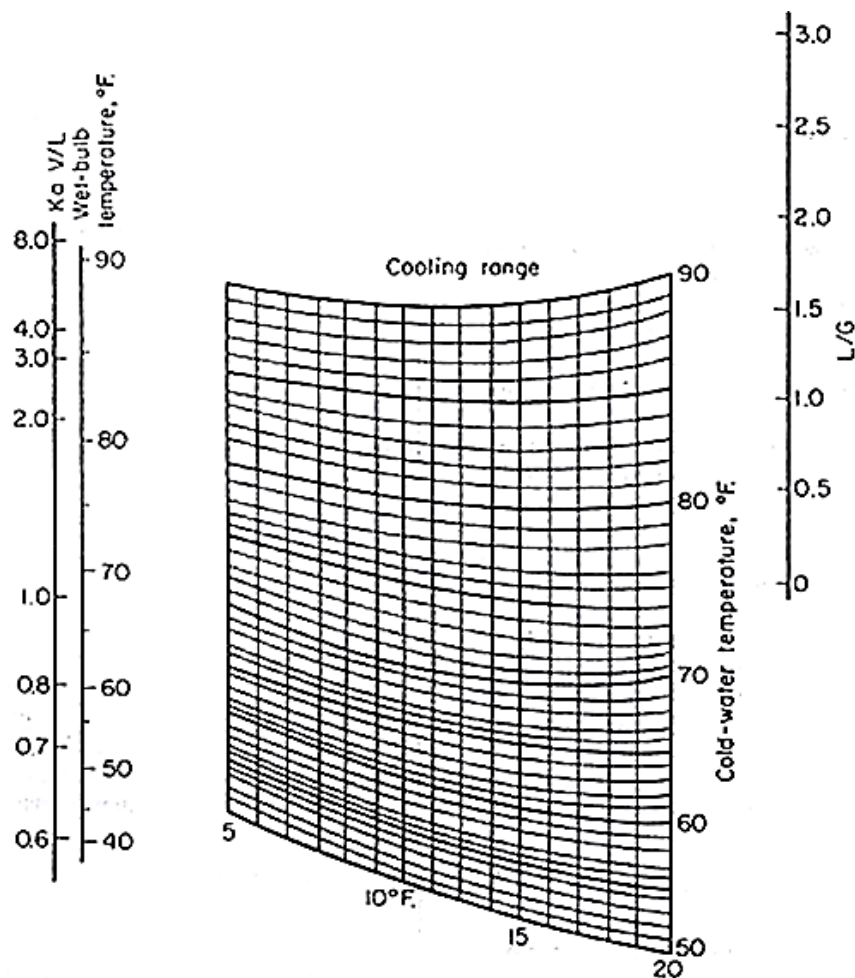


Рисунок 1.4 – Номограмма градирен с воздушным охлаждением

Вместе с тем, в зарубежной практике используют и номограмму GPSA (рисунок 1.5) [157,161], которая условно разделена на две области: кривые температур воздуха по влажному термометру (Wet – bulb temperature, °F) и кривые перепада температур (Range, °F). Руководствуясь ими, можно определить, как КПД градирни (Performance factor), так и температуру охлажденной воды аппарата (Cold water temperature, °F). Согласно номограмме можно установить влияние на температуру охлажденной воды и на КПД градирни следующих параметров [161]: температуры воздуха по влажному термометру (рисунок 1.6, а); диапазона охлаждения (рисунок 1.6, б); скорости циркуляции воды и тепловой нагрузки (рисунок 1.6, в); температуры воздуха по влажному термометру, диапазона охлаждения, скорости циркуляции воды и расхода воздуха в совокупности (рисунок 1.6, г).

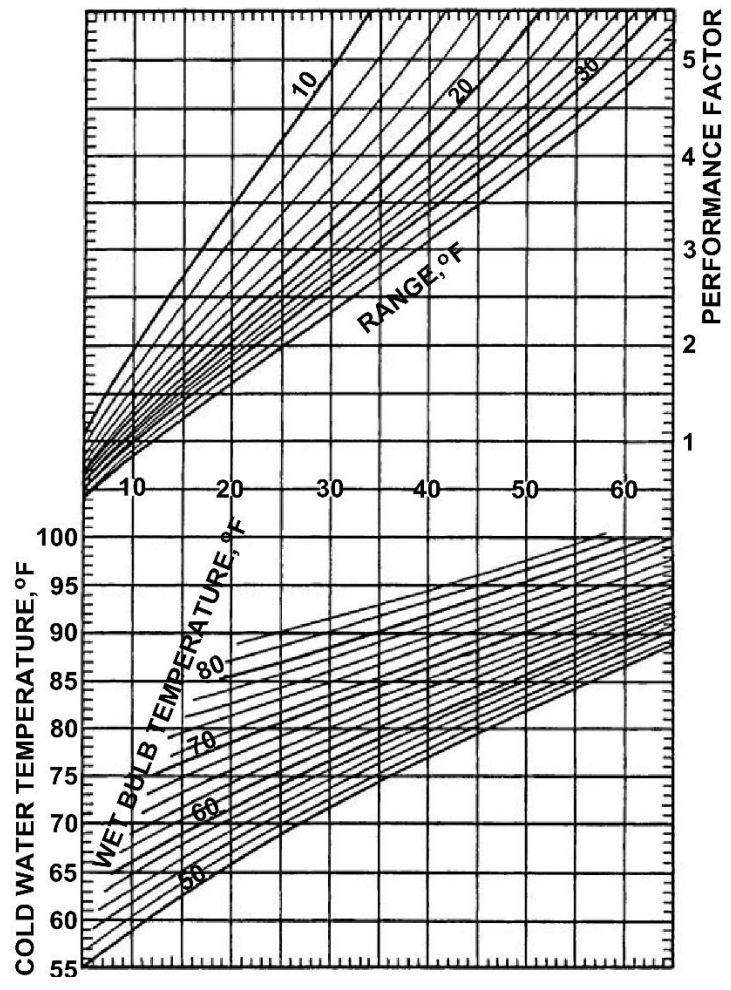
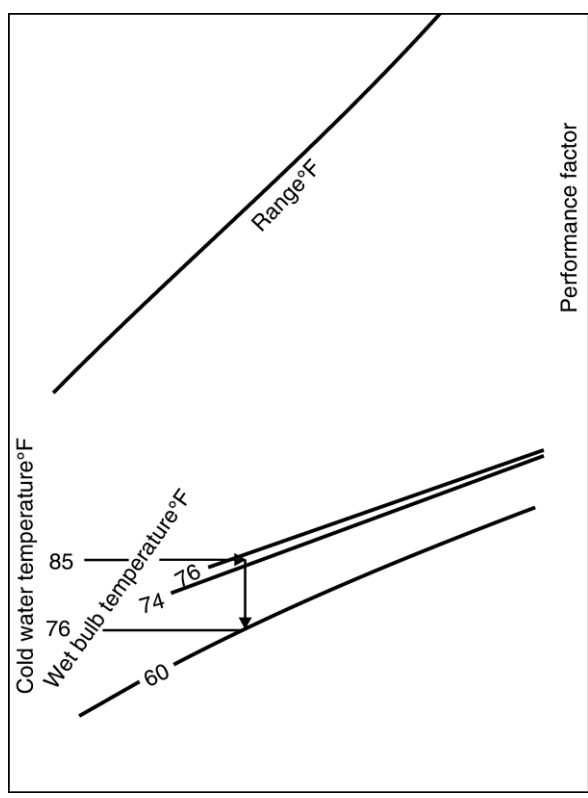
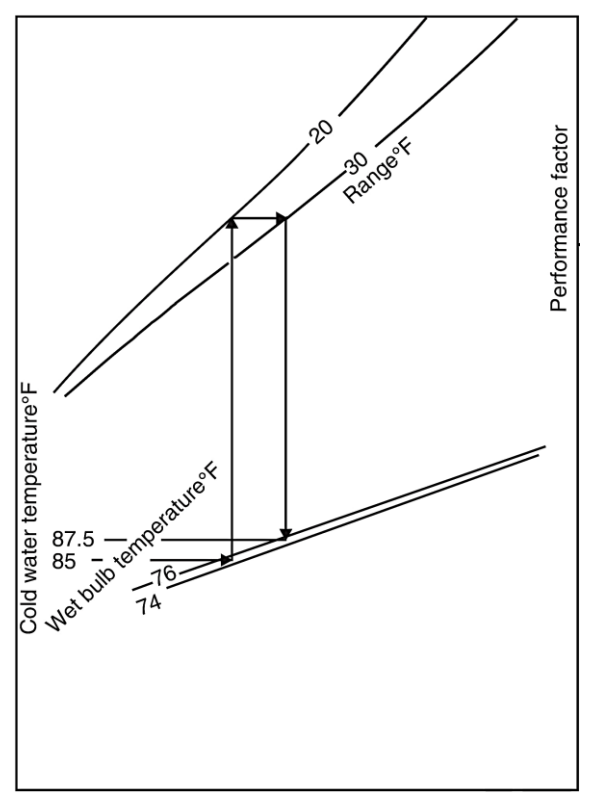


Рисунок 1.5 – Номограмма GPSA



a)



б)

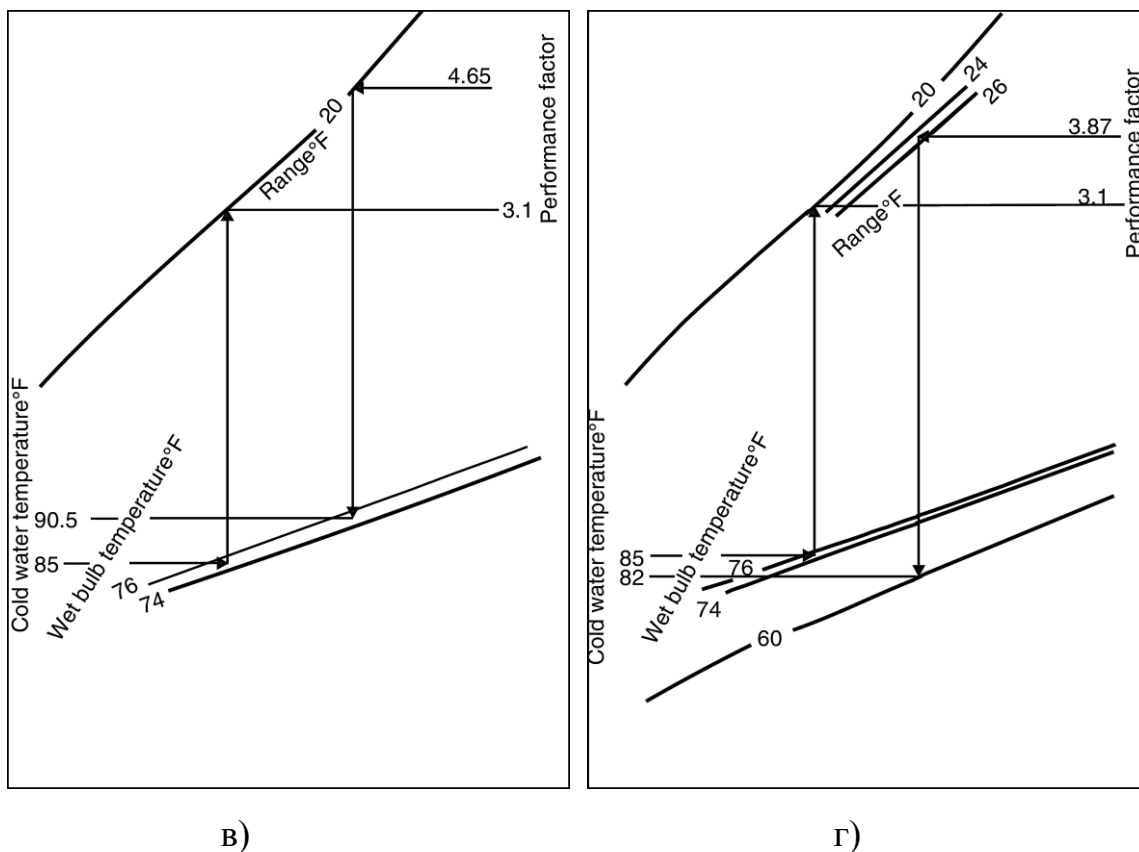


Рисунок 1.6 – Определение температуры холодной воды по номограмме GPSA от влияния: а) температуры воздуха по влажному термометру; б) скорости циркуляции воды и тепловой нагрузки; в) температуры воздуха по влажному термометру, диапазона охлаждения, скорости циркуляции и расхода воздуха.

Несмотря на универсальность номограммы, представленной на рисунке 1.5, у нее есть существенный недостаток – номограмма предназначена для грубого определения охлаждающей способности градирен. Для более точного расчета эффективности, необходимо принимать во внимание высоту башни, тип оросителя и способ потока воды (поперечный или противоточный).

С учетом конструктивных особенностей, в РФ, для башенных градирен, сооруженных по отечественным проектам компаний АО «Союзтехэнерго», ОАО «Институт Теплоэлектропроект», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и т.д., нормативные характеристики строят по пособию проектирования градирен института АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [101] или по методике нормирования показателей работы гидроохладителей в энергетике АО «Фирма ОРГРЭС» [122]. В них отражены номограммы, полученные из результатов

натурных испытаний исправных башенных градирен [101,122], не имеющих дефектов и недоработок. Номограммы служат главной характеристикой введенного в эксплуатацию нового охлаждающего устройства. Так, представленные нормативные рабочие характеристики для башенных испарительных градирен индивидуальны и, во многом, зависят от конструктивных параметров и размеров башни. Поэтому, при построении номограмм, в первую очередь, определяют параметры: площадь орошения, высоту башни, геометрические размеры и конструкцию оросителя.

Номограммы, разработанные АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» основаны на многолетних экспериментальных испытаниях башенных испарительных градирен [101]. Их отличительной особенностью является представление параметров относительной влажности наружного воздуха φ , плотности орошения q и перепада температуры воды Δt в виде частных характеристик. Номограммы ВНИИГ широко используются при анализе охлаждающей способности испарительных градирен. В качестве примера, на рисунке 1.7 отражена номограмма БГ – 1600.

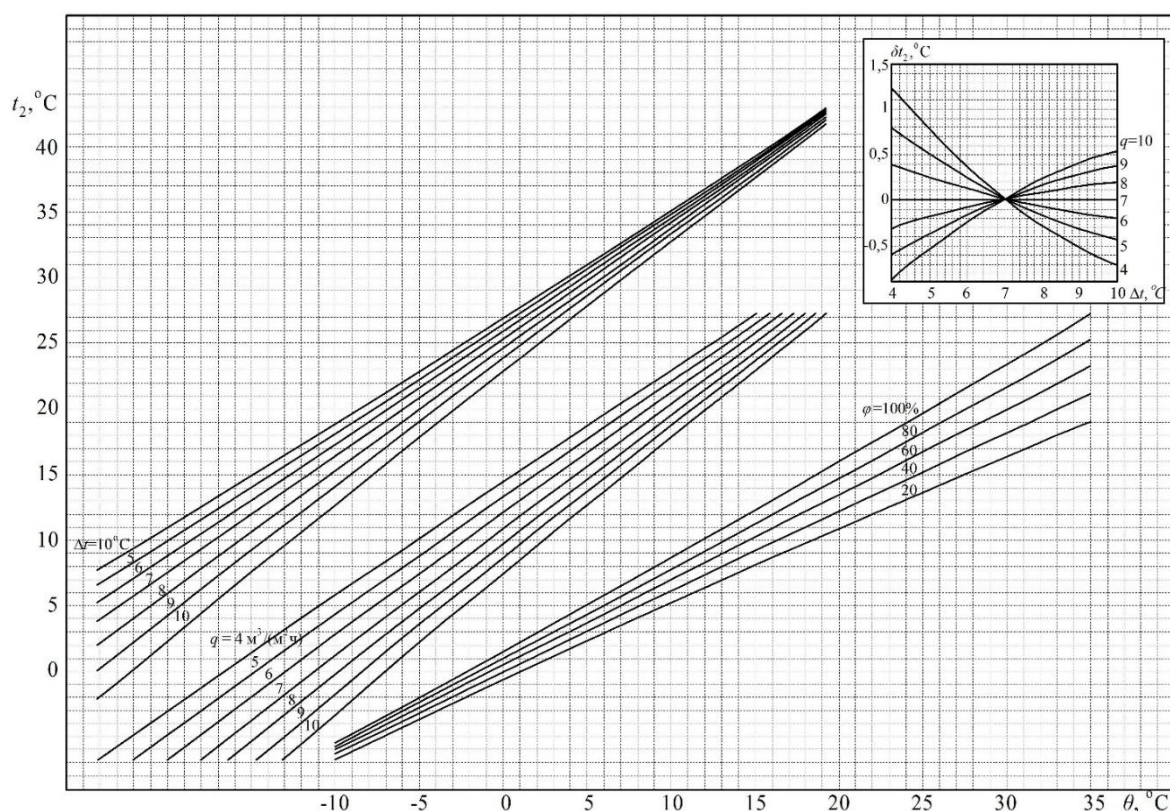


Рисунок 1.7 – Номограмма башенной градирни БГ – 1600

С учетом конструктивных особенностей высоты воздухопроводных окон, высоты и диаметра вытяжной башни, конечная температура охлажденной воды по номограмме [101] определяется согласно ключу:

$$\theta \rightarrow \varphi \rightarrow q \rightarrow \Delta t \rightarrow t_2, \quad (3)$$

где θ – температура наружного воздуха, °С; φ – относительная влажность наружного воздуха, %; q – плотность орошения, м³/м²·ч; Δt – перепад температуры воды, °С; t_2 – конечная температура охлажденной воды, °С.

Номограммы компании АО «Фирма ОРГРЭС» базируются на балансовых испытаниях башенных градирен, следовательно, дают достаточно точный результат охлаждающей способности [122]. В отличие от номограмм института АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», параметры плотность орошения q и перепад температуры Δt представлены в единой характеристике охлаждающей мощности (тепловой нагрузки) $q\Delta t$. В качестве примера, на рисунке 1.8 приведена нормативная характеристика башенной градирни БГ – 2600.

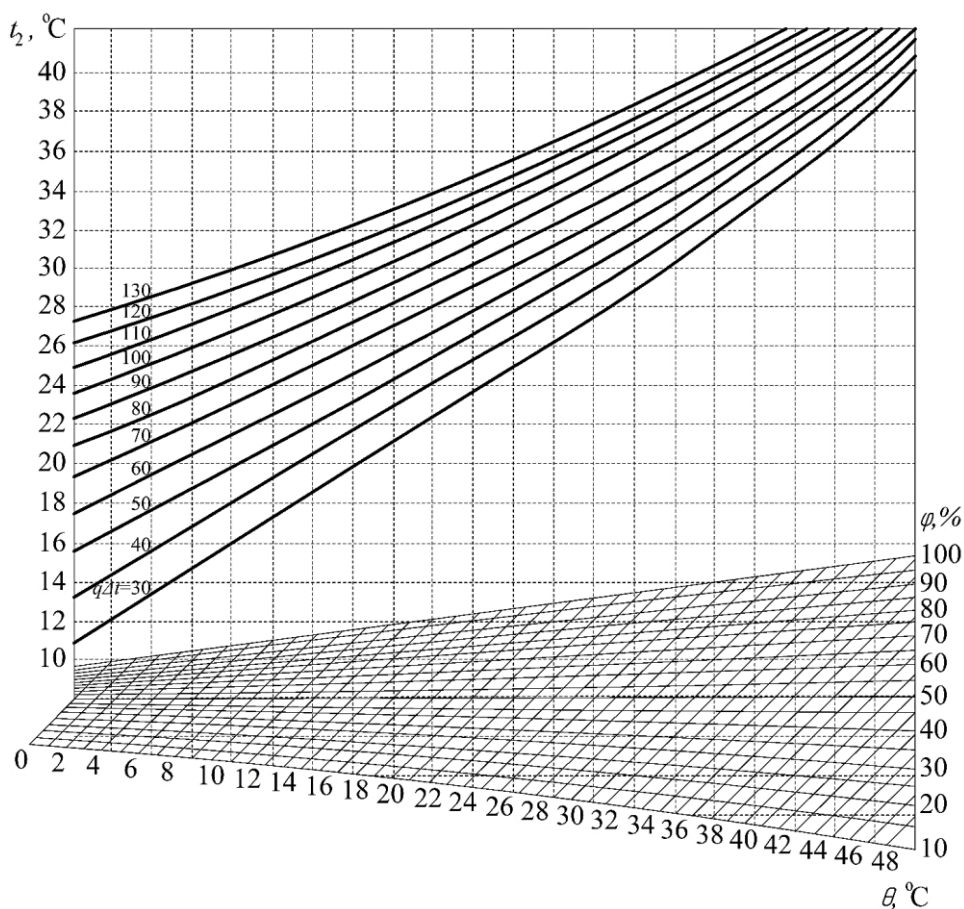


Рисунок 1.8 – Номограмма башенной градирни БГ-2600

С определением поправок на совпадение с натурными данными, на перепад температуры и скорости ветра, конечная температура охлажденной воды по номограмме [122] определяется согласно ключу:

$$\theta \rightarrow \varphi \rightarrow q\Delta t \rightarrow t_2, \quad (4)$$

где θ – температура наружного воздуха, °С; φ – относительная влажность наружного воздуха, %; $q\Delta t$ – удельная тепловая нагрузка, Мкал /м²·ч; t_2 – конечная температура охлажденной воды, °С.

Так, нормативная температура охлажденной воды рассчитывается по формуле:

$$t_2^H = t_2 + \Delta t_\delta + \Delta w_\delta + \Delta c. \quad (5)$$

где Δc – поправка на совпадение с натурными данными, Δt_δ – поправка на перепад температуры, Δw_δ – поправка на скорость ветра.

Вместе с тем, приведенные указания по построению нормативных характеристик удобны в расчетах и в применении на практике, однако, имеют значительный недостаток, связанный с все большим совершенствованием конструктивных элементов башенных градирен. Например, в методике [122] приводятся указания по нормированию охлажденной температуры воды башенных градирен, оснащенных устаревшими деревянными и асбоцементными оросителями. Практический опыт показывает, что с такими оросителями перепад температуры градирни составляет 5 – 7 °С, в то время как эксплуатация с современными полиэтиленовыми оросителями достигает перепад температур 8 – 10 °С [56,57,69,117]. Поэтому, сегодня башенные градирни с устаревшими типами оросителя почти не встречаются, практически все башенные градирни реконструированы с переходом на полимерные оросители.

С учетом недостатков указаний построения нормативных характеристик [101,122], Калатузовым В.А. разработан новый подход к построению нормативных характеристик градирен [61,62,84]. Им предложена методика построения нормативных характеристик аналитическим способом. Зависимость нормативной характеристики охлаждения воды выражается в виде формулы:

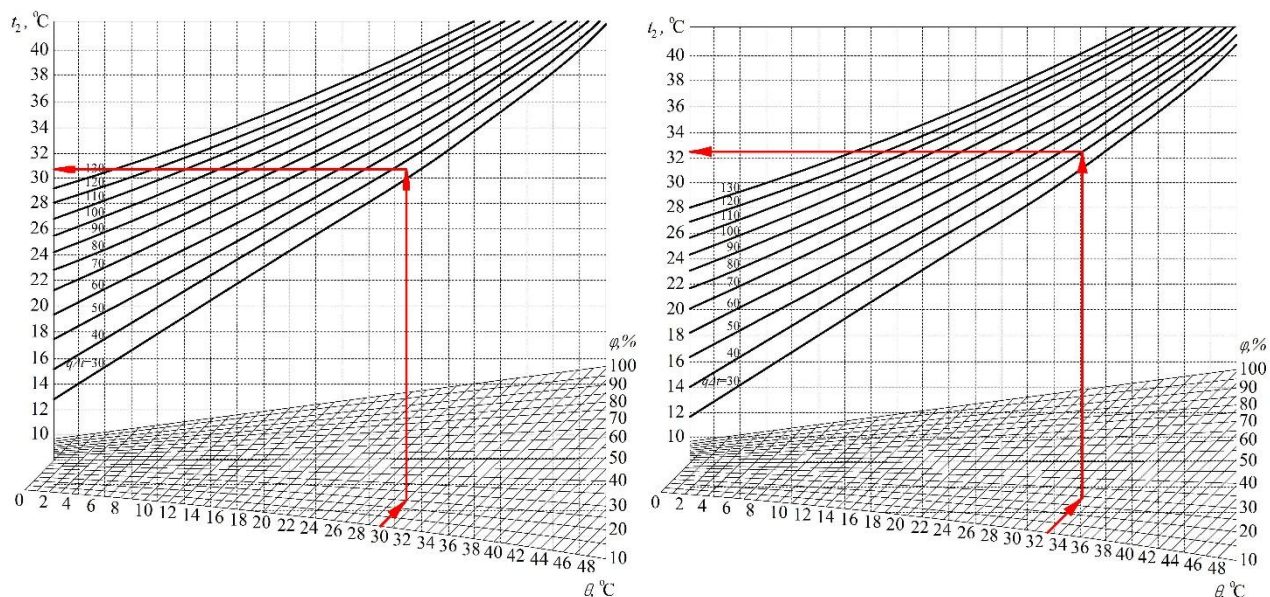
$$\tau = \frac{1}{2a} \left[ax + b\Delta t - \sqrt{\frac{3A}{\left(\frac{x}{54,4}\right)^2 + C}} \right], \quad (6)$$

где $A = \sqrt{\xi / H_g} \cdot (q\Delta t / \Psi)$, $\Psi = \sqrt{\varphi / (1 + 0,5\varphi)}$; ξ – общий коэффициент сопротивления градирни; H_g – высота вытяжной башни градирни, м; q – плотность орошения, м³/м²·ч; Δt – перепад температуры, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; a и b – постоянные коэффициенты.

Далее, как и в методике, с учетом поправок на совпадение с натурными данными, на перепад температуры градирни и скорости ветра, нормативная температура охлажденной воды рассчитывается по формуле (5).

Приведенные номограммы башенных градирен широко используются на практике. Однако, важно подчеркнуть, что они характеризуют только те аппараты, которые начали свою работу и не были подвержены длительной эксплуатации. Поскольку, в процессе работы башенных испарительных градирен могут проявляться различного рода неисправности аппарата, что, в свою очередь, значительно влияет на охлаждающую эффективность, возникает необходимость в построении фактических характеристик.

С использованием методики построения нормативных характеристик градирен [62,84], компанией «ИРВИК» проведены обследования и испытания оборотной системы охлаждения на примере Астраханской ТЭЦ-2 [91]. В техническом отчете представлен анализ состояния двух башенных градирен, согласно которому выявлены неисправности их конструкции. К ним отнесены: неисправности оросительного устройства, разрушение ветровых перегородок, неравномерный напор сопел, неравномерное расположение поворотных щитов, наличие коррозии и биологически обрастания на конструкциях градирни. Отмечено, что в проведенных обследованиях башенных градирен снижена их гидравлическая нагрузка. С учетом указанных неисправностей, построена фактическая нормативная характеристика башенных градирен (рисунок 1.9).



а) Характеристика БГ №1

б) Характеристика БГ №2

Рисунок 1.9 – Фактические характеристики башенных градирен

Согласно сравнению фактических характеристик с нормативной (рисунок 1.8), графики фактических тепловых нагрузок от 30 до 130 Мкал /м²·ч смещены вверх по оси конечной температуры t_2 , что свидетельствует о повышении температуры охлажденной воды. Это демонстрирует заметное влияние неисправностей конструктивных элементов на эффективность аппарата. Однако, несмотря на полученный результат обследования [91], в рамках работы не проведен анализ степени неисправности и ее влияния на эффективность процесса охлаждения каждого из элементов конструкции башенной градирни.

Прежде чем, провести такого рода анализ, необходимо рассмотреть более подробно виды неисправностей и всевозможные причины возникновения низкой эффективности охлаждения воды в башенной градирне.

1.3 Причины низкой эффективности башенных градирен

Как известно, несущей конструкцией градирни с естественной тягой является железобетонная башня. Со временем, под влиянием физических и химических воздействий, происходит ее разрушение [63,143]. Расслоение железобетона башни приводит к появлению трещин и, в последующем, утечке воды путем просачивания, что свидетельствует о возникновении потерь воды в

циркуляционной системе. Более значимые трещины и образовавшиеся щели могут стать причинами нарушения аэродинамики воздуха в аппарате, и, в последующем, спада процесса охлаждения. На рисунке 1.10 представлено повреждение устья градирни Ульяновской ТЭЦ [113].



Рисунок 1.10 – Разрушение оболочки железобетонной башни градирни

Вместе с тем, разрушение каркаса башни может привести к прогибу участков оросителя и каплеуловителя, что негативно сказывается на эффективности аппарата. Для примера, на рисунке 1.11 изображена фотография внутренней конструкции башенной градирни Благовещенской ТЭЦ, на которой в левой части от моста отчетливо видно, что блоки каплеуловителя провалены из-за частичного разрушения каркаса башенной градирни, и, на правой части, напротив – ровно уложенные блоки каплеуловителя [36].

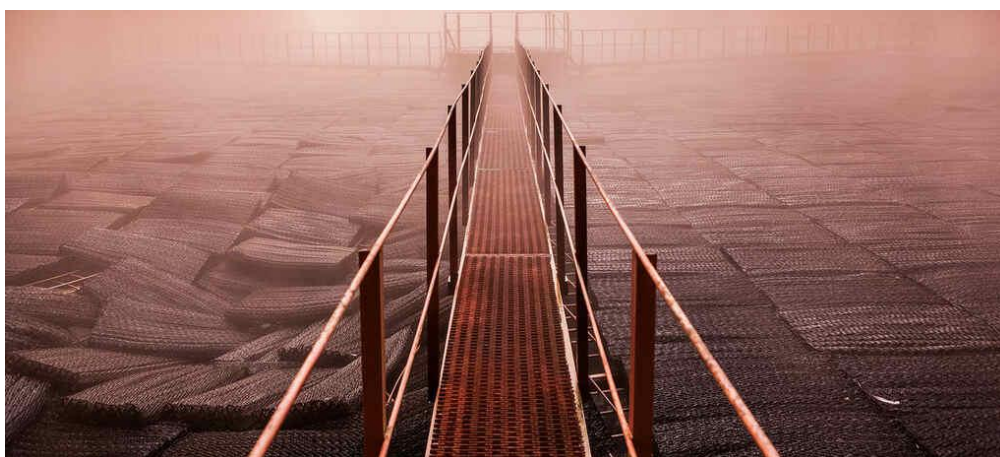


Рисунок 1.11 – Прогиб блоков каплеуловителя башенной градирни

В свою очередь, неправильная укладка блоков оросителя может привести к возникновению областей с неорошаемыми зонами, что свидетельствует о

стеснении живого сечения градирни и возникновении дополнительного аэродинамического сопротивления в отдельных участках оросительного устройства [42].

Разрушение железобетонной конструкции башни часто становится одной из существенных проблем эксплуатации градирен. В конечном счете, при ее значительном разрушении, прибегают к полной замене охладителя [63,114].

Однако, поддержание оболочки железобетонной башни в целостности и сохранности не единственная задача, требующая особого внимания. На практике, под тщательным наблюдением находится и техническое состояние конструкции оросителя, водораспределительная системы (ВРС). Они требуют более основательного ухода, поскольку являются главными конструктивными элементами аппарата: с подачей в водораспределительную систему и разбрызгиванием горячей воды соплами до мелкодисперсного состояния, именно в объеме оросителя происходит наибольший контакт между водой и воздухом, и соответственно, максимальный теплосъем [100].

Современные полиэтиленовые оросители, особенно в зимнее время года, под воздействием холодного воздуха подвергаются разрушению. Распад на части блоков оросителя вызывает уменьшение площади для непосредственного контакта воды и воздуха [36] (рисунок 1.12). В свою очередь, поломленные элементы уносятся с потоком охлажденной воды, засоряя циркуляционные насосы и конденсатор [65] (рисунок 1.13).



Рисунок 1.12 – Дефект блока оросителя



Рисунок 1.13 – Элементы оросителя

Кроме того, полиэтиленовым блокам свойственно обрастание водорослями и солями жесткости, что способствует забиванию каналов оросителя. Результатом становится уменьшение полезной площади орошения охлаждаемой воды башенной градирни вплоть до 30 % [108].

Другой причиной низкой эффективности охлаждения воды может стать образование отложений в магистральных и секционных трубах водораспределительной системы (ВРС), являющееся, как правило, результатом неправильного ведения водно-химического режима оборотной системы водоснабжения ТЭС [2,19,92,126,179]. Нарушение работы ВРС приводит к снижению давления и уменьшению площади орошения сопел. Для примера, на рисунке 1.14 представлена фотография ВРС в действии.



Рисунок 1.14 – Орошение воды при образовании отложений в трубах ВРС

На рисунке 1.14 проглядывается разностный характер орошения воды: радиус орошения сопла №2 меньше в сравнении с радиусом орошения сопла №1. Это свидетельствует о недостаточном давлении и отложениях в водораспределительных трубах [89]. К причинам образования осадков в них, также относят эксплуатацию аппарата при малых гидравлических нагрузках и, как следствие, при малых скоростях потока воды водораспределительной системы (0,8 – 1 м/с) [108].

Образование отложений в магистральных и секционных трубопроводах водораспределительного устройства вызывает засоры в конструкциях разбрызгивающих сопел и в последующем их отказы (рисунок 1.15) [26,32]. На

рисунке 1.16 представлена фотография одной из сопел конструкции ВРС, изображенной на рисунке 1.14. Сопла имеют засоры и поэтому орошение воды происходит не в полный радиус.



Рисунок 1.15 – Ряд отказавших сопел

Рисунок 1.16 – Сопла с засорами

Так, из-за потери давления, малой скорости потока воды и забивания труб отложениями, возникает недостаточное и неравномерное разбрызгивание воды соплами. В совокупности, это приводит к возникновению неравномерного распределения потоков воды по сечению башенной градирни [26,32].

Несмотря на приведенные причины, существенным признаком низкой эффективности охлаждения воды могут стать и ошибки в конструкции при проектировании или неправильная эксплуатация воздухопроводных окон [64]. Поскольку воздух является хладагентом в процессе охлаждения воды, правильная подача воздуха в аппарат при помощи воздухорегулирующих щитов является одной из главных задач обслуживающего персонала башенных градирен. Поэтому, во многом глубина охлаждения воды напрямую зависит от способа и угла подачи воздуха в створ окон, скорости и направления ветра.

Ввиду регулярной переменчивости ветра, необходимо и очень важно правильно регулировать положение воздухопроводных окон. Однако, практический опыт показывает обратное. Так, на рисунках 1.17, 1.18 отображена действующая башенная градирня ТЭЦ с рабочими положениями воздухопроводных окон. Очевидно, что углы наклона щитов окон каждой секции не отрегулированы и находятся в беспорядочном положении относительно друг друга. К тому же, наблюдается запущенное техническое состояние воздухопроводных окон.



Рисунок 1.17 – Неотрегулированное положение воздуховодных окон



Рисунок 1.18 – Неисправность воздуховодных окон

Настройка положений воздуховодных окон без учета скорости и направления ветра становится причиной возникновения турбулентности потока воздуха секций в подросительном пространстве, изменяется соотношение расходов воды и воздуха, что приводит к значительному спаду КПД башенной градирни [108]. Распределение и мощность потока воздуха, поступающего в отдельные секции башенной градирни, однозначно зависит от скорости и направления ветра [144]. В то же время, нельзя исключать близкого расположения соседних градирен. Они могут оказывать довольно значительное влияние на аэродинамическую способность естественной тяги воздуха в аппарате [163,170].

В совокупности, указанные неисправности конструктивных элементов могут стать причинами возникновения неравномерности потоков воды и воздуха в процессе охлаждения воды, особенно, в таких крупномасштабных аппаратах, как башенные градирни [121]. Как было продемонстрировано ранее, увеличение размеров теплообменного аппарата является основанием снижения его эффективности [109]. Следовательно, крупногабаритным башенным градирням свойственны неравномерности распределения потоков воды и воздуха.

Таким образом, следует сделать вывод о немаловажном значении проблемы неравномерности распределения орошения воды и воздушного потока среди исследований башенных градирен, пренебрежение которого может привести к неэффективной эксплуатации аппарата и в последующем, к значительному спаду КПД тепловой электростанции [15,32,100]. Далее рассматриваются исследования, посвященные неравномерностям потоков воды и воздуха в башенных градирнях.

1.4 Неравномерности распределения потоков в башенных градирнях

Стоит отметить, что проблема неравномерности потоков – явление свойственное крупномасштабным аппаратам [79,109,121]. Среди научных трудов, посвященных большим промышленным колоннам, можно встретить численные и экспериментальные исследования, в которых проанализирован процесс неравномерности фаз и отражено его значительное влияние на эффективность работы аппаратов [121,93,94,171,174]. Установлено, что с увеличением неравномерности, их эффективность снижается [94,173,174].

Применительно к контактным теплообменным аппаратам, к которым относятся и башенные градирни, математически доказано значительное влияние неравномерности фаз на эффективность теплообмена [21]. Интересным представляется исследование аппаратов с насадкой Пушнова А. С. [107], в которой отражена зависимость качества распределения воды от высоты, эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ), характеризующая эффективность насадки, согласно которой со снижением качества распределения воды, показатель ВЭТТ уменьшается.

Из-за конструктивных особенностей башенных градирен, природа возникновения неравномерностей в ней отлична от других аппаратов, и, следовательно, влияние на эффективность проявляется своеобразно. Неполноценное распределение воды и воздуха по сечению приводит к появлению плохо орошаемых или неорошаемых участков охлаждения, характеризующих уменьшение поверхности контакта воды и воздуха и снижение

показателей процесса тепломассообмена. Это приводит к недоохлаждению циркуляционной воды и, в результате, к спаду эффективности главного оборудования оборотной системы технического водоснабжения ТЭС – конденсатора турбоустановки. Недоохлаждение воды, подаваемой на конденсаторы турбин ТЭС на 1 °С ведет к снижению вакуума в конденсаторах на 0,5 %, что равносильно спаду мощности турбины на 0,4 % [15,100]. Поэтому, важно учитывать неравномерности распределения потоков воды и воздуха.

1.4.1 Неравномерности распределения воздуха

Оптимальное регулирование и распределение воздуха является главным условием наилучшей работы башенных градирен. От физических характеристик атмосферного воздуха зависит глубина охлаждения воды [64].

Рассмотрим исследования, посвященные распределению воздуха и его неравномерности в башенной градирне. Течение воздуха в подросительном пространстве от периферии до центра аппарата рассмотрено в работе исследователей из ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [89] (рисунок 1.19).

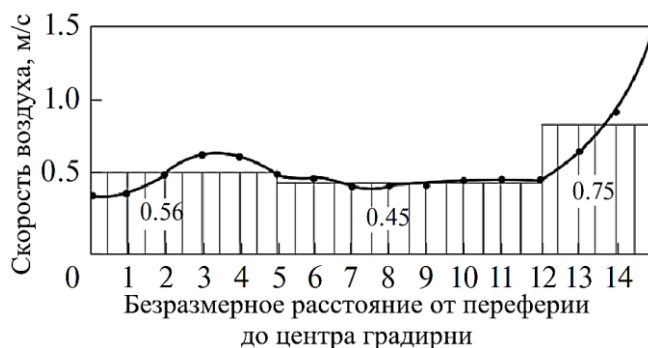


Рисунок 1.19 – Неравномерное распределения воздушного потока в радиальном направлении башенной градирни

Анализ распределения воздуха в радиальном направлении показал, что в зоне периферии (у воздухопроводных окон) и в зоне центрального стакана башенной градирни наблюдаются неравномерности воздушного потока. Это является причиной возникновения неравномерности нагрева воздуха, что свидетельствует о неравномерной силе тяги по сечению башенной градирни на 30 – 40 % и резком снижении охлаждающей эффективности.

Основываясь на результатах исследований неравномерности воздушного потока [89], Пушновым А. С. [105,106] предложено компоновать ороситель аппарата с учетом неравномерного распределения скоростей потока воздуха в поперечном сечении. Идея компоновки состоит в следующем: согласно распределению поля скоростей потока воздуха, предлагается расположить блоки оросителя с большей высотой в областях с повышенным расходом воздуха и с меньшей высотой, в областях с пониженным расходом воздуха. Один из способов такой компоновки показан на рисунке 1.20.

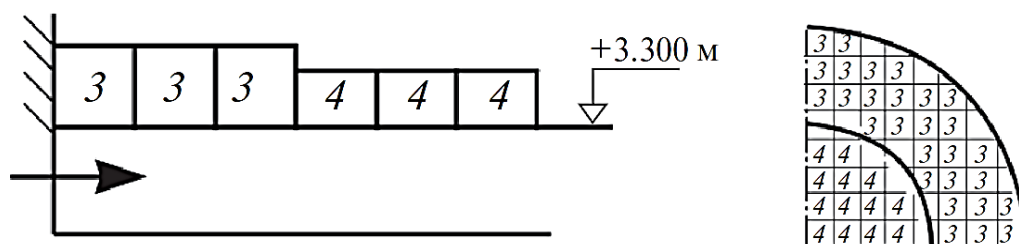


Рисунок 1.20 – Вариант компоновки блоков оросителя

В результате исследований, автором разработана поликанальная модель аэродинамики башенной градирни, позволяющая подобрать необходимые типы насадок по конструктивным характеристикам слоя комбинированного оросителя. Это позволит выровнять потоки воздуха в поперечном сечении и, следовательно, повысить охлаждающую способность аппарата [106]. Тем не менее, в научных работах [89,105,106] не рассматриваются причины возникновения неравномерности потока воздуха и какие факторы влияют на образование установленной неравномерности.

Учитывая, что башенная градирня является устройством с естественной тягой воздуха, распределение воздушного потока внутри аппарата происходит с помощью воздухопроводных окон, и, в большей степени, зависит от скорости и направления ветра. Именно влиянию ветра посвящены основные работы ученых института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова. Начиная с 1990-х годов ими проделан большой труд в области вопросов аэродинамики башенных градирен. Например, в работе [99] проведен анализ тепловой эффективности в безветренном режиме и в условиях влияния ветра. Для оценки влияния ветра,

авторами введена безразмерная величина скорости ветра S , изменяющаяся в диапазоне значений от 0,5 до 1,5: при $S < 0,5$ ветер принят слабым, а при $S > 1,5$ – ветер является сильным. С применением параметра S установлено положительное влияние на эффективность аппарата. Отражено, что с увеличением скорости ветра, начиная с $S > 1,5$ производительность градирни повышается. Однако, с увеличением скорости ветра при безразмерной величине свыше $S > 1,5$ производительность башенной градирни падает. Из-за недостатка экспериментальных данных, для авторов задача анализа причины снижения эффективности оказалась сложной.

В следующей работе [28] исследованы возможности интенсификации процесса испарения башенной градирни площадью орошения 3200 м^2 и высотой 82 метра Минской ТЭЦ – 4 с учетом закрутки воздушных потоков с поступлением в аппарат. Для наблюдения за течением потока воздуха, в секции башенной градирни был запущен дым от шашки. Это позволило визуализировать воздушные потоки и построить линии воздушного течения, проходящие через воздухопроводные окна (рисунок 1.21).

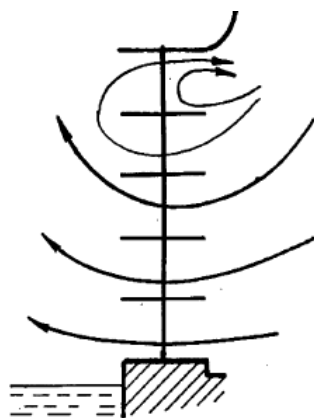


Рисунок 1.21 – Воздушное течение через воздухопроводные окна градирни

Согласно схеме на рисунке 1.21, в верхней части воздухопроводного окна возникают вихревые течения, препятствующие прохождению воздушного потока из окружающей среды. Авторами так же установлено, что аэродинамическое сопротивление возрастает с высотой его поступления в воздухопроводные окна от уровня земли. В результате воздействия этого сопротивления, возникают неравномерности скорости воздуха в секциях башенной градирни.

В продолжение исследований [28,99], авторы предлагают устранить неравномерности воздушного потока как вертикального, так и радиального направления, путем подбора оптимального угла наклона щитов воздухопроводных окон в условиях разных скоростей ветра [29]. С целью минимизации неравномерности распределения воздуха и выравнивания воздушного течения, авторами предложен аэродинамический завихритель [115]. Так, с правильной настройкой щитов и применением аэрозавихрителей, достигается оптимальный поток воздуха по горизонтали [29,115] (рисунок 1.22).

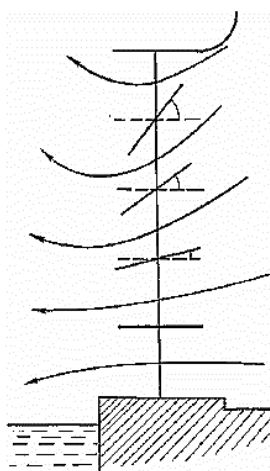


Рисунок 1.22 – Оптимальные углы поворота щитов воздухопроводных окон

На этом, кропотливый труд исследователей из института им. А.В. Лыкова не заканчивается. В следующей работе выполнено численное моделирование процесса охлаждения воды с использованием дополнительных конструкции, улучшающие аэродинамику башенной градирни при разных скоростях ветра (дефлекторы и ветроперегородки) [55]. Описано изменение температурного поля по сечению аппарата с применением аэродинамических элементов. Результаты показывают, что повышение скорости ветра приводит к росту изменения температурного поля. Анализировалось поведение воздуха как с наличием дефлекторов с углами наклона 45° , 52° , 60° , 70° и 90° , так и без них. В результате, получены рабочие характеристики массового расхода воздуха в зависимости от скорости ветра, изменяющегося от 0 до 12 м/с. Характеристики исследуемой башенной градирни при наилучших условиях работы с применением аэродинамических элементов изображены на рисунке 1.23.

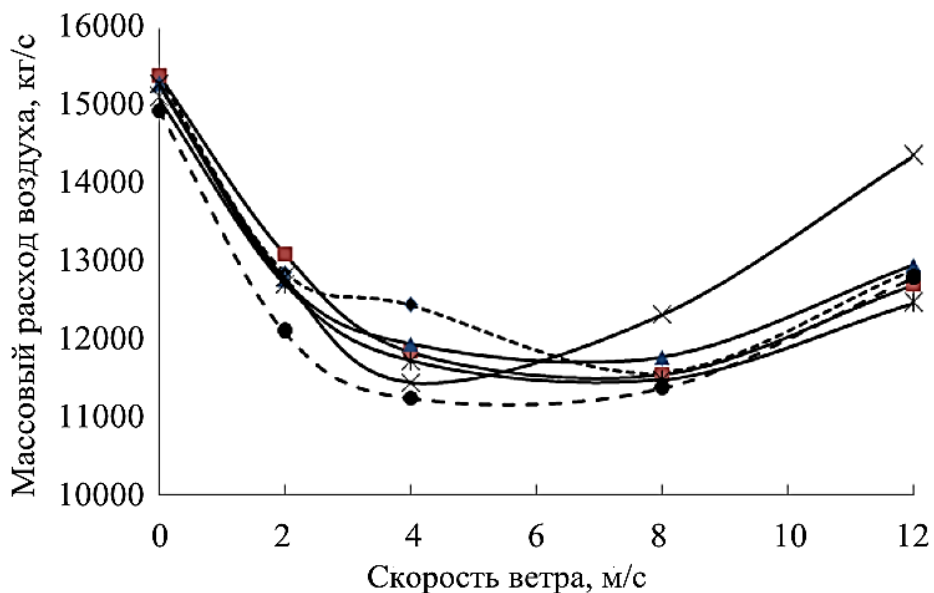


Рисунок 1.23 – Массовый расход БГ от скорости ветра, где:

---◆--- без дефлекторов; —■— угол наклона дефлекторов $\alpha = 90^\circ$;
 —▲— $\alpha = 70^\circ$; —×— $\alpha = 60^\circ$; —*— $\alpha = 52^\circ$; ---●--- $\alpha = 45^\circ$.

Анализ кривых массового расхода воздуха отражает одинаковый характер зависимостей – с критической точкой минимума. Основываясь на результатах, для оценки эффективности работы башенной градирни в условиях ветра, авторами построена зависимость мощности теплоотдачи (рисунок 1.24).

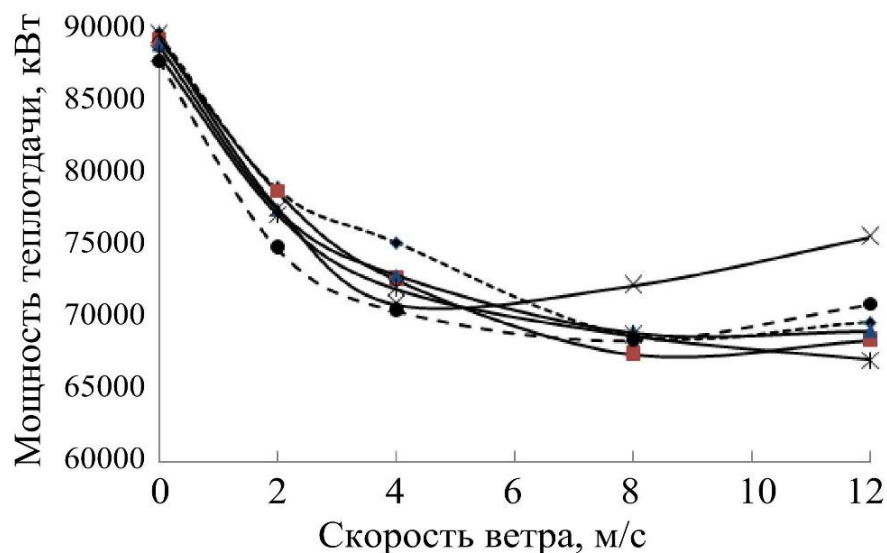


Рисунок 1.24 – Мощность теплоотдачи БГ от скорости ветра, где:

---◆--- без дефлекторов; —■— угол наклона дефлекторов $\alpha = 90^\circ$;
 —▲— $\alpha = 70^\circ$; —×— $\alpha = 60^\circ$; —*— $\alpha = 52^\circ$; ---●--- $\alpha = 45^\circ$.

Анализ нелинейных зависимостей (рисунок 1.23 и рисунок 1.24) показал, что при ветре от 0 до 4 м/с происходит снижение, от 4 до 6 м/с зависимости принимают, с некоторым допущением стабильное состояние, при скорости ветра 8 м/с и выше происходит увеличение расхода воздуха. Так, график тепловой эффективности исследуемой башенной градирни имеет минимум или, как авторы отмечают, критическую скорость ветра (8 м/с).

Подобные исследования были выполнены и китайскими учеными [180]. На лабораторной модели башенной градирни, выполнены экспериментальные исследования оценки тепловой эффективности с применением ветровых перегородок в условиях разных скоростей ветра. Ветер создавался искусственно, с подачей вентилятора на входе воздуховодных окон и на уровне устья лабораторной модели. В результате многократных серий опытов, при разных углах ветровых перегородок (60°, 70°, 80°) исследователями установлен оптимальный угол, равный 70°. Построены рабочие характеристики лабораторной модели массового расхода воздуха в зависимости от скорости ветра, изменяющегося от 0 до 1 м/с. Характеристики исследуемой лабораторной модели башенной градирни с применением ветровых перегородок и без применения изображены на рисунке 1.25.

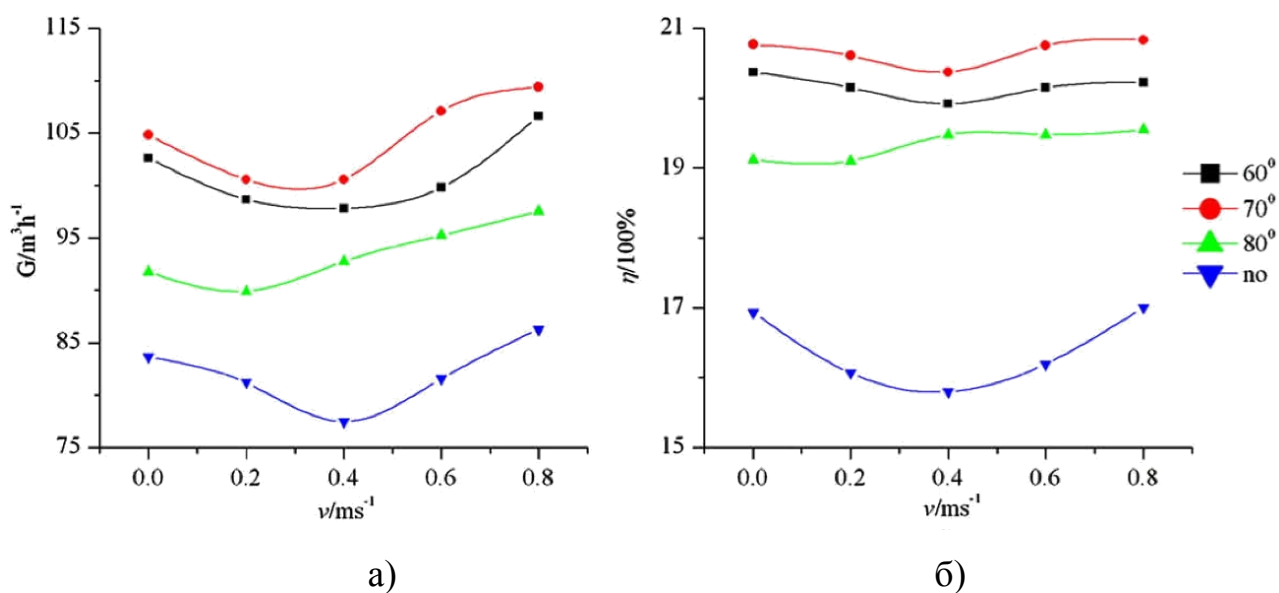


Рисунок 1.25 – Массовый расход воздуха (а) и КПД (б) от скорости ветра лабораторной модели башенной градирни

В случае установки ветровых перегородок с углом 70° , при ветре от 0 до 0,3 м/с происходит снижение, от 0,3 и выше происходит увеличение расхода воздуха (рисунок 1.25, а). График массового расхода имеет критическую скорость ветра 0,3 м/с. В свою очередь, характеристика КПД лабораторной модели (рисунок 1.25, б) при том же угле ветроперегородок, имеет критическую скорость ветра 0,4 м/с. Анализируя работы белорусских [55] и китайских ученых [180], очевидно, что они имеют общий характер результатов исследования. Предположительно, резкое повышение расхода воздуха при скорости ветра выше критической точки, является следствием возникновения вихревых течений и застойных зон, порождающих неравномерности потоков воздуха.

Повышение эффективности охлаждения башенных градирен с помощью аэродинамических элементов представлены и в других работах, и проработаны с помощью CFD – анализа [153,165,169]. Основной причиной необходимости установки ветроперегородок и дефлекторов является сильные потоки ветра в приземном слое атмосферы у градирни. Установлены оптимальные скорости ветра для наилучшего охлаждения градирен. Вместе с тем, отмечено, что именно мощные потоки ветра являются причиной возникновения неравномерности воздуха в окружности аппарата.

Однако, необходимо учесть, что влияние ветра – не единственный фактор, оказывающий воздействие на изменение скорости воздуха внутри градирни. Выявить эти факторы можно исходя из уравнения теоретической скорости воздуха в башенной градирне, которое определяется равенством между аэродинамическим сопротивлением аппарата и силой тяги в башне [16]:

$$\zeta \frac{w^2}{2g} \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \left(\frac{H_{\text{ор}}}{2} + H_6 \right) (\gamma_1 - \gamma_2), \quad (7)$$

где ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления; γ_1, γ_2 – удельные веса воздуха на входе и выходе; w – скорость воздуха в градирне; g – ускорение свободного падения; $H_{\text{ор}}, H_6$ – высоты оросителя и вытяжной башни.

Согласно уравнению (7), скорость воздуха в башенной градирне зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления, высоты башни, удельного веса воздуха на входе и выходе аппарата. В частном порядке, коэффициент аэродинамического сопротивления принято относить к оросителю, поскольку на его долю приходится 50 – 70% общего сопротивления градирни. Влияние скорости воздуха на гидравлическое (воздушное) сопротивление оросителя представлено в работах [16,103] (рисунок 1.26).

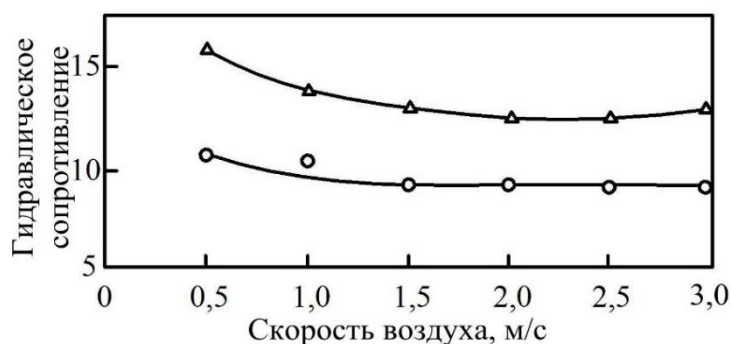


Рисунок 1.26 – Зависимость гидравлического сопротивления от скорости воздуха, где: -Δ- – насадка высотой 1,2 м, -○- насадка высотой 1,8 м.

По характеру нелинейных зависимостей, изображенных на рисунке 1.26, с возрастанием скорости воздуха, гидравлическое сопротивление уменьшается. Вместе с гидравлическим сопротивлением оросителя влияние на скорость воздуха оказывает и сопротивление воздухопроводных окон [29], сопротивления в каналах течения.

Что касается удельных весов воздуха на входе и выходе башенной градирни, нужно сказать, что эти параметры являются функциями, зависящими от разницы температур поступающей воды и атмосферного воздуха. Следовательно, при анализе распределения скорости воздуха стоит учитывать и указанный перепад температур [16]. В дополнение, необходимо отметить, что скорости воздуха в башенной градирне также зависят от плотности орошения, что вытекает из закона взаимодействия потоков воды и воздуха в двухфазных аппаратах, к которым относятся башенные градирни [15,75,100]. Таким образом, обобщая анализ влияния факторов, скорость воздуха в башенной градирне зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления, перепада

температур поступающей на охлаждение воды и наружного атмосферного воздуха, плотности орошения и скорости ветра.

Несмотря на довольно обширные исследования и представительный экспериментальный материал исследователей, в рассмотренных работах не приведена оценка степени неравномерности распределения воздуха и его качественно – количественное влияние на эффективность охлаждения башенной градирни. К тому же, не рассматривалось общее влияние факторов на распределение скорости воздуха в с учетом ее неравномерности по секциям башенной градирни.

1.4.2 Неравномерности орошения воды

Не исключены и возникновения неравномерности орошение воды. Рассмотрим известные способы учета неравномерного распределения орошения воды в башенных градирнях. Одним из подходов, позволяющих получить оценку распределения орошения воды в аппарате, является оценка неравномерности орошения единичного сопла водораспределительной системы [20,54,100], получаемого путем построения опытной эпюры плотности орошения орошаемого радиуса $q(r)$ и оцениваемая с помощью коэффициента неравномерности орошения по радиусу $K_{\text{НРАД}}$ [54,100] и неравномерности орошения по окружности $K_{\text{НОКР}}$ единичного сопла [20]:

$$K_{\text{НРАД}} = \frac{\sum_{r=0}^{R_{\Phi}} |q(r) - \bar{q}| \Delta r}{\bar{q} R_{\Phi}} \quad \text{и} \quad K_{\text{НОКР}} = \frac{(Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}) N}{\sum_i Q_i}, \quad (8)$$

где $q(r)$ – опорная эпюра неравномерности орошения сопла; \bar{q} – среднее значение $q(r)$; R_{Φ} – радиус орошения сопла; Q_{max} – максимальный объем распыляемой воды; Q_{min} – минимальный объем распыляемой воды; N – число секторов распыления воды.

Результаты расчета неравномерности орошения как по радиусу, так и по окружности является достаточно представительными, но только в пределах

одного сопла. При групповой работы сопел, теоретический расчет становится громоздким и сложным. Учитывая количество сопел водораспределительной системы, например, градири БГ-2600, составляет более 2500 шт., можно без сомнений утверждать, что при проектировании и эксплуатации аппарата, это вызовет значительную трудоемкость в расчетах. Поэтому, прибегают к некоторым допущениям, путем усреднения опытных эпюр $q(r)$ по разным направлениям орошения сопла. Так, расчет неравномерности орошения групповой работы сопел сводится к определению коэффициента неравномерности групп сопел $K_{НГР}$:

$$K_{НГР} = MK_{НР} \left(\frac{f}{H_C \cdot R_{\Phi}} \right)^{0,4}, \quad (9)$$

где M – константа направления факела сопла; f – площадь оросителя, м²; H_C – напор воды перед соплом, м.

При расчетах, в приведенной формуле (3) помимо допущений, следует учитывать и положение сопла, направленных вверх или вниз, что дополняет и усложняет расчеты.

В работах [32,100], так же авторы отмечают иной подход к определению неравномерности – оценивать распределение воды по длине трубопровода водораспределительной системы. Предлагается вычислять неравномерность орошения из отношения расходов воды первого и последнего сопла:

$$m_{ТР} = \frac{q_{С1}}{q_{С.П}} = (1 - 0,35K_{\omega}) \sqrt{1 - 0,36K_{\omega}^{1,8}}, \quad (10)$$

где $q_{С1}$ – расход воды через первое сопло трубы, м³/ч; $q_{С.П}$ – расход через последнее сопло трубы, м³/ч; K_{ω} – отношение площади всех отверстий трубы к площади поперечного сечения трубы.

Зачастую, расход воды через сопла имеет значительные отклонения от действительного. Ввиду засорения сопел, напор воды и, следовательно, расход уменьшается – происходит неполное заполнение их водой, что способствует

выходу из строя ряда разбрызгивающих устройств. Поэтому, в расчетах авторы предлагают вводить допущения в виде приведенных значений диаметра сопла.

Следующими авторами [21] вводятся параметр ψ_y , отражающий заполнение поперечного сечения по зонам распыла форсунок к длине поперечного сечения и параметр ψ_x , отражающий изменение начальной локальной плотности орошения каждым размером капель в зоне распыла форсунки, на основе которых предложена функция распределения локальных плотностей орошения в пределах одной форсунки:

$$g_{kl} = \frac{1}{\psi_{yl}} \left[\psi_{xl} \cdot g_{nl} + A_l \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{y_{\phi l}}{L_{\phi l}} \right) \right) \right], \quad (11)$$

где g_{nl} – начальная плотность орошения с каплями размера l ; $y_{\phi l}$ – координата на длине зоны распыла форсунки $L_{\phi l}$; A_l – амплитуда изменения значений плотности орошения.

К недостаткам такого способа оценки изменения локального поля плотности орошения форсунки следует отнести ее применение только к единичной форсунке, что представляет собой громоздкие расчеты локальных плотностей орошения всех форсунок градирни. Приведенная формула (4) неудобна для определения неравномерности орошения воды на практике по причине своей усложненности – здесь принципиально важно знать размер капель распыла воды форсунками.

В работе [120] проведены исследования и выполнена оценка неравномерности распределения орошения соплами башенной градирни с помощью критерия неравномерности:

$$\xi = \int_0^a \int_0^b \frac{|q(x, y) - q_{\text{ср}}| dx dy}{q_{\text{н}}}, \quad (12)$$

где a и b – размеры площади оросителя; $q(x, y)$ – плотность орошения в определенной точке с соответствующими координатами x и y площади оросителя, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $q_{\text{ср}}$ – средняя плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Согласно предложенной методике, исследования показали достаточную сходимость натуральных и расчетных данных. Однако, такой подход требует кропотливой предварительной подготовки перед расчетом. Необходимо подбирать и учитывать план расположения сопел по координатам x и y согласно ортогональной сетке. Принимая во внимание, что, как правило, количество сопел башенной градирни превышает 2500 шт., это на порядок затрудняет процесс определения неравномерности распределения орошения воды.

В других работах [150,166] предлагается учитывать неравномерность орошения с помощью наложения созданных шаблонов (паттернов) орошения сопел и расчетом коэффициента неравномерности:

$$C_U = 1 - \frac{\sum_i^n |M_i - M_{ave}|}{nM_{ave}}, \quad (13)$$

где n – количество точек выборки шаблонов орошения соплами, M_{ave} – среднее значение выборки шаблонов орошения соплами.

При этом, рассматривается идеальное расположение сопел относительно друг друга, то есть без наложения поля орошения соседних сопел. Такой подход может быть полезен при исследовании динамики работы сопел в башенной градирне. Однако, на эксплуатируемых градирнях идеальная работа сопел без наложения друг на друга концентрических полей орошения практически не встречаются. Это объясняется частым засором, заилием магистральных, распределительных труб и сопел.

Стоит отметить вклад ученых, посвятивших труды CFD моделированию гидродинамики и исследования неравномерности орошения воды в башенной градирне [183,178,186]. Результаты авторов свидетельствуют о существенных неравномерностях распределения орошения воды, и как правило, представлены в виде наглядных 3D – моделей. Однако, такой подход характеризуется довольно сложными подготовительными этапами перед моделированием с точки зрения статистической обработки данных, выполняется разделение аппарата на секторы с одинаковой плотностью орошения, далее производится расчет и суммирование

результатов. Как отмечалось выше, большое количество разбрызгивающих устройств, а иногда, и усложненность конструкции водораспределительной системы в несколько раз затрудняет получить представление о распределении орошения воды.

Согласно приведенным расчетам в литературе и сведениям проектных организаций, в градирнях наблюдаются значительные неравномерности орошения воды [98]. Исследования, проводимые автором по методике расчета неравномерности орошения воды трубопровода показали, что неравномерность плотности орошения воды может составить 12,4 % [100]. Аналогичным образом были проведен анализ работы водораспределительной системы башенной градирни [90], который показал неравномерность орошения трубопровода – 19 %. Расчеты, представленные в работе [120] свидетельствуют, что неравномерность орошения разбрызгивающих устройств в среднем составляет около 22 %. Испытания градирен, проводимые проектной организацией показали неравномерность орошения водораспределительной системы от 15 до 25 % [40]. Значительную степень неравномерности орошения воды сопла (форсунки), как и по радиусу, так и по окружности показали и другие исследования [32,183,186]. Следует предположить, что указанные степени разброса орошения воды конструктивными элементами может оказать значительное влияние на процесс охлаждения в аппарате.

1.5 Выводы по главе

Анализ литературных источников подтверждает, что одной из причин низкой эффективности башенных градирен могут стать неравномерные распределения потоков. Несмотря на это, анализ охлаждающей мощности аппарата при построении фактических характеристик производится без учета неравномерности плотности орошения и скорости воздуха.

Анализ работ, посвященных распределению воздуха позволил установить, что главной причиной возникновения его неравномерности в секциях башенных градирен является неправильное регулирование ветрового потока. Вместе со

скоростью ветра, к факторам, влияющих на распределение воздуха отнесены: аэродинамическое сопротивление, перепад температур поступающей воды и атмосферного воздуха, плотность орошения. Однако, не рассматривался анализ влияния всех факторов в совокупности, с учетом неравномерности распределения воздуха в секциях башенной градирни.

Известные способы учета неравномерности орошения воды представляют собой сложные формулы расчета, что вызывает затруднения при оценке неисправности башенной градирни. Вместе с тем, несмотря на выявленные значительные неравномерности плотности орошения, ее расчет производится, например, исключительно в пределах одной форсунки, трубопровода или водораспределительной системы градирни. Важно учитывать неравномерность орошения воды в совокупности всех имеющихся конструктивных элементов башенной градирни, поскольку не принимаются во внимание и другие немаловажные параметры, влияющие на эффективность, например, укладка оросителя и т.д. Решением этой задачи может стать учет неравномерности распределения плотности орошения по сечению башенной градирни.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ

2.1 Теоретический анализ распределения воздуха в башенных градирнях

С целью изучения природы распределения воздуха в башенных градирнях, решено провести анализ закона распределения. Выдвинуто предположение о том, что законом при любой скорости воздуха по сечению башенных градирен является нормальный закон распределения. С целью проверки гипотезы, единым показателем для любой скорости воздуха принята ее безразмерная величина:

$$W = \frac{w}{w_{\text{cp}}}, \quad (14)$$

где w – скорость воздуха в секции, м/с; w_{cp} – средняя скорость воздуха, м/с.

Рассчитав безразмерное значение по формуле (14), можно получить среднюю величину безразмерной скорости воздуха W , которая будет равна 1, а дисперсия безразмерной скорости потока воздуха общей для всех скоростей. В таблице 2.1 представлены соотношения экспериментальной w и безразмерной скорости воздуха W .

Таблица 2.1 – Безразмерные скорости воздуха по секциям

Скорость воздуха w , м/с	Безразмерная скорость воздуха W	Скорость воздуха w , м/с	Безразмерная скорость воздуха W
2,19	1,02	2,77	1,28
1,96	0,91	1,45	0,67
1,67	0,77	1,96	0,91
3,37	1,56	2,09	0,97
2,01	0,93	1,31	0,61
3,59	1,66	1,55	0,72
$w_{\text{cp}} = 2,16$, м/с; $W_{\text{cp}} = 1$			

Зная результат математического ожидания (средней величины скорости воздуха) и величину дисперсии (степени неравномерности скорости воздуха) можно построить гистограмму плотности распределения безразмерной скорости воздуха для любых башенных градирен (рисунок 2.1).

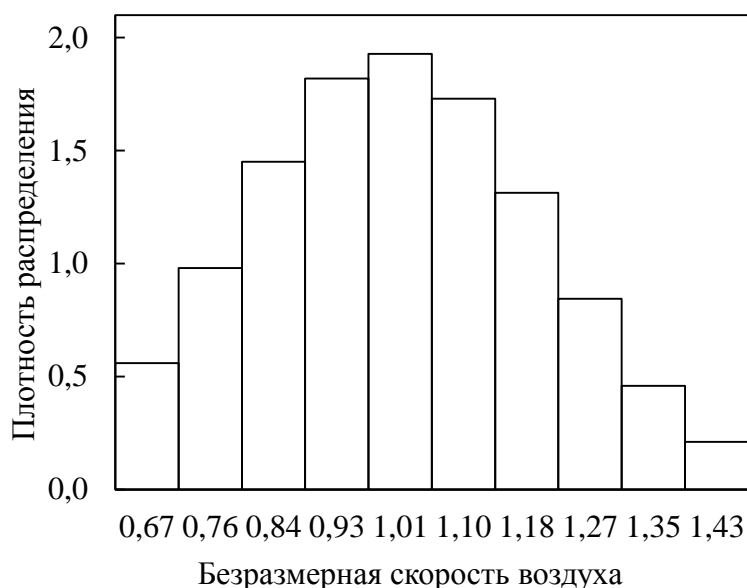


Рисунок 2.1 – Плотность распределения безразмерной скорости воздуха башенных градирен

Статистические данные гистограммы на рисунке 2.1 подвергнуты проверке методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона. Результаты проверки гипотезы сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Расчет проверки гипотезы о законе скорости воздуха

Интервал значений скорости воздуха w , м/с	Число наблюдений n	Границы интервалов w_i		Интегральная функция распределения		Вероятность попадания в интервал, p_i	$n_p \cdot p_i$	$(n - n_p \cdot p_i)^2 / n_p \cdot p_i$
		$w_{i.min}$	$w_{i.max}$	$F(w < w_{i.min})$	$F(w > w_{i.max})$			
0,67	4	0,63	0,72	0,04	0,09	0,05	4,81	0,14
0,76	12	0,72	0,80	0,09	0,17	0,08	8,36	1,58
0,84	13	0,80	0,89	0,17	0,29	0,12	12,32	0,04
0,93	14	0,89	0,97	0,29	0,44	0,15	15,39	0,13
1,01	11	0,97	1,05	0,44	0,60	0,16	16,30	1,73
1,10	19	1,05	1,14	0,60	0,75	0,15	14,65	1,29
1,18	7	1,14	1,22	0,75	0,86	0,11	11,16	1,55
1,27	13	1,22	1,31	0,86	0,93	0,07	7,21	4,64
1,35	2	1,31	1,39	0,93	0,97	0,04	3,95	0,97
1,43	1	1,39	1,48	0,97	0,99	0,02	1,84	0,38
	$n_p = 100,85$					$\Sigma p_i = 0,952$		$\chi^2_{н} = 12,44$

В результате проверки, получено наблюдаемое значение $\chi^2_{\text{н}} = 12,44$. При этом, число степеней свободы $k = 7$, критическое значение $\chi^2_{\text{кр}} = 14,1$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (таблица 2.3) [34].

Таблица 2.3 – Критические точки распределения $\chi^2_{\text{кр}}$

Число степеней свободы, k	Уровень значимости α					
	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,89
7	18,5	16,0	14,1	2,17	1,69	1,24

Следовательно, условие $\chi^2_{\text{н}} < \chi^2_{\text{кр}}$ выполняется. Это говорит о том, что распределение скорости потока воздуха в башенных градирнях подчиняются нормальному закону распределения.

Значит, распределение скоростей потока воздуха башенных градирен можно представить функцией нормального распределения безразмерной скорости воздуха:

$$F(W) = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(W-1)^2}{2 \cdot \sigma_w^2} \right], \quad (15)$$

где W – безразмерная скорость воздуха; σ_w^2 – дисперсия W .

Знание закона распределения полезно при расчетах неравномерности воздушного потока башенных градирен. Полученная значительная неравномерность скорости воздуха должна отражаться на эффективности работы башенной градирни.

2.2 Экспериментальный анализ неравномерности распределения воздуха башенных градирен

Численные и экспериментальные исследования подтверждают, что основным условием эффективности работы, а также достижения нормативных показателей башенных градирен является организация подачи и распределения воздуха по секциям [55,64]. Ввиду образования неравномерности воздушного потока возникают следующие вопросы: что стало причиной возникновения, какова ее величина и как неравномерность влияет на процесс охлаждения.

Со временем, техническое состояние конструктивных элементов башенных градирен ухудшилось, их охлаждающая эффективность значительно снизилась. Поэтому, в первую, очередь, была поставлена задача провести анализ возможных причин возникновения неравномерности воздушного потока и ухудшения охлаждающей мощности градирен. Для осмотра и дальнейшего исследования, выбрана работающая, наиболее проблемная башенная градирня, с пониженной гидравлической нагрузкой. Основные параметры и конструктивное исполнение башенной градирни №3 (рисунок 2.2) приведены в приложении А.



Рисунок 2.2 – Башенная градирня №3 Набережночелнинской ТЭЦ

Первым, рассмотрено состояние вытяжной башни. Ее исполнение представляет собой монолитную башню из стального каркаса, которая внутри обшита гофрированными алюминиевыми листами. Значимых дефектов башни не обнаружено, однако замечены биологические обрастания, коррозия на обшивочных листах и на самом железобетонном каркасе (Приложение А).

Далее рассмотрены всевозможные дефекты оросительного устройства. Ороситель типа «косой дождь» состоит из полимерных блоков, разложенных вплотную друг к другу на раме железобетонного каркаса. По причине разрушенного состояния рамы каркаса, произошло значительное провисание

оросительного устройства (Приложение А). В основном, провисание блоков оросителя выявлено в периферийной зоне градирни. Из 12 секций, провисание оросителей произошло в 4 секциях периферийной области. Неравномерное расположение по горизонтали блоков оросителя стало одной из причин неравномерности распределения воздуха.

При осмотре состояния блоков оросителя установлены значительные нарушения и дефекты. В первую очередь, обнаружено, что блоки оросителя отдалены друг от друга на значительном расстоянии, чем образованы сквозные зазоры. Это свидетельствует об их неравномерном упорядочении, а значит и о неравномерности потоков воздуха.

При осмотре воздухопроводных окон, выявлены разнородные положения воздухопроводных окон. Жалюзи воздухопроводных окон каждой секции находятся под разным углом наклона. При обходе вокруг башенной градирни, из 12-ти секций, в 4-х секциях жалюзи воздухопроводных окон находились в положении «открыто», в 3-х секциях в положении «закрыто», в остальных 5-ти секциях в положении «открыто/закрыто на 45°» (Приложение А). Таким образом, воздухопроводные окна не настроены, а воздух распределяется в подоросительном пространстве секций с разнородной скоростью. Кроме того, обнаружены неисправности конструкции воздухопроводных окон, а также прогибы центральной балки жалюзи, что является одной из причин неравномерности воздушного потока по сечению градирни.

На основании осмотра технического состояния башенной градирни, решено экспериментально исследовать неравномерность распределения скорости воздуха по секциям действующей башенной градирни БГ–2600 Набережночелнинской ТЭЦ и, в первую очередь, проанализировать ее степень неравномерности. Аппарат разбит по сечению на 12 секций, оборудованных полимерными оросителями типа «косой дождь». Эксперимент проводился в летний период эксплуатации градирни при температуре окружающей среды 25 – 31 °С. Нагрузка по воде была ниже нормативной и составляла 8400 – 12 000 м³/ч. Скорость воздуха замерялась в подоросительном пространстве градирни в нескольких точках каждой секции с помощью анемометров серии АТТ

(приложение Б) с погрешностью измерения по паспорту не более 4 %. Для устранения случайных ошибок измерений, каждый опыт повторялся три раза, а показания усреднялись. Положения измерений скоростей воздуха башенной градирни БГ-2600 показаны на рисунке 2.3.

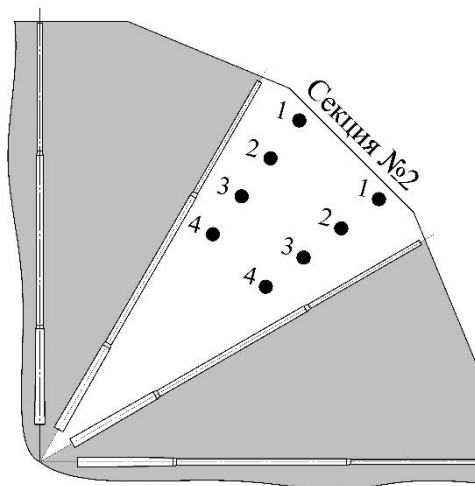


Рисунок 2.3 – Положения измерений скорости воздуха по сечению градирни

С целью анализа на воспроизводимость, решено подвергнуть проверке экспериментальные данные скорости воздуха по критерию согласия Кохрена. Результаты проверки сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты воспроизводимости экспериментов по воздуху

№ секции	1-ая серия эксперимента, w	2-ая серия эксперимента, w	3-ая серия эксперимента, w	Дисперсия σ_w^2
1	2,32	1,39	2,87	0,5606
2	2,06	2,56	1,24	0,4455
3	1,76	2,18	1,06	0,3235
4	3,55	2,13	4,41	1,3207
5	2,12	2,63	1,27	0,4691
6	3,79	4,70	2,27	1,4998
7	2,93	1,76	3,63	0,8951
8	1,53	1,89	0,92	0,2434
9	2,06	1,24	2,56	0,4455
10	2,21	2,74	1,32	0,5097
11	1,38	1,71	0,83	0,1997
12	1,63	2,03	0,98	0,2790
Дисперсия воспроизводимости				0,5993
Максимальная дисперсия				1,4998
Сумма дисперсий				7,1917
Расчетное значение критерия Кохрена G_p				0,2086

При табличном значении критерия Кохрена $G_{кр} = 0,326$, доверительной вероятности $p = 0,95$, условие $G_p < G_{кр}$ выполняется. Следовательно, экспериментальные данные скорости воздуха башенной градирни следует считать воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

По результатам проверки воспроизводимости экспериментов, была построена гистограмма распределения средних скоростей воздуха по секциям градирни (рисунок 2.4) и по радиусам секций (рисунок 2.5), согласно которым общая средняя скорость воздуха составила 2,16 м/с, а среднеквадратичное отклонение по секциям – 0,45 м/с или 20,83 % от среднего значения, что существенно превышает погрешность прибора.

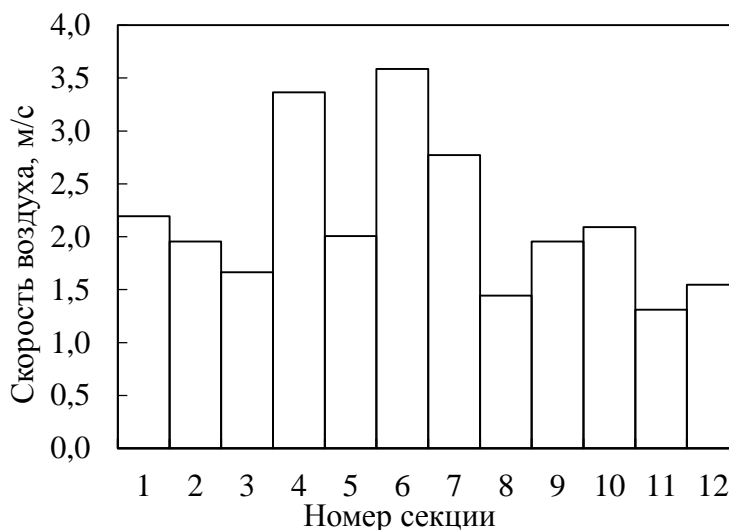


Рисунок 2.4 – Посекционное распределение скорости воздуха БГ-2600

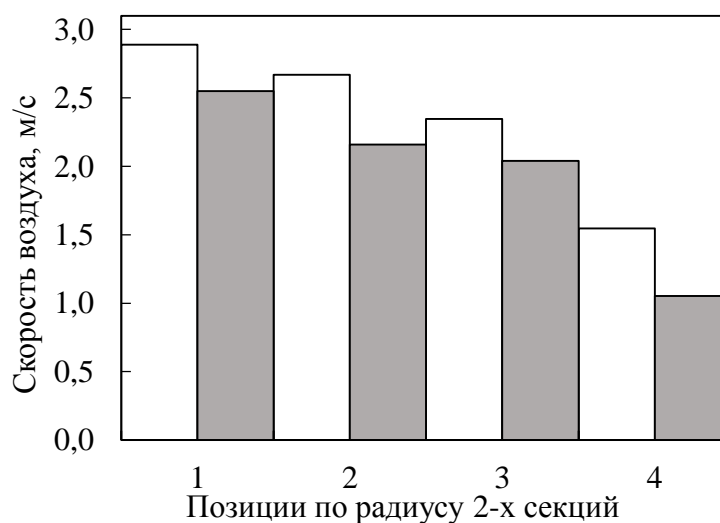


Рисунок 2.5 – Радиальное распределение скорости воздуха в 2-х секциях башенной градирни БГ-2600

В дополнение к исследованиям, научно-производственной компанией ООО «ЭКОТЭП» с целью анализа неравномерности воздуха башенной градирни БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ, предоставлена экспериментальная база данных. ООО «ЭКОТЭП» является одной из ведущих российских предприятий в области эксплуатации и модернизации оборудования систем оборотного водоснабжения, которыми укомплектовано свыше 50-ти башенных градирен оборудованием собственного производства. Были построены гистограммы распределения воздуха по секциям (рисунок 2.6) и по радиусам секций (рисунок 2.7).

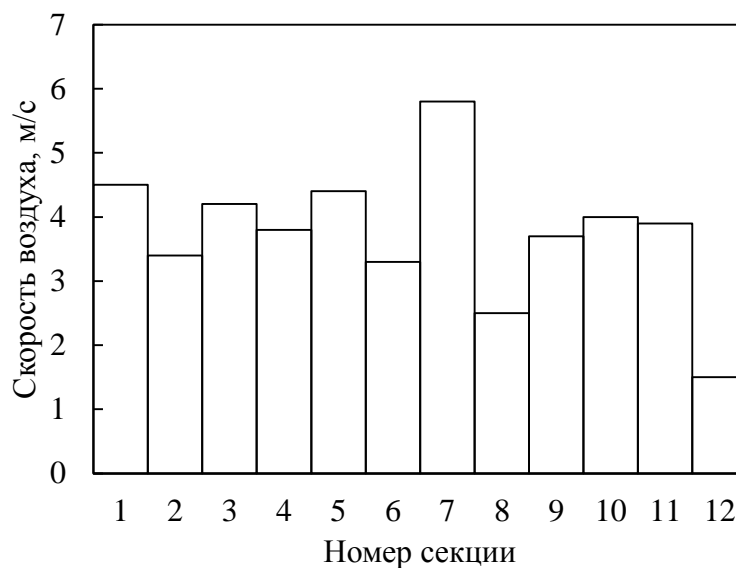


Рисунок 2.6 – Посекционное распределение скорости воздуха башенной градирни БГ-1600

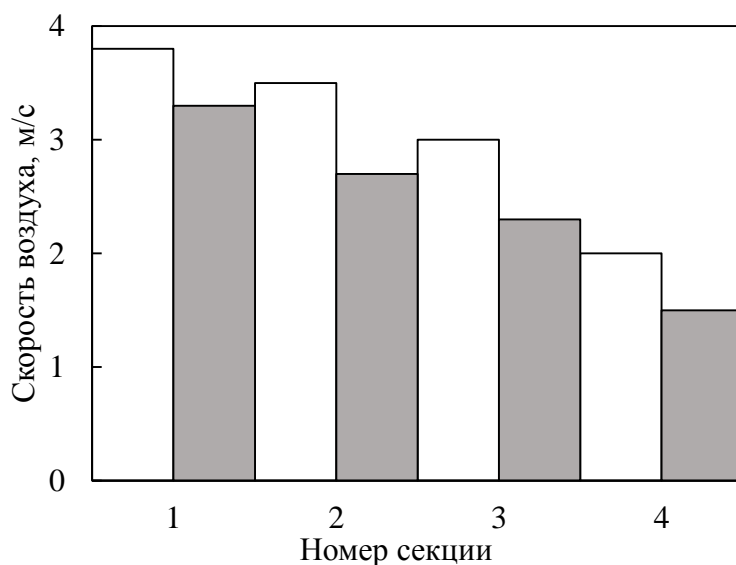


Рисунок 2.7 – Радиальное распределение скорости воздуха в 2-х секциях башенной градирни БГ-1600

В результате статистической обработки экспериментальных данных неравномерности распределения воздуха БГ-1600, установлено, что при средней скорости воздуха 3,75 м/с, среднеквадратичное отклонение составило 1,06 м/с, а степень неравномерности распределения воздуха – 28,35 %. Натурные эксперименты свидетельствуют о значительной неравномерности распределения воздуха в башенных градирнях БГ-2600 и БГ-1600. Таким образом, эксперимент показал наличие существенной неравномерности распределения скоростей воздуха по секциям градирни.

С целью изучения природы явления неравномерности, принято решение установить закон распределения скорости воздуха. Экспериментальные данные гистограмм посекционного и радиального распределения градирен БГ-2600 и БГ-1600 были подвергнуты проверке методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона. Результаты показали, что данные распределений скорости воздуха подчиняются нормальному закону распределения.

2.3 Частные аэродинамические характеристики башенной градирни

Основным технологическим параметром, позволяющим управлять степенью охлаждения потока воды в градирне, является расход воздуха [64]. При неравномерности распределения потоков воды и воздуха по секциям градирни возникают следующие вопросы: какие факторы оказывают влияние на скорость потока воздуха в градирне и какова сила их влияния (аэродинамические характеристики); каковы причины неравномерности распределения воздуха по секциям градирни.

Рассматривая расход воздуха в аппарате как управляемый параметр, можно установить все внешние и внутренние факторы, оказывающие на него влияние. Теоретически скорость воздуха в башенной градирне (без учета неравномерностей потоков) определяется по уравнению, полученному приравниванием аэродинамического сопротивления градирни к силе тяги, создаваемой в вытяжной башне [16]:

$$\zeta \frac{w^2}{2g} \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \left(\frac{H_{\text{ор}}}{2} + H_6 \right) (\gamma_1 - \gamma_2), \quad (16)$$

где ζ – полный коэффициент аэродинамического сопротивления градирни; γ_1 и γ_2 – удельные веса воздуха на входе и выходе градирни; w – скорость воздуха в градирне; g – ускорение свободного падения; $H_{\text{ор}}$, H_6 – высоты оросителя и вытяжной башни.

Согласно уравнению (16), скорость воздуха w в башенной градирне зависит от аэродинамического сопротивления, высоты башни, удельного веса воздуха на входе и выходе аппарата. Учитывая то, что удельный вес воздуха на входе и выходе градирни зависит от температур поступающих в аппарат воды и атмосферного воздуха, в качестве первого фактора влияния можно принять перепад температур поступающей воды и атмосферного воздуха Δt , °С. Вторым неоспоримым фактором влияния, вытекающим из уравнения (16), является коэффициент аэродинамического сопротивления градирни ζ , третьим фактором, подтвержденным экспериментально [55,180] – метеорологическая скорость ветра v , м/с. Помимо этого, к факторам воздействия можно отнести также и плотность орошения градирни q , м³/м²·ч, что согласуется с законами взаимодействия двухфазных потоков. На основании такого предварительного анализа можно считать, что скорости воздуха в отдельных секциях и в градирне в целом являются функциями четырех указанных факторов $w = f(\Delta t, \zeta, q, v)$.

Чтобы оценить, какова сила влияния обозначенных факторов на скорость потока воздуха, необходимо вначале провести анализ одномерных зависимостей по всем факторам, которые можно назвать частными аэродинамическими характеристиками, а затем рассмотреть их совместное воздействие. При этом характеристики должны быть построены с учетом неравномерности распределения указанных факторов по секциям градирни.

Основным нормативным документом для градирни является номограмма охлаждения [62,101,122], которая устанавливает взаимосвязь между внешними условиями, нагрузкой и температурой охлаждения. В литературе, на

аэродинамические характеристики градирни нормативные документы отсутствуют. Поэтому решено провести исследование аэродинамических характеристик в условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха на примере башенной градирни БГ-2600.

2.3.1 Влияние перепада температур на скорость воздуха

Первая аэродинамическая характеристика – это зависимость скорости воздуха от перепада температур поступающей воды и атмосферного воздуха:

$$w = f_1(\Delta t), \quad (17)$$

где w – скорость воздуха, м/с; Δt – перепад температуры, °С.

Форма связи между факторами отражена в теоретическом уравнении (15) и подтверждена экспериментально: например, в работе [16] приводится их связь, (таблица 2.5), в соответствии с которой удельный расход воздуха λ в башенной градирне нелинейно возрастает с увеличением перепада температур Δt .

Таблица 2.5 – Удельный расход воздуха при перепаде температур

$\Delta t, \text{°C}$	5	10	15	20
λ	0,3 – 0,7	0,6 – 1,0	1,1 – 1,5	1,8 – 2,2

На неравномерность распределения воздуха по секциям градирни этот фактор почти не влияет, поскольку температуры воздуха на входе и выходе аппарата являются общими для всех секций.

2.3.2 Влияние коэффициента сопротивления на скорость воздуха

Вторая аэродинамическая характеристика – зависимость скорости воздуха от коэффициента аэродинамического сопротивления ζ градирни

$$w = f_2(\zeta), \quad (18)$$

также вытекает из известного закона сопротивления движению потока. Коэффициент аэродинамического сопротивления градирни ζ является сложной функцией внешних и конструктивных параметров: сопротивления воздухозаборных окон, проходного сечения оросителя, режима течения воздуха

в башенной градирне, местных сопротивлений каналов течения, смачиваемости оросителей и т.д. Воздушное сопротивление Δp , Па, в башенной градирне в целом или ее секции рассчитывается по известной классической формуле Бермана Л.Д. [15], выраженное в упрощенном виде через плотность воздуха:

$$\Delta p = \zeta \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (19)$$

где ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления, отнесенный к полной высоте градирни; ρ – плотность воздуха, кг/м³, w – скорость воздуха, м/с.

В соответствии с формулой (19), при постоянном перепаде давления зависимость скорости воздуха $w = f_2(\zeta)$ будет обратной и нелинейной. Для отдельных секций башенной градирни высота столба газа, средняя плотность воздуха и перепад давления будут одинаковыми. Перепад давления будет рассчитываться по формуле силы тяги, создаваемой вытяжной башней. Исходя из этого, для расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления в каждой секции можно воспользоваться формулой

$$\zeta = \frac{C}{w^2}, \quad (20)$$

где $C = 2\Delta P / \rho$.

С применением формулы (19) был проведен расчет распределения коэффициентов аэродинамического сопротивления по 12–ти секциям градирни. Сила тяги башенной градирни в этот период была равна 21,57 Па. Согласно результатам расчета, построена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости воздуха (рисунок 2.8).

Согласно результатам расчета значения коэффициента аэродинамического сопротивления в различных секциях градирни могут различаться почти в 6 раз. Таким образом, разброс значений коэффициента сопротивления, очевидно, является одной из причин неравномерности распределения воздуха по секциям башенной градирни.

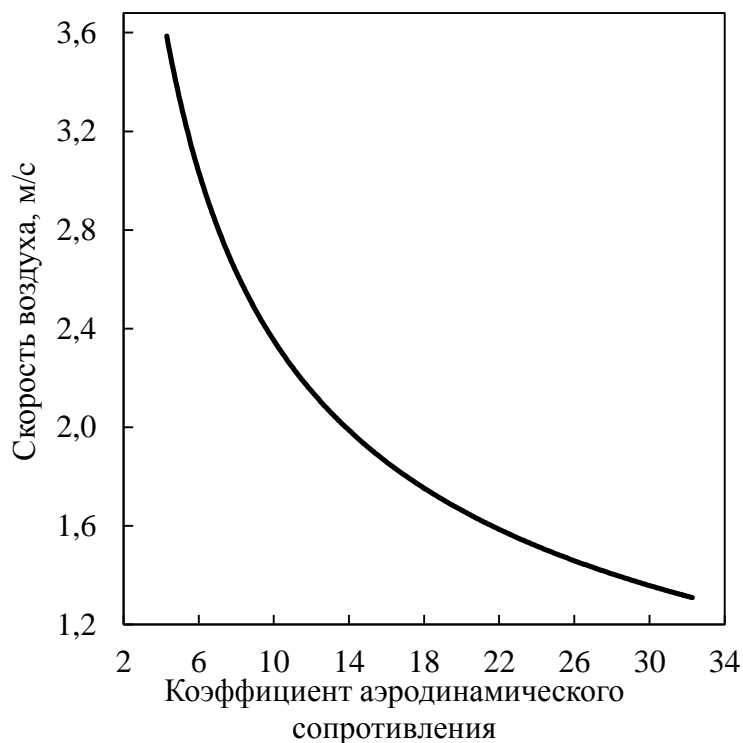


Рисунок 2.8 – Аэродинамическая характеристика при коэффициенте аэродинамического сопротивления башенной градирни БГ-2600

2.3.3 Ветровая характеристика

Следующий этап работы был посвящен анализу ветровой характеристики башенной градирни БГ-2600

$$w = f_3(v), \quad (21)$$

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

Скорость ветра – это, как известно, один из важнейших факторов, влияющих на расход воздуха и производительность башенной испарительной градирни. Из литературных источников [55,89,105,106,136,153,181], такая характеристика связана с процессами внутренней аэродинамики и весьма сложна. При больших скоростях ветра наблюдается снижение расхода воздуха и производительности градирни вследствие «запирания» выходного сечения градирни, а также образования вихрей в области воздухозаборных окон и сквозного продувания подросительного пространства. В работе [55] приведены графики зависимости расхода воздуха и мощности теплоотдачи теплоносителя от скорости ветра. Однако такие характеристики не могут быть одинаковыми для

всех градирен, поскольку конструкции градирен имеют свои особенности, а течение воздуха в приземном слое зависит также от рельефа местности и расположенных рядом строений.

Задача заключалась в проведении анализа влияния метеорологической скорости ветра v как на общий расход воздуха градирни, так и на неравномерность его распределения по секциям градирни. В соответствии с законами аэродинамики при турбулентном обтекании ветром таких больших тел, как градирня, вокруг нее формируется поле скоростей ветра v в непосредственной близости от воздухоподводящих окон. Эксперимент проводился на башенной градирне БГ-2600 и заключался в измерении как скорости и направления ветра на наружной стороне воздухоподводящих окон на высоте 2 метра, так и скорости воздуха в секции при полностью открытых воздухоподводящих окнах. Для измерения использовался анеморумбометр М63М-1 и анемометр АТТ-1004 (приложение Б). Так был собран большой статистический материал – получены распределения скоростей ветра по окружности градирни и скоростей воздуха внутри секций при разных направлениях и скоростях ветра:

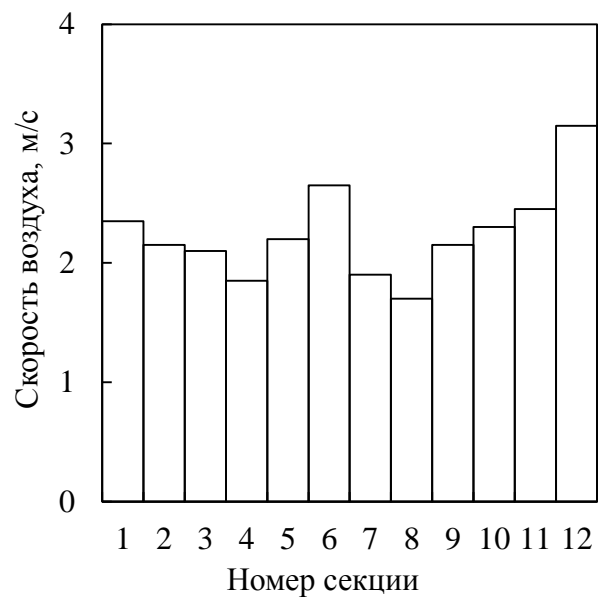
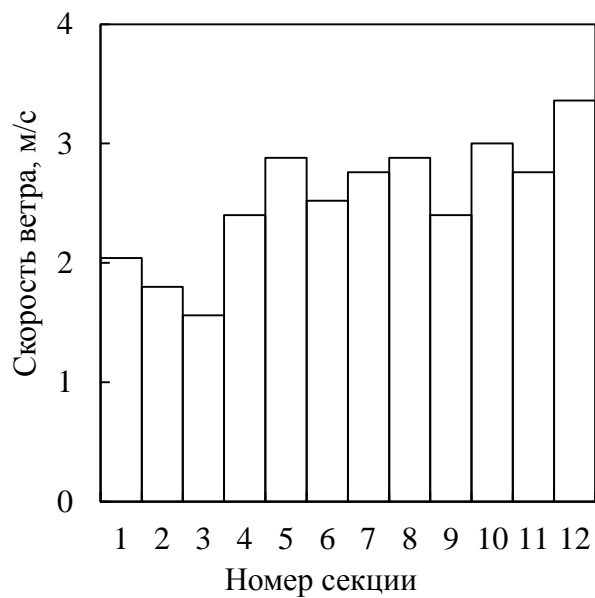
- при метеорологической скорости южного ветра 1 м/с в направлении секций 11 и 12 (рисунок 2.9);

- при метеорологической скорости южного ветра 3 м/с в направлении секций 11 и 12 (рисунок 2.10);

- при метеорологической скорости юго – западного ветра 5 м/с в направлении секций 10 и 11 (рисунок 2.11);

- при метеорологической скорости северо – восточного ветра 7 м/с в направлении секций 4 и 5 (рисунок 2.12);

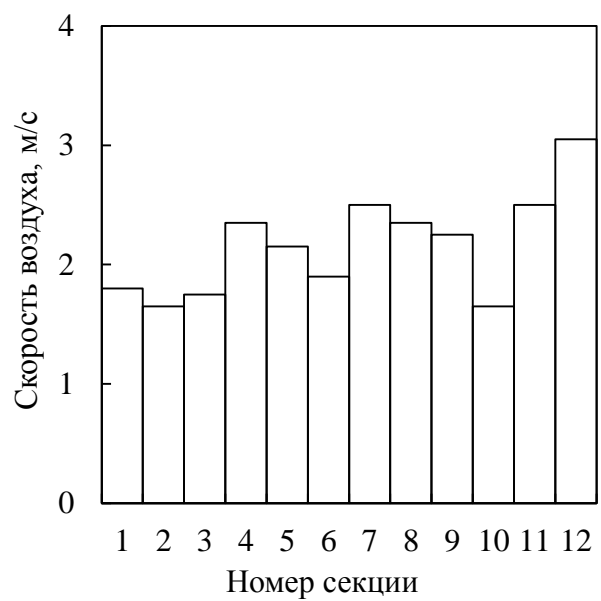
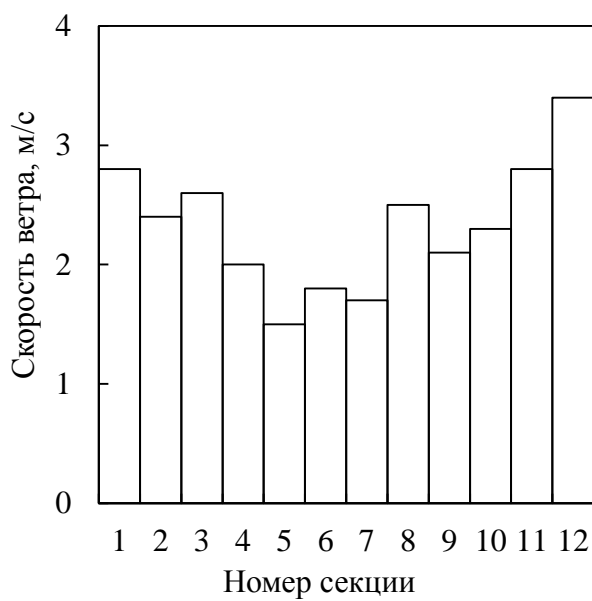
- при метеорологической скорости юго – западного ветра 9 м/с в направлении секций 10 и 11 (рисунок 2.13).



а)

б)

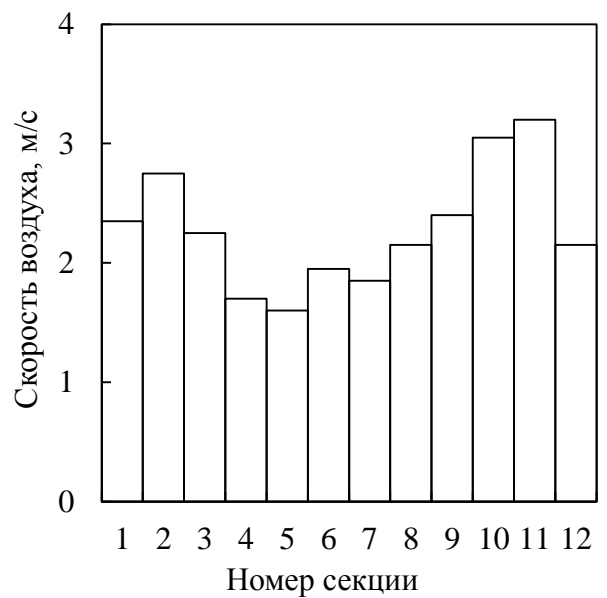
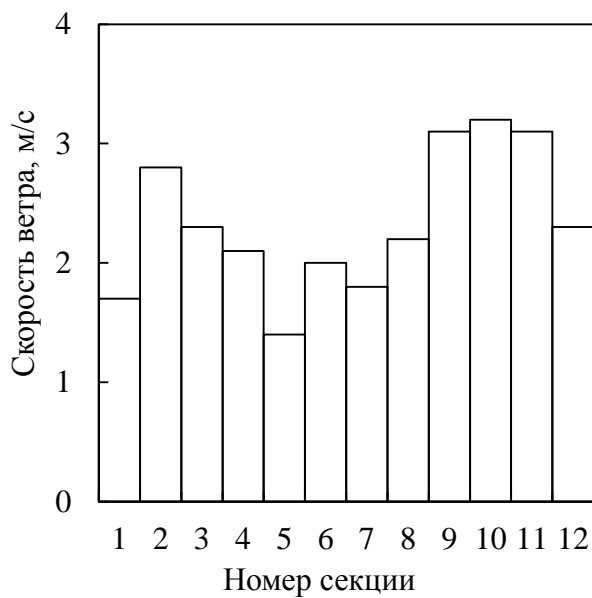
Рисунок 2.9 – Распределение скорости ветра в окружности (а) и скорости воздуха в секциях (б) при метеорологической скорости ветра 1 м/с



а)

б)

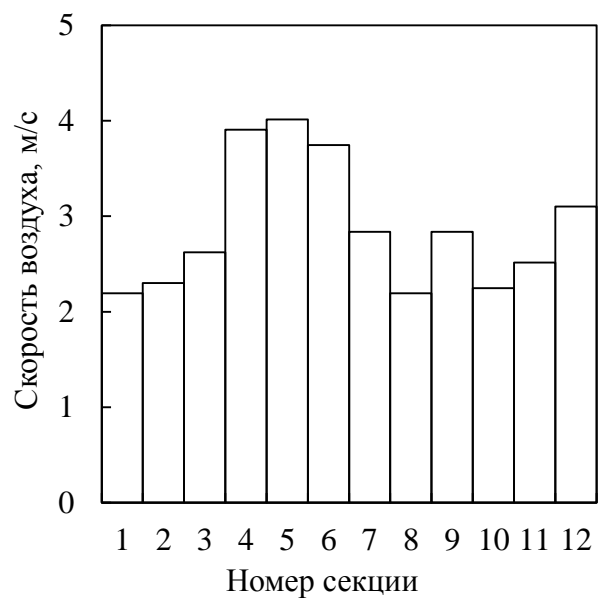
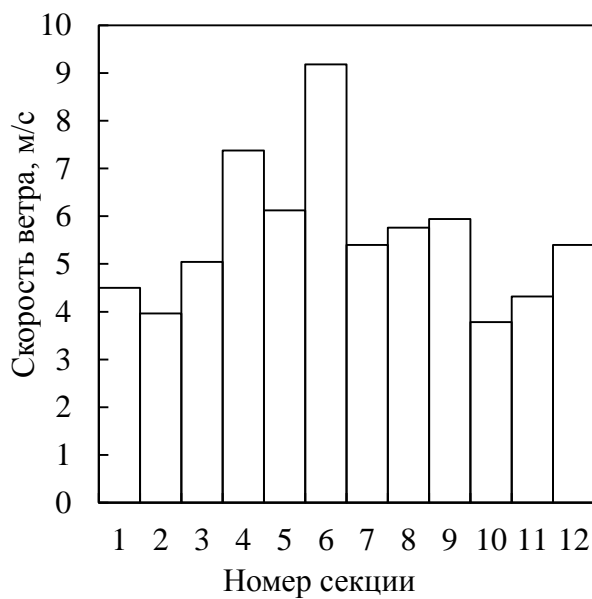
Рисунок 2.10 – Распределение скорости ветра в окружности (а) и скорости воздуха в секциях (б) при метеорологической скорости ветра 3 м/с



а)

б)

Рисунок 2.11 – Распределение скорости ветра в окружности (а) и скорости воздуха в секциях (б) при метеорологической скорости ветра 5 м/с



а)

б)

Рисунок 2.12 – Распределение скорости ветра в окружности (а) и скорости воздуха в секциях (б) при метеорологической скорости ветра 7 м/с

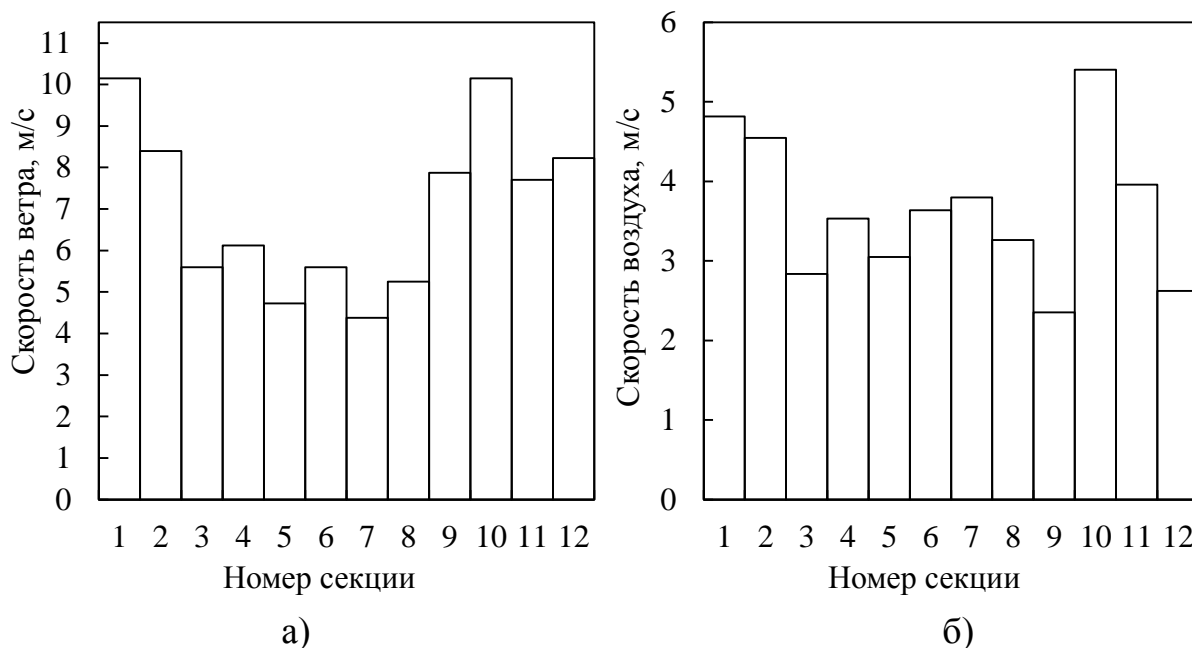


Рисунок 2.13 – Распределение скорости ветра в окружности (а) и скорости воздуха в секциях (б) при метеорологической скорости ветра 9 м/с

Проведен статистический анализ скорости ветра в окружности градирни распределения воздуха в секциях по представленным гистограммам. Результаты показали значительные неравномерности потоков при метеорологических скоростях ветра 1, 3, 5, 7 и 9 м/с (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Степень неравномерности ветра и воздуха

Метеорологическая скорость ветра, м/с	Степень неравномерности ветра, %	Степень неравномерности воздуха, %
1	20,67	19,26
3	23,28	19,70
5	25,48	22,12
7	27,43	23,48
9	28,63	25,15

Следует установить, что с увеличением метеорологической скорости ветра, возрастает неравномерность распределения ветра по окружности башенной градирни, и, как следствие, возрастает степень неравномерности распределения скорости воздуха в секциях аппарата. Таким образом, неравномерное распределение ветра по окружности снаружи приводит к неравномерности распределения воздуха по секциям внутри башенной градирни.

Проведенный затем анализ полученных распределений показал наличие корреляционной связи $w = f(v)$ между скоростями воздуха в секциях градирни и скоростями ветра у воздухопроводных окон (коэффициент корреляции 0,6 – 0,7). При этом абсолютные значения указанных скоростей зависят от метеорологической скорости ветра v . Таким образом, ветер оказывает влияние и на абсолютное значение скоростей воздуха, и на неравномерность распределения воздуха по секциям градирни.

С учетом изложенного было изучено влияние метеорологической скорости ветра на среднюю скорость воздуха в градирне w , рассчитываемую по скоростям воздуха в отдельных секциях. Построена ветровая характеристика башенной градирни БГ-2600 в среднеквадратичном приближении. В качестве сравнения, зависимости башенных градирен БГ-2600 и ТЭС «Ву-Джин» (Доброго К. В.) изображены на рисунке 2.14.

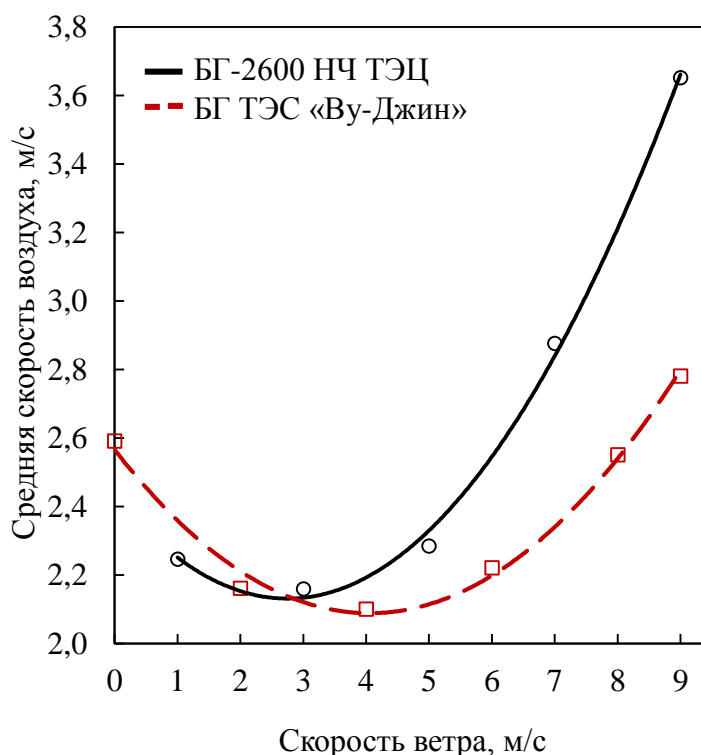


Рисунок 2.14 – Ветровая характеристика башенных градирен

Уравнение регрессии ветровой характеристики с коэффициентом корреляции 0,97 и среднеквадратичным отклонением 0,03 м/с имеет вид:

$$w = 0,039 v^2 - 0,22 v + 2,44 . \quad (22)$$

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

Колебания средней скорости воздуха значительно превышают ошибку прибора, что позволяет говорить о достоверности выводов. Седлообразный характер зависимости можно объяснить следующим образом: при слабой скорости ветра 1 м/с в подросительном пространстве возникают свободные, незаполненные воздушным потоком зоны, вследствие чего, в них возникают завихрения воздушного течения. Это вызывает приращение скорости воздуха в подросительном пространстве. С ростом скорости ветра до 3 м/с, ее сила пробивает насквозь подросительную зону, не поднимаясь кверху, тем самым, снижая расход воздуха в башенной градирне. Однако, дальнейшее возрастание скорости ветра от 3-х до 9 м/с под силой и действием естественной тяги позволяет направить объемный поток воздуха ввысь, к устью башни. Из полученных результатов следует также, что построенная зависимость $w = f(v)$ аналогична рассмотренным в работах Доброго К. В [55] и Wang К. [181] с той лишь разницей, что критическая скорость ветра стала равной 3 м/с.

2.3.4 Анализ зависимости скорости воздуха от плотности орошения

Четвертая аэродинамическая характеристика – зависимость скорости воздуха от плотности орошения

$$w = f_4(q), \quad (23)$$

где w – скорость воздуха в секциях; м/с, q – плотность орошения, м³/м²·ч.

По предположению, увеличение плотности орошения должно приводить к уменьшению проходного сечения воздушного потока, отрыву капель от пленки, образованию не только пленочного, но и капельного течения, и, вследствие этого, повышению аэродинамического сопротивления градирни и снижению расхода воздуха. Необходимо было проверить существование такой связи в реальных условиях функционирования, поэтому вначале были проведены натурные исследования на действующей промышленной башенной градирне БГ-2600. Эксперимент заключался в измерениях распределений скоростей воздуха и плотности орошения по секциям градирни при фиксированной нагрузке градирни по горячей воде.

Методика измерений плотности орошения в секциях была подробно рассмотрена в работе [142], скорости же воздуха по секциям измерялись в подросительном пространстве градирни с помощью поверенного анемометра модели АТТ-1004 (приложение Б). Результаты испытаний отдельных секций были объединены на одном корреляционном поле, построен график зависимости скорости воздуха в секции башенной градирни как функции плотности орошения в ней (рисунок 2.15).

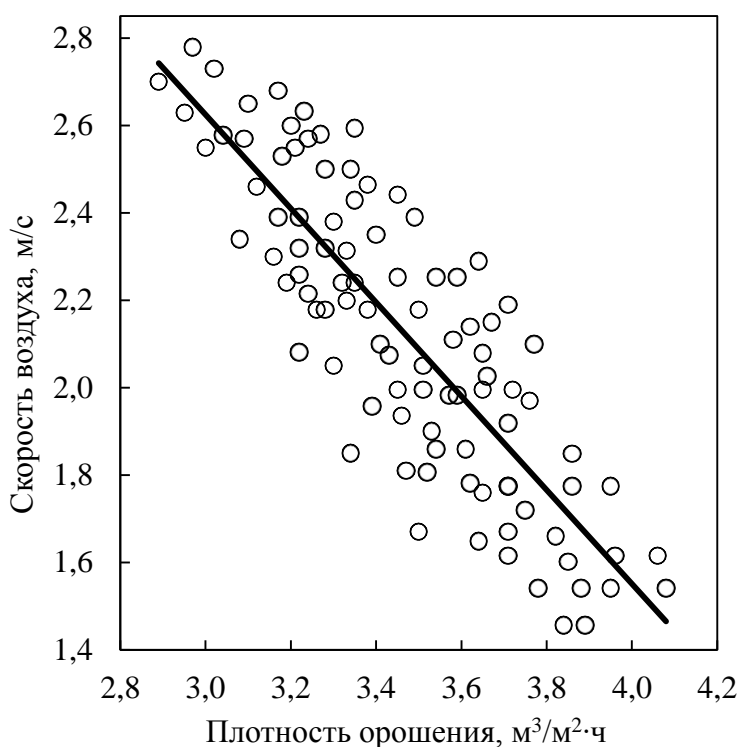


Рисунок 2.15 – Аэродинамическая характеристика при неравномерности плотности орошения башенной градирни

Полученная зависимость на рисунке 2.15 описывается уравнением регрессии параболического типа с коэффициентом корреляции 0,75:

$$w = -1,073 \cdot q + 5,79 \quad (24)$$

где w – скорость воздушного потока, м/с; q – плотность орошения, м³/м²·ч.

Результаты эксперимента и расчета показали наличие обратной корреляционной связи, в соответствии с которой скорость воздуха в секциях градирни падает с ростом плотности орошения.

Сравнительно умеренная корреляция, обусловлена, с одной стороны, тем, что отдельные секции градирни не являются идентичными и различаются между

собой аэродинамическим сопротивлением, а с другой – условиями измерения: сложностью установки прибора не только в заданную точку пространства секции градирни, но и перпендикулярно направлению движения воздуха. Однако результаты эксперимента имеют практическую ценность.

2.3.5 Анализ аэродинамической характеристики на лабораторной модели

Для подтверждения установленной зависимости скорости воздуха от плотности орошения башенной градирни (рисунок 2.15), были проведены также экспериментальные исследования на лабораторной установке, разработанной Чичириным А.А., Власовым С.М., Чичириной Н.Д. в научно-исследовательской лаборатории «Источник теплоты – тепловая сеть» Казанского государственного энергетического университета [30,129,131,132]. Центральным аппаратом лабораторной установки обратного охлаждения была вентиляторная градирня высотой 1,25 м и площадью орошения 0,3 м². В масштабе, модель меньше натурной башенной градирни БГ–2600 в 51 раз (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Общий вид лабораторной установки

Установка служит для оценки эффективности охлаждения воды, конструктивными элементами которой является пирамидальная вытяжная башня, ороситель, циркуляционный насос, вентилятор и латунные трубки (рисунок 2.17).

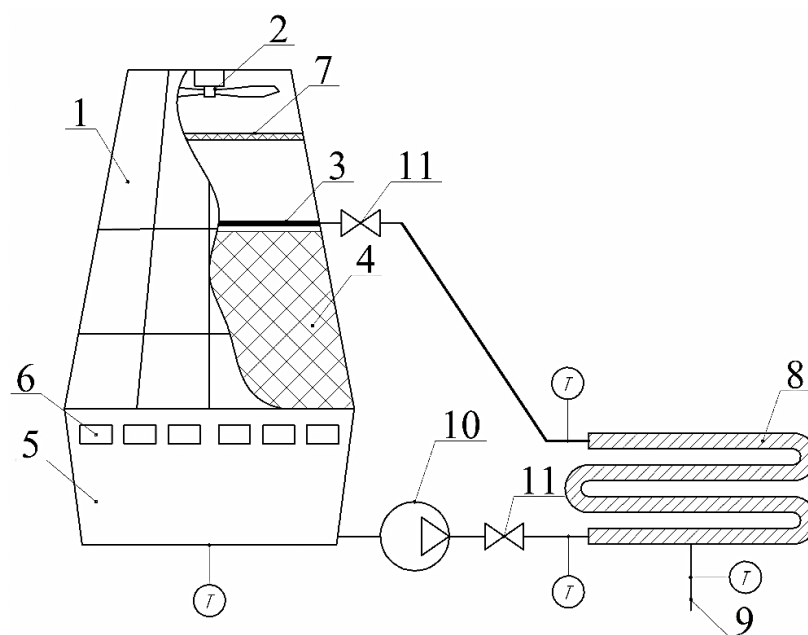


Рисунок 2.17 – Общая схема лабораторной установки УВО – 0,3, где:

1 – вытяжная башня; 2 – вентилятор; 3 – устройство водораспределения; 4 – ороситель; 5 – водосборный бассейн; 6 – воздухопроводные окна; 7 – каплеуловитель; 8 – трубки конденсатора; 9 – система подогрева трубок; 10 – циркуляционный насос; 11 – вентиль; Т – термопара.

С помощью циркуляционного насоса и системы подогрева трубок осуществлялась подача в установку воды с заданной температурой 30 °С. Расход воды изменялся поворотом вентиля на выходе насоса, а расход воздуха в градирне регулировался с помощью вентилятора. Установка была оснащена приборами измерения температур потоков, расхода воды и скоростей воздуха.

Методика эксперимента заключалась в следующем: фиксировалась мощность вентилятора на уровне 30 Вт, а далее проводилась серия опытов при различных расходах воды. В каждом опыте задавался определенный расход воды и замерялась установившаяся при этом скорость воздуха в градирне. Погрешность измерения скорости воздуха анемометром модели АТТ-1004 (приложение Б) составила по паспорту 4 %. Распределение воды и воздуха по сечению аппарата принималось равномерным и потому не измерялось. По результатам эксперимента была построена экспериментальная зависимость скорости воздуха в градирне от плотности орошения (рисунок 2.18).

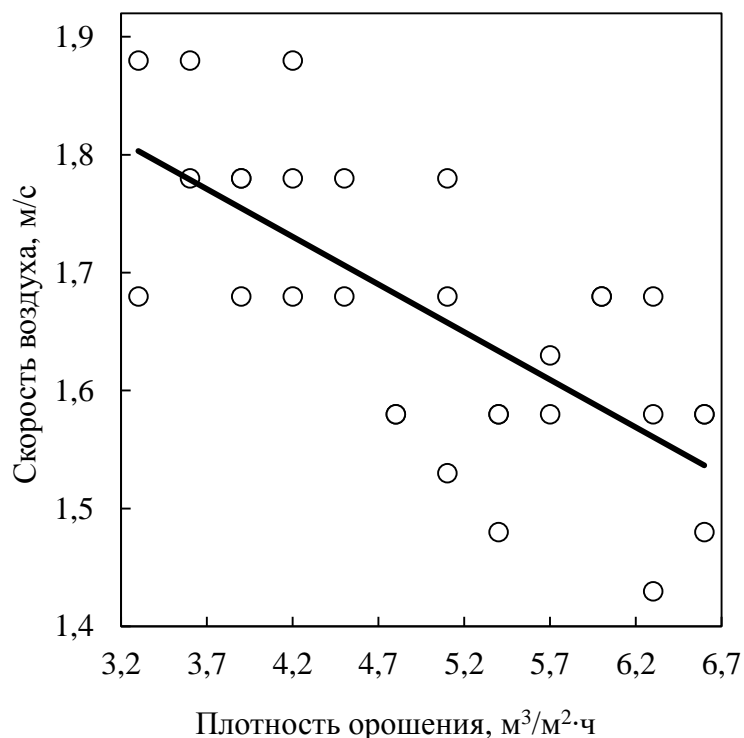


Рисунок 2.18 – Аэродинамическая характеристика от плотности орошения лабораторной установки

Аэродинамическая характеристики в зависимости от плотности орошения лабораторной установки описывается уравнением регрессии параболического типа с коэффициентом корреляции 0,51:

$$w_y = -0,081 \cdot q_y + 2,09, \quad (25)$$

де w_y – скорость воздуха в лабораторной установке, м/с; q_y – плотность орошения лабораторной установки, м³/м²·ч.

Согласно экспериментальным данным колебания скорости воздуха составляют в среднем 33%, что превышает ошибку измерения, при этом увеличение плотности орошения приводит к снижению скорости воздуха.

По результатам лабораторного опыта, умеренный коэффициент корреляции 0,51 свидетельствует о наличии между факторами корреляционной связи. Сравнительно среднее значение коэффициента корреляции, возможно, обусловлено сложностями проведения такого эксперимента.

Схожесть результатов лабораторных и промышленных испытаний является дополнительным доказательством существования рассматриваемой

связи. Согласно результатам эксперимента, плотность орошения оказывает существенное влияние на скорость воздуха. К примеру, при увеличении плотности орошения на $3,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, скорость воздуха падает почти на $0,3 \text{ м/с}$, следовательно, этот фактор необходимо учитывать. Таким образом, неравномерность распределения плотности орошения по секциям градирни может быть одной из причин неравномерности распределения воздуха.

2.4 Обобщенная аэродинамическая характеристика башенной градирни

По полученным ранее четырем одномерным аэродинамическим характеристикам может быть построена многомерная аэродинамическая характеристика для каждой секции градирни в отдельности. Форма уравнения может быть различной, да и нет проблем с построением уравнения регрессии любого порядка. Однако в первом приближении для анализа и предварительной оценки эффекта наиболее удобным является линейное уравнение множественной регрессии. В качестве необходимых при этом экспериментальных данных с разбросом факторов в определенном интервале использовались распределения плотностей орошения, скорости воздуха и ветра по секциям исследуемой градирни. Влияние перепада температур Δt учтено в свободном члене уравнения регрессии. В результате обработки эксперимента получено следующее уравнение регрессии:

$$w = 4,085 - 0,354 q + 0,226 v + 0,076 \zeta, \quad (26)$$

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

Парные коэффициенты корреляции Пирсона между скоростью воздуха и соответствующим фактором будут равны $r_1 = 0,63$, $r_2 = 0,67$, $r_3 = 0,82$ при коэффициенте множественной корреляции $R = 0,72$. Результаты статистики множественной регрессии сведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Статистика множественной регрессии

Параметр	$w = f(\zeta)$	$w = f(v)$	$w = f(q)$	$w = f(\zeta, v, q)$
Коэффициент корреляции	0,82	0,67	0,63	0,72
Коэффициент детерминации	0,67	0,45	0,40	0,64
Нормированный коэффициент детерминации	0,66	0,44	0,39	0,64
Стандартная ошибка	0,51	0,65	0,68	0,35
Наблюдения	60	60	60	60

Хотя уравнение (26) – это частная зависимость для конкретной градирни, однако подобные уравнения позволяют оценить распределение скоростей воздуха по секциям градирни при совместном воздействии всех рассмотренных факторов. Несмотря на сравнительно большую погрешность экспериментов на промышленных аппаратах, проведенное исследование позволило как установить качественные характеристики, присущие башенным градирням, а также получить количественные оценки для конкретного аппарата. Таким образом, определены основные факторы, влияющие на расход воздуха в градирне и неравномерность его распределения по секциям аппарата. Проанализировано влияние каждого фактора на скорость воздуха в отдельной секции и градирне в целом (аэродинамические характеристики башенных градирен). Проведена оценка совместного влияния всех факторов на скорость воздуха в градирне.

2.5 Выводы по главе

Теоретически установлено, что распределение скорости воздуха в башенных градирнях подчиняются нормальному закону распределения.

Исследования распределения воздуха по секциям функционирующей башенной градирни БГ-2600 показали значительную степень неравномерности – 20,83 % при средней скорости воздуха 2,16 м/с. В свою очередь, исследованиями распределения воздушного потока башенной градирни БГ-1600 установлено, что ее степень неравномерности распределения воздуха составила 28,35 %, при

средней скорости 3,75 м/с. Экспериментально подтверждено, что распределение скорости воздуха по секциям башенных градирен подчиняется нормальному закону распределения. Получена функция нормального распределения безразмерной скорости воздуха, что позволяет охарактеризовать распределение скорости воздуха башенных градирен.

Проведен анализ причин неравномерности распределения воздушного потока и выявлены факторы, влияющие на изменение расхода воздуха в башенной градирне. К ним отнесены: перепад температур воды и атмосферного воздуха, коэффициент аэродинамического сопротивления, плотность орошения и скорость ветра.

С целью анализа силы влияния факторов на скорость потока воздуха в башенной градирне, построены частные аэродинамические характеристики с учетом неравномерности распределения указанных факторов по секциям башенной градирни. Аэродинамическая характеристика в зависимости от плотности орошения была проверена и подтверждена на лабораторной установке. Отражено, что наиболее влиятельным фактором является скорость ветра по окружности башенной градирни, с увеличением которого степень неравномерности распределения воздуха по секциям прямолинейно возрастает. Основываясь на результатах, проанализировано совместное воздействие частных аэродинамических характеристик, согласно которому, построена обобщенная аэродинамическая характеристика.

Ветровая характеристика внедрена на Набережночелнинскую ТЭЦ и используется для регулирования положения воздухопроводных окон каждой секции в зависимости от метеорологических скоростей ветра по окружности башенной градирни, что подтверждается актом внедрения (приложение В).

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ОРОШЕНИЯ В БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ

3.1 Теоретический анализ распределения плотности орошения в башенных градирнях

С целью изучения природы распределения плотности орошения в башенных градирнях, решено провести анализ закона распределения. Выдвинуто предположение, что независимо от степени гидравлической нагрузки, законом распределения плотности орошения является нормальный закон распределения. Для проверки гипотезы, введен общий показатель гидравлических режимов – безразмерная плотность орошения:

$$Q = \frac{q}{q_{\text{ср}}}, \quad (27)$$

где q – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $q_{\text{ср}}$ – средняя плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Средняя величина безразмерной плотности орошения $Q_{\text{ср}}$ будет равной 1, а дисперсия безразмерной плотности орошения одной величиной при всех гидравлических нагрузках. В таблице 3.1 представлены соотношения экспериментальной w и безразмерной плотности орошения Q .

Таблица 3.1 – Безразмерные скорости воздуха

Плотность орошения q , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Безразмерная плотность орошения Q	Плотность орошения q , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Безразмерная плотность орошения Q
3,45	1,01	3,35	0,98
2,80	0,82	4,20	1,23
3,80	1,11	2,85	0,84
3,45	1,01	3,15	0,92
3,33	0,98	3,60	1,06
2,48	0,73	4,45	1,31
$q_{\text{ср}} = 3,41, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}; Q_{\text{ср}} = 1$			

Так, зная математическое ожидание и величину дисперсии, распределение плотности орошения можно отнести к гистограмме плотности распределения безразмерной плотности орошения башенных градирен (рисунок 3.1), согласно которой установлен закон распределения плотности орошения.

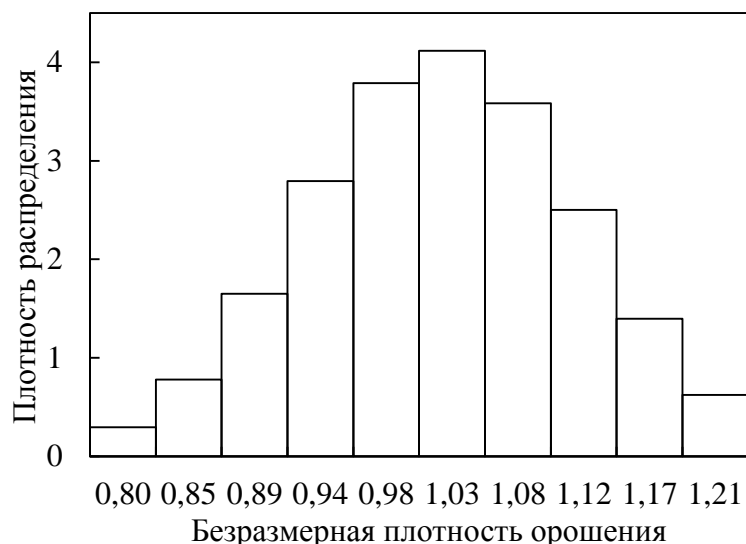


Рисунок 3.1 – Статистическая плотность распределения орошения

Данные гистограммы подвергнуты проверке с помощью метода статистических гипотез по критерию согласия Пирсона (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Расчет проверки гипотезы о законе плотности орошения

Интервал значений плотности и орошения q , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Число наблюдений n	Границы интервалов q_i		Интегральная функция распределения		Вероятность попадания в интервал, p_i	$n_p \cdot p_i$	$(n - n_p \cdot p_i)^2 / n_p \cdot p_i$
		$q_{i.min}$	$q_{i.max}$	$F(q < q_{i.min})$	$F(q > q_{i.max})$			
0,80	1	0,780	0,825	0,006	0,020	0,014	1,373	0,10
0,85	3	0,825	0,871	0,020	0,056	0,036	3,559	0,09
0,89	6	0,871	0,916	0,056	0,132	0,076	7,419	0,27
0,94	21	0,916	0,962	0,132	0,259	0,127	12,441	5,89
0,98	16	0,962	1,007	0,259	0,430	0,171	16,782	0,04
1,03	9	1,007	1,053	0,430	0,616	0,186	18,209	4,66
1,08	15	1,053	1,098	0,616	0,778	0,162	15,893	0,05
1,12	13	1,098	1,144	0,778	0,892	0,114	11,159	0,30
1,17	8	1,144	1,189	0,892	0,956	0,064	6,302	0,46
1,21	4	1,189	1,235	0,956	0,985	0,029	2,863	0,45
	$n_p = 101,62$					$\Sigma p_i = 0,98$		$\chi^2_n = 12,31$

В результате проверки, получено наблюдаемое значение $\chi^2_n = 12,31$. При этом, число степеней свободы $k = 7$, критическое значение $\chi^2_{кр} = 14,1$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [34]. Следовательно, условие $\chi^2_n < \chi^2_{кр}$ выполняется. Это говорит о том, что распределение скорости потока воздуха в башенных градирнях подчиняются нормальному закону распределения.

Таким образом, распределение плотности орошения описывается функцией нормального распределения безразмерной плотности орошения:

$$F(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(Q-1)^2}{2 \cdot \sigma_Q^2}\right], \quad (28)$$

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

Знание закона распределения полезно при расчетах неравномерности плотности орошения аппарата. Неравномерность плотности орошения должна отражаться на эффективности работы башенной градирни.

3.2 Влияние неравномерности плотности орошения на эффективность процесса испарения в башенных градирнях

На следующем этапе исследования решено выяснить, каким образом эта неравномерность влияет на главный процесс – испарение воды в аппарате. На основании установленного закона распределения, если принять, что средняя плотность орошения q_c – непрерывная случайная величина, математически можно учитывать неравномерность статистической функцией $f(q)$:

$$q = \int_{q_1}^{q_2} q \cdot f(q) dq, \quad (29)$$

где q_c – средняя плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $f(q)$ – доля сечения, плотность орошения в которой находится в пределах от q до $q+dq$.

Согласно теории массопередачи, интенсивность процесса массопереноса характеризуется ее коэффициентом, который, в свою очередь, описывается произведением удельной поверхности контакта фаз и поверхностного коэффициента массотдачи в газовой среде. Отметим, что эти показатели зависят от расхода воды. Коэффициент массопереноса можно выразить формулой [15]:

$$h = B \cdot q^n, \quad (30)$$

где B – постоянная величина, n – эмпирический показатель степени плотности орошения.

Коэффициент массоотдачи башенной градирни H с учетом функции распределения плотности орошения можно представить в виде:

$$H = \int_{q_1}^{q_2} Bq^n f(q) dq, \quad (31)$$

К тому же, если интенсивность процесса испарения в башенной градирне характеризуется средним коэффициентом массоотдачи H , его можно выразить как формулу зависимости от средней плотности орошения:

$$H = Bq_c^m, \quad (32)$$

где B – постоянная величина, m – показатель степени неравномерности средней плотности орошения.

Показатель m служит мерой эффективности массоотдачи в башенной градирне и доказательством связи между интенсивностью массоотдачи и распределением плотности орошения:

$$m = \frac{\ln \int_{q_1}^{q_2} q^n \cdot f(q) dq}{\ln \int_{q_1}^{q_2} q \cdot f(q) dq}, \quad (33)$$

Так установлено, что, при нормальном законе распределения плотности орошения, с увеличением дисперсии распределения показатель m снижается, а значит скорость процесса испарения падает. Таким образом, при показателе степени для одного и того же сечения $n = 0,8$ получено, что при одной средней плотности орошения, например, $q_c = 1,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, показатель интенсивности массоотдачи m зависит от дисперсии распределения следующим образом:

- 1) $n=0,8, \sigma = 1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, m = 0,38;$
- 2) $n=0,8, \sigma = 1,13 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, m = 0,46$ (при неравномерности орошения 33%);
- 3) $n=0,8, \sigma = 1 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, m = 0,57;$
- 4) $n=0,8, \sigma = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, m = 0,775;$
- 5) $n=0,8, \sigma \rightarrow 0$ (дельта-функция распределения), $m = 0,8.$

Таким образом, полученные результаты отражают, что неравномерность распределения плотности орошения воды значительно влияет на эффективность процесса испарения в башенной градирне. Знание закона распределения плотности орошения необходимо для более детального расчета аппарата на этапе проектирования.

Данный математический анализ позволил перейти к экспериментальному исследованию неравномерности плотности орошения на примере башенной градирни Набережночелнинской ТЭЦ.

3.3 Экспериментальный анализ неравномерности плотности орошения башенных градирен

Для башенных градирен летнее время года становится тяжелым периодом. Из-за нагрева поступающего в аппарат атмосферного воздуха, который является хладагентом, происходит повышение температуры охлаждаемой воды [3,15,16]. Поэтому, для достижения требуемой конечной температуры, производственники прибегают к снижению гидравлической нагрузки. Вместе с неравномерностью распределения потока воздуха, причиной спада эффективности охлаждения может стать и неравномерное распределение орошения в башенной градирне. Поэтому, сначала решено провести обследование башенной градирни БГ-2600 и установить возможные причины неравномерности плотности орошения.

Установленные при анализе причин неравномерности распределения скорости воздуха провисание оросительного устройства и зазоры между блоками оросителя следует также отнести к причинами возникновения неравномерности плотности орошения. Вместе с тем, на поверхности оросителя можно увидеть отложения солей жесткости, закупоривающие каналы, что свидетельствует об уменьшении сечения трубок оросителя (Приложение А).

Следующим рассмотрена водораспределительная система башенной градирни. Обнаружены биологические обрастания как на поверхности центрального стояка, так и на магистральных и рабочих трубопроводах, а также на раме каплеуловителя, при этом, самого каплеуловителя не обнаружено. При

осмотре трубопроводов водораспределительной системы, местами замечено разрушение антикоррозионной защиты, а также обнаружены поломанные и засоренные сопла ВРС, что является главной причиной неравномерности орошения воды. (Приложение А).

На основании обследования технического состояния башенной градирни, проведено экспериментальное исследование и анализ степени неравномерности распределения орошения воды по секциям в их связи с эффективностью охлаждения аппарата. В летнее время года, при тех же условиях, что и при эксперименте неравномерности распределения воздуха (температура окружающей среды 25 – 31 °С, гидравлическая нагрузка 8400 – 12000 м³/м²·ч) на функционирующей башенной градирне БГ-2600 (рисунок 2.1), был произведен анализ орошения воды. Проведены натурные эксперименты, в ходе которых выполнены измерения плотности орошения по сечению 12 – ти секции башенной градирни.

Методика измерения состояла в следующем: в позициях каждой секции аппарата, с помощью телескопической трубы, на конце которого закреплен мерный сосуд, секундомером получены времени наполнения емкости водой. При эксперименте, погрешность измерения сосудом не превышала 2,5 %. По полученным данным, высчитывались плотности орошения воды каждой секции башенной градирни. В каждой половине секции выбиралось по 7 позиции (на рисунке 3.2 показана 2 – ая секция и позиции замеров) и выбирались такими, чтобы они находились в единой области с измерениям скорости воздуха. Позиции замеров принадлежат большей части площади сечения секций, что позволяет утверждать о представительных данных.

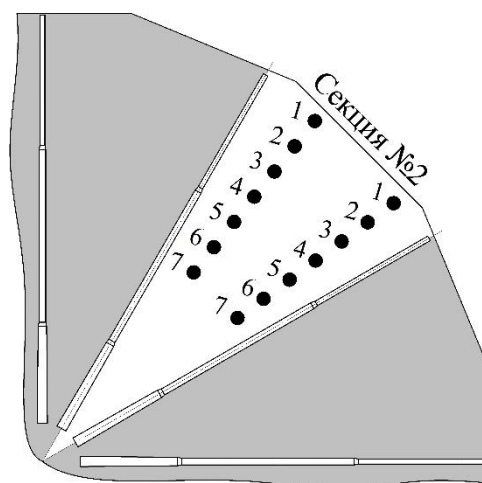


Рисунок 3.2 – Положиции замеров плотности орошения по сечению башенной градирни

С целью анализа на воспроизводимость, решено подвергнуть проверке экспериментальные данные плотности орошения по критерию согласия Кохрена. Результаты проверки сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты воспроизводимости экспериментов орошения воды

№ секции	1-ая серия эксперимента, q	2-ая серия эксперимента, q	3-ая серия эксперимента, q	Дисперсия σ^2_q
1	3,64	4,52	2,19	1,3875
2	2,96	3,67	1,77	0,9139
3	4,01	4,98	2,41	1,6833
4	3,64	4,52	2,19	1,3875
5	3,51	4,35	2,11	1,2887
6	2,61	3,24	1,57	0,7141
7	3,54	4,39	2,12	1,3082
8	4,44	5,50	2,66	2,0563
9	3,01	3,73	1,81	0,9468
10	3,33	4,12	2,00	1,1567
11	3,80	4,71	2,28	1,5107
12	4,70	5,83	2,82	2,3084
Дисперсия воспроизводимости				1,3885
Максимальная дисперсия				2,3084
Сумма дисперсий				16,661
Расчетное значение критерия Кохрена G_p				0,1385

При табличном значении критерия Кохрена $G_{кр} = 0,326$, доверительной вероятности $p = 0,95$, условие $G_p < G_{кр}$ выполняется. Следовательно, экспериментальные данные плотности орошения следует считать воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

Полученные экспериментальные величины приведены к средним значениям и представлены в виде гистограмм распределений как по каждой секции (рисунок 3.3), так и по радиусу аппарата (на рисунке 3.4 показаны распределения соседних секций). Как видно из гистограммы (рисунок 3.3), наблюдается неравномерность плотности орошения по секциям аппарата. В свою очередь, гистограмма радиального распределения отражает у периферии и у центра малые плотности орошения и большие в средней зоне.

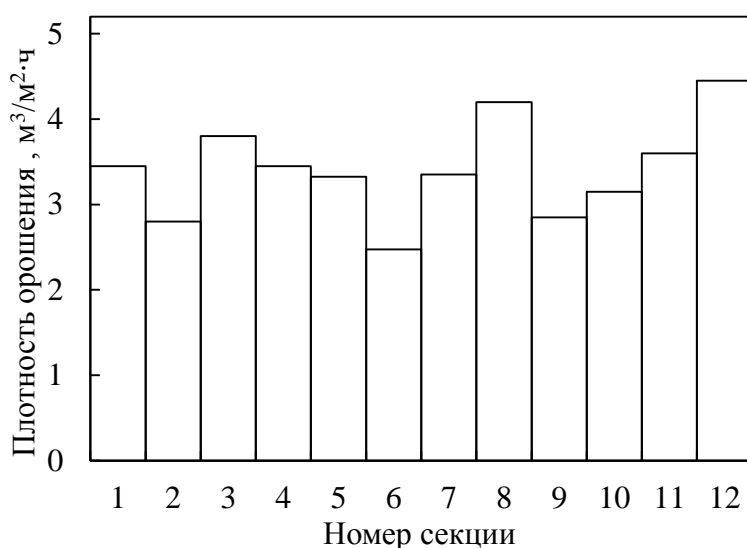


Рисунок 3.3 – Распределение плотности орошения по секциям башенной градирни БГ-2600

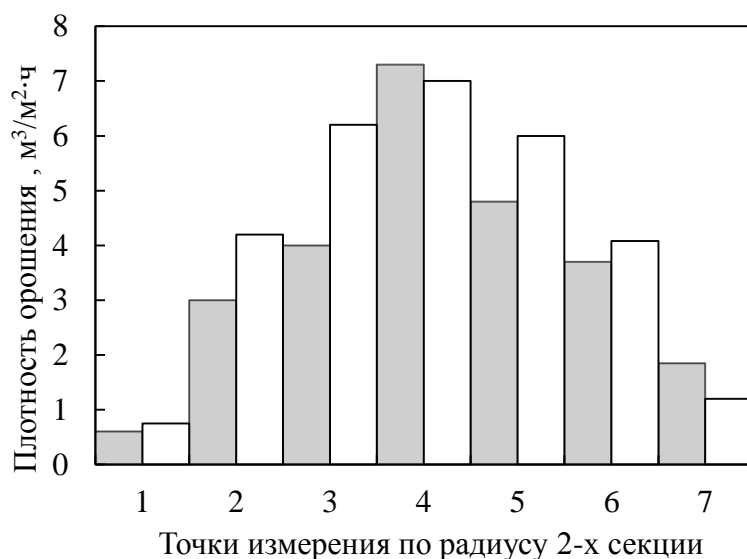


Рисунок 3.4 – Распределение плотности орошения по радиусу двух соседних секции башенной градирни БГ-2600

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 3.3 и 3.4 были объединены в общую гистограмму статистической плотности распределения орошения (рисунок 3.5), согласно которой средняя плотность орошения градирни равна $3,41 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, среднеквадратичное отклонение = $1,13 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ или 33 % от среднего значения. Таким образом, неравномерность плотности орошения аппарата составила 33 %. Произведена и оценка точности измерения – рассчитана среднеквадратичная погрешность, которая составила $0,0335 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ или 1,015 % от среднего арифметического значения.

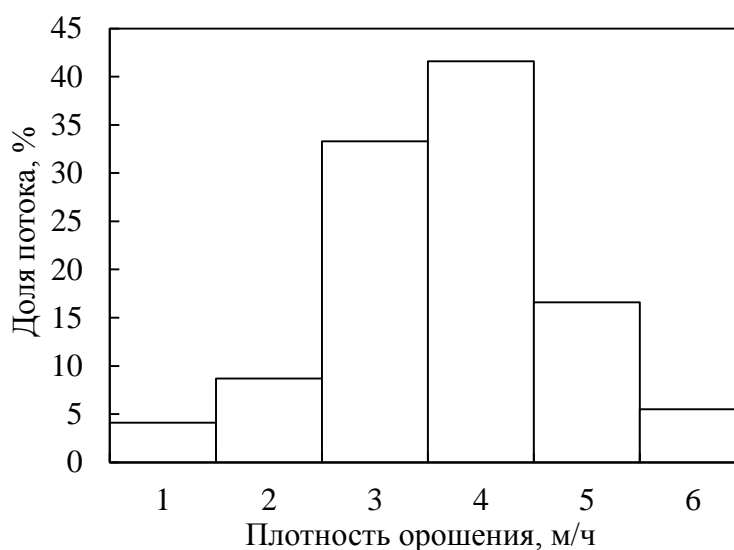


Рисунок 3.5 – Статистическая плотность распределения плотности орошения башенной градирни БГ-2600

Аналогично исследованиям распределения скорости воздуха башенной градирни БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ, были получены экспериментальные величины. В результате обработки экспериментальных данных башенной градирни, установлена неравномерность плотности орошения величиной 15 % при ее среднем значении $6,8 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Распределение плотности орошения по секциям и по радиусам секций БГ-1600 представлены в виде гистограмм (рисунок 3.6 и 3.7).

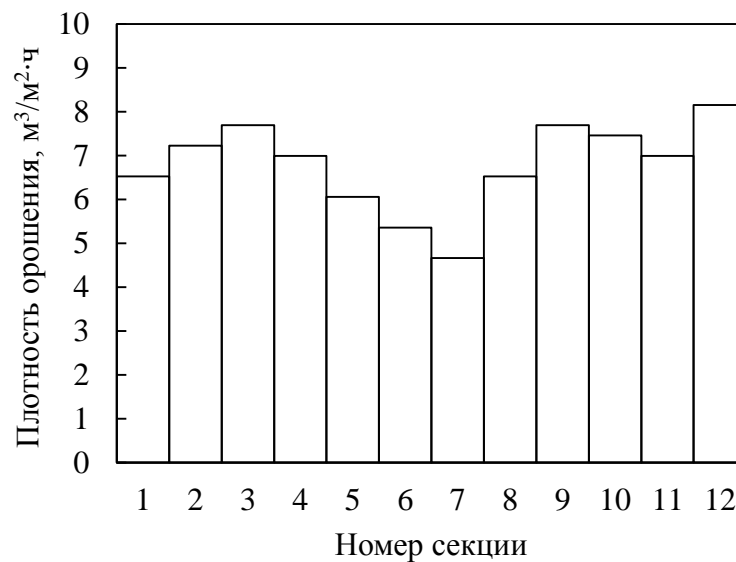


Рисунок 3.6 – Распределение плотности орошения по секциям башенной градирни БГ-1600

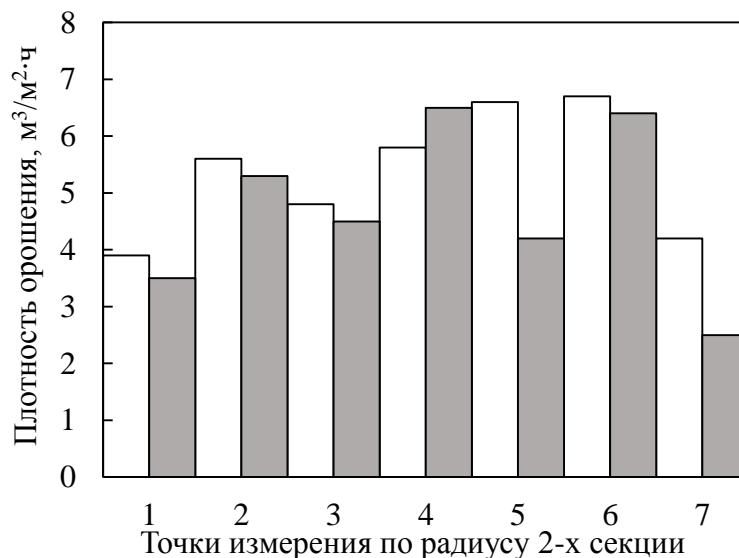


Рисунок 3.7 – Распределение плотности орошения по радиусу двух соседних секции башенной градирни БГ-1600

Анализ распределения плотности орошения позволил установить причины неравномерности орошения. К ним отнесены: неисправность трубопроводов и сопел водораспределительной системы, неправильное расположение и разрушенное состояние блоков оросителя башенной градирни. Ввиду указанных причин, необходимо учитывать неравномерность распределения орошения и ее влияние на эффективность аппарата. Однако для того, чтобы понять природу явления неравномерности, следует установить закон распределения плотности орошения. Так, методом статистических гипотез по критерию согласия Пирсона

выполнена проверка распределений плотности орошения башенных градирен БГ-2600 и БГ-1600. Экспериментально подтверждено, что статистические данные гистограмм подчиняются нормальному закону распределения.

3.4 Температурная и охлаждающая характеристики башенной градирни в условиях неравномерности потоков

Наряду с измерениями плотности орошения, одновременно были сняты показания температуры воды на уровне форсунок водораспределительной системы и на уровне бассейна 12-ти секций градирни БГ-2600. С помощью цифрового термометра с выносным датчиком (приложение Б), опущенного в мерный сосуд, фиксировалось мгновенное значение температуры воды.

Если принять, что секции башенной градирни идентичные по отношению друг к другу, то экспериментальные показатели секций можно объединить для построения рабочей характеристики. Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных о плотности орошения и перепада температуры воды, построена регрессионная модель с учетом неравномерности (рисунок 3.8).

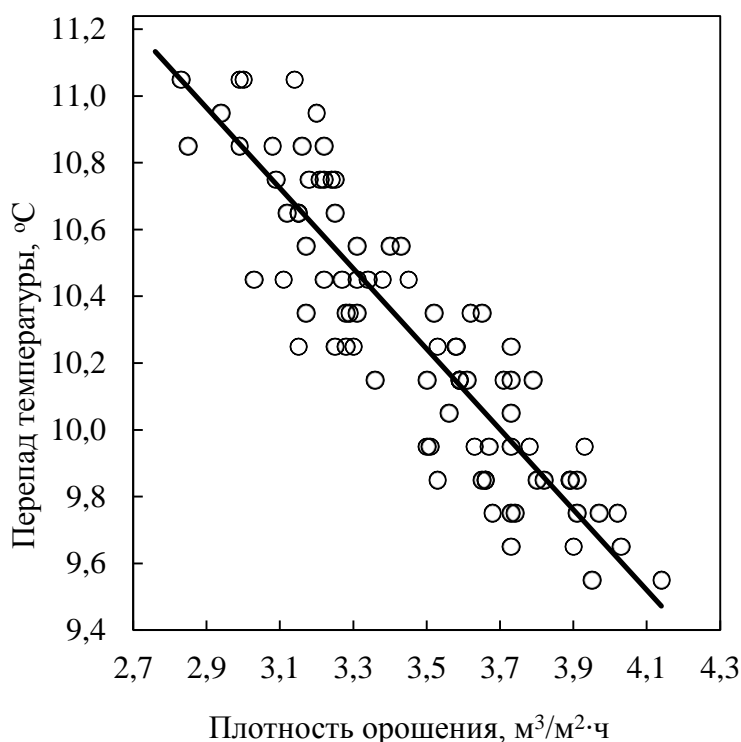


Рисунок 3.8 – Температурная характеристика с учетом неравномерности плотности орошения башенной градирни БГ-2600

Температурная характеристика описывается уравнением регрессии с коэффициентом корреляции 0,82:

$$\Delta T = -1,204 \cdot q + 14,41, \quad (34)$$

где ΔT – перепад температуры, °С; q – плотность орошения, м³/м²·ч.

Коэффициент корреляции регрессионного уравнения (35) составил 0,78, что свидетельствует о высокой степени связи. Рабочая характеристика (рисунок 3.8) отражает степень охлаждения воды и позволяет, по плотности орошения, дать оценку охлаждающей способности аппарата по секциям. Вместе с тем, немаловажным критерием оценки эффективности является влияние распределения плотности орошения на испарительную мощность.

Так, на основании полученных экспериментальных значений плотности орошения и перепада температуры, рассчитаны охладительные мощности башенной градирни по формуле (1). Построена охладительная характеристика с учетом неравномерности плотности орошения (рисунок 3.9).

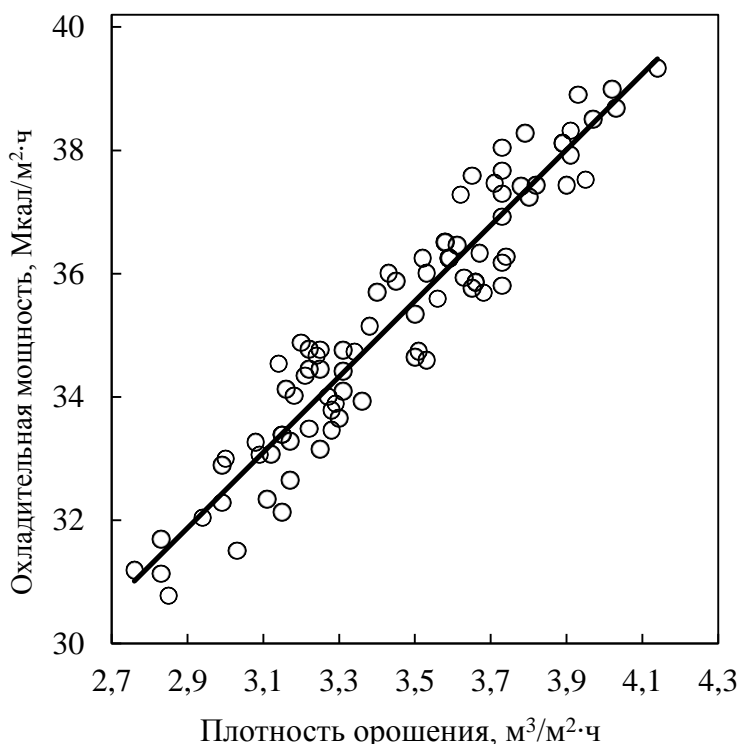


Рисунок 3.9 – Охладительная характеристика башенной градирни

Охлаждающая характеристика описывается уравнением регрессии с коэффициентом корреляции 0,91:

$$R = -6,14 \cdot q + 14,07, \quad (35)$$

где R – охлаждающая мощность, Мкал/м²·ч; q – плотность орошения, м³/м²·ч.

Коэффициент корреляции регрессионного уравнения (36) свидетельствует о высокой степени связи. Регрессионная модель охлаждающей характеристики (рисунок 3.9) позволяет проанализировать охлаждающую способность башенной градирни БГ-2600, по которым определялись «слабые» и «сильные» каждой секции.

3.5 Анализ температурной и охлаждающей характеристики башенной градирни на лабораторной модели

Несмотря на теоретически высокий показатель коэффициента корреляции температурной (рисунок 3.8) и охлаждающей характеристики (рисунок 3.9), а также ввиду внешних воздействий, оказывающих влияние на степень охлаждения, решено дополнительно провести анализ рабочих характеристик башенной градирни на лабораторной установке.

В научно-исследовательской лаборатории «Источник теплоты – тепловая сеть» КГЭУ [30,129,131,132], по показаниям гигрометра (приложение Б), при температуре окружающей среды по сухому термометру 24,5 °С и относительной влажности 79 % на установке УВО – 0,3 площадью орошения 0,3 м² (рисунок 2.16) выполнены замеры перепада температур и скорости воздуха в зависимости от плотности орошения. Расход воды по рабочему диапазону циркуляционного насоса составил от 0,99 – 1,98 м³/ч.

Методика эксперимента была следующей. В чашу установки набиралось 20 литров воды для ее циркуляции в системе УВО. Выбиралась первая ступень циркуляционного насоса с мощностью 20 Вт и соответствующим расходом воды от 0,99 до 1,26 м³/ч. В пределах рабочего диапазона, расход воды регулировался с помощью вентиля, установленного на подающей трубке воды в установку. Фиксировались четыре положения вентиля, поворот на: 45°, 90°, 135°, 180°. На следующих этапах

выбиралась 2-ая (40 Вт) и 3-я (60 Вт) ступени циркуляционного насоса, с диапазоном расхода воды от 1,35 до 1,62 м³/ч и от 1,71 до 1,98 м³/ч соответственно (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Регулирование подачи воды лабораторной установки

Скорость насоса	Мощность насоса, Вт	Угол поворота вентиля, °	Расход воды, м ³ /ч
1	20	45	0,99
		90	1,08
		135	1,17
		180	1,26
2	40	45	1,35
		90	1,44
		135	1,53
		180	1,62
3	60	45	1,71
		90	1,80
		135	1,89
		180	1,98

Начальная температура воды измерялась с помощью обычной термопары, установленной на латунной трубке, имитирующей пучок труб конденсатора. В трубке, обвитой нагревательным кабелем, температура воды поддерживалась до 30 °С. Цифровым термометром (приложение Б), опущенного в чашу установки, измерялось мгновенное значение конечной температуры охлаждения воды.

При площади орошения установки 0,3 м², и значений расходов воды, рассчитаны соответствующие значения плотности орошения:

$$q = \frac{G}{S}, \quad (36)$$

где q – плотность орошения, м³/м²·ч, G – расход воды на установку, м³/ч, S – площадь орошения установки, м².

Так, получены зависимости перепада температуры от плотности орошения, при соответствующих ступенях циркуляционного насоса. Результаты были объединены в общую зависимость температурной характеристики лабораторной установки (рисунок 3.10).

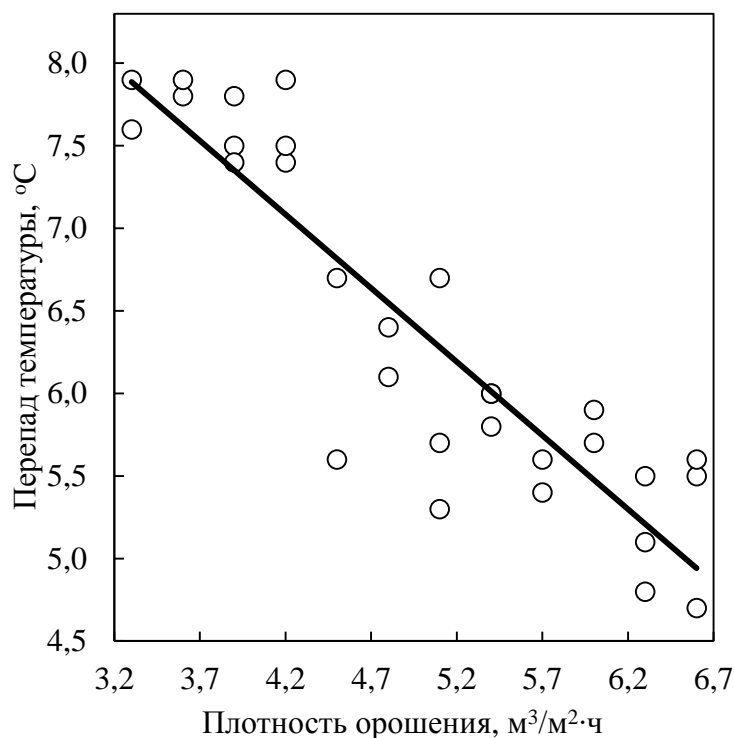


Рисунок 3.10 – Температурная характеристика лабораторной установки

Зависимость температурной характеристики описывается линейным уравнением регрессии с коэффициентом корреляции 0,81:

$$\Delta T = -0,89 \cdot q + 10,83, \quad (37)$$

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

Таким образом, эксперимент показал сходимость рабочей характеристики башенной градирни (рисунок 3.8) и лабораторной установки (рисунок 3.10). К тому же, коэффициент корреляции зависимости перепада температуры от плотности орошения лабораторной установки составил 0,81, что говорит о высокой степени связи перепада температуры и плотности орошения.

Применив формулу расчета охладительной мощности (1), были рассчитаны их значения, данные были сгруппированы и проанализированы с помощью регрессионного и корреляционного анализа. Результаты объединены для построения зависимости охладительной характеристики от плотности орошения лабораторной установки (рисунок 3.11).

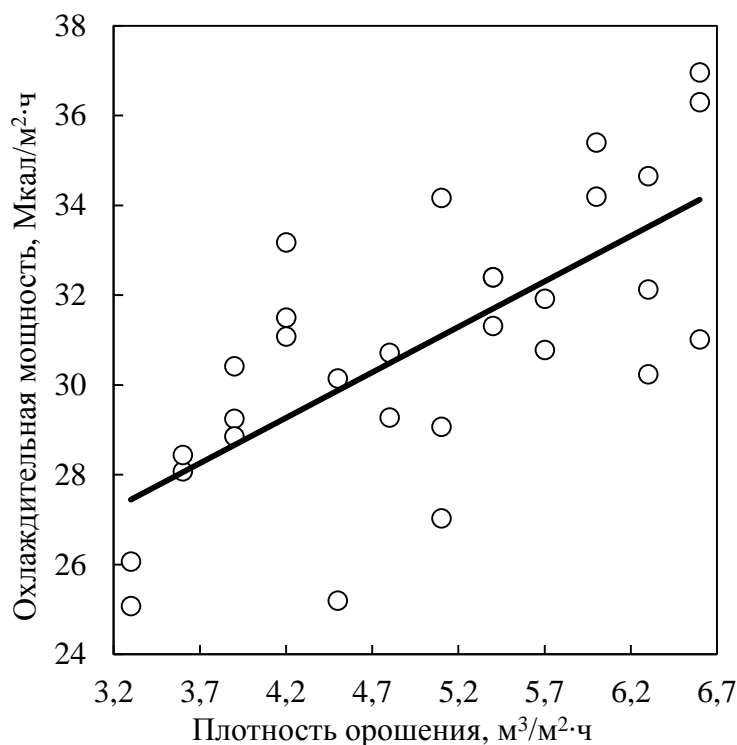


Рисунок 3.11 – Охлаждательная характеристика лабораторной установки

Зависимость охлаждающей характеристики описывается линейным уравнением регрессии с коэффициентом корреляции 0,51:

$$R = 2,024 \cdot q + 20,77, \quad (38)$$

где R – охлаждательная мощность, Мкал/м²·ч; q – плотность орошения, м³/м²·ч.

Так, на лабораторной установке получено подтверждение рабочих характеристик натурной башенной градирни. Сравнивая характер зависимостей лабораторной установки и зависимостей башенной градирни, следует отметить, что их разница только в том, что рабочие характеристики башенной градирни построены с учетом причастным им неравномерности потоков, а рабочие характеристики лабораторной установки – при равномерном распределении потоков, поскольку в лабораторных условиях неравномерности практически отсутствуют. Полученные температурная и охлаждательная характеристики башенной градирни БГ-2600 позволяют оценить эффективность с учетом неравномерности распределения плотности орошения башенной градирни.

3.6 Выводы по главе

Теоретически установлено, что распределение плотности орошения в башенных градирнях подчиняются нормальному закону распределения.

Экспериментальное исследование неравномерности распределения плотности орошения воды башенной градирни БГ-2600 позволило установить наличие значительной неравномерности распределения плотности орошения воды. При средней плотности орошения $3,41 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, неравномерность плотности орошения составила 33 %. В свою очередь, исследованиями распределения плотности орошения башенной градирни БГ-1600, установлена неравномерность плотности орошения величиной 15 % при ее среднем значении $6,8 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Экспериментально подтверждено, что распределение плотности орошения по секциям башенных градирен подчиняется нормальному закону распределения. Получена функция нормального распределения безразмерной плотности орошения, что позволяет охарактеризовать распределение плотности орошения башенных градирен.

К причинам неравномерности орошения отнесены: неисправность трубопроводов и сопел водораспределительной системы, неправильное расположение и разрушенное состояние блоков оросителя башенной градирни.

Отражено существенное влияние неравномерности орошения на эффективность башенной градирни. Предложено учитывать неравномерность плотности орошения статистической функцией средней плотности орошения. Выявлено, что показатель интенсивности испарения снижается с увеличением неравномерности распределения плотности орошения.

Построены температурная и охладительная характеристики башенной градирни с учетом неравномерности орошения воды и подтверждены на лабораторной установке. Рабочие характеристики башенной градирни внедрены на Набережночелнинскую ТЭЦ и используются при планировании гидравлических режимов аппарата.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА КОРРЕКТИРОВКИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА

На основании результатов проведенных исследований, с установлением нормального закона распределения воды и воздуха показано, что влияющие факторы действуют независимо друг от друга. Это позволяет произвести корректировку характеристик башенных градирен. Так, предложена методика корректировки рабочих характеристик башенной градирни с учетом неравномерности распределения плотности орошения и воздуха. Методика позволяет строить фактические характеристики башенной градирни с учетом неравномерности воды и воздуха. Последовательность шагов построения как нормативных, так и скорректированных характеристик приведена ниже.

4.1 Построение нормативных характеристик

На первом этапе строятся нормативная температурная и охладительная характеристики башенной испарительной градирни [84,101,122]. Например, последовательность построения температурной характеристики по методике [122] следующая:

1) Из конструктивных параметров площади орошения, высоты башни, типа и параметров оросителя, подбирается номограмма аппарата и показатель корректировки на совпадение с натурными данными Δc из таблицы 1 [122].

2) Далее, выбираются рабочие плотности орошения (5 – 6 значений) и перепад температуры воды по паспорту аппарата.

3) По номограмме определяется конечная температура охлажденной воды t_2 для рабочих плотностей орошения и перепада температур. Так, согласно метеорологической температуре θ и относительной влажности воздуха φ , паспортным данным плотности орошения q и перепада температуры воды Δt , руководствуясь ключом $\theta \rightarrow \varphi \rightarrow q\Delta t \rightarrow t_2$, на номограмме проводят указательные линии и определяют конечную температуру охлаждения t_2 .

4) Определяются корректировки на перепад температуры Δt_{δ} и скорости ветра Δw_{δ} башенной градирни.

5) Учитывая конечную температуру охлажденной воды и значения корректировок на перепад температуры и скорости ветра, рассчитывается нормативная температура охлажденной воды башенной градирни:

$$t_2^H = t_2 + \Delta t_{\delta} + \Delta w_{\delta} + \Delta c, \quad (39)$$

где t_2 – конечная температура охлажденной воды, °С; Δt_{δ} – корректировка на перепад температуры, °С; Δw_{δ} – корректировка скорости ветра, м/с; Δc – корректировка на совпадение с натурными данными.

6) Таким образом, для 5 – 6 значений плотности орошения q , рассчитываются нормативные температуры охлажденной воды t_2^H .

7) Для построения охладительной характеристики, рассчитываются значения охлаждающих мощностей по классической формуле:

$$R = q \cdot \Delta t, \text{ Мкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (40)$$

где q – плотность орошения, м³/м²·ч; Δt – перепад температуры, °С.

4.2 Построение скорректированных характеристик

На следующем этапе выполняется корректировка нормативной температурной и охладительной характеристик с учетом неравномерности распределения плотности орошения воды. Процесс корректировки состоит из следующих шагов:

1) Для выбранных рабочих плотностей орошения q , с учетом экспериментально установленной безразмерной дисперсии распределения плотности орошения σ^2 , рассчитываются гистограммы распределения орошения по секциям башенной градирни. Величина безразмерной дисперсии характеризует степень неравномерности при любой плотности орошения. Для каждой секции гистограмм распределения плотности орошения, по номограмме определяются нормативные температуры охлажденной воды и строятся гистограммы перепада температур.

2) Для каждой гистограммы перепада температур рассчитывается ее средневзвешенное значение по формуле:

$$\Delta T_s = \frac{\sum \Delta T_i \cdot q_i}{\sum q_i}, \quad (41)$$

где q – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; ΔT_i – перепад температуры, $^{\circ}\text{C}$; i – секция.

3) По значениям плотностей орошения и средневзвешенным перепадам температур строится скорректированная температурная характеристика башенной градирни.

4) Для построения скорректированной охлаждающей характеристики, рассчитываются средневзвешенные значения охлаждающих мощностей:

$$R_s = q_{\text{ср}} \cdot \Delta T_s, \text{ Мкал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (42)$$

где $q_{\text{ср}}$ – средняя плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; ΔT_s – средневзвешенный перепад температуры, $^{\circ}\text{C}$.

4.3 Рабочие характеристики башенной градирни БГ-2600

Применим методику корректировки рабочих характеристик башенной градирни в условиях неравномерности распределения плотности орошения и воздуха на примере башенной градирни БГ-2600 Набережночелнинской ТЭЦ.

1. На первом этапе построим нормативную характеристику БГ-2600 по методике [122].

1) Определим подходящую номограмму и показатель корректировки на совпадение с натурными данными Δc . Для башенной градирни БГ-2600 высотой 71 м, $\Delta c = -0,3$.

2) Выберем рабочие плотности орошения (6 значений) и перепад температуры воды по паспорту. Из паспорта, башенная градирня работает в диапазоне плотностей орошения q от 2 до 8 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ и при перепаде температуры $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$.

3) Определим конечные температуры охлажденной воды t_2 по номограмме для рабочих плотностей орошения БГ-2600 [122]. Например, при температуре воздуха $\theta = 28^{\circ}\text{C}$ и ее относительной влажности $\varphi = 50\%$,

плотности орошения $q = 4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и перепаде температуры $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, по указательным линиям конечная температура воды $t_2 = 30,25 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 4.1).

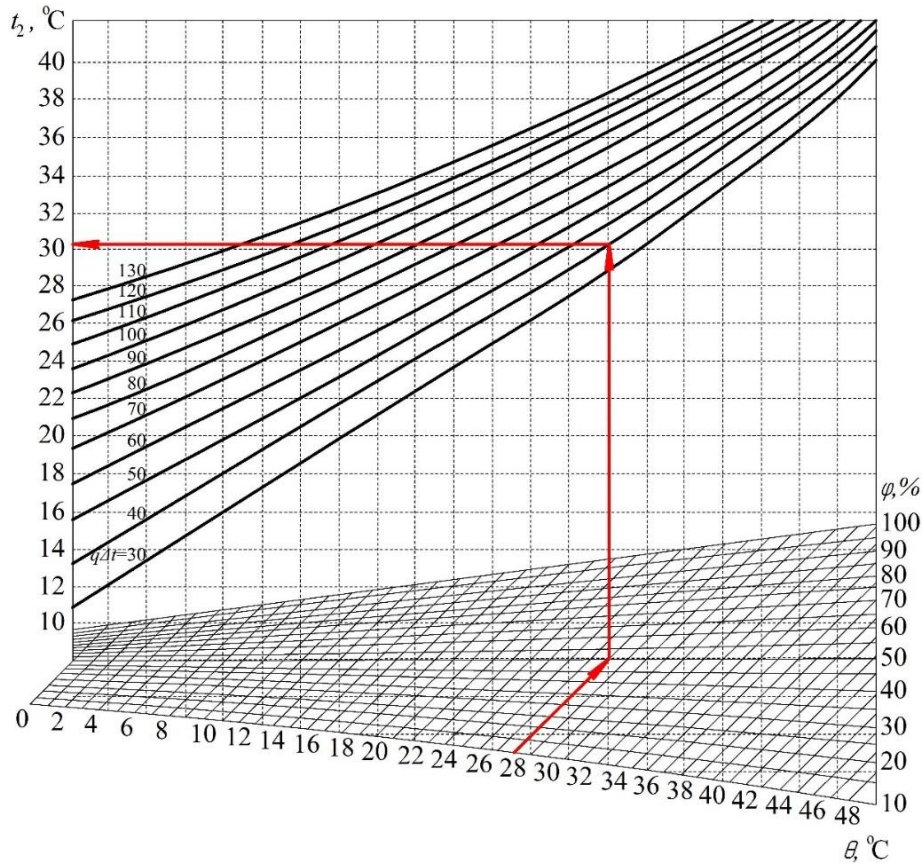


Рисунок 4.1 – Номограмма башенной градирни БГ-2600

4) Обозначим корректировки на перепад температуры Δt_δ и скорости ветра Δw_δ . Корректировка Δt_δ на перепад температуры воды Δt рассчитывается по рисунок 4.2 [122]. Далее, по рисунку 4.3, определяется корректировка Δw_δ на скорость ветра w .

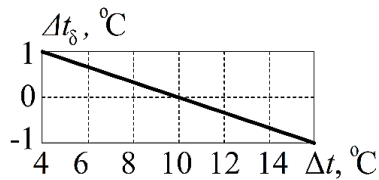


Рисунок 4.2 – Корректировка на перепад температуры воды

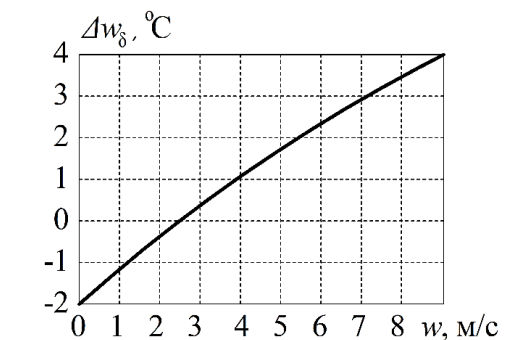


Рисунок 4.3 – Корректировка на скорость ветра

Для БГ-2600, если перепад температуры воды $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, следовательно, корректировка $\Delta t_\delta = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. При скорости ветра $w = 2,1 \text{ м/с}$, корректировка на скорость ветра $\Delta w_\delta = -0,3 \text{ м/с}$.

5) Рассчитаем по формуле (39) нормативную конечную температуру охлажденной воды t^H_2 . При конечной температуре охлажденной воды по номограмме $t_2 = 30,25 \text{ }^\circ\text{C}$ и корректировками $\Delta c = -0,3$, $\Delta t_\delta = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta w_\delta = -0,3 \text{ м/с}$, нормативная температура охлажденной воды t^H_2 составила $29,65 \text{ }^\circ\text{C}$. На основании полученных 6 значений плотности орошения q и их нормативных температур охлажденной воды t^H_2 , построена нормативная температурная характеристика перепада температур и конечной температуры охлаждения башенной градирни БГ-2600 (рисунок 4.4, 4.5).

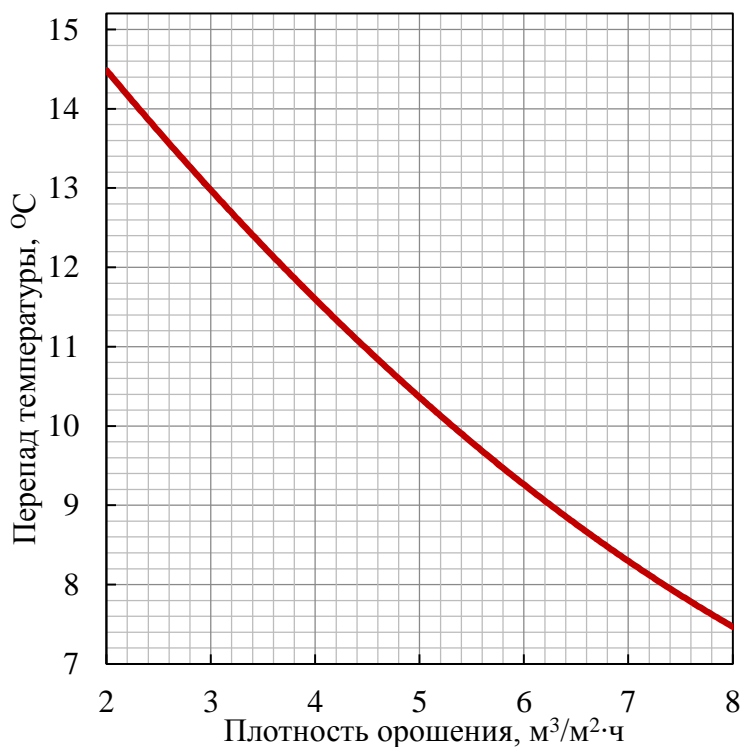


Рисунок 4.4 – Нормативная температурная характеристика БГ-2600

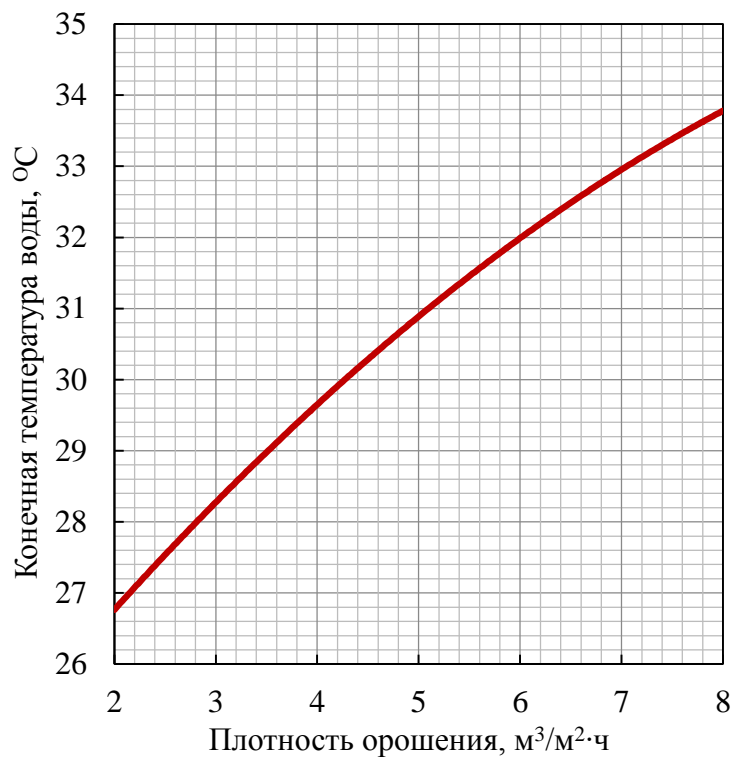


Рисунок 4.5 – Нормативная температурная характеристика БГ-2600

б) Используя формулу (40), рассчитаны значения охладительных мощностей R . Построена нормативная охладительная характеристика башенной градирни БГ-2600 (рисунок 4.6).

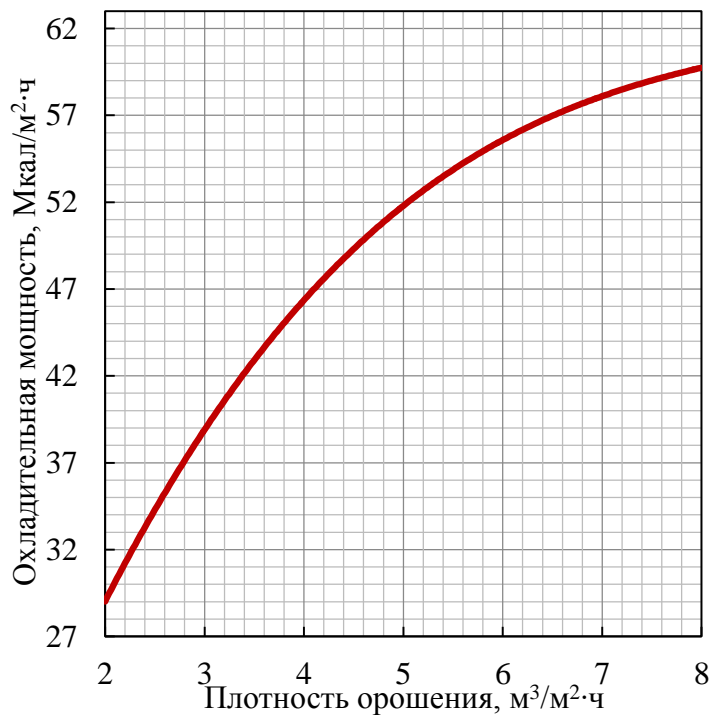


Рисунок 4.6 – Нормативная охладительная характеристика БГ-2600

2. На втором этапе, построим скорректированные рабочие характеристики с учетом неравномерности потоков воды и воздуха БГ-2600.

1) С учетом экспериментально установленной безразмерной дисперсии $\sigma^2 = 0,0092$ башенной градирни БГ-2600, построим гистограммы распределения плотности орошения q (рисунки 4.7 – 4.13).

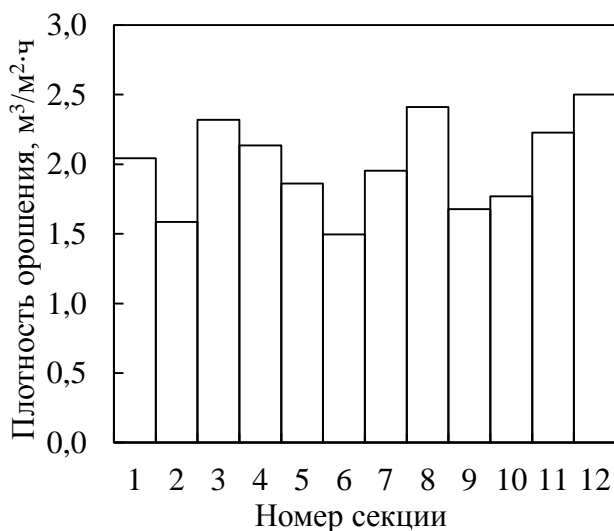


Рисунок 4.7 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

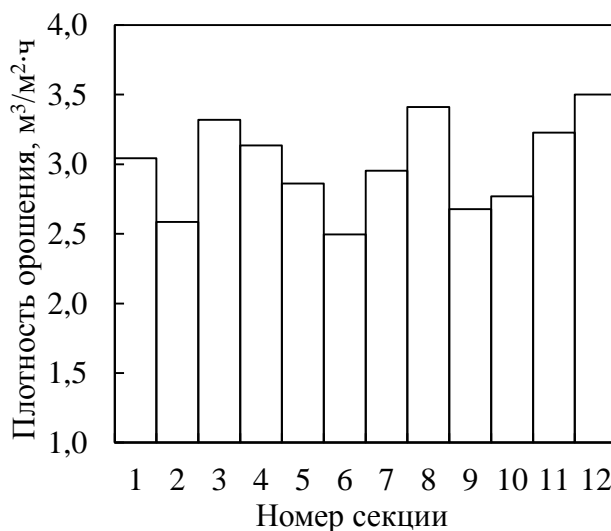


Рисунок 4.8 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

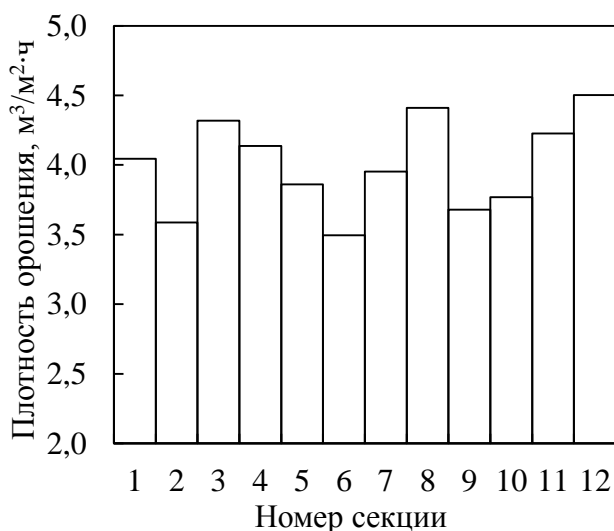


Рисунок 4.9 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

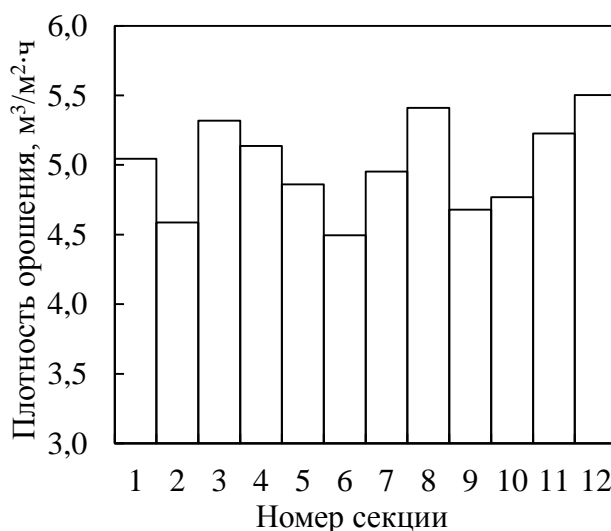


Рисунок 4.10 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

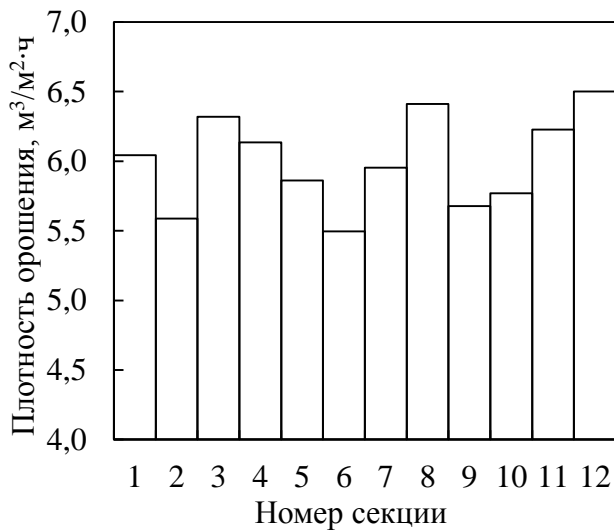


Рисунок 4.11 – Гистограмма

распределения плотности орошения

при $q_c = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

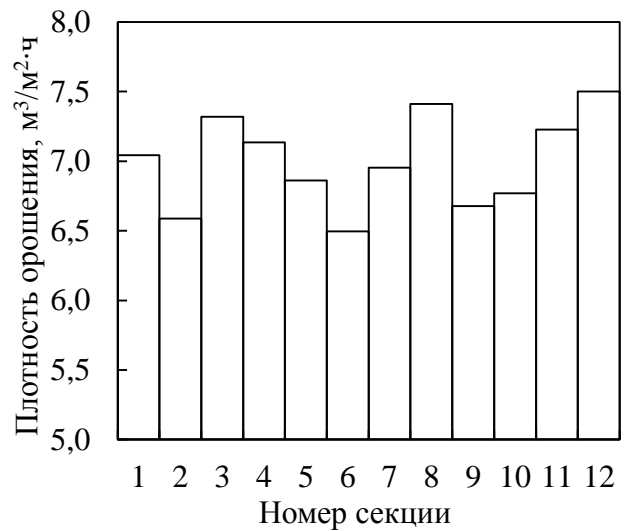


Рисунок 4.12 – Гистограмма

распределения плотности орошения

при $q_c = 7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

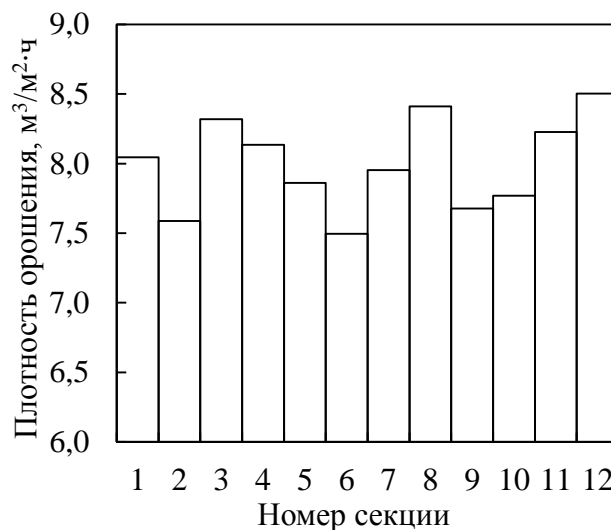


Рисунок 4.13 – Гистограмма распределения

плотности орошения при $q_c = 8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

2) Определим по номограмме нормативные температуры охлажденной воды t^H_2 и построим гистограммы перепада температур ΔT . Ниже приведены гистограммы распределения перепада температур ΔT башенной градирни БГ-2600 (рисунок 4.14 – 4.20).

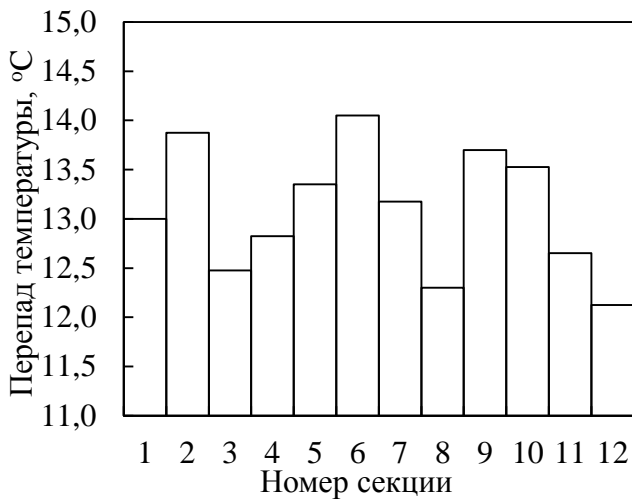


Рисунок 4.14 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

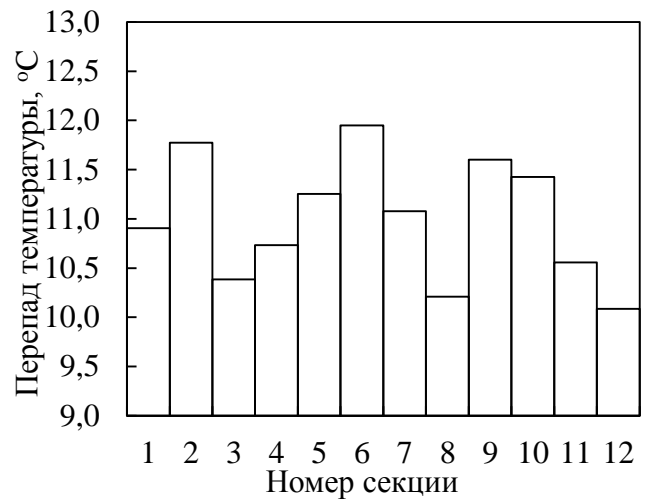


Рисунок 4.15 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

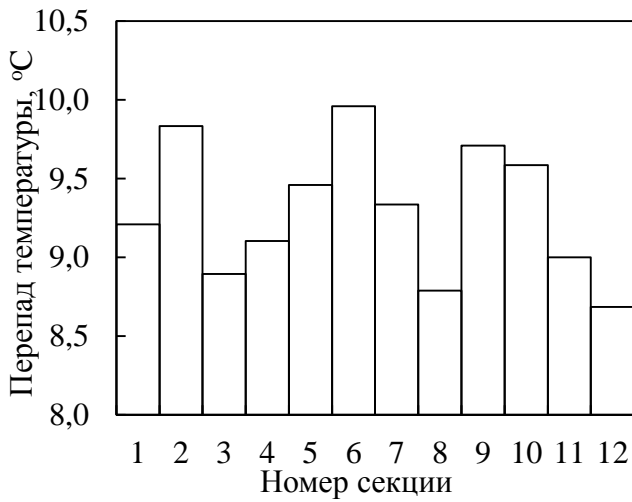


Рисунок 4.16 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

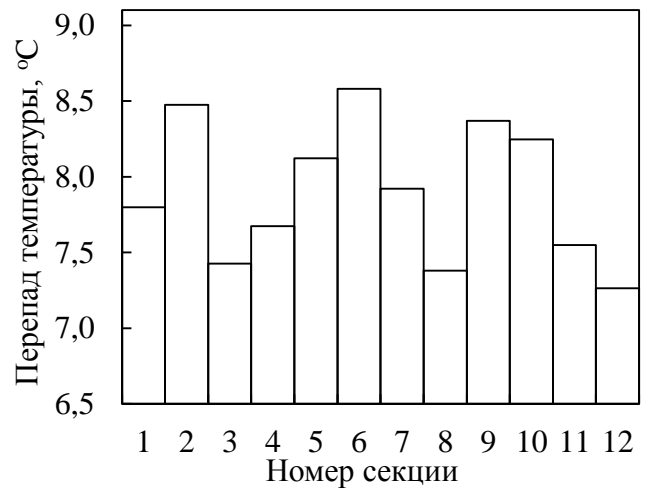


Рисунок 4.17 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

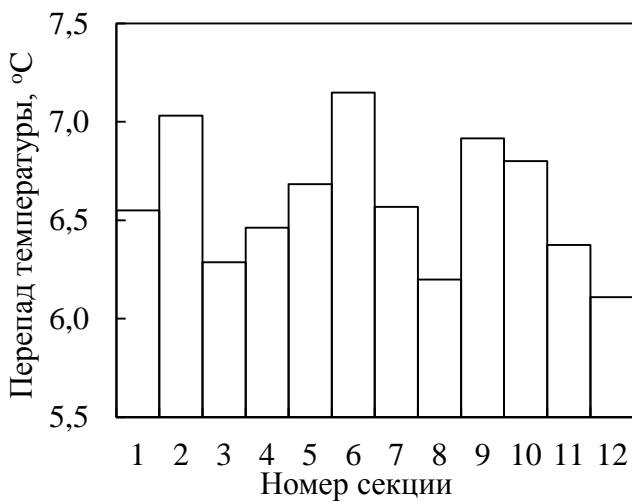


Рисунок 4.18 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

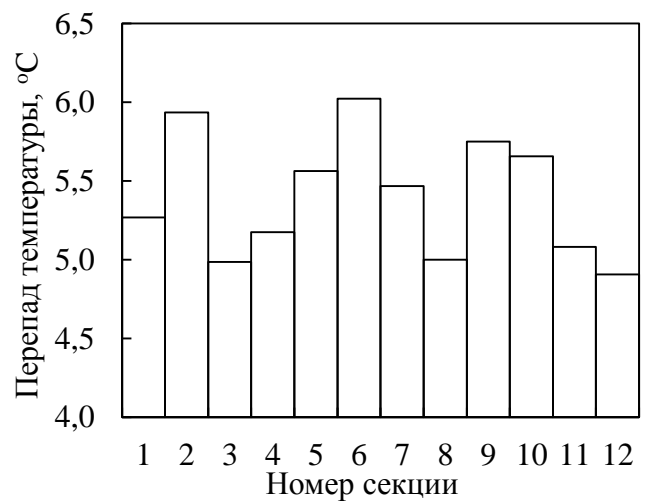


Рисунок 4.19 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

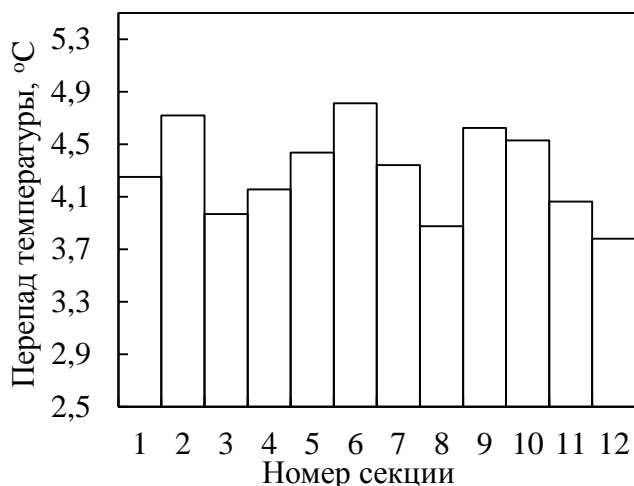


Рисунок 4.20 – Гистограмма распределения ΔT при $q_c = 8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

3) Рассчитаем средневзвешенное значение перепада температур по формуле (41) и построим скорректированную температурные характеристики башенной градирни БГ-2600. Для наглядности, скорректированная и температурная характеристики перепада температур и конечной температуры охлаждения представлены в единой плоскости (рисунок 4.21, 4.22).

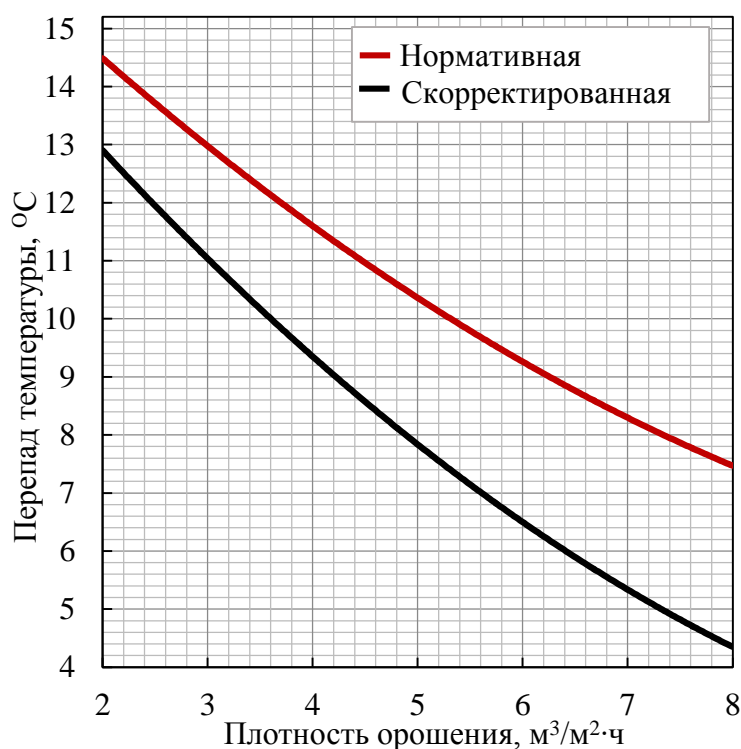


Рисунок 4.21 – Температурные характеристики башенной градирни БГ-2600

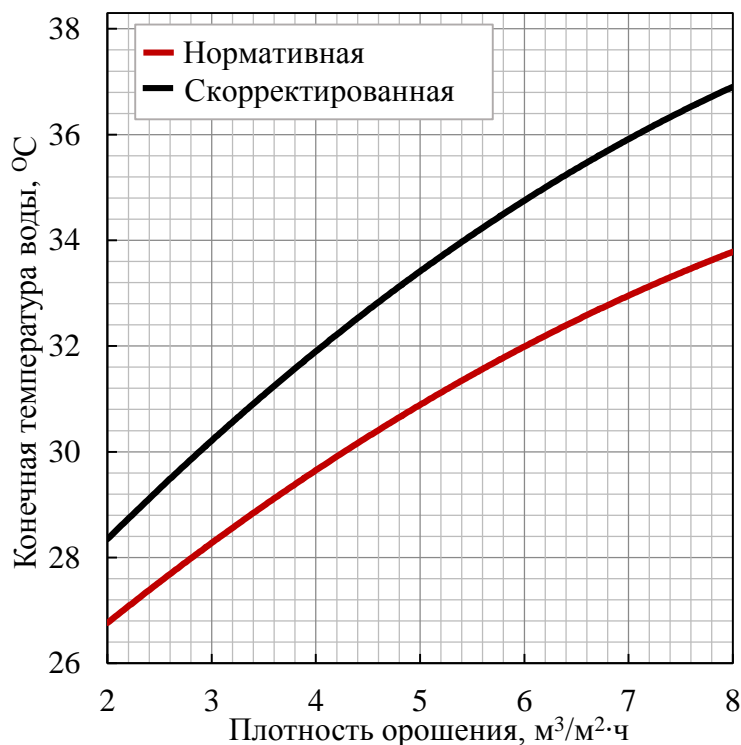


Рисунок 4.22 – Температурные характеристики башенной градирни БГ-2600

4) Рассчитаем средневзвешенные значения охлаждающих мощностей R_s по формуле (41) и построим скорректированную охлаждающую характеристику БГ-2600. Скорректированная и нормативная характеристики представлены в одной плоскости (рисунок 4.23).

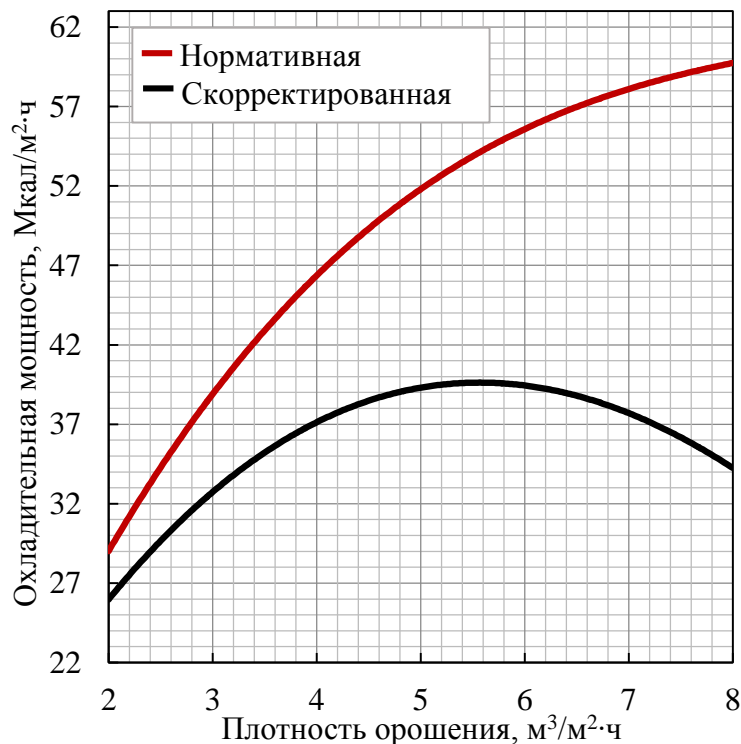


Рисунок 4.23 – Охлаждающие характеристики башенной градирни БГ-2600

Проведен анализ полученных характеристик, а также влияния неравномерности потоков на процесс охлаждения воды в башенной градирне. Анализ температурных характеристик показал, что неравномерность распределения плотности орошения и воздуха величиной 33 % и 20,8 % соответственно, приводит к снижению перепада температуры, в среднем, на 2 °С (рисунок 4.21, 4.22). Отклонение скорректированной охлаждающей характеристики от нормативной ведет к снижению охлаждающей мощности на 15 Мкал/м²·ч. К тому же, в диапазоне плотности орошения от 5 м³/м²·ч до 8 м³/м²·ч происходит необратимый процесс спада мощности аппарата (рисунок 4.23). С увеличением плотности орошения, по причине неравномерного распределения воды и воздуха (уменьшение живого сечения контакта воды и воздуха), воздушный поток не справляется с гидравлической нагрузкой, таким образом неполноценно выполняя теплосъем в единицу времени. В совокупности, это свидетельствует о значительном влиянии неравномерности потоков воды и воздуха на эффективность башенной градирни, пренебрежение которого ведет к перерасходу топлива на ТЭС.

Полученные рабочие характеристики башенной градирни БГ-2600 внедрены на Набережночелнинской ТЭЦ и используются при планировании гидравлической нагрузки охлаждающего устройства, о чем свидетельствует акт (приложение В).

4.4 Рабочие характеристики башенной градирни БГ-1600

С целью дополнительной проверки, методика апробирована на примере башенной градирни БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ. Инженерами известной компании ООО «ЭКОТЭП», оказывающих услуги по строительству, обследованию, реконструкции и модернизации, а также по натурным испытаниям градирен [88], были сняты экспериментальные данные распределения плотности орошения и потока воздуха БГ-1600. Полученные данные были подвергнут обработке и, в дальнейшем, построены рабочие характеристики башенной градирни БГ-1600.

1. На первом этапе построим нормативную характеристику башенной градирни БГ-1600 по методике [89].

1) Обозначим подходящую номограмму, рабочие плотности орошения (6 значений) и метеоусловия и определим конечные температуры t_2 башенной градирни БГ-1600. Например, при температуре наружного воздуха $\theta = 18,8\text{ }^\circ\text{C}$, относительной влажности наружного воздуха $\varphi = 50\%$, плотности орошения $q = 8\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и перепаде температуры воды $\Delta t = 8\text{ }^\circ\text{C}$, конечная температура охлажденной воды t_2 составит $26,8\text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 4.24).

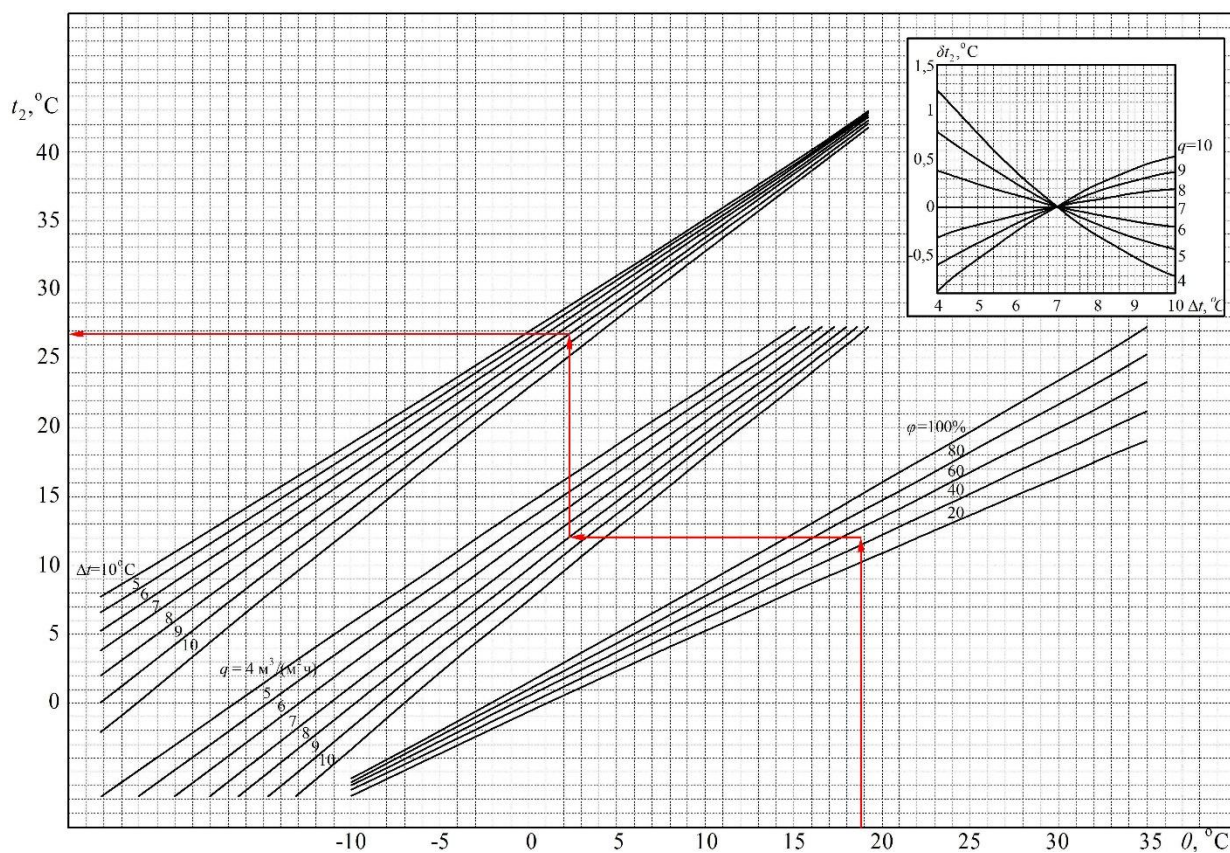


Рисунок 4.24 – Определение конечной температуры воды

2) Выберем поправку к конечной температуре воды δt_2 (рисунок 4.25). Например, при плотности орошения $q = 8\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и перепаде температуры воды $\Delta t = 8\text{ }^\circ\text{C}$, поправка δt_2 составит $0,1\text{ }^\circ\text{C}$.

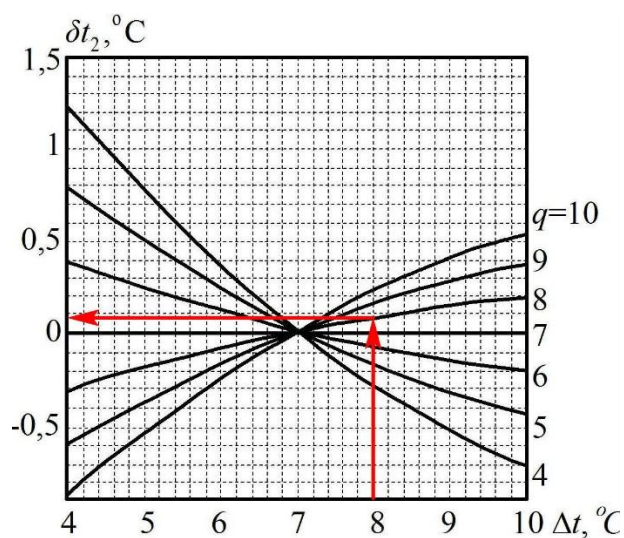


Рисунок 4.25 – Поправка к конечной температуре воды δt_2

3) Рассчитаем значения нормативной температуры воды t^H_2 с учетом поправки δt_2 по формуле $t^H_2 = t_2 - \delta t_2$. На основании 6 значений плотности орошения q и нормативных температур воды t^H_2 , построим нормативные температурные характеристики перепада температур и конечно температуры охлаждения БГ-1600 (рисунок 4.26, 4.27).

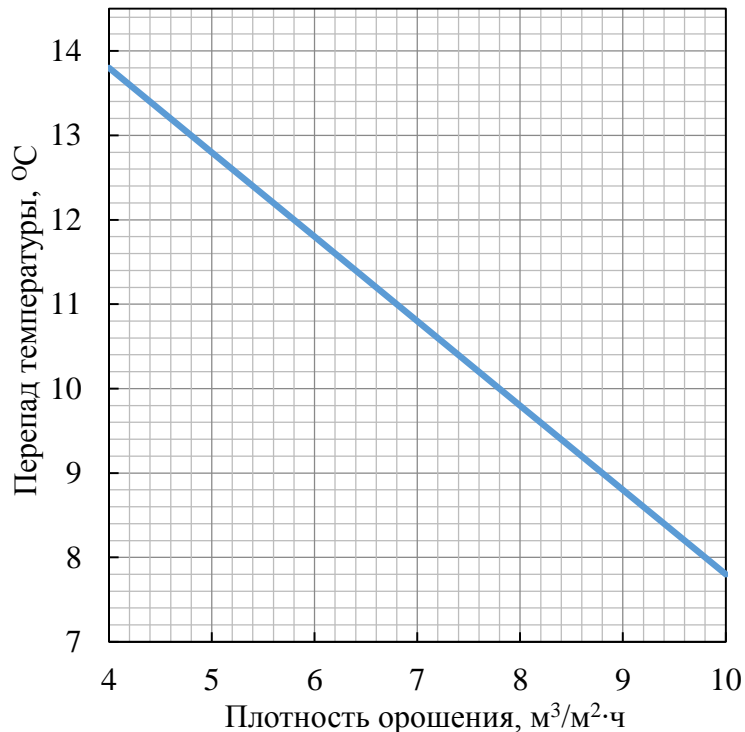


Рисунок 4.26 – Нормативная температурная характеристика БГ-1600

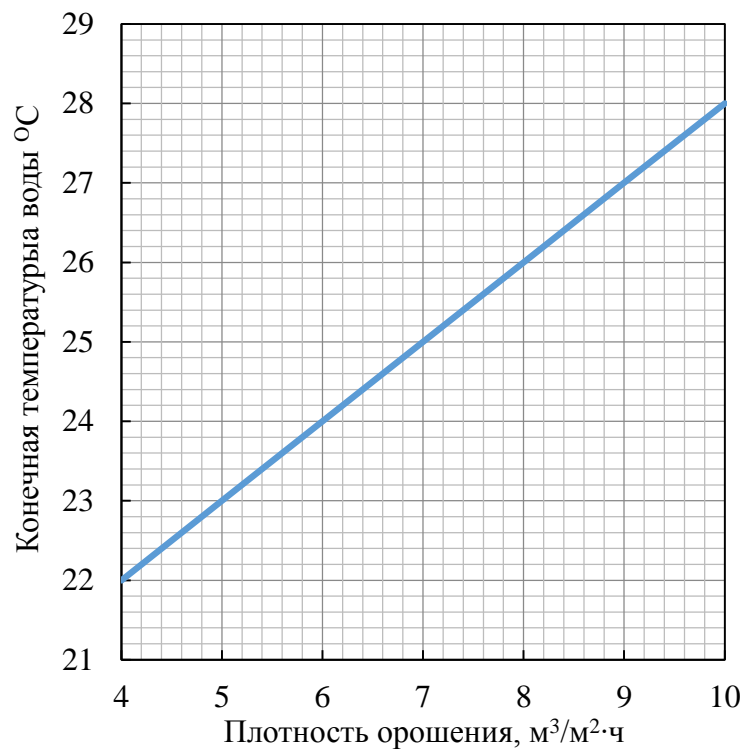


Рисунок 4.27 – Нормативная температурная характеристика БГ-1600

4) Используя формулу (40), рассчитаем значения охлаждающих мощностей R . Построим нормативную охладительную характеристику башенной градирни БГ-1600 (рисунок 4.28).

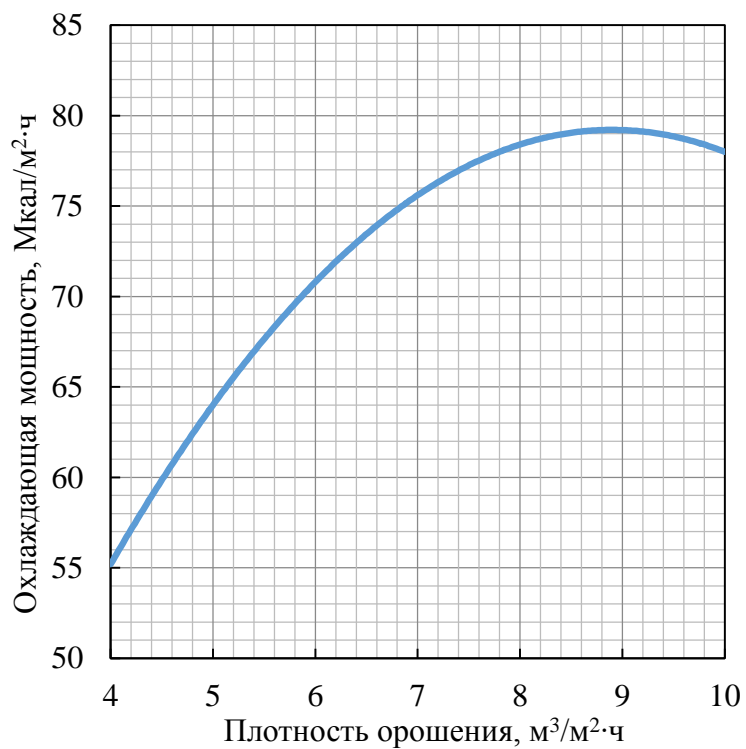


Рисунок 4.28 – Нормативная охладительная характеристика БГ-1600

2. На втором этапе, построим скорректированные рабочие характеристики с учетом неравномерности потоков воды и воздуха БГ-1600.

1) С учетом экспериментально установленной безразмерной дисперсии $\sigma^2 = 0,14$ башенной градирни БГ-1600, построим гистограммы распределения плотности орошения q (рисунки 4.29 – 4.35).

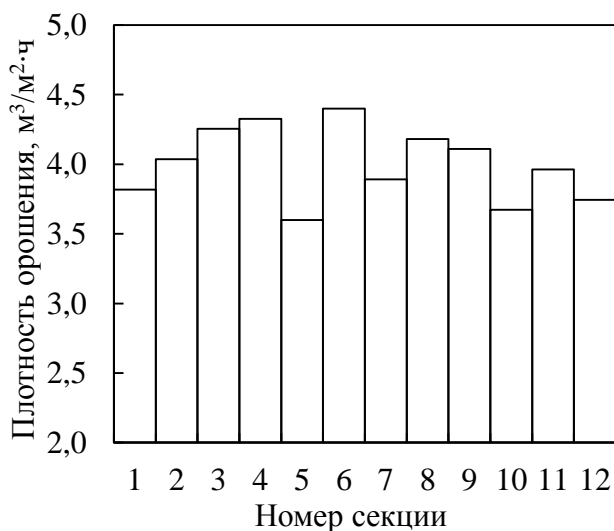


Рисунок 4.29 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

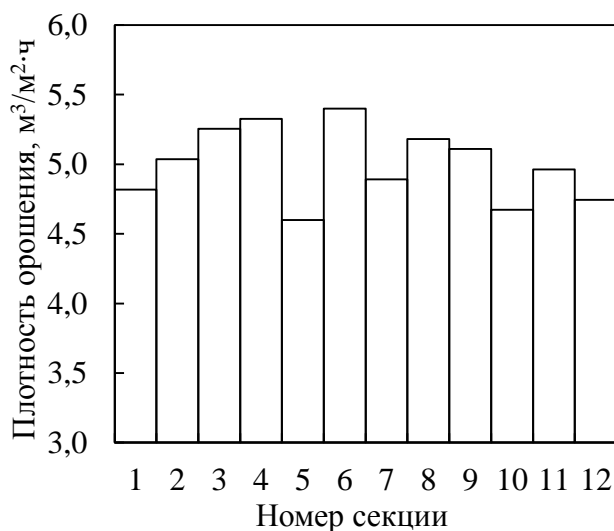


Рисунок 4.30 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

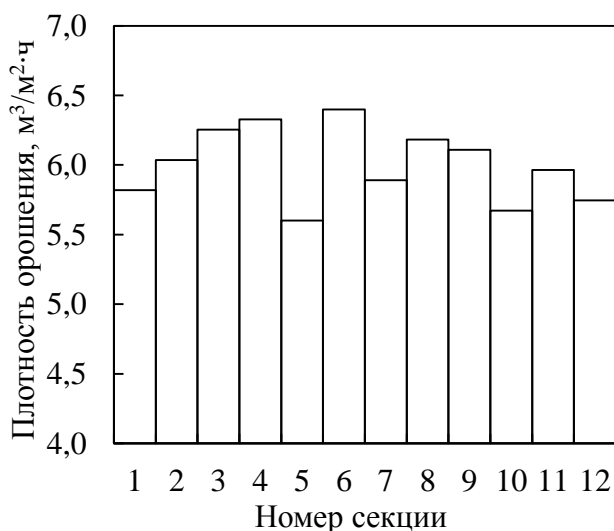


Рисунок 4.31 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

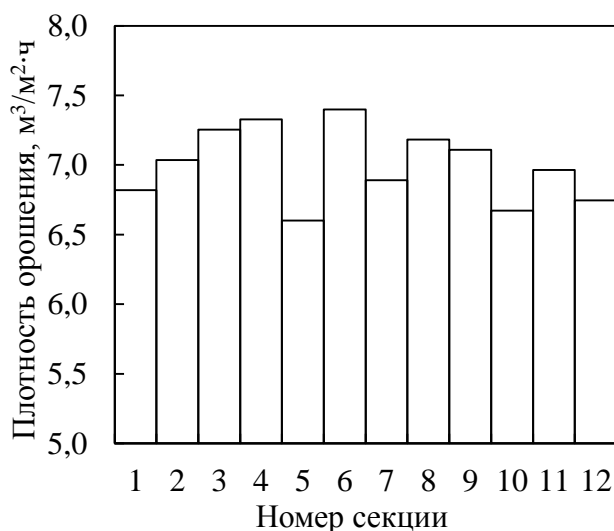


Рисунок 4.32 – Гистограмма распределения плотности орошения при $q_c = 7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

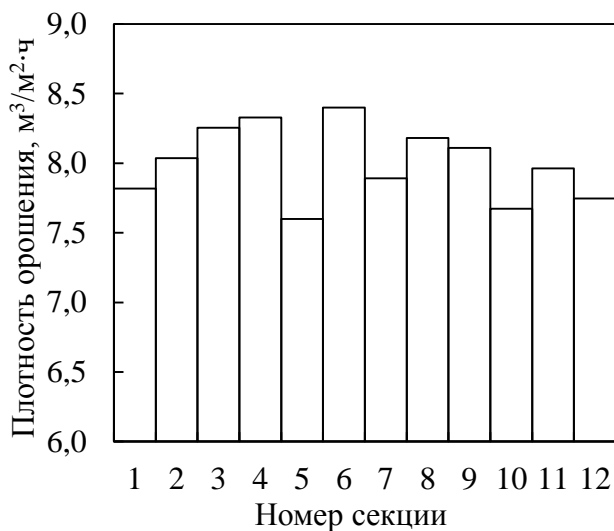


Рисунок 4.33 – Гистограмма

распределения плотности орошения

при $q_c = 8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

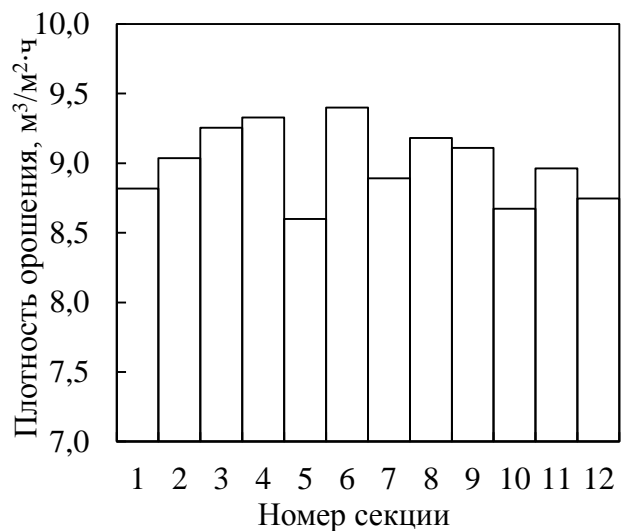


Рисунок 4.34 – Гистограмма

распределения плотности орошения

при $q_c = 9 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

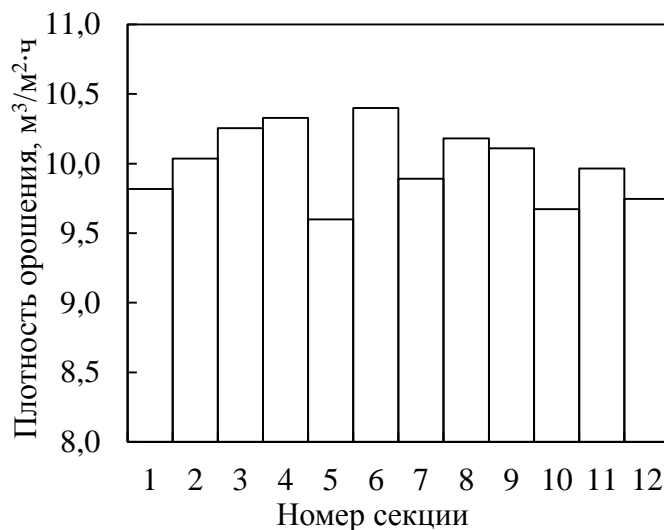


Рисунок 4.35 – Гистограмма распределения

плотности орошения при $q_c = 8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

2) Определим по номограмме нормативные температуры охлажденной воды t^H_2 и построим гистограммы перепада температур ΔT . Ниже приведены гистограммы распределения перепада температур ΔT башенной градирни БГ-1600 (рисунок 4.36 – 4.42).

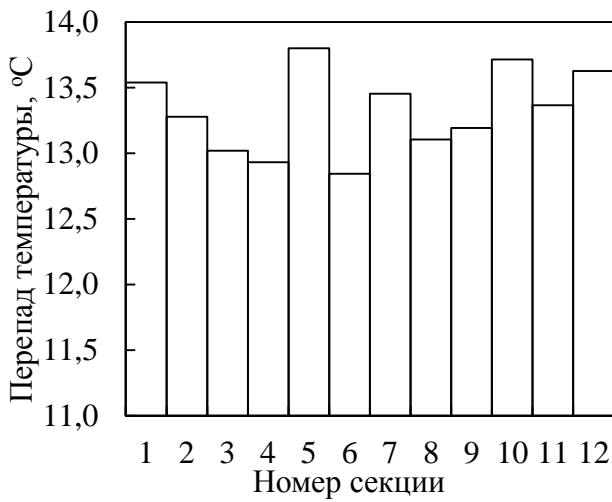


Рисунок 4.36 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

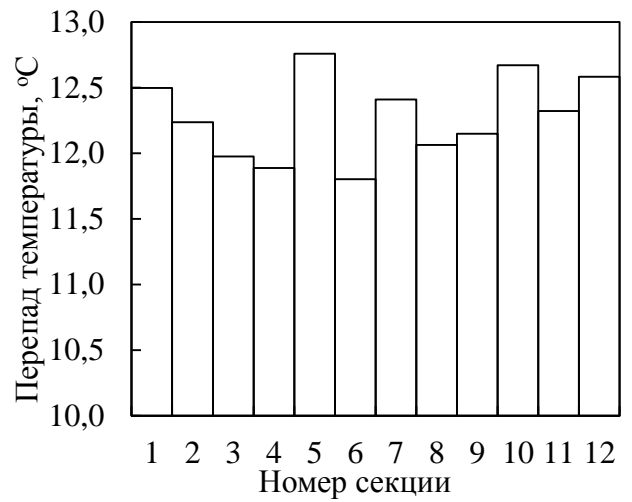


Рисунок 4.37 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

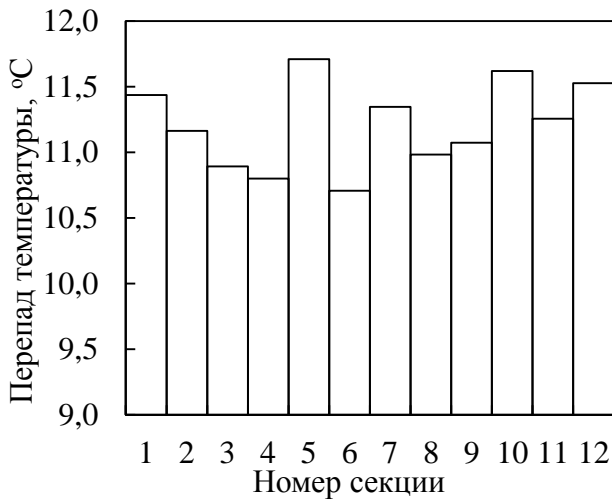


Рисунок 4.38 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

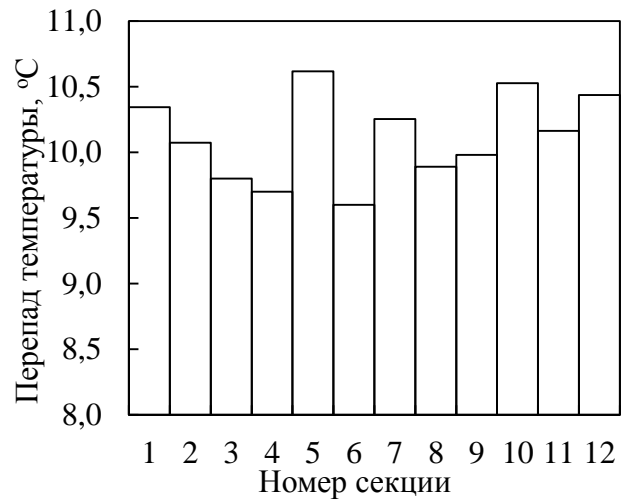


Рисунок 4.39 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

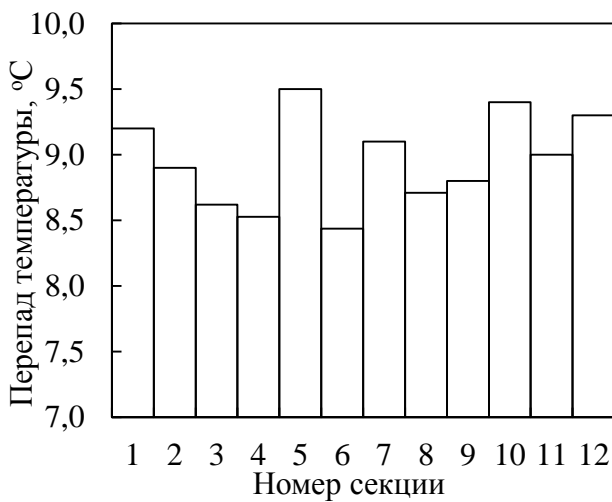


Рисунок 4.40 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

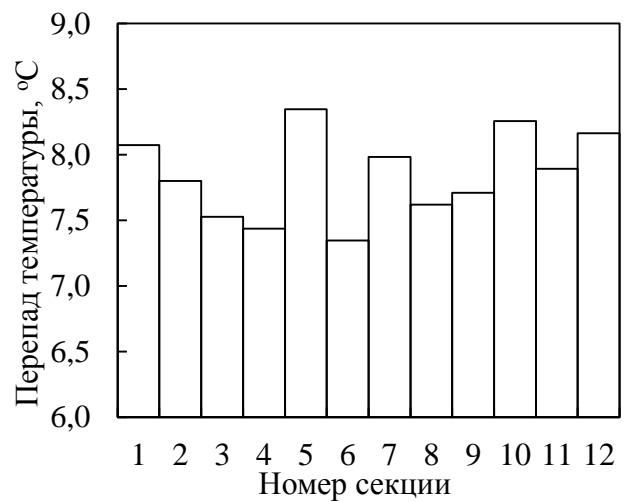


Рисунок 4.41 – Гистограмма

распределения ΔT при $q_c = 9 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

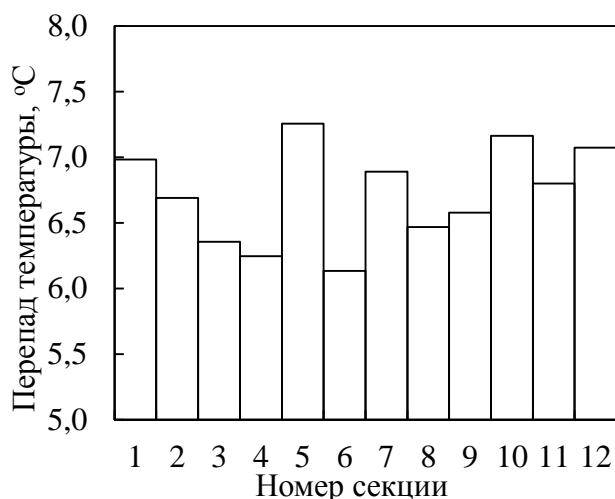


Рисунок 4.42 – Гистограмма распределения ΔT при $q_c = 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

Рассчитаем средневзвешенные значения перепадов температур ΔT_s по формуле (40) и построим скорректированную температурные характеристики перепада температур и конечной температуры охлаждения БГ-1600. Для наглядности, скорректированная характеристика представлена с нормативной характеристикой в одной плоскости (рисунок 4.43, 4.44).

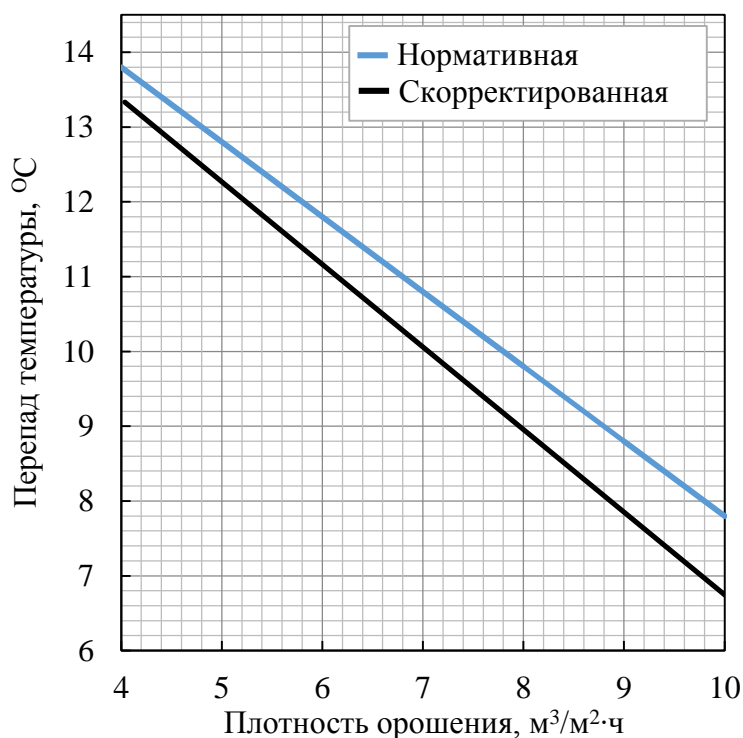


Рисунок 4.43 – Температурные характеристики башенной градирни БГ-1600

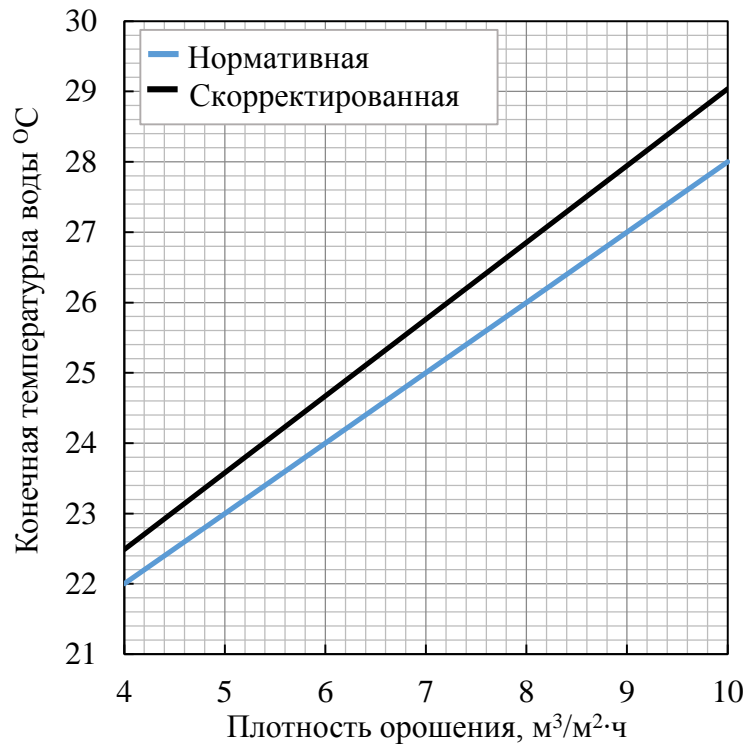


Рисунок 4.44 – Температурные характеристики башенной градирни БГ-1600

3) Рассчитаем средневзвешенные значения охлаждающих мощностей R_s по формуле (41) и построим скорректированную охлаждающую характеристику БГ-1600. Скорректированная и нормативная характеристики представлены в одной плоскости (рисунок 4.45).

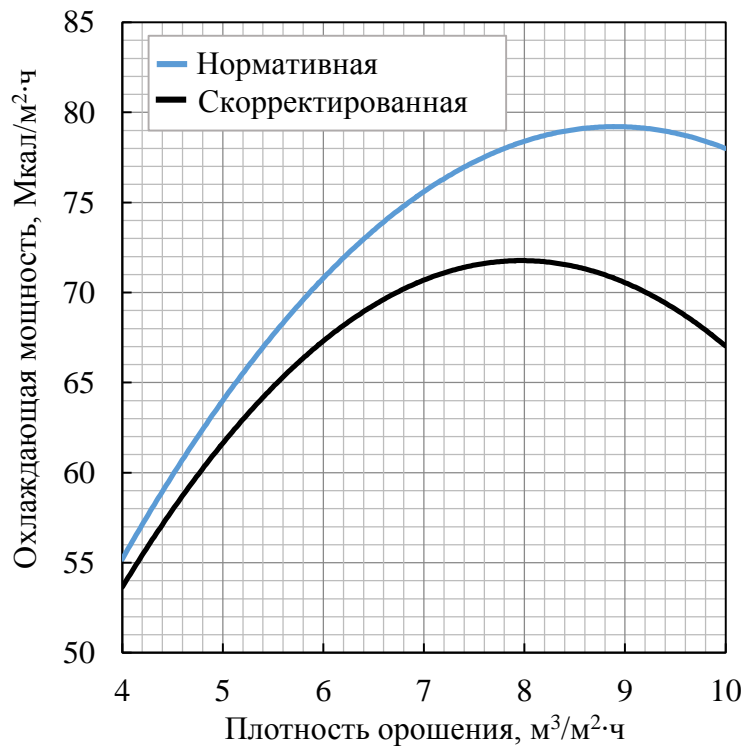


Рисунок 4.45 – Охладительные характеристики башенной градирни БГ-1600

Анализ температурных характеристик башенной градирни БГ-1600 показал, что неравномерность распределения плотности орошения и воздуха величиной 13 % и 26 % соответственно, приводит к снижению температуры, в среднем, на 1 °С (рисунок 4.43, 4.44). Отклонение скорректированной охладительной характеристики от нормативной ведет к снижению охладительной мощности, в среднем, на 6 Мкал/м²·ч. В диапазоне плотности орошения от 8 м³/м²·ч до 10 м³/м²·ч происходит необратимый процесс спада мощности аппарата (рисунок 4.45).

Таким образом, методика корректировки рабочих характеристик башенных градирен с учетом неравномерности распределения воды и воздуха апробирована на БГ-1600 и рекомендована к применению на практике, о чем свидетельствует полученный акт использования результатов от компании ООО НПО «ЭКОТЭП» (Приложение В).

4.5 Выводы по главе

Предложенная методика корректировки рабочих характеристик позволяет получить фактические характеристики башенных градирен, функционирующих в условиях неравномерности потоков воды и воздуха. С помощью номограммы и методики построены нормативные и скорректированные характеристики башенной градирни БГ-2600, проведен их сравнительный анализ. Полученные рабочие характеристики градирни внедрены на Набережночелнинскую ТЭЦ и используются в процессе эксплуатации на производстве, о чем свидетельствует акт о внедрении результатов (приложение В).

Вместе с тем, методика корректировки рабочих характеристик была успешно апробирована на башенной градирне БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ (г. Петрозаводск, республика Карелия), что подтверждается актом использования результатов работы (приложение В).

ГЛАВА 5. МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА

5.1 Общие мероприятия по снижению неравномерности потоков

Анализ скорректированных и нормативных характеристик башенной градирни позволил установить спад эффективности аппарата, работающего в условиях неравномерности потоков. Однако, дальнейшая эксплуатация градирни в текущем режиме приведет к нарастающему снижению ее производительности. Поэтому, с целью устранения неравномерности потоков воды и воздуха и достижения нормативных характеристик выдвинуты следующие организационно-технические мероприятия для башенной градирни:

- произвести наладку системы водно-химического режима I очереди, ввиду явных отложений солей жесткости на поверхностях блоков оросителей;
- устранить провисание оросительного устройства и обеспечить его продольное выравнивание укреплением металлической рамы каркаса градирни;
- произвести замену сопел водораспределительной системы, находящихся в состоянии засорения или разрушения, ввиду неравномерного разбрызгивания воды для охлаждения.

Стоит отметить, что наладка водно-химического режима, ремонта или замены конструктивных элементов башенной градирни не позволят достичь наилучшей эффективности охлаждения башенной градирни. Если с устранением конструктивных недостатков и корректировки водно-химического режима можно обеспечить равномерное распределение плотности орошения воды, чего нельзя говорить о достижении таким путем равномерности воздушного потока. Ввиду разнородных потоков ветра вокруг башенной градирни, необходимо рационально управлять расходом воздуха внутри аппарата. Таким образом, с учетом организации наладки водно-химического режима, устранения неполадок конструктивных элементов, с целью достижения показателей нормативных характеристик аппарата, решено разработать систему рационального управления

расходом воздуха в секциях башенной градирни в условиях неравномерности распределения воды и воздуха. Однако, прежде чем реализовать задуманную идею на практике, необходимо выполнить проверку ее эффективности. Сегодня, подобного рода задачи, как правило, решают современными средствами компьютерного моделирования CFD.

5.2 Численное моделирование степени охлаждения башенной градирни

5.2.1 Построение сеточной модели секции

Анализируя процессы, протекающие в башенной испарительной градирне, необходимо подчеркнуть, что охлаждение аппаратом происходит в результате взаимодействия двух фаз – воды и воздуха. Следовательно, постановка сводится к решению задачи численного моделирования многофазных потоков, которые отличаются более сложной физикой и могут рассматриваться с точки зрения, как «Эйлеровых», так и «Лагранжевых» подходов. В частности, для моделирования течений воздуха рациональным будет применение модели Эйлера, а в случае моделирования дисперсного потока орошения воды модели Лагранжа.

Перед выполнением вычислительного моделирования, была подготовлена 3-D модель башенной градирни в полномасштабном размере (рисунок 5.1). В натурной 3-D модели учтены все конструктивные элементы градирни БГ-2600.

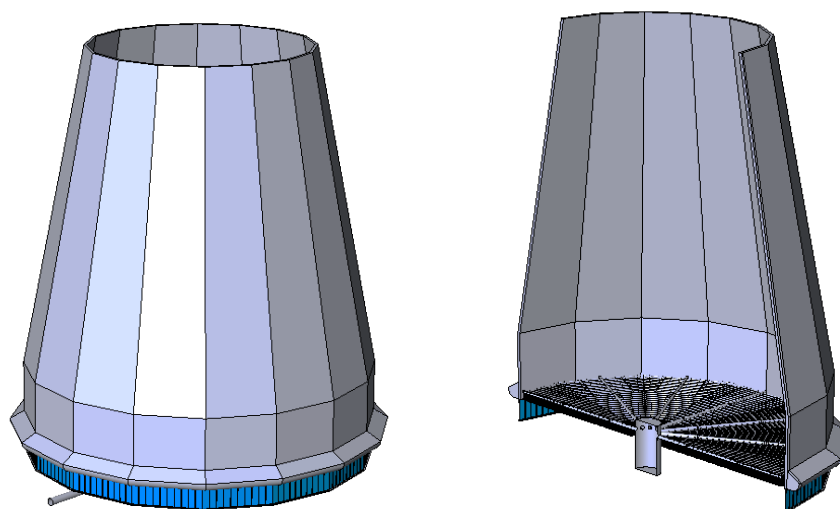


Рисунок 5.1 – 3-d модели башенной градирни БГ-2600

Основной контакт воды и воздуха осуществляется в подросительном пространстве башенной градирни. Поэтому, с целью снижения вычислительной нагрузки, было решено из построенной 3-D модели вычленить часть, а именно одну секцию, с условием, что все секции аппарата идентичны друг другу.

К наиболее известным и мощным системам моделирования для численного решения задач относят программные продукты «ANSYS». В частности, с целью исследований многофазных потоков выбран решатель «ANSYS Fluent 19.2», построена сеточная модель подросительного пространства одной секции. Была получена тетраэдрическая сеть модели из неструктурированных ячеек, общее количество которых составило 2 597 579 шт. Так, учитывая вычислительные возможности и объемность сетки модели, решено преобразовать исходную сеть в полиэдрическую. Это позволило уменьшить количество ячеек до 480 093 шт. и произвести, в дальнейшем, более быстрый расчет без потери точности.

С целью обеспечения достаточной устойчивости и сходимости расчета, необходимо определить оптимальное количество ячеек сетки. Поэтому, решено провести исследование сеточной зависимости и оценить ее влияние на результат расчета. Общий подход исследования заключался в наблюдении за динамикой изменения статического давления на входе и выходе модели при заданной скорости воздуха. Первым, для расчетной области заданы граничные условия секции градирни (рисунок 5.2).

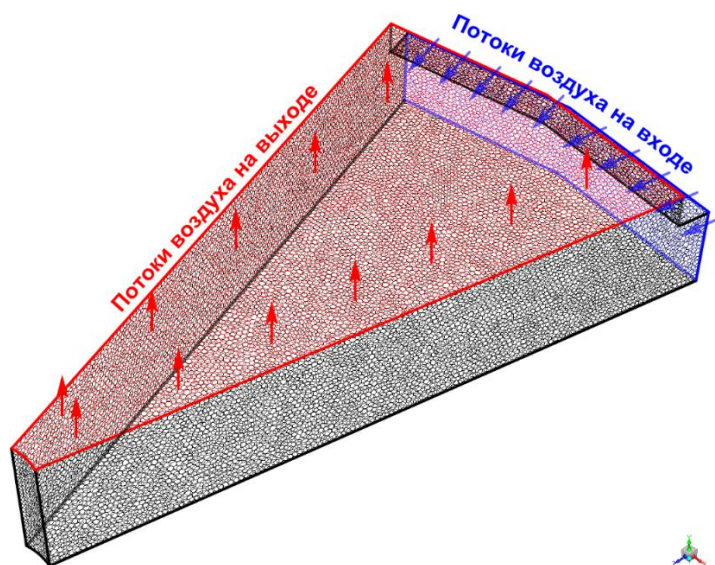


Рисунок 5.2 – Полиэдрическая сетка секции башенной градирни

В качестве входной плоскости потока воздуха была выбрана граничная зона (inlet), соответствующая воздухопроводному оконному проему. Для области выхода воздуха задана надоросительная плоскость градири (outlet). Границы, разделяющие отдельные секции приняты с условием периодичности (periodic), остальные плоскости были представлены как «стенки» (walls).

Проведены вычисления и анализ 8-ми различных сеточных моделей. Исследование сеточной зависимости производилось с последовательным сгущением сетки шагом 0,25. При этом, фиксировались значения статического давления на входе и выходе расчетной области. Соотношение размеров, количества элементов и перепада давлений отражены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Соотношение количества элементов и перепада давлений

№ сетки	Размер	Количество элементов, шт.	Перепад давлений, Па
1	1	8 957	0,394537
2	0,75	22 465	0,408204
3	0,5	53 653	0,422134
4	0,25	259 731	0,558935
5	0,1	2 597 535	0,692228
6	0,075	6 459 744	0,414046
7	0,05	15 056 398	0,396788
8	0,025	27 101 516	0,394774

В результате, получена зависимость перепада статического давления от количества элементов сетки (рисунок 5.3).

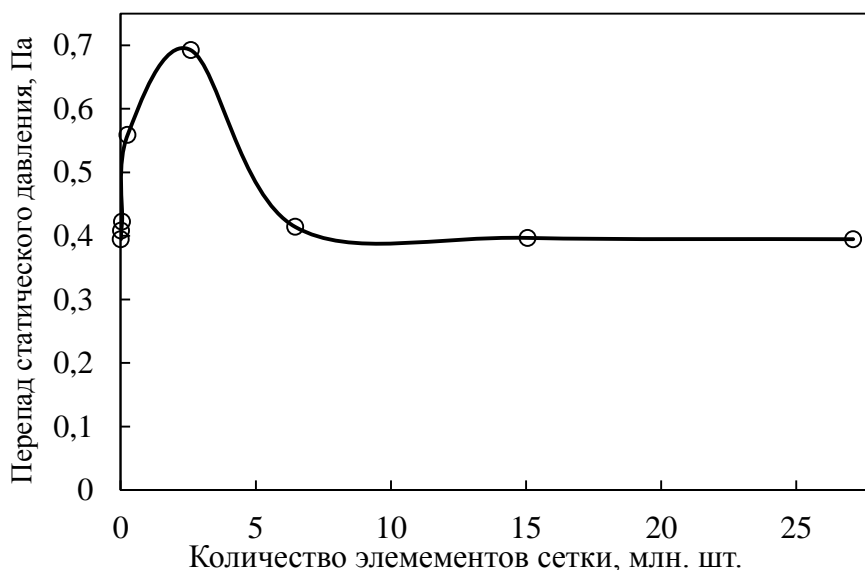


Рисунок 5.3 – Перепад статического давления от сгущаемости сетки

Анализируя зависимость, представленной на рисунке 5.3, можно сделать вывод, что установившееся значение перепада давления расчетной области достигается при количестве 6,45 млн. ячеек. Следовательно, дальнейшее приращение количества элементов сетки не повлияет на точность вычисления, однако значительно отразится на времени расчета. На основании результатов исследований сеточной зависимости, было принято решение провести численное моделирование с числом ячеек сетки без потерь точности и за оптимальное время вычисления. Таким образом, для моделирования потоков воды и воздуха секции башенной градирни, подобрана сеточная модель с количеством 6,45 млн. ячеек.

5.2.2 Методика численного расчета

В процессе моделирования, рассматривалась нестационарная задача взаимодействия двух фаз. В качестве первой фазы принят воздушный поток как модель сплошной среды, описываемая системой уравнений Навье-Стокса, которая состоит из уравнения неразрывности (42) и уравнения движения (43):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (43)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla(\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \quad (44)$$

где ρ – плотность, P – статистическое давление, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений, \mathbf{v} – вектор скорости несжимаемой жидкости, \mathbf{g} – вектор гравитационных объемных сил, \mathbf{F} – вектор внешних объемных сил.

В свою очередь, вторая фаза – орошаемая вода, была представлена как дискретная с распылением на мелкие капли воды в диапазоне от 3 до 5 мм, с начальной температурой 41,5 °С. Инжекция была реализована с помощью модели «Species Transport», в качестве испаряемой смеси выбраны капли воды. В ходе моделирования использовались физические модели распределения капель: стохастическое столкновение, распад и объединение. Процесс переноса энергии излучением описывался с помощью модели дискретных ординат «DO», поскольку, в сравнении с другими подходами, модель позволяет учитывать

зеркальное отражение капель и излучение сквозь полупрозрачную орошаемую воду [58]. В свою очередь, фазовый переход рассматривался посредством модели испарения капель воды для дискретной фазы в соответствии с законом тепломассообмена [145]. В качестве наглядности, на рисунке 5.4 представлена расчетная модель секции с упорядоченно расположенными 12-ю соплами, разбрызгивающих охлаждаемую воду.

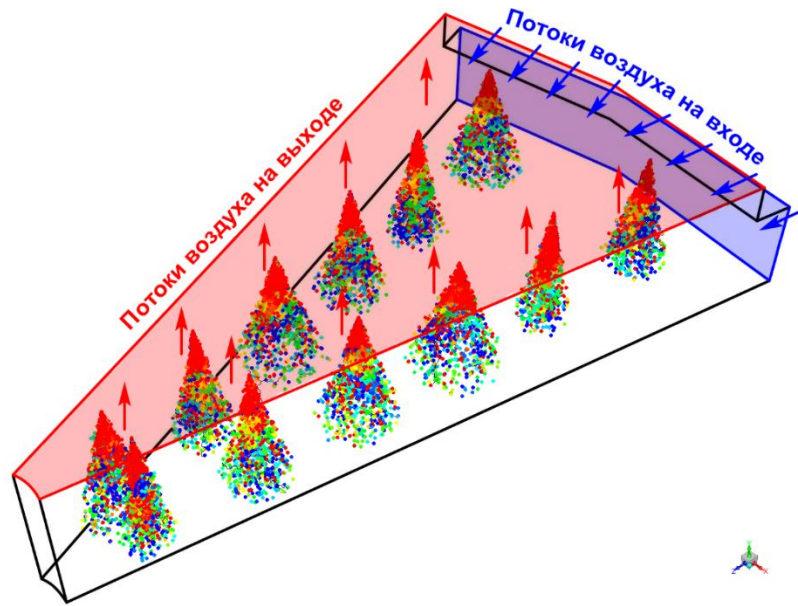


Рисунок 5.4 – Расчетная модель секции башенной градирни

Численный расчет проводился с использованием «RNG k-ε» – модели. Модель турбулентности позволяет повысить точность вычислений для жидкостей с деформациями, а также учитывает влияние завихренности потоков [145]. Вместе с тем, был подключен интерактивный режим взаимодействия дискретной фазы (воды) с моделью континуума (воздуха), поэтому учитывалось сохранение энергии уравнением (44):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E + \nabla(\mathbf{v}(\rho E + P))) = -\nabla\left(\sum_j h_j J_j\right) + S, \quad (45)$$

где E – энергия, h – энтальпия, J – диффузионный поток, S – энтропия.

Методика моделирования неравномерности потоков воды и воздуха в башенной градирне была принята следующей. На первом этапе, для каждого сопла модели задается индивидуальный расход охлаждаемой воды в диапазоне от 1 до 8 м³/м²·ч, при котором среднее значение плотности орошения воды

необходимо принять экспериментальным $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, а степень неравномерности плотности орошения – 33 %. Для граничной зоны, на входе расчетной модели, которой соответствует оконный проем секции (рисунок 5.4), задаются расчетные скорости воздуха обобщенной аэродинамической характеристики согласно формуле (26). При этом, значения скорости воздуха v модели должны соответствовать скоростям ветра натурального эксперимента (1, 3, 5, 7 и 9 м/с), а коэффициент аэродинамического сопротивления ζ градирни определен по формуле (20). В свою очередь, плотность орошения q останется неизменной, $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. На основании представленной методики, было принято решение приступить к процессу расчета.

5.2.3 Результаты моделирования

Проведено численное компьютерное моделирование потоков воды и воздуха башенной градирни. Результаты распределения скорости воздуха расчетной модели секции представлены на рисунках 5.5 – 5.10 (вид сверху).

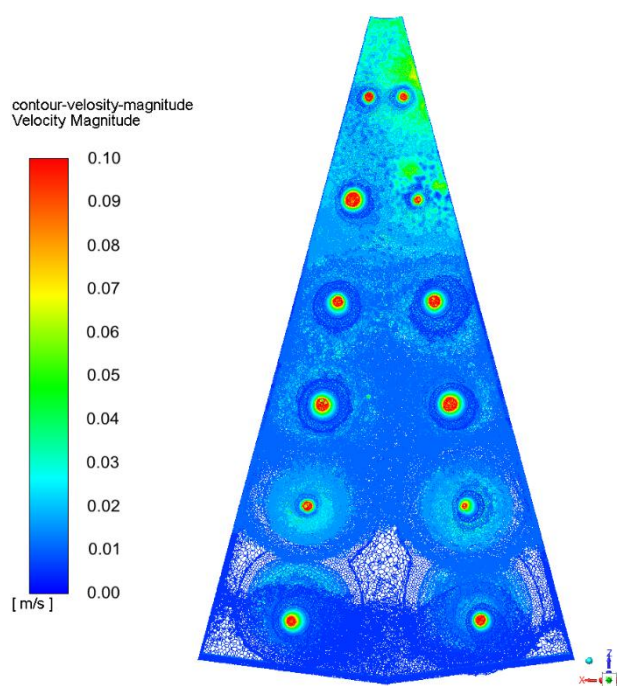


Рисунок 5.5 – Распределение воздушного потока в секции при входной скорости 0,1 м/с

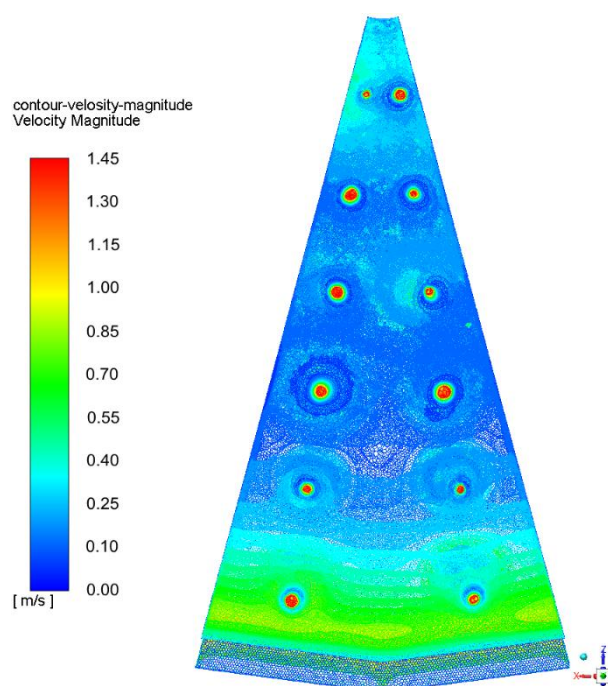


Рисунок 5.6 – Распределение воздушного потока в секции при входной скорости 0,82 м/с

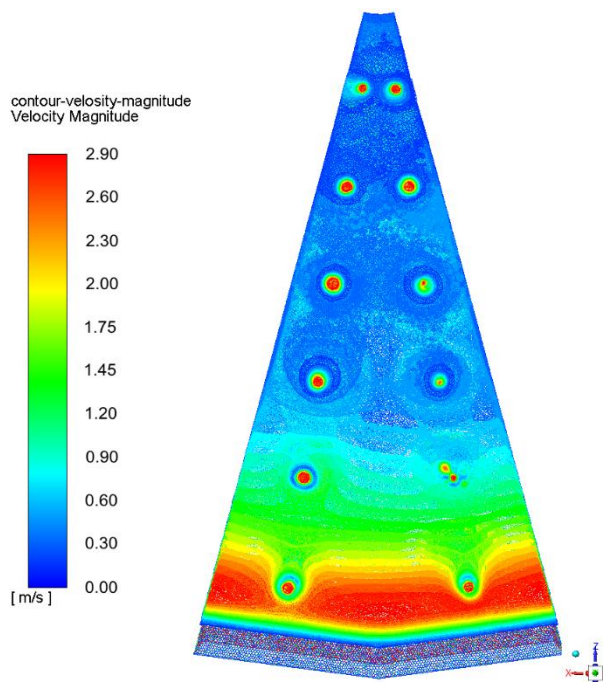


Рисунок 5.7 – Распределение
воздушного потока в сечении при
входной скорости 2,86 м/с

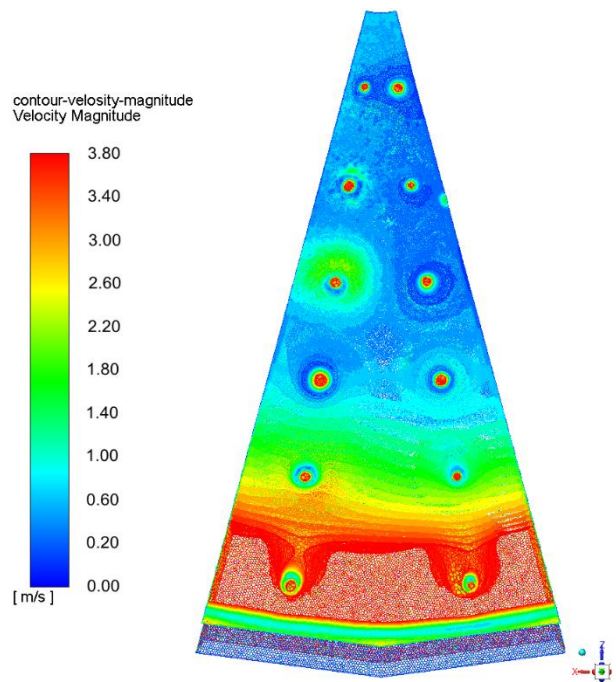


Рисунок 5.8 – Распределение
воздушного потока в сечении при
входной скорости 3,80 м/с

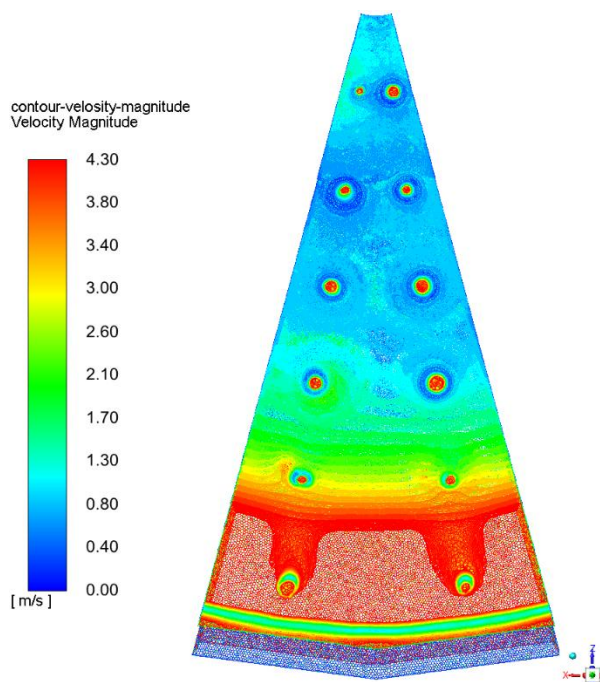


Рисунок 5.9 – Распределение
воздушного потока в сечении при
входной скорости 4,30 м/с

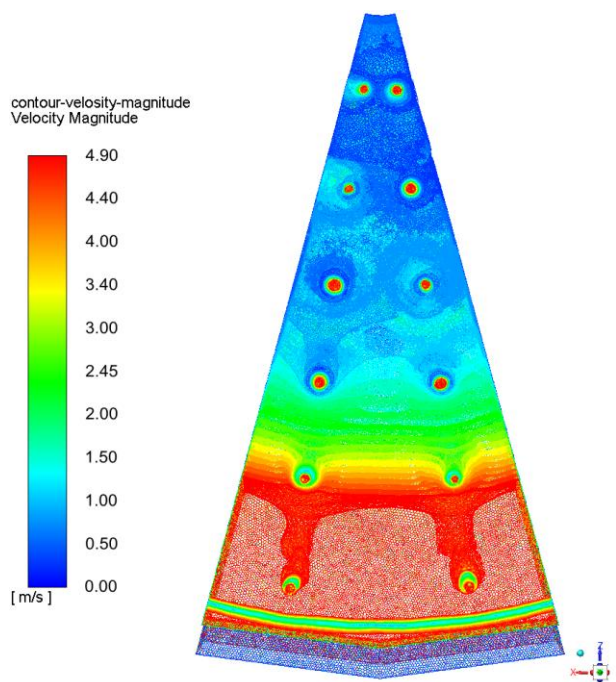


Рисунок 5.10 – Распределение
воздушного потока в сечении при
входной скорости 4,86 м/с

По результатам численного моделирования распределения воздушного потока, построены регрессионные зависимости изменения скорости воздуха от периферийной зоны к центру секции. В качестве примера, на рисунке 5.11 представлена экспериментальная зависимость башенной градирни и полученная численным методом при входной скорости 2,86 м/с. Зависимости изменения скорости воздуха в секции при входных скоростях 0,1, 0,82, 3,80, 4,30 и 4,86 м/с в секции демонстрируют аналогичный характер изменения.

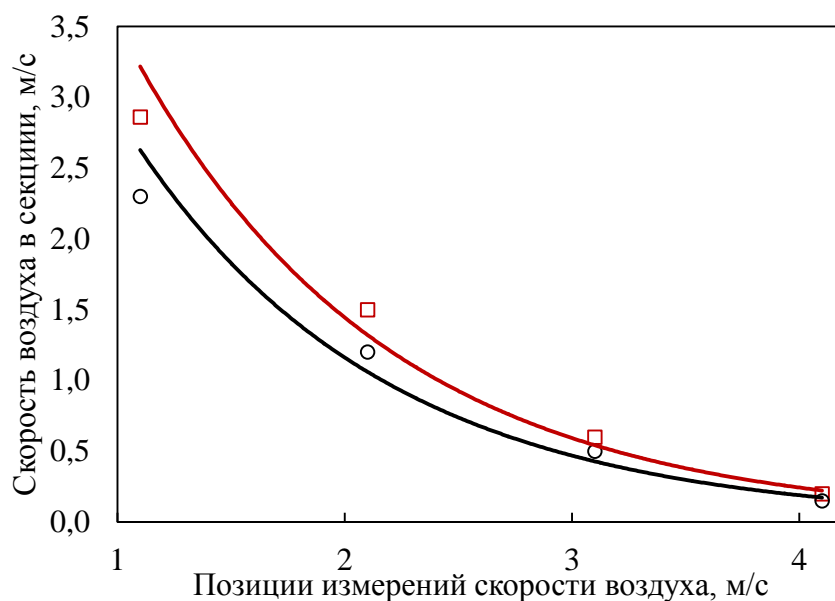


Рисунок 5.11 – Распределение скорости воздуха в секции, где:

—□— — численная зависимость; —○— — экспериментальная зависимость.

Результаты моделирования свидетельствуют о постепенном снижении скорости воздуха от входа к центру секции. Вместе с тем, с все большим усилением скорости воздуха, интенсивность потока во входной области секции возрастает. Возникает вопрос о влиянии возникающей интенсивности скорости воздуха на степень охлаждения воды в секции. Учитывая заданную плотность орошения $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, решено выяснить при какой скорости воздуха степень охлаждения воды в секции станет наилучшей.

Так, на следующем этапе, проведено численное моделирование степени охлаждения воды при скоростях воздуха в секции 0,1 м/с, 0,82 м/с, 2,86 м/с, 3,80 м/с, 4,30 м/с и 4,86 м/с. Результаты моделирования представлены на рисунках 5.12 – 5.17 (вид сбоку).

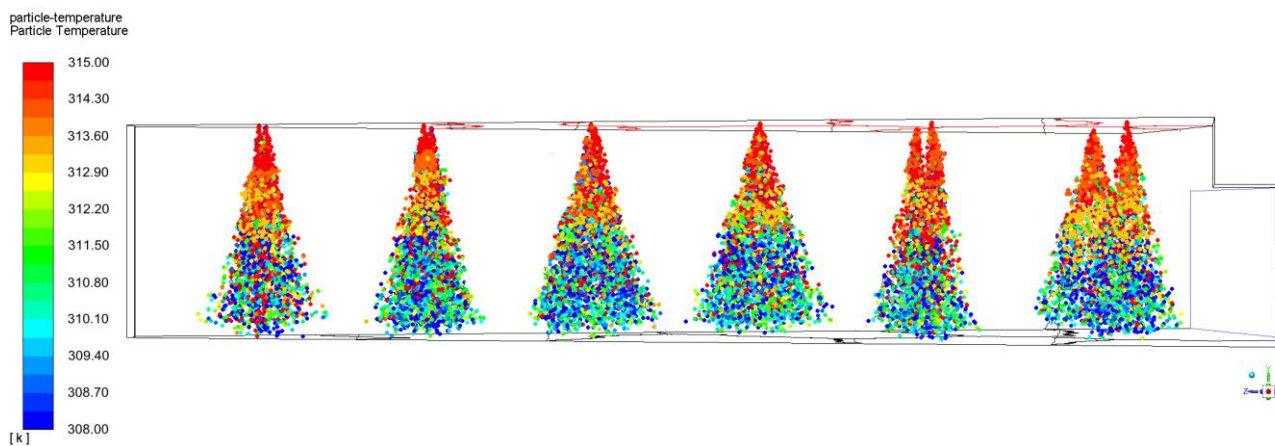


Рисунок 5.12 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градири при скорости воздуха 0,10 м/с

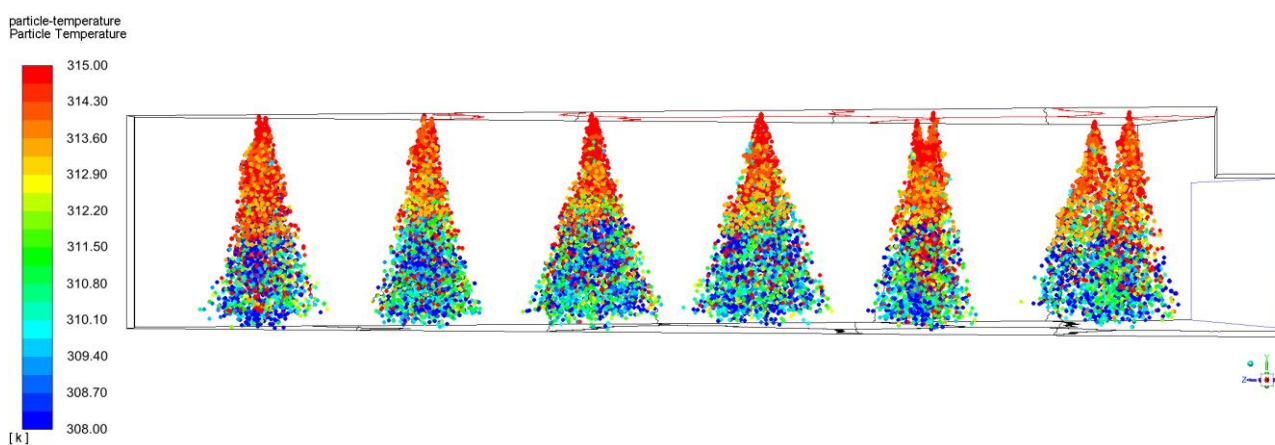


Рисунок 5.13 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градири при скорости воздуха 0,82 м/с

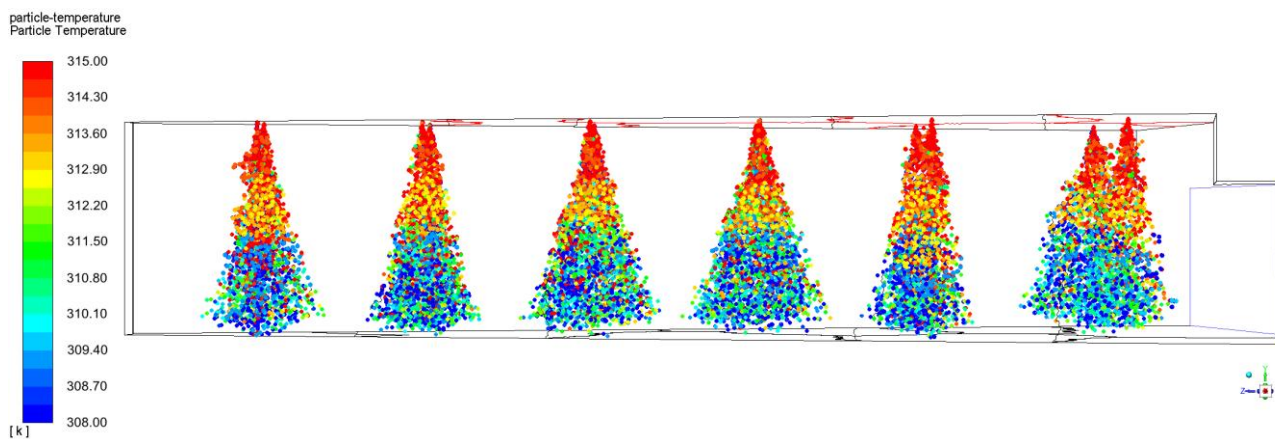


Рисунок 5.14 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градири при скорости воздуха 2,86 м/с

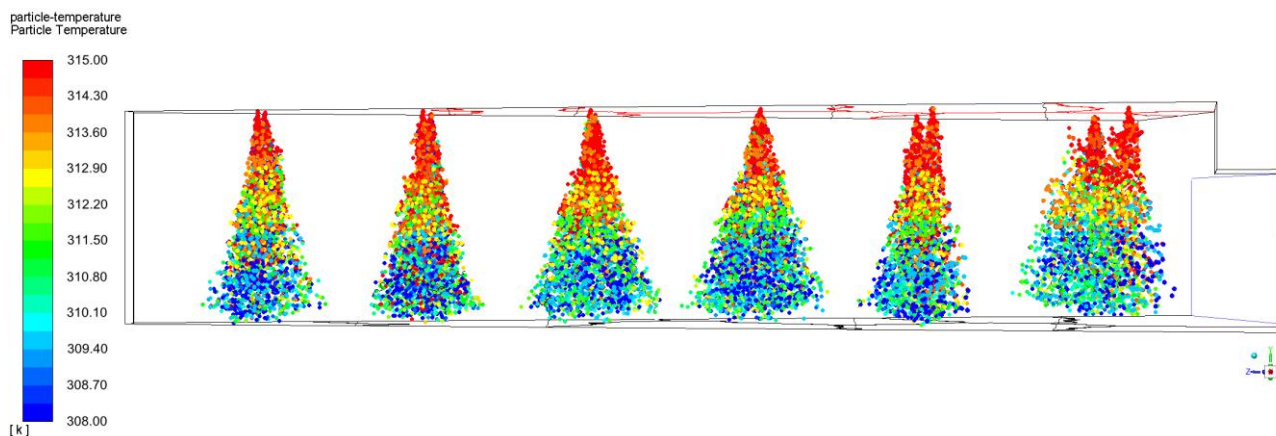


Рисунок 5.15 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градирни при скорости воздуха 3,80 м/с

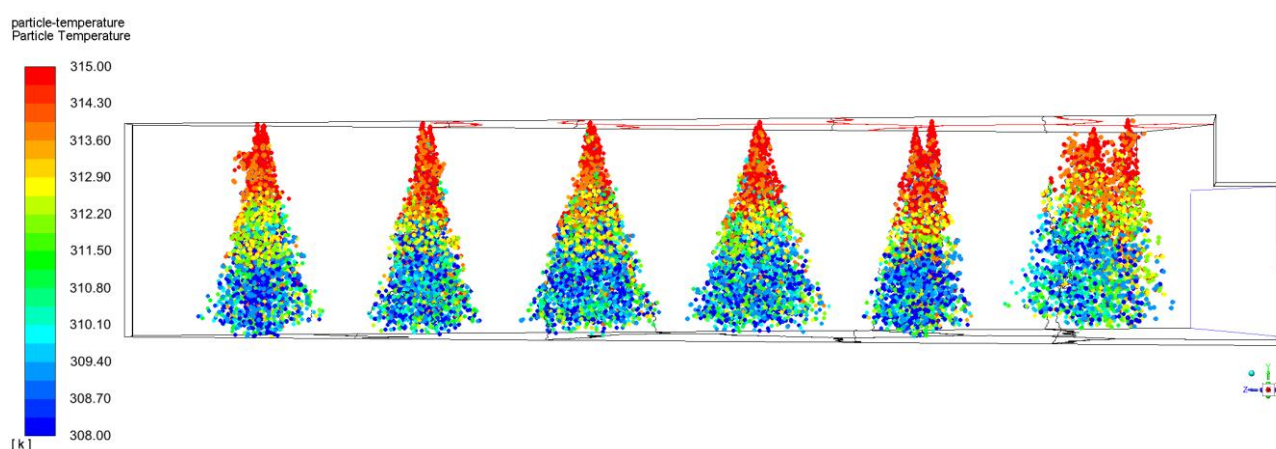


Рисунок 5.16 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градирни при скорости воздуха 4,30 м/с

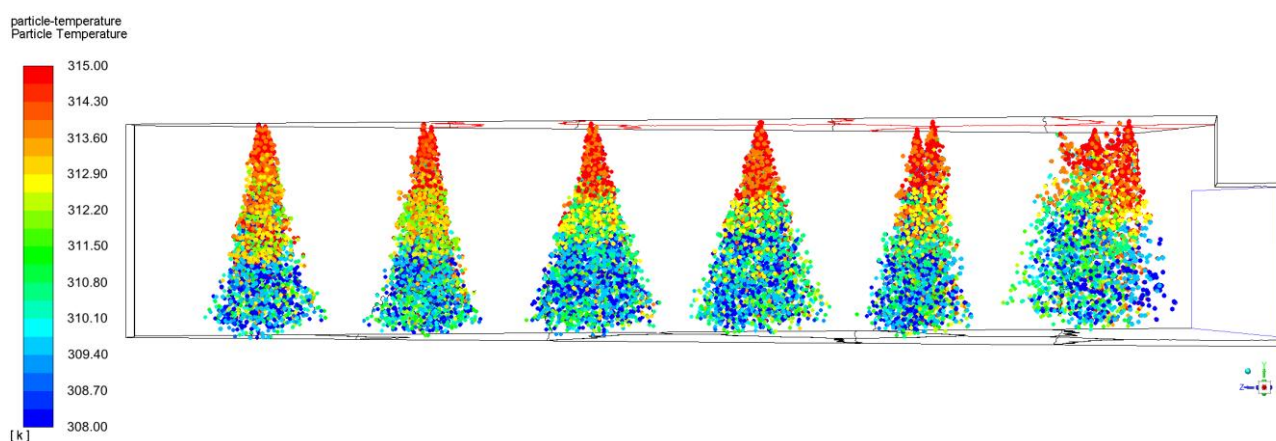


Рисунок 5.17 – Изменение температуры орошаемой воды из разных сопел по высоте подросительной зоны градирни при скорости воздуха 4,86 м/с

Результаты моделирования демонстрируют последовательное снижение температур капель воды от 314,65 К до 308 К (от 41,5 до 34,85 °С). Проведен анализ температуры охлаждения воды каждого сопла, получены их средние значения для секции при скоростях воздуха 0,1 м/с, 0,82 м/с, 2,86 м/с, 3,80 м/с, 4,30 м/с и 4,86 м/с. Результаты представлены вместе с экспериментальными показателями на рисунке 5.18.

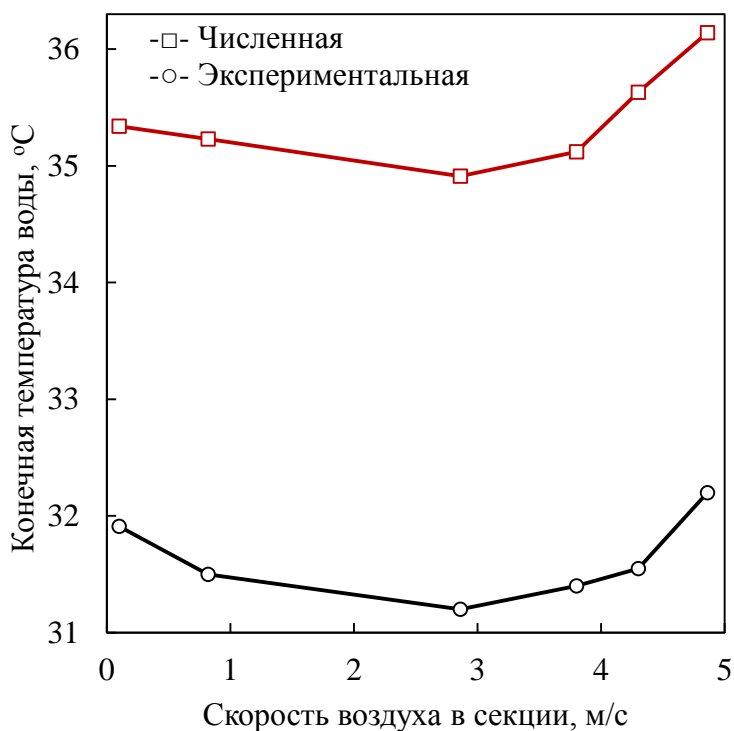


Рис. 5.18 – Температура охлаждения при скорости воздуха в секции

Согласно рисунку 5.18, для модели секции башенной градирни, при условии плотности орошения $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, ее аэродинамическом сопротивлении и скорости ветра, наилучшее охлаждение воды до $34,91 \text{ °С}$ достигается при скорости воздуха $2,86 \text{ м/с}$.

С возрастанием скорости воздуха в модели секции, возникает нарастающее интенсивное завихрение потоков, что приводит к «запиранию» входной зоны для вновь поступающего воздуха. Это приводит к возникновению неоднородности температуры охлаждения воды. Поэтому, проведено моделирование воздушных вихрей в секции, результаты которого представлены на рисунках 5.19 – 5.24.

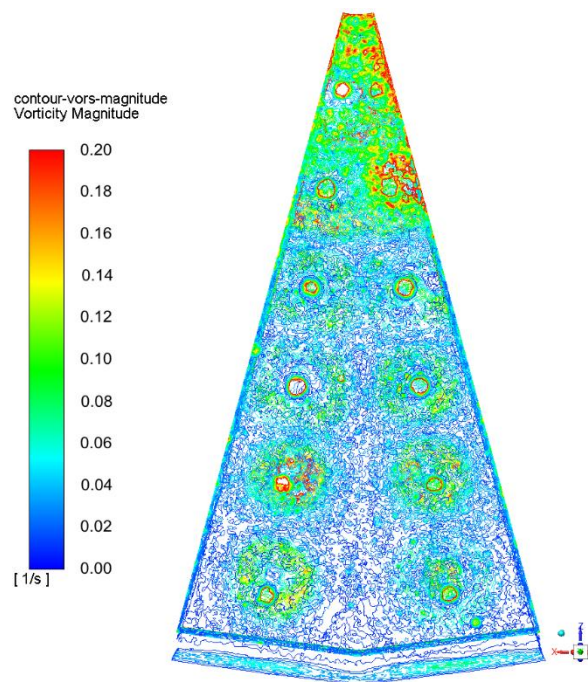


Рисунок 5.19 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 0,10 м/с

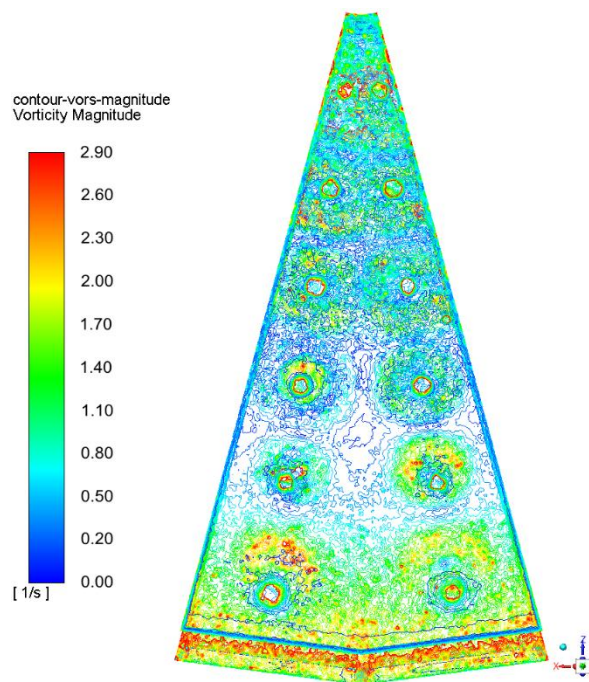


Рисунок 5.20 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 0,82 м/с

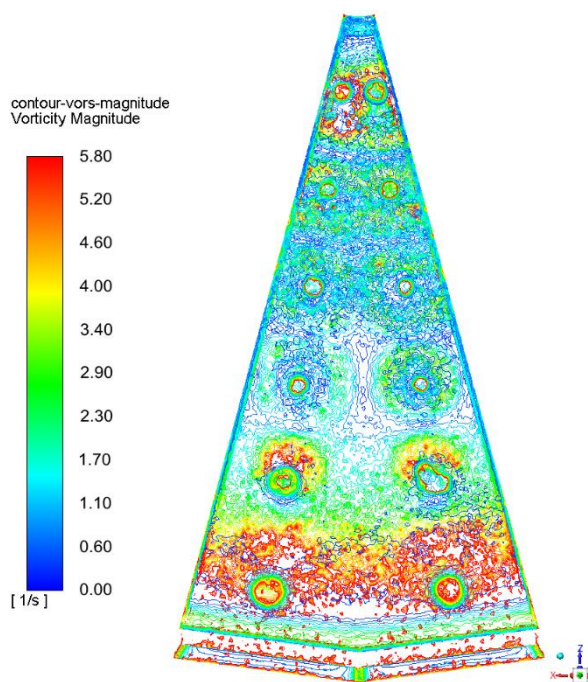


Рисунок 5.21 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 2,86 м/с

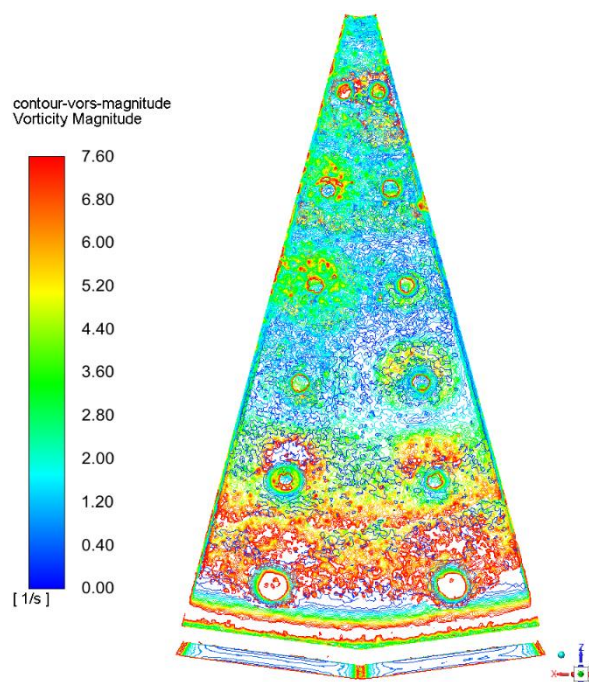


Рисунок 5.22 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 3,80 м/с

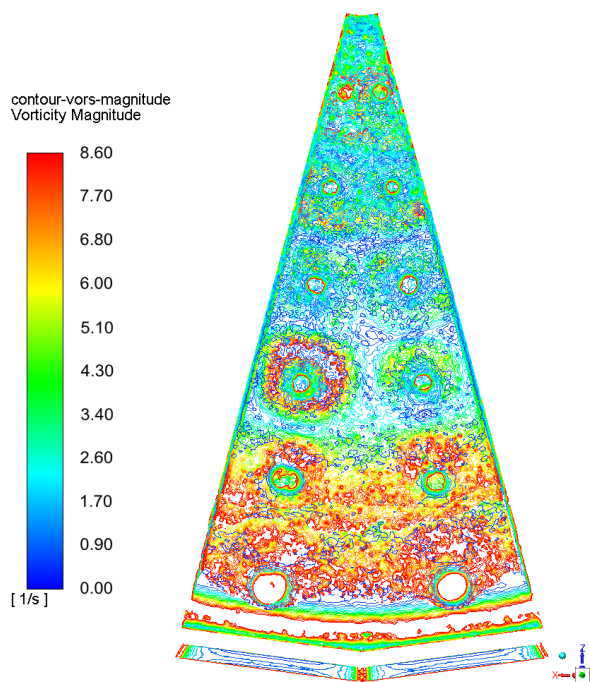


Рисунок 5.23 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 4,30 м/с

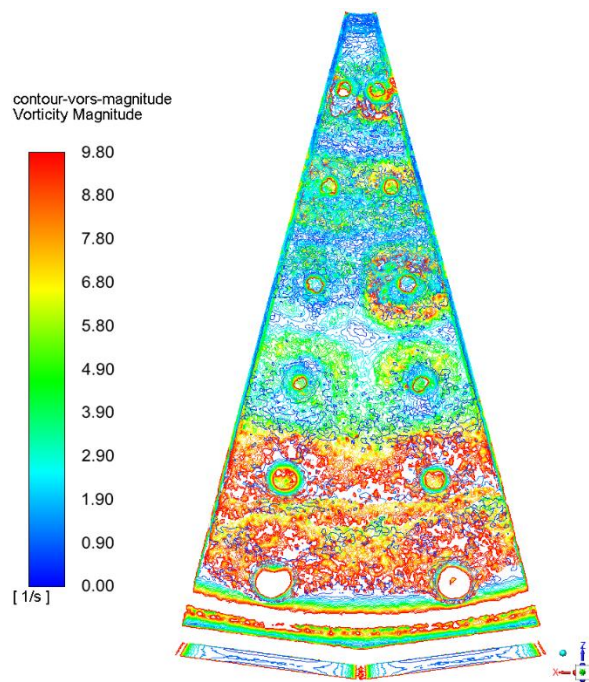


Рисунок 5.24 – Интенсивность воздушных вихрей в секции при входной скорости воздуха 4,86 м/с

Проведенное компьютерное моделирование свидетельствуют о том, что при малых скоростях воздуха 0,1 м/с и 0,82 м/с, потоки безвихревые и не образуют застойных воздушных зон в секции, однако, охлаждение воды в недостаточно эффективно. При скорости воздуха 2,86 м/с, в секции образуются воздушные вихри, что способствует интенсификации тепломассобмена между водой и воздухом, и, в тоже время, не возникают воздушные застойные участки. С нарастающим усилением скорости воздуха, от 3,80 м/с до 4,86 м/с, в подросительном пространстве башенной градирни с нарастанием развиваются воздушные застойные зоны. Такое явление препятствует интенсификации процесса охлаждения, поэтому показания температуры воды при указанных скоростях воздуха наихудшие.

Сравнивая результаты измерения конечной температуры воды при натурном эксперименте (31,2 °С) и компьютерном моделировании (34,91 °С) в аналогичных условиях, расхождение составляет 10,63 %. Учитывая сложности в расчетах многофазных потоков, указанный процент расхождения принимают приемлемым, а результаты вычислений следует считать достоверными.

Таким образом, с помощью численного моделирования потоков воды и воздуха в секции, подтверждена неоднородность охлаждения в башенной градирне. Установлено, что при плотности орошения в секции $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, наилучшее охлаждение достигается при скорости воздуха в секции $2,86 \text{ м/с}$. В результате, продемонстрирована необходимость применения системы рационального регулирования потоками воздуха в секциях башенной градирни посредством автоматического управления воздухопроводными окнами.

5.3 Разработка системы управления охлаждением башенной градирни

5.3.1 Техническая реализация системы управления

Численное моделирование позволило приступить к разработке системы управления охлаждением башенной градирни, функционирующей в условиях неравномерности воды и воздуха. Учитывая разнородную скорость ветра в окружности башенной градирни, а значит и разнородное течение воздушных потоков, с помощью технического решения предложено «сбалансировать» потоки воды и воздуха внутри секции аппарата. В целом, идея подхода заключается в рациональном распределении воздуха в башенной градирне в зависимости от параметров плотности орошения, аэродинамического сопротивления и локальной скорости ветра вокруг башни.

На первом этапе, идея направлена на выявление сильных и слабых секции орошения воды с помощью датчиков давления, установленных на водораспределительной системе. Так, на основании фактических данных распределения плотности орошения, скорости ветра и воздуха в секциях, производится регулирование воздухопроводными окнами каждой секции башенной градирни. Это позволит направить сильный поток воздуха в секции с высоким орошением воды, а слабый поток воздуха – в секции с низким орошением воды. На рисунке 5.25 продемонстрированы секции с низкой и высокой плотностью орошения, и в тоже время, распределяемые сильные и слабые потоки воздуха.

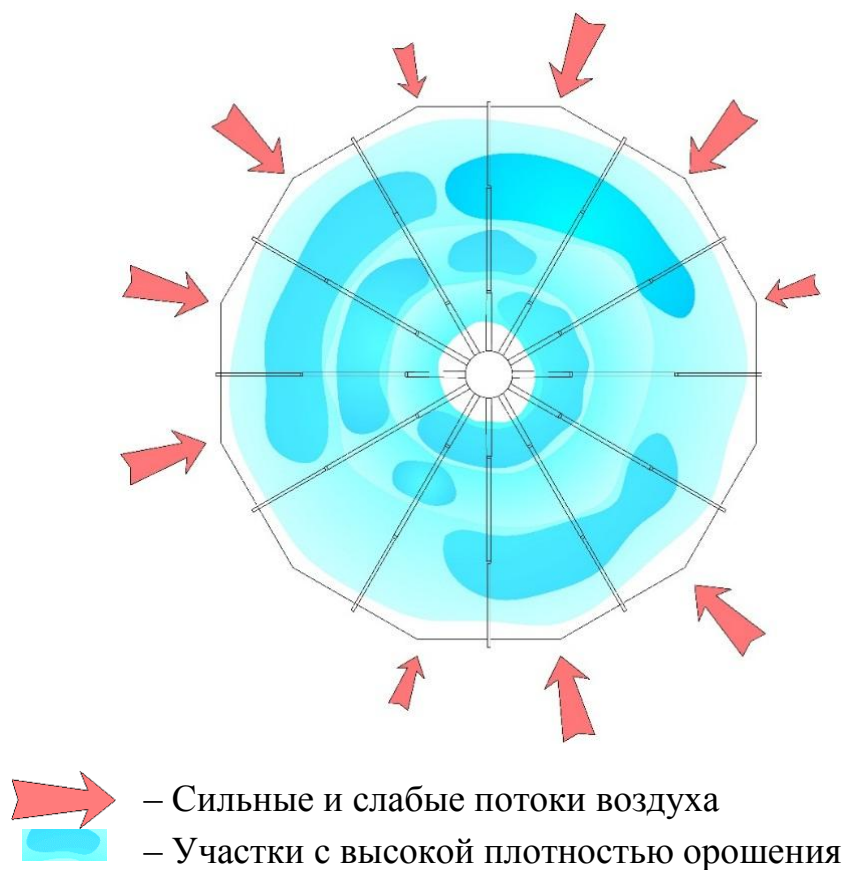


Рисунок 5.25 – Башенная градирня в сечении

Техническое решение представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором предусмотрено автоматическое и диспетчерское управление воздухопроводными окнами, а также мониторинг процесса работы башенной градирни (рисунок 5.26). Для практической реализации идеи решено применить технические и программные средства автоматизации. Система управления охлаждением башенной градирни включает:

- группу датчиков давления воды, установленных на рабочих трубопроводах и подключенных через кабельные линии связи к входным модулям микропроцессорного устройства управления;
- статические датчики ветра и температуры наружного воздуха, установленных под козырьком воздухопроводных окон и подключенных через кабельные линии связи к входным модулям микропроцессорного устройства;
- датчики температуры воды на входе в градирню, опущенный в центральный стакан и подключенный через кабельную линию связи к входным модулям микропроцессорного устройства управления;

- датчики температуры воды на выходе из градирни, опущенный в бассейн градирни и подключенный через кабельную линию связи к входным модулям микропроцессорного устройства управления;
- микропроцессорное устройство управления, обрабатывающего сигналы датчиков и формирующего сигнал управления воздуховодными окнами;
- однооборотный исполнительный механизм управления воздуховодными окнами башенной градирни;
- компьютер оператора, необходимого для мониторинга характера распределения воздуха и орошения воды, степени охлаждения воды и дистанционного управления воздуховодными окнами.

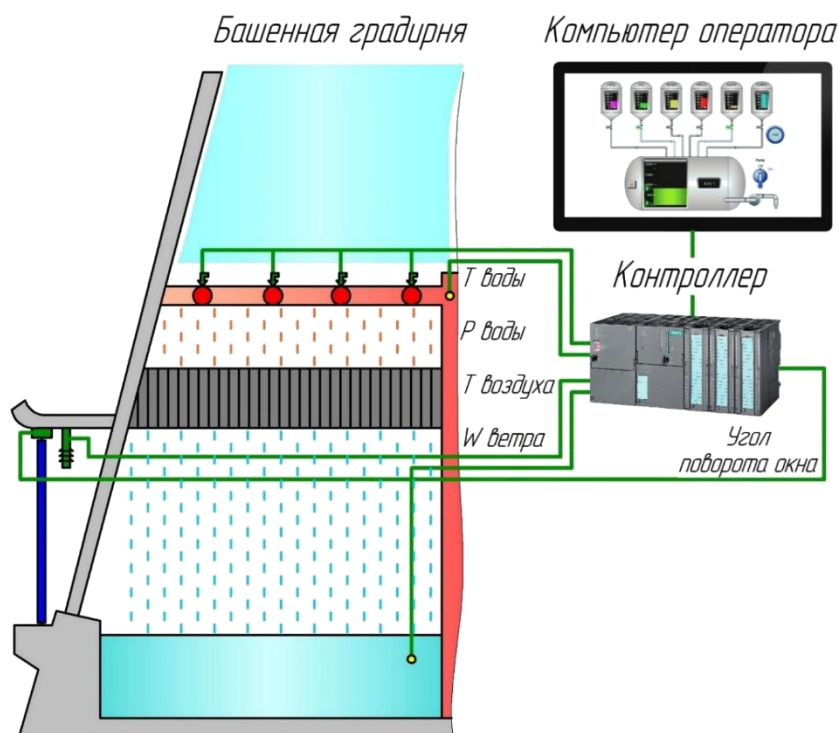


Рисунок 5.26 – Программно-аппаратный комплекс башенной градирни

На основании подбора оборудования с целью реализации технического решения, на первом этапе разработана структурная схема системы управления воздуховодными окнами в условиях неравномерности распределения воды и воздуха (рисунок 5.27).

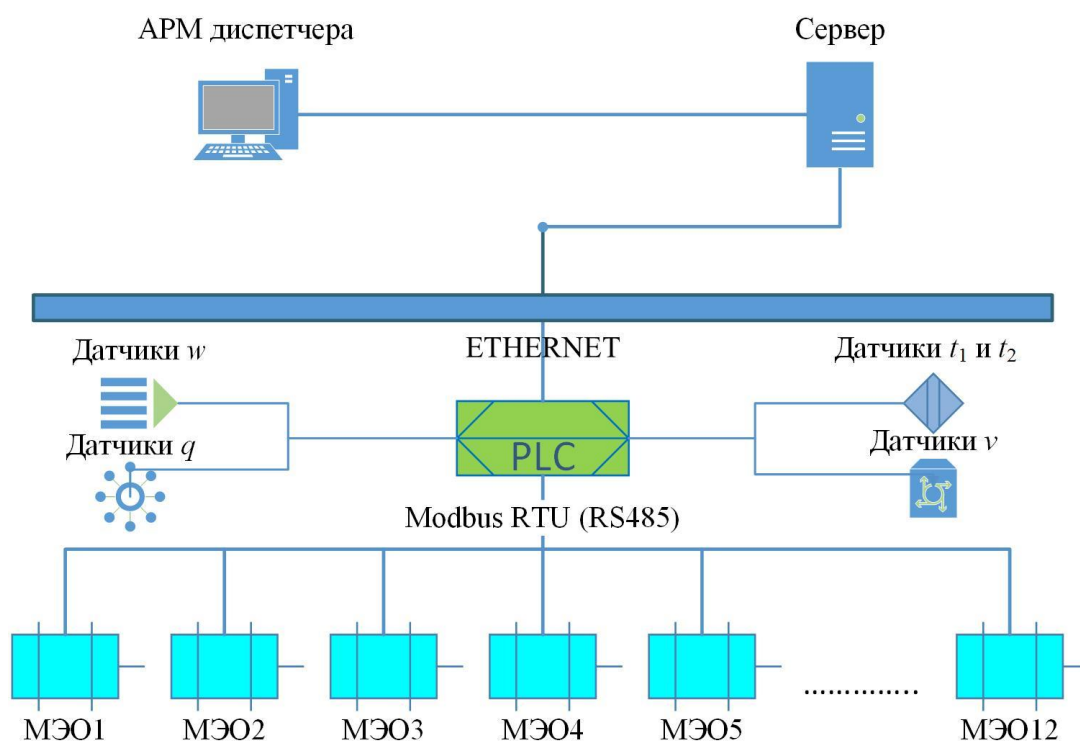


Рисунок 5.27 – Структурная схема системы управления башенной градирни

Структурная схема условно разделена на два уровня: верхний и нижний, центральным устройством которой является программируемый логический контроллер PLC. Ее основная функция – прием и обработка входных сигналов датчиков параметров воды и воздуха согласно алгоритму, и далее, формирование управляющего сигнала поворота воздухопроводных окон. На верхнем уровне, обмен данными между PLC, АРМ оператора и сервером обеспечивается через промышленную сеть «Ethernet».

На нижнем уровне, связь между исполнительными механизмами МЭО и PLC поддерживается с помощью интерфейса «RS – 485» по протоколу «Modbus RTU». Так, по данным входных аналоговых значений скорости и направления ветра, давления воды в магистральных трубопроводах и температур воды и воздуха, контроллером PLC формируется сигнал на управление приводами МЭО воздухопроводными окнами.

На верхнем уровне предусмотрена визуализация работы башенной градирни с помощью SCADA-системы в виде мнемосхем, функционирующей на клиентском компьютере АРМ диспетчера. Архивирование и хранение данных осуществляется в базе данных, на стороне серверного обеспечения.

На следующем этапе разработана электрическая принципиальная схема системы управления воздухопроводными окнами башенной градирни. Электрическая схема включает 12 электроприводов МЭО каждой секции для управления воздухопроводными окнами и их устройства плавного пуска. В схеме предусмотрены автоматические выключатели, промышленный контроллер, серверное оборудование, преобразователь напряжения 220/24 В, группа датчиков измерения давления воды в трубопроводах, скорости и направления ветра, а также температур воды и воздуха (рисунок 5.28).

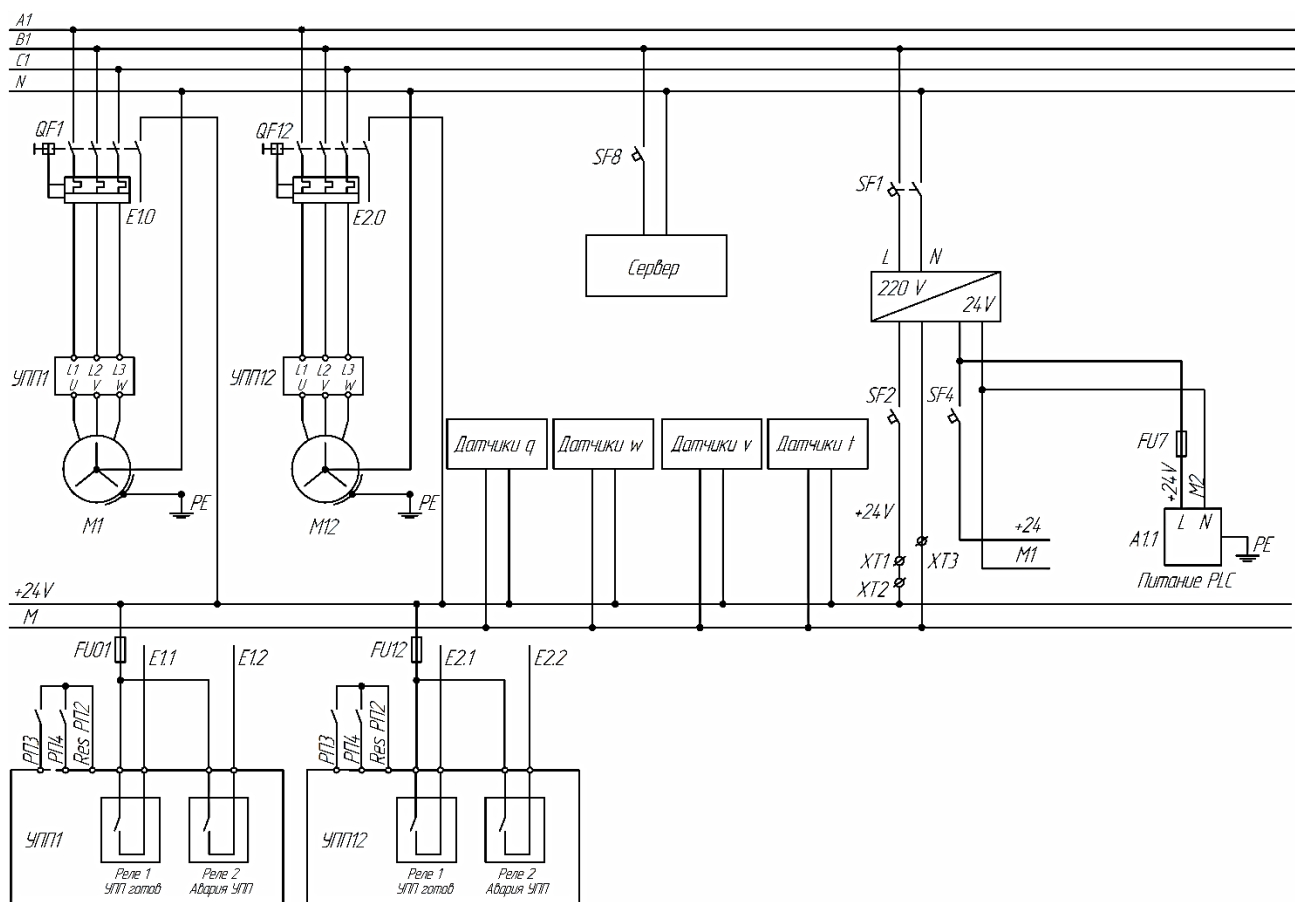


Рисунок 5.28 – Электрическая принципиальная схема системы управления

5.3.2 Математическая модель и алгоритм управления окнами

Разработана математическая модель, учитывающая неравномерности плотности орошения и скорости воздуха башенной градирни комплексно. Поэтапно, модель включает расчет средней плотности орошения, оценку среднеквадратичного отклонения от средней величины, построение гистограммы распределения плотности орошения, расчет плотности орошения в

каждой секции, расчет коэффициента аэродинамического сопротивления и расчет скорости воздуха в каждой секции башенной градирни.

Управление воздухопроводными окнами осуществляется на основании программы управления промышленным контроллером, реализованной на языке программирования SCL международного стандарта IEC 61131-3 (приложение Г). Алгоритм программы управления представлен на рисунках 5.29 – 5.31.

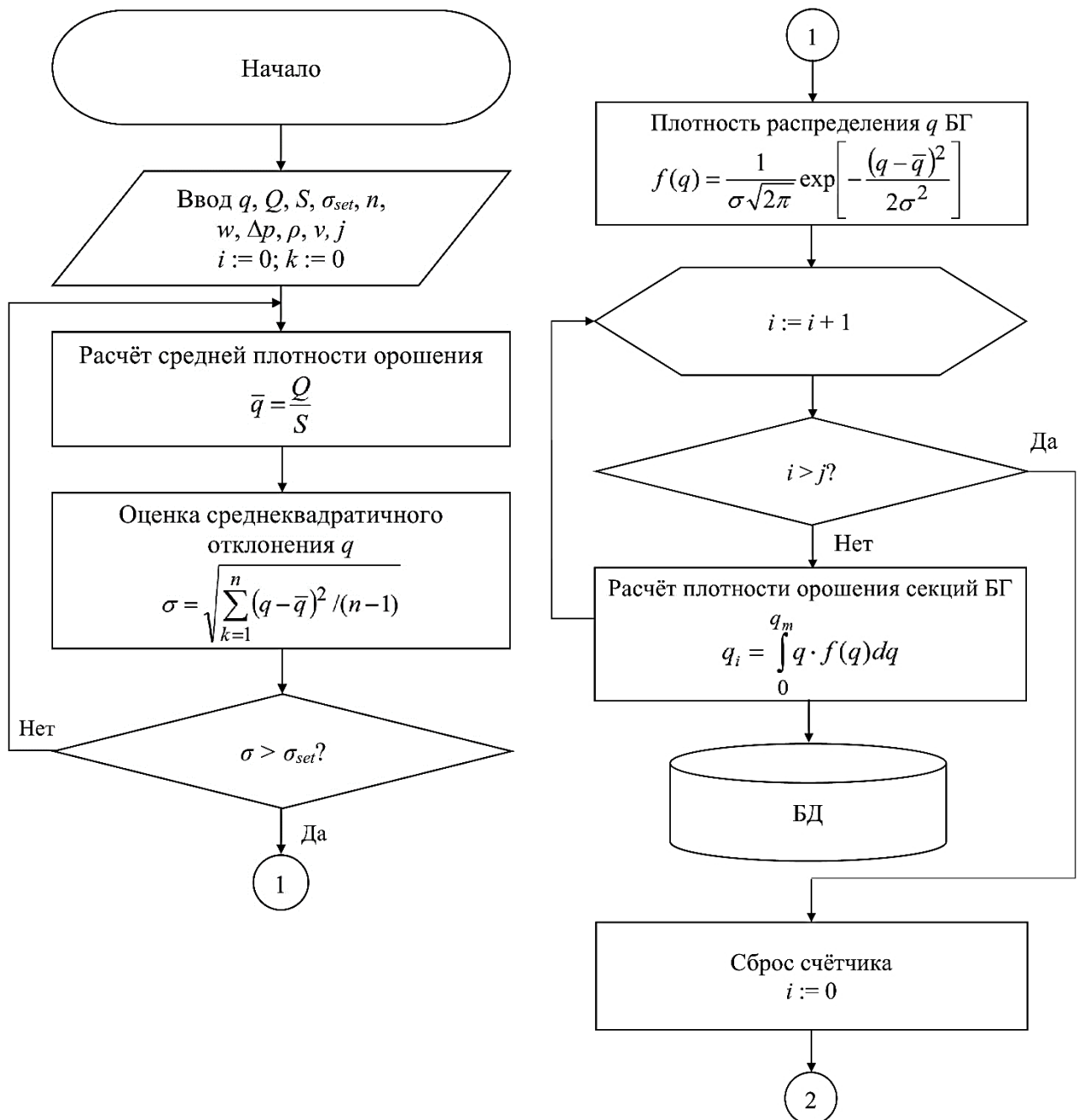


Рисунок 5.29 – Алгоритм управления воздухопроводными окнами

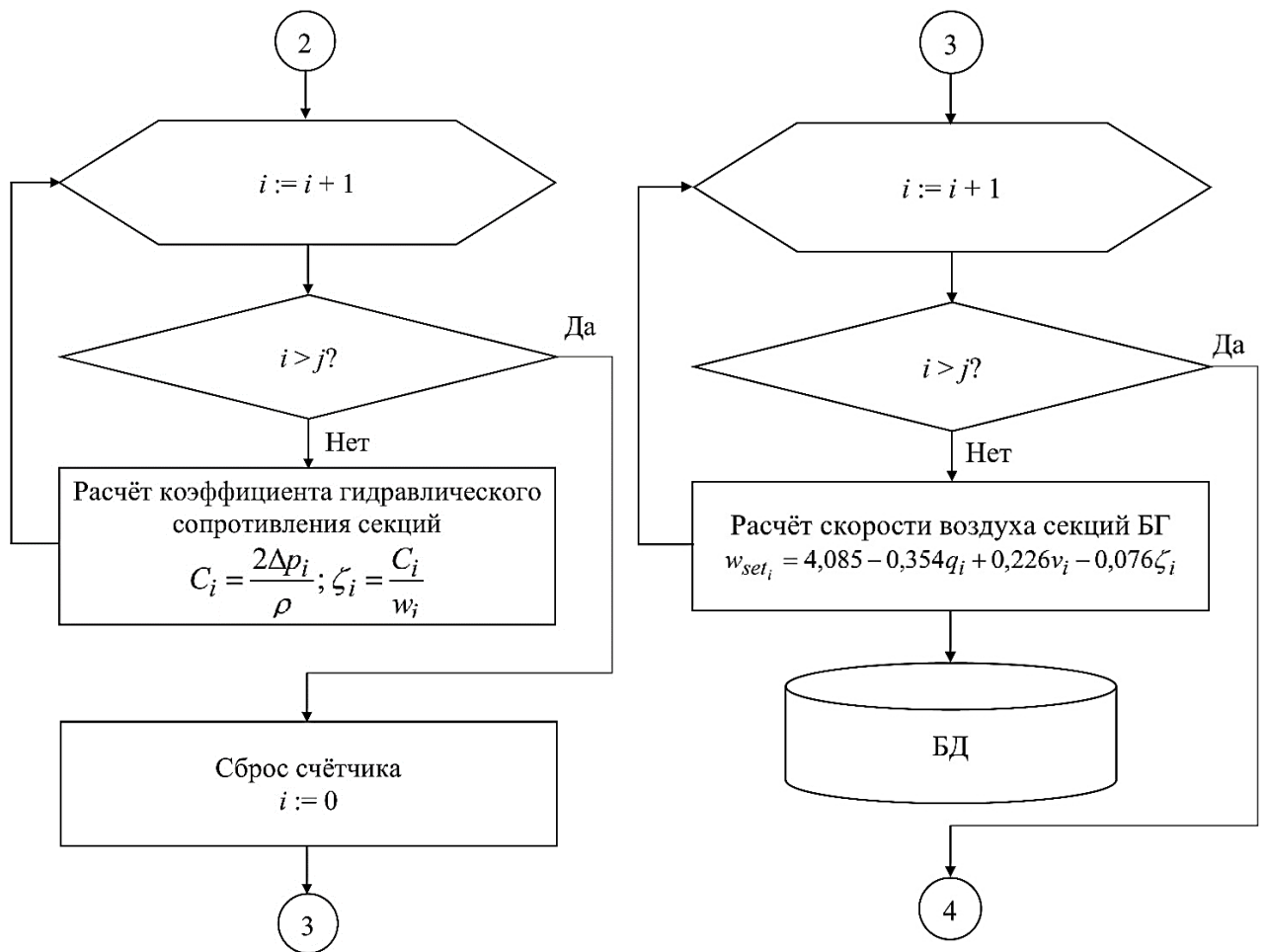


Рисунок 5.30 – Алгоритм управления воздуховодными окнами (продолжение)

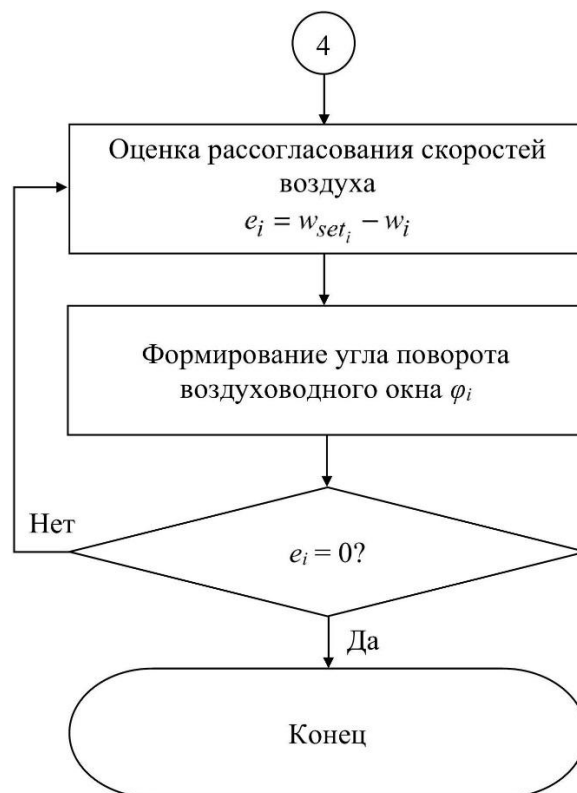


Рисунок 5.31 – Алгоритм управления воздуховодными окнами (продолжение)

На начальном этапе алгоритма производится ввод параметров, которые регистрируются датчиками потоков воды и воздуха, а также введенных констант. Рассчитывается средняя плотность орошения башенной градирни, исходя из которой, в дальнейшем оценивается среднеквадратичное отклонение плотности орошения. В свою очередь, среднеквадратичное отклонение характеризует степень неравномерности плотности орошения воды. Поэтому, принято, что если среднеквадратичное отклонение составило больше заданной величины, следует, что в башенной градирне обнаружена существенная неравномерность плотности орошения, которую необходимо учитывать. Основываясь на законе нормального распределения, выполняется построение гистограммы плотности распределения плотности орошения $f(q)$ башенной градирни. Это позволит рассчитать средние посекционные плотности орошения аппарата.

На следующем этапе алгоритма производится расчет коэффициентов аэродинамического сопротивления каждой секции башенной градирни. Зная рассчитанные коэффициенты аэродинамического сопротивления, плотность орошения и локальную скорость ветра, из обобщенной аэродинамической характеристики вычисляются скорости воздушного потока, при которых будет достигнут оптимальный расход воздуха в каждой секции башенной градирни.

В заключительном этапе алгоритма, расчетные значения скорости воздуха сравниваются с фактическими значениями до тех пор, пока их рассогласование не будет сведено к нулю. В общем, это позволит установить необходимый угол поворота воздухопроводных окон, при котором расход воздуха в секции будет скорректирован согласно показаниям распределения плотности орошения воды, коэффициентов аэродинамического сопротивления и локальной скорости ветра. Таким образом, в процессе эксплуатации башенной испарительной градирни, программа управления позволит сбалансировать потоки – направить сильные воздушные потоки в секции с высоким орошением воды и, наоборот, слабые потоки воздуха в секции с низким орошением воды.

5.4 Техничко-экономический расчет

Выполнен расчет влияния неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни на выработку электроэнергии турбиной Т-100/120-3. Рассмотрено два режима работы исследуемой башенной градирни: фактический (с учетом неравномерности потоков) и нормативный.

На первом этапе расчета, для фактического и нормативного режима по энергетическим характеристикам (рисунок 5.32) определены давления пара P_2^Φ и P_2^H в конденсаторе КГ2-6200-3 паровой турбины Т-100/120-3 [22,23,24,25]. Рассматривая работу оборудования в август месяц 2018 года, при расходе пара в конденсатор $D_2 = 122,2$ т/ч, расходе циркуляционной воды через конденсатор $W = 5356$ т/ч и нормативной температуре охлажденной воды I очереди $t_{1B}^H = 24,7$ °С, давление отработавшего пара в конденсаторе P_2^H составит $0,058$ кгс/см². При тех же условиях расхода воды и пара в конденсатор, с фактической температурой охлажденной воды I очереди $t_{1B}^\Phi = 26,4$ °С, давление отработавшего пара в конденсаторе P_2^Φ составит $0,064$ кгс/см².

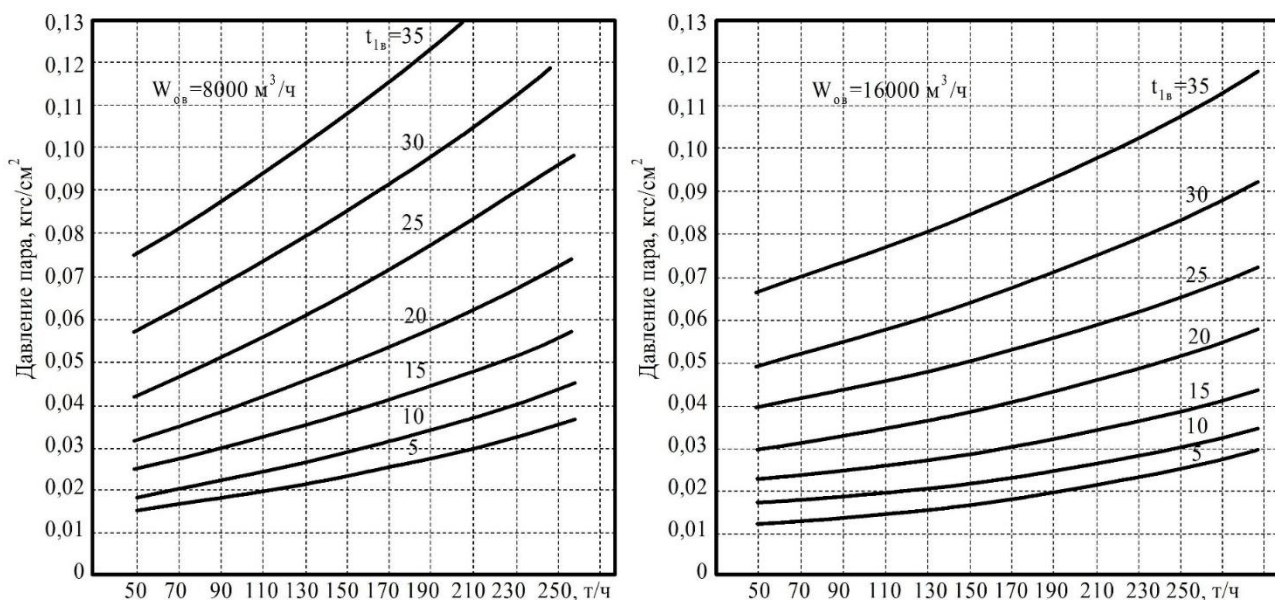


Рисунок 5.32 – Энергетические характеристики конденсатора при расходе оборотной воды 8000 и 16000 м³/ч

На следующем этапе, исходя из параметров давлений пара указанных режимов, определялась поправка к вырабатываемой электрической мощности $\Delta N_{\text{ф-н}}$. При $P_2^{\text{ф}} = 0,064 \text{ кгс/см}^2$ и $P_2^{\text{н}} = 0,058 \text{ кгс/см}^2$, поправка на мощность вырабатываемой электроэнергии $\Delta N_{\text{н-ф}}$ составила 686 кВт (рисунок 5.33).

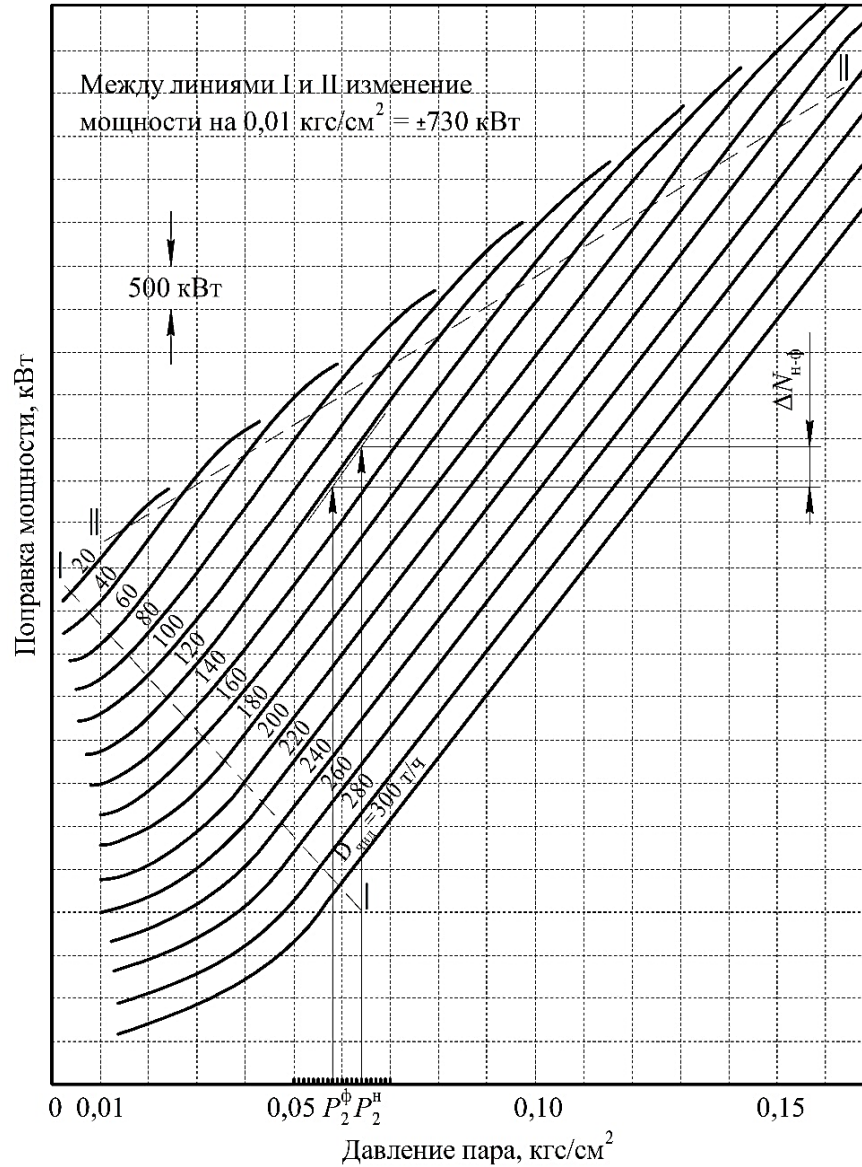


Рисунок 5.33 – Поправка к электрической мощности на отклонение давления пара в конденсаторе турбины Т-100/120-3

Следовательно, если время работы турбины $\tau_{\text{раб}}$ в август месяц составило 451 ч., можно определить недовыработку электроэнергии по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta N_{\text{н-ф}} \cdot \tau_{\text{раб}}, \quad (46)$$

Таким образом, недовыработка электроэнергии за август составит

$$\Delta \mathcal{E} = 686 \text{ кВт} \cdot 451 \text{ ч.} = 309 \text{ 386 кВт} \cdot \text{ч.}$$

В условиях резерва установленной мощности $N_{уст}$ в энергосистеме, полезно перевести недовыработку электроэнергии на расход условного топлива. Изменение расхода тепла на выработку электроэнергии ΔQ_3 рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta Q_3 = \Delta \mathcal{E} \cdot q_T^{бр(ф)} \cdot 10^{-6}, \text{ Гкал}, \quad (47)$$

где $q_T^{бр(ф)}$ – фактический удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии, ккал/кВт·ч.

Учитывая, что за август $q_T^{бр(ф)} = 2389,74$ ккал/кВт·ч, расхода тепла на выработку электроэнергии ΔQ_3 составит:

$$\Delta Q_3 = 309\,386 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 2389,74 \text{ ккал/кВт}\cdot\text{ч} = 739,35 \text{ Гкал}.$$

Расход топлива можно определить по формуле

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_3}{7 \cdot \eta_{к(ф)}^{нетто} \cdot \eta_{тп}^{\phi}}, \text{ т.у.т.}, \quad (48)$$

где $\eta_{к(ф)}^{нетто}$ – фактический КПД нетто по группе котлов, $\eta_{тп}^{\phi}$ – КПД теплового потока.

Таким образом, при $\eta_{к(ф)}^{нетто} = 0,89$ и $\eta_{тп}^{\phi} = 0,98$, перерасход топлива ΔB за август 2018-го года составит:

$$\Delta B = \frac{739,35}{7 \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 121,47 \text{ т.у.т.}$$

Аналогично расчету за август, произведены расчеты за другие месяцы 2018-го года и сведены в таблицу 5.3.

В суммарном расчете за 2018-ый год, перерасход топлива составит 574,93 т.у.т./год. Принимая стоимость природного газа за 3848,4 руб./т.у.т. [35], получим, что финансовые потери, возникающие по причине неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни составят 2 млн. 212 тыс. 565 руб./год при расчете на один турбоагрегат. Учитывая общее количество турбоагрегатов станции (11 шт.), можно определить, что полные суммарные потери на ТЭЦ составят в среднем 24 млн./год.

Таблица 5.3 – Расчет влияния неравномерности потоков на расход топлива ТЭЦ

Параметры	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
W , т/ч	9724,46	11516,04	9538,01	9,8	714,32	1660,7	115,06	5356,33	8687,2	4454	9258,3	1538,5
D_2 , т/ч	64,96	66,18	53,81	–	1,18	–	–	122,23	189,91	21,4	38,71	8,3
t_{1B}^{ϕ} , °C	15,83	15,24	14,78	17,7	21,32	19,63	27,69	26,38	25,07	18,0	15,13	14,69
t_{1B}^H , °C	13,53	12,79	12,48	15,9	19,92	18,23	26,29	24,68	22,87	16,4	12,73	13,29
$\tau_{\text{раб}}$, ч.	744	672	624	–	7	–	–	451	622	361	720	165
$q_T^{\text{бр}(\phi)}$, ккал/кВт·ч	1217,78	1181,11	1113,3	–	2526,4	–	–	2389,74	2374,1	1178	1070,6	1030,4
$\eta_{\text{к}(\phi)}^{\text{нетто}}$	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,89	0,89	0,88	0,89	0,89	0,89
$\eta_{\text{гп}}^{\phi}$	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
P_2^{ϕ} , кгс/см ²	0,028	0,027	0,026	–	–	–	–	0,064	0,077	0,028	0,028	–
P_2^H , кгс/см ²	0,024	0,023	0,022	–	–	–	–	0,058	0,068	0,026	0,025	–
$\Delta N_{\text{н-ф}}$, кВт	426,00	426,00	426,00	–	–	–	–	686	935	197	349	–
$\Delta \mathcal{E}$, кВт	316944	286272	265824	–	–	–	–	309386	581570	7112	25128	–
$\Delta \mathcal{E}$, руб.	1169523,4	1056343,7	980890,6	–	–	–	–	1141634,3	2145993	262422	927223	–
$\Delta Q_{\mathcal{E}}$, Гкал	385,97	338,12	295,94	–	–	–	–	739,35	1380,7	83,77	269,03	–
ΔB , т.у.т.	63,11	55,26	48,31	–	–	–	–	121,47	229,11	13,7	43,97	–
ΔB , т.у.т./год	574,93											

5.5 Выводы по главе

На основании полученных результатов, выдвинуты мероприятия, позволяющие повысить охлаждающую мощность в условиях неравномерности потоков башенной градирни. К ним отнесены: устранение закупоривания трубок блоков оросителей, устранение провисания оросительного устройства, замена сопел водораспределительной системы. Средствами численного моделирования, продемонстрирована необходимость применения системы рационального регулирования потоками воздуха в секциях башенной градирни.

Разработана система автоматического управления воздухопроводными окнами башенной градирни в условиях неравномерности потоков. Предложена структурная и электрическая принципиальная схема автоматической системы управления. Разработан алгоритм и программа управления воздухопроводными окнами, позволяющие рационально распределить потоки воздуха в башенной градирне (приложение Г).

Выдвинутые мероприятия позволят уменьшить неравномерности потоков воды и воздуха башенной градирни БГ-2600 Набережночелнинской ТЭЦ, а также сократить финансовые потери по перерасходу топлива на 2 млн. 212 тыс. 565 руб./год. с расчетом на один турбоагрегат, а при расчете на все турбоагрегаты станции, в среднем на 24 млн./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

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.

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.

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 охладительная характеристики БГ-2600, которые используются при планировании гидравлической нагрузки.

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

Методика дополнительно апробирована на башенной градирне БГ-1600.

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 м/с при средней плотности орошения 3,4 м³/м²·ч.

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.

Проведен технико-экономический расчет влияния неравномерности распределения воды и воздуха на расход топлива НЧ ТЭЦ. Предложенные организационно-технические мероприятия позволят уменьшить финансовые потери до 2,2 млн. руб./год по расходу топлива при расчете на один турбоагрегат или до 24 млн. руб./год при расчете для 11-ти турбоагрегатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение: учебник для вузов / Н. Н. Абрамов. – [2-е изд., перераб. и доп.] – Москва: Стройиздат, 1974. – 480 с.
2. Алиев, А. Ф. Предотвращение накипеобразования в оборотных системах технического водоснабжения при использовании вод повышенной минерализации / А. Ф. Алиев; Теплоэнергетика. –2006. – №8. – С. 55 – 58.
3. Арефьев, А. Н. Достижение наиболее низкой температуры в башенных охладителях с естественной тягой; Известия ВТИ. – 1932. – № 1. – С. 23.
4. 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», 9 – 11 октября 2017 г. – Москва: НИУ «МЭИ», 2017. – Т.2. – С. 57 – 58.
5. 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», 8-10 ноября 2017 г. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т. 1. – С. 780 – 784.
6. Бадриев, А. И. Анализ рабочих характеристик при неравномерности распределения потоков в башенной градирне / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин; Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29 – 31 мая 2019 г. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – Т2. – С. 51 – 53.
7. Бадриев, А. И. Влияние характеристик градирни на энергосбережение ТЭЦ / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин; Международная конференция «Энергосбережение. Наука и образование», 28 ноября 2017 г. – Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2017. – С. 140 – 142.
8. Бадриев, А. И. Метод анализа влияния гидравлической нагрузки на охлаждающую способность башенной градирни / А. И. Бадриев, В. Н. Шарифуллин; XI Международная конференция «Тинчуринские чтения», 23-25 марта 2016 г. – Казань: КГЭУ, 2016. – Т.2. – С. 27.

9. 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», 5 – 7 апреля 2016 г. – Иваново: ИГЭУ, 2016. – Т. 1. – С. 45 – 47.

10. 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», 1 – 3 ноября 2016 г. – Саратов: СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2016. – С. 210 – 215.

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

12. Балаев, И. С. Проблемы при эксплуатации водооборотных циклов и новые подходы к их решению / И. С. Балаев, А. А. Герт, Н. Е. Спиридонов; Водоснабжение и санитарная техника, 2019. – № 1. – С. 38 – 47.

13. Беляева, С. В. Расчет воздушного зазора между защитным экраном и оболочкой железобетонной башенной градирни / С. В. Беляева, Ю. Г. Барабанщиков; Строительство уникальных зданий и сооружений, 2013. – №4 (9). – С. 18 – 28.

14. Беренгартен, М. Г. Исследования испарительного охлаждения оборотной воды в комбинированных контактных устройствах / М. Г. Беренгартен, А. И. Шустшов, М. И. Клюшенкова, Н. А. Кузнецова, А. С. Пушнов, Б. Л. Свердлин, В. И. Шишов; Известия ВНИИГ им. Веденеева, 2009. – Т. 253. – С. 92 – 98.

15. Берман, Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л. Д. Берман. – Москва: Госэнергоиздат, 1949. – 440 с.

16. Берман, С. С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок / С. С. Берман. – Москва: Машгиз, 1959. – 423 с.

17. Бондарь, К. Е. Аэродинамические исследования миниградирен / К. Е. Бондарь, С. П. Иванов, С. В. Лапонов, Е. С. Подцепняк; Естественные и технические науки, 2020. – № 9(147). – С. 187 – 189.

18. Бондарь, К. Е. Распределение скоростей воздушного потока в малогабаритной градирне с тангенциальной подачей воздуха / К. Е. Бондарь [и др.]; Естественные и технические науки, 2019. – № 11(137). – С. 411 – 414.

19. Бондарь, Ю. Ф. Совместимость хлорирования с обработкой воды оборотных систем охлаждения фосфонатами / Ю. Ф. Бондарь, Т. К. Досаева, О. А. Попов; Теплоэнергетика, 1989. – №5. – С. 18 – 20.

20. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей / В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягодкин. – Москва: Машиностроение, 1967. – 263 с.

21. Братута, Э. Г. Влияние неравномерности распределения дискретной фазы на тепломассообмен в дисперсном потоке / Э. Г. Братута, А. Н. Ганжа, С. В. Боровок; Вестник НТУ «ХПИ»: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, 2004. – № 11. – С. 37 – 42.

22. Бродов, Ю. М. Концепция системы диагностики конденсационной установки паровой турбины / Ю. М. Бродов, К. Э. Аронсон, М. А. Ниренштейн; Теплоэнергетика, 1997. – № 7. – С. 34 – 38.

23. Бродов, Ю. М. Особенности расчета конденсирующих теплообменных аппаратов ПТУ при модернизации их в условиях эксплуатации / Ю. М. Бродов, М. А. Ниренштейн, К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков; Электрические станции, 2007. – № 7. – С. 15 – 18.

24. Бродов, Ю. М. Современная ситуация и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС / Ю. М. Бродов, К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, М. А. Ниренштейн, Н. В. Желонкин, Д. В. Брезгин, И. Б. Мурманский. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 104 с.

25. Бродов, Ю. М. Современное состояние и тенденции в проектировании и эксплуатации водоохлаждаемых конденсаторов паровых турбин ТЭС и АЭС (обзор) / Ю. М. Бродов, К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, М.А. Ниренштейн; Теплоэнергетика, 2019. – № 1. – С. 21 – 33.

26. Буренков, Д. К. Расчет и экспериментальное исследование плотности орошения в факеле центробежно-струйных форсунок большой производительности / Д. К. Буренков, И. В. Деревич, В. И. Максимов, Т. В. Рабчук; Теплоэнергетика, 1996. – №3. – С. 58 – 63.

27. Ведрученко, В. Р. Повышение эффективности работы оборотной системы водоснабжения ТЭС (на примере Омской ТЭЦ-5) / В. Р. Ведрученко, В. К. Гаак, М. В. Глухова; Энергосбережение и водоподготовка, 2021. – № 2(130). – С. 10 – 15.

28. Власов, А. В. Интенсификация испарительного охлаждения в башенных градирнях при закрутке входных воздушных потоков / А. В. Власов, В. Ф. Давиденко, Г. В. Дашков, О. Г. Мартыненко, А. Д. Солодухин, Н. Н. Столович, В. Д. Тютюма // Труды IV Минского международного форума. – 2000. – Т. 10. – С. 192 – 201.

29. Власов, А. В. Оптимизация внутренней аэродинамики башенных испарительных градирен / А. В. Власов, В. Ф. Давиденко, Г. В. Дашков, В. С. Дикун, А. Д. Солодухин, В. Д. Тютюма, С. П. Фисенко; V Минский международный форум по тепло- и массообмену, 24-28 мая 2004 г. Тезисы докладов и сообщений. – Т. 2. – Мн.: ИТМО НАНБ. – 2004. – С. 278 – 279.

30. Власов, С. М. Разработка технологий стабилизационной обработки воды системы оборотного охлаждения ТЭС / С. М. Власов, Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, А. Ю. Власова; Теплоэнергетика, 2018. – № 2. – С. 44 – 49.

31. Гильфанов, К. Х. Повышение эффективности охлаждения воды в оросителях градирни с принудительной тягой / К. Х. Гильфанов, Ф. М. Давлетшин, Д. Р. Гилязов; Вестник Казанского государственного университета, 2011. – № 1(8). – С. 6 – 13.

32. Гильфанов, К. Х. Повышение эффективности охлаждения воды и исследование градирен как объекта управления: монография / К.Х. Гильфанов, Ф. М. Давлетшин, Д. Р. Гилязов. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2009. – 185 с.

33. Гильфанов, К. Х. Тепло- и массообмен при охлаждении воды в оросителях градирни с принудительной тягой / К.Х. Гильфанов, Ф.М. Давлетшин, Д.Р. Гилязов; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2009. – № 11 – 12. – С. 33 – 40.

34. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / В. Е. Гмурман. – Москва: Высшая школа, 2003. – 479 с.

35. Годовой отчет АО «Татэнерго» за 2018 год. // АО «Татэнерго»: [сайт]. – 2018. – URL: <http://www.tatgencom.ru> (дата обращения: 14.11.2019).

36. Головки, А. Для чего нужна градирня и принцип ее работы / А. Головки. // LiveJournal: [сайт]. – 2016. URL: <https://golovko.livejournal.com> (дата обращения: 05.05.2019).

37. ГОСТ Р 7.0.100 – 2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден приказом № 1050-ст Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандартом) от 03 декабря 2018 года: введен впервые: дата введения 01 июля 2019 года / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)» филиал «Российская книжная палата». – Москва: Стандартинформ, 2018. – 124 с.; 29 см.

38. Григорьев, В. А. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 588 с.

39. Гусинская, Н. В. Тепловая эффективность испарительных градирен башенного типа / Н. В. Гусинская, Р. И. Нигматуллин; Теплоэнергетика, 2001. – № 8. – С. 68 – 71.

40. Давлетшин, Ф. М. Испытания градирен, проводимые холдингом ООО «ТМИМ» / Ф. М. Давлетшин. // ООО «ТМИМ»: [сайт]. – 2006. URL: <http://gradirni.tmim.ru> (дата обращения: 02.08.17).

41. Давлетшин, Ф. М. Оценка погрешности результатов при опытном исследовании характеристик оросителей промышленных градирен / Ф. М. Давлетшин, К. Х. Гильфанов; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2007. – № 1 – 2. – С. 111 – 115.

42. Давлетшин, Ф. М. Экспериментальная установка для исследования характеристик оросителей промышленных градирен / Ф. М. Давлетшин, А. А. Сагдеев, К. Х. Гильфанов; Химия и химическая технология, 2006. – Т. 49. – Вып. 12. – С. 90 – 92.

43. Данилов – Данильян, В. И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России / В. И. Данилов – Данильян. – Москва: ООО «Типография ЛЕВКО», 2009. – 88 с.

44. Даутов, Р. Г. Повышение эффективности процесса охлаждения в градирне / Р. Г. Даутов, С. А. Вилохин; Вестник Казанского технологического университета, 2013. – № 5. – Т. 16. – С. 190 – 192.

45. Дашков, Г. В. Моделирование работы башенной испарительной градирни с импульсно-периодическим режимом орошения / Г. В. Дашков, А. Д. Солодухин, Н. Н. Столович, С.П. Фисенко; Известия РАН. Энергетика, 2007. – №1. – С. 96 – 106.

46. Дашков, Г. В. Нестационарный тепло – и массоперенос при испарительном охлаждении стекающих пленок жидкости / Г. В. Дашков, Е. Ф. Ноготов, Н. В. Павлюкевич, В.Д. Тютюма; Инженерно-физический журнал, 2006. – Т. 79. – №1. – С. 3 – 10.

47. Джанибеков, Г. Г. Экономически наивыгоднейшая плотность орошения башенных охладителей для мощных электросиловых станций СССР / Г. Г. Джанибеков; Изв. ВТИ, 1934. – № 5. – С. 40.

48. Дикий, Н. А. Исследование процессов теплопереноса в пористых насадках при пленочном течении жидкости / Н. А. Дикий; Известия вузов. Энергетика, 1986. – №7. – С. 93 – 96.

49. Дмитриев, А. В. Оценка пропускной способности безреагентной испарительной градирни со струйно-пленочными контактными элементами / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев, А. И. Хафизова, О. С. Дмитриева; Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019. – Т. 23. – № 5(148). – С. 902 – 910.

50. Дмитриев, А. В. Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена в трехпоточной испарительной градирне с наклонно-гофрированными контактными элементами / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев, Л. В. Круглов, Н. Д. Чичирова; Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2020. – Т. 12. – № 4(48). – С. 126 – 135.

51. Дмитриев, А. В. Экспериментальное исследование гидравлических и тепломассообменных показателей наклонно-гофрированных контактных элементов оросителя градирни / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев, О. С. Дмитриева; Экология и промышленность России, 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 4-8.

52. Дмитриева, О. С. Охлаждение оборотной воды в вихревой камере с дисковым распылителем / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев; Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2013. – № 3. – С. 13 – 16.

53. Дмитриева, О. С. Разработка новых градирен для увеличения энергоэффективности промышленных установок / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев; Вестник Казанского технологического университета, 2014. – Т 17. – № 6. – С. 134 – 136.

54. Доброго, К. В. Использование брызгательных сопел для придания вращения паровоздушному потоку в надросительном пространстве градирни / К. В. Доброго, В. Ф. Давыденко, И. А. Козначеев; Инженерно - физический журнал, 2016. – Т. 89. – № 1. – С. 148 – 157.

55. Доброго, К. В. Моделирование башенной испарительной градирни и влияния аэродинамических элементов на ее работу в условиях ветра / К. В. Доброго, М. М. Хеммасиан Кашани, Е. Е. Ласко; Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2014. – №6. – С. 47 – 60.

56. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций. Часть 1 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Н. В. Широглазова, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская; Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 235 – 248.

57. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций. Часть 2 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Н. В. Широглазова, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская; Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 362 – 375.

58. Зиганшин, А. М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: Методическое пособие для учебной и научной работы – Казань: Издательство КГАСУ, 2013. – 79 с.

59. Иванов, С. П. Разработка конструкции сетчатой оболочки из полимерных материалов с целью интенсификации тепломассообменного процесса в градирнях / С. П. Иванов, Е. В. Боев; Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт, 2007. – № 5. – С. 53 – 54.

60. Инструкция по натурным испытаниям и исследованиям башенных градирен большой производительности (ВСН 25-80): утверждено протоколом совместного совещания Главниипроекта и Главтехуправления Минэнерго СССР от 10 декабря 1980 г. N 9-5/11: введено в действие IV квартал 1981 г. – Москва: Минэнерго СССР, 1981. – 35 с.

61. Калатузов, В. А. Математическая модель расчета нормативных характеристик / В. А. Калатузов; Энергосбережение и водоподготовка, 2006. – №.4(42). – С. 55 – 58.

62. Калатузов, В. А. Методика построения нормативных характеристик башенных градирен испарительного типа по результатам натуральных измерений / В. А. Калатузов; Теплоэнергетика, 2007. – №11. – С. 51 – 55.
63. Калатузов, В. А. Проблемы обеспечения надежности железобетонных вытяжных башен градирен / В. А. Калатузов; Энергетик, 2001. – №8. – С. 23 – 26.
64. Калатузов, В. А. Регулирование подачи и распределения воздуха – главное условие эффективности работы градирен / В. А. Калатузов; Промышленная энергетика, 2010. – №6. – С. 20 – 23.
65. Капельно – пленочный ороситель градирни. // ООО НПО «Агростройсервис»: [сайт]. – 2017. – URL: <https://acs-nnov.ru> (дата обращения: 05.05.2019).
66. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учебное пособие / В. В. Кафаров. – Москва: Высшая школа, 1987. – 320 с.
67. Конг, Ц. Ц. Экспериментальное исследование характеристик тепло- и массопереноса при испарительном охлаждении воды в градирне с пенокерамическим оросителем / Ц. Ц. Конг, Д. Ю. Лю, П. Ван [и др.]; Теплофизика и аэромеханика, 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 287 – 300.
68. Корбуш, К. И. Конструкция и расчет башенных охладителей / К. И. Корбуш; Тепло и сила, 1932. – № 1. – С. 28.
69. Кравченко, В. П. Сопоставление охлаждающей способности асбестоцементного и сетчатого оросителя градирен / В. П. Кравченко, Е. Н. Морозов, М. П. Галацан; Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2011. – Т. 2. – № 8. – С. 13 – 16.
70. Крылов, О. В. Ограниченность ресурсов как причина предстоящего кризиса / О. В. Крылов; Вестник РАН, 2000. – Т. 70. – № 2. – С. 136 – 146.
71. Лаптев, А. Г. Математическая модель и расчет эффективности процесса охлаждения воды в пленочной градирне / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева; Теплоэнергетика, 2016. – № 10. – С. 48 – 53.

72. Лаптев, А. Г. Определение тепловой эффективности и высоты блоков оросителей противоточных градирен / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева; Инженерно-физический журнал, 2020. – Т. 93. – № 3. – С. 715 – 721.

73. Лаптев, А. Г. Определение эффективности охлаждения оборотной воды в градирне / А. Г. Лаптев, В. А. Данилов, И. В. Вишнякова; Теплоэнергетика, 2004. – № 8. – С. 61 – 65.

74. Лаптев, А. Г. Сравнительные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочных регулярных насадок в градирнях / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева; Вестник технологического университета, 2017. – Т.20. – № 18. – С. 71 – 74.

75. Лаптев, А. Г. Устройство и расчет промышленных градирен: монография / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2004. – 180 с.

76. Лаптева, Е. А. Модель структуры потока и эффективность пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова, А. Г. Лаптев; Фундаментальные исследования, 2018. – № 11 – 2. – С. 150 – 154.

77. Лаптева, Е. А. Показатели энергоэффективности градирен / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев, М. И. Фаррахов; Надежность и безопасность энергетики, 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 217 – 221.

78. Лаптева, Е. А. Снижение энергозатрат на охлаждение воды применением мини градирен / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова; Труды Академэнерго, 2020. – № 2(59). – С. 23 – 30.

79. Лаптева, Е. А. Тепловая эффективность и расчет охлаждения воды в пленочных градирнях / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев; Вода: химия и экология, 2018. – № 4 – 6 (115). – С. 101 – 105.

80. Лаптева, Е. А. Энергетические и тепломассообменные характеристики пленочных блоков оросителей в градирнях / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев, Л. М. Ишмуратова; Международная конференция «IX семинар вузов по теплофизике и энергетике», 21 – 42 октября 2015 г. – Казань: КГЭУ, 2015. – С. 54 – 60.

81. Лаптева, Е. А. Ячеечная модель тепломассопереноса в пленочных блоках оросителей градирни / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев; Вестник технологического университета, 2015. – Т.18. – № 11. – С. 181 – 185.

82. Ледуховский, Г. В. Экспериментальное определение сетки поправок к мощности турбины ТП-115/125-130-1ТП УТМЗ на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе / Г. В. Ледуховский, А. А. Поспелов, М. Ю. Зорин; Вестник ИГЭУ, 2010. – Вып. 4. – С. 1 – 7.

83. Марченко, Е.М. Совершенствование средств снижения шума на тепловых электростанциях / Е. М. Марченко, М. Е. Марченко, Ю. Е. Мишенин; Теплоэнергетика, 1999. – № 12. – С. 49 – 52.

84. Методика построения нормативных характеристик градирен испарительного типа (СО 34.22.302–2005): утверждено главным инженером Филиала ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – «Фирма ОРГРЭС» В. А. Купченко от 01 октября 2005: введено в действие 03 октября 2005 г. – Москва: СПО ОРГРЭС, 2005. – 20 с.

85. Мильман, О. О. Исследование режима работы сухой вентиляторной градирни на ТЭЦ-12 ПАО «Мосэнерго» / О. О. Мильман, С. Н. Ленев, П. В. Голов [и др.]; Теплоэнергетика, 2020. – № 4. – С. 41 – 51.

86. Мильман, О. О. Экспериментальные исследования распределения потоков воздуха в воздушных конденсаторах пара / О. О. Мильман, А. В. Кондратьев, А. В. Птахин, М. О. Корлякова; Теплоэнергетика, 2019. – № 12. – С. 77 – 85.

87. Мурадян, А. К. Исследование режимов работы и энергетических показателей энергоблоков при увеличении охладительного эффекта башенных градирен / А. К. Мурадян, Д. Т. Аршакян; Теплоэнергетика, 2007. – № 11. – С. 66 – 68.

88. Научно-производственная фирма ООО «ЭКОТЭП». Градирни и технологическое оборудование для них. // ООО НПО «ЭКОТЭП»: [сайт]. – 2019. – URL: <http://www.ekotep.ru/> (дата обращения: 16.12.2019).

89. Недвига, Ю. С. Натурные исследования работы разбрызгивающих форсунок с гидровентиляторами на градирне №5 ТЭЦ-22 АО «МОСЭНЕРГО» / Ю. С. Недвига, К. В. Пилипенко; Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000. – Т. 236. – С. 248 – 253.

90. Николаева, О. С. Гидравлический расчет напорной водораспределительной системы градирни (на примере вентиляторной градирни Мутновской ГеоЭС) / О. С. Николаева, Б. Л. Свердлин, К. В. Пилипенко; Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2010. – Т. 260. – С. 78 – 85.

91. Обследование и испытания оборотной системы охлаждения Астраханской ТЭЦ-2: технический отчет; ООО «ИРВИК», 2011. – 163 с.

92. Очков, В. Ф. Расчет и визуальное отображение водно – химического режима систем оборотного охлаждения на ТЭС / В. Ф. Очков, К. А. Орлов, Е. Н. Иванов, А. А. Макушин; Теплоэнергетика, 2013. – №7. – С. 10 – 17.

93. Павленко, А. Н. Разделение смесей и распределение жидкости на структурированной насадке в крупномасштабной модели дистилляционной колонны / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, В. Ю. Чехович, В. Е. Жуков, С. Сандер, П. Хоуптон, А. Ф. Серов, А. Д. Назаров; Теоретические основы химической технологии, 2006. – Т. 40. – № 4. – С. 355 – 365.

94. Павленко, А. Н. Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, В. Ю. Чехович, В. Е. Жуков, С. Сандер, П. Хоуптон; Теоретические основы химической технологии, 2009. – Т. 43. – № 1. – С. 3 – 13.

95. Патент № 133270 РФ, МПК F28C 1/00 (2006.01), G05B 19/00 (2006.01). Автоматизированная система мониторинга и управления физико-химическими процессами градирни: № 2013105837/06; заявл. 12.02.2013; опубл. 10.10.2013 / Власов С.М. Чичирова Н.Д. Чичиров А.А.

96. Патент № 2295014 РФ, МПК E04H 5/12 (2006.01), F28F 25/00 (2006.01). Способ воздухорегулирувания в градирне и устройство для его осуществления: № 2005119598/03; заявл. 24.06.2005; опубл. 10.03.2007 / Калатузов В. А.

97. Патент № 2355968 РФ, МПК FC28C 1/00 (2006.01). Градирня: № 2007141905/06; заявл. 14.11.2007; опубл. 20.05.2009 / Давлетшин Ф.М.

98. Петросян, В. Г. Анализ возможности повышения эффективности охлаждения воды в испарительных градирнях Армянской АЭС / В. Г. Петросян, Э. А. Егоян; Теплоэнергетика, 2015. – № 10. – С. 30 – 36.

99. Петручик, А. И. К анализу экспериментальных данных о тепловой эффективности башенной испарительной градирни / А. И. Петручик, А. Д. Солодухин, Н. Н. Столович, С. П. Фисенко; Известия академии наук. Энергетика, 2000. – №6. – С. 66 – 72.

100. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие / Под. общ. ред. В. С. Пономаренко. – Москва: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

101. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»): ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР от 20 марта 1985 г. № 27 / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. - Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 190 с.

102. Преснов, Г. В. Эффективный способ подавления шума башенной градирни ТЭЦ – 23 ОАО «Мосэнерго» / Г.В. Преснов, Н.А. Зройчиков, И.В. Галас, А.А. Патакин, А.Г. Москвин, В.И. Лисица, Е.А. Морозова; Теплоэнергетика, 2006. – № 11. – С. 47 – 49.

103. Пушнов, А. С. Влияние гидравлического сопротивления регулярных насадок на эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях / А. С. Пушнов; Теплоэнергетика, 2013. – № 6. – С. 47 – 50.

104. Пушнов, А. С. Влияние разрывов по высоте между соседними пакетами регулярной насадки на эффективность процесса испарительного охлаждения / А. С. Пушнов, Н. П. Лозовая; Энергосбережение и водоподготовка, 2010. – № 4. – С. 49 – 50.

105. Пушнов, А. С. Канальная модель аэродинамики градирни / А. С. Пушнов; Энергетика, 2011. – Т. 57. – №1. – С. 60 – 70.

106. Пушнов, А. С. Компоновка оросителя градирни с учетом неравномерности поля скоростей воздушного потока / А. С. Пушнов, А. С. Рябушенко; Теплоэнергетика, 2016. – № 7. – С. 74 – 79.

107. Пушнов, А. С. О равномерности распределения жидкости в тепло- и массообменных аппаратах с регулярной насадкой / А. С. Пушнов; Хим. промышленность, 2008. – Т. 85. – № 8. – С. 405 – 412.

108. Реконструкция, модернизация и ремонт градирни. // ООО НПО «Агростройсервис»: [сайт]. – 2017. – URL: <https://acs-nnov.ru> (дата обращения: 06.05.2019).

109. Розен, А. М. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / А. М. Розен, Е. И. Мартюшин, В. М. Олевский [и др.] - Москва: Химия, 1980. – 320 с.

110. Руководство по оптимизации оборотной системы водоснабжения электростанций с градирнями (РД 34.22.101): утверждено Научно-техническим советом Минэнерго СССР (протокол № 82 от 12 августа 1981 г.). – Москва: Минэнерго СССР, 1981. – 44 с.

111. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / под ред. В. Я. Гиршфельда. – 3 – е изд., М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

112. Седлов, А. С. Повышение охлаждающей способности градирен ТЭС с использованием аэродинамических завихрителей / А. С. Седлов, А. М. Латыпов [и др.]; Новое в российской электроэнергетике, 2019. – № 2. – С. 6 – 15.

113. Сильнов, Д. В. В Ульяновске восстанавливают градирню ТЭЦ, поврежденную ураганом / Д. В. Сильнов. // Главные новости России: [сайт]. – 2018. – 6 августа. – URL: <https://mosaica.ru> (дата обращения: 04.05.2019)

114. Синькевич, А. Н. Проблемы эксплуатации башенных градирен из монолитного железобетона / А. Н. Синькевич, А. В. Мучинская; Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты, 2013. – № 9. – С. 172 – 176.

115. Солодухин, А.Д. Аэродинамические методы повышения охлаждающей способности башенных испарительных градирен ТЭС И АЭС / А. Д. Солодухин, В. Ф. Давиденко [и др.]; Труды VI Минского международного форума, 19 – 23 мая 2008. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова, 2008. – Т. 10. – С. 192 – 201.

116. Сосновский, С. К. Коэффициент эффективности работы вентиляторных и башенных градирен. / С. К. Сосновский, В. П. Кравченко; Теплоэнергетика, 2014. – № 9. – С. 20 – 25.

117. Сосновский, С. К. Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторных и башенных градирнях / С. К. Сосновский, В. П. Кравченко; Энергетика и электрификация, 2008. – №3. – С. 37 – 44.

118. Сосновский, С. К. Оптимальные параметры работы градирен / С. К. Сосновский; Технологический аудит и резервы производства, 2012. – № 5/1(7). – С. 5 – 6.

119. Сосновский, С. К. Термодинамические циклы и правила регулирования систем оборотного водоснабжения с испарительными охладителями / С. К. Сосновский, В. П. Кравченко; Холодильная техника и технология, 2015. – Т. 51. – Вып. 6. – С. 51 – 60.

120. Спицын, И. П. Некоторые вопросы гидравлики водораспределительных систем башенных градирен / И. П. Спицын; Ленинградский гидрометеорологический институт. Межведомственный сборник, издание ЛПИ, 1978. – Вып. 67. – С 38 – 53.

121. Тимонин, А. С. Машины и аппараты химических производств: учебное пособие для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др. / Под общей редакцией А. С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой. 2008. – 872 с.

122. Указания по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике (РД 34.09.212): утверждено зам. начальника Главтехуправления Д. Я. Шамараковым 7.02.1980 г. – Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. – Москва: Южтехэнерго, 1981. – 37 с.

123. Фарфоровский, Б. С. Повышение производительности градирни путем реконструкции / Б. С. Фарфоровский; Электрические станции, 1947. – № 9. – С. 50.

124. Хвостиков, А. С. Модернизация башенных градирен эксплуатируемых в сложных климатических условиях / А. С. Хвостиков, К. С. Богданов; Энергосбережение и водоподготовка, 2019. – № 5(121). – С. 22 – 26.

125. Чичиров, А. А. Автоматизированные комплексы мониторинга и управления системами оборотного охлаждения на ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, С. М. Власов, О. В. Ильин; Труды Академэнерго, 2012. – № 4. – С. 45 – 53.

126. Чичиров, А. А. Исследование состава и структуры отложений в системе оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, И. И. Галиев, Л. И. Гайнутдинова, А. Ю. Смирнов; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2009. – № 7 – 8. – С. 37 – 45.

127. Чичиров, А. А. Комплексная реагентная обработка воды системы технического водоснабжения с градирнями на ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, М. А. Волков, С. М. Власов, И. А. Закиров; Труды Академэнерго, 2012. – № 1. – С. 90 – 100.

128. Чичиров, А. А. Математическое моделирование материальных потоков в системе оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, И. Ю. Силов, А. Ю. Смирнов, А. И. Муртазин; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2008. – № 5 – 6. – С. 28 – 34.

129. Чичиров, А. А. Математическое моделирование несопряженной системы оборотного охлаждения с реагентной стабилизационной обработкой воды на примере Набережночелнинской ТЭЦ / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, М. А. Волков, С. М. Власов; Труды Академэнерго, 2011. – №3. – С. 56 – 74.

130. Чичиров, А. А. Моделирование и анализ процессов при функционировании системы оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, И. И. Галлеев, А. И. Муртазин, А. Ю. Смирнов, М. А. Волков; Труды Академэнерго, 2009. – № 2. – С. 64 – 80.

131. Чичиров, А. А. Мониторинг физико-химических процессов в системе оборотного охлаждения Набережночелнинской ТЭЦ / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, М. А. Волков, А. И. Муртазин; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2010. – № 3 – 4. – С. 146 – 150.

132. Чичиров, А. А. Разработка методов снижения неустойчивости циркуляционной воды сопряженной системы оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, С. М. Власов, А. И. Ляпин, Р. Ш. Мисбахов, И. Ю. Силов, А. И. Муртазин; Теплоэнергетика, 2016. – № 10. – С. 73 – 80.

133. Чичиров, А. А. Экспериментальное определение испарения воды в градирнях системы оборотного охлаждения ТЭС / А. А. Чичиров, А. Ю. Смирнов, В. А. Васильев, Н. Д. Чичирова; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2007. – № 5 – 6. – С. 134 – 140.

134. Чичирова, Н. Д. Исследование структуры отложений в системах оборотного охлаждения паровых турбин ТЭС / Н. Д. Чичирова, С. М. Власов, А. А. Чичиров, А. А. Филимонова, А. Ю. Власова; Теплоэнергетика, 2018. – № 9. – С. 94 – 102.

135. Чичирова, Н. Д. Определение причин осадкообразования в системе технического водоснабжения на ТЭС / Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, А. И. Муртазин, С. М. Власов; Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2012. – № 1-2. – С. 41 – 45.

136. Чичирова, Н. Д. Повышение охлаждающей способности башенных градирен на примере БГ – 1520 ст. №4 КТЭЦ – 2 / Н. Д. Чичирова, М. М. Субхангулов; Труды Академэнерго, 2010. – № 1. – С. 45 – 54.

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

138. 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.

139. 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.

140. 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.

141. Шарифуллин, В. Н. Основы математического моделирования и оптимизации технологических процессов / В. Н. Шарифуллин. – Казань: КГЭУ, 2008. – 118 с.

142. Шрайбер, А. А. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в градирнях нового поколения. / А. А. Шрайбер, А. И. Баштовой; Промышленная теплотехника, 2005. – Т. 27. – № 5. – С. 28 – 33.

143. Югов, А. М. Технология монтажа металлической башенной градирни / А. М. Югов, Р. В. Судашов; Современное промышленное и гражданское строительство, 2008. – Т.4. – №1. – С. 39 – 48.

144. Al – Waked, R., Behnia, M. CFD simulation of wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, № 4, pp. 382 – 395.

145. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS, Inc. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, 2013.

146. Arias, B.G., Merayo, N., Millán, A., Negro, C. Sustainable recovery of wastewater to be reused in cooling towers: Towards circular economy approach, 2021, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 41, pp. 102064. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102064.

147. 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.

148. 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.

149. Badriev, A. I., Sharifullin, V. N. The analysis of the process in the cooling tower with the low efficiency. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, pp. 012205. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012205.
150. Bender, T. J., Bergstrom, D. J., Rezkallah, K. S. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: Part 2. Wind wall study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, vol. 64, no 1, pp. 61 – 72.
151. Bender, T. J., Bergstrom, D. J., Rezkallah, K. S. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: Part 3. Numerical study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, vol. 64, no 1, pp. 73 – 88.
152. Busch, D., Harte, R., Kratzig, W. B., Montag, U. New natural draft cooling tower of 200 m of height. *Engineering Structures*, 2002, vol. 24, № 12, pp. 1509-1521.
153. Chen, X., Sun, F., Chen, Y., Gao, M. New retrofit method to improve the thermal performance of natural draft wet cooling towers based on the reconstruction of the aerodynamic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 132, pp. 671 – 680. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.047.
154. Christiansen, J. E. Irrigation by Sprinkling. *California Agricultural Experiment Station*, University of California, Berkeley, bulletin 670, 1942.
155. Comansa Jie builds the world's highest cooling towers: news [Site of Linden Comansa], 2012. Available at: <https://www.nbmcw.com> (accessed 01.04.19).
156. Derksen, D. D., Bender, T. J., Bergstrom, D. J., Rezkallah, K. S. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: Part 1. Wind tunnel study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, vol. 64, no 1, pp. 47 – 59. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00084-0.
157. Economides, M., Permadi, P. Production Engineering. Cooling Towers. *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, 1996, vol. 2, pp. 363 – 983.
158. Elsarrag, E. Experimental study and predictions of an induced draft ceramic tile packing cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, pp. 2034 – 2043. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.12.019.

159. Facao, J., Oliveira, A. C. Thermal behavior of closed wet cooling towers for use with chilled ceilings. *Applied Thermal Engineering*, 2000, vol. 20, no 13, pp. 1225 – 1236. DOI: 10.1016/S1359-4311(99)00096-4.
160. Gao, M., Sun, F., Wang, N., Zhao, Y. Experimental research on circumferential inflow air and vortex distribution for wet cooling tower under crosswind conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2014, № 1 – 2, pp. 93 – 100. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.023.
161. Gas Processors Suppliers Association. *Engineering data book*. FPS version, 2004, vol. I & II, sections 1 – 26.
162. Gharagheizi, F., Hayati, R., Fatemi, S. Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing. *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, no 1, pp. 277 – 280. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.002.
163. Gunn, D. J., Malik, A. A. Wind Forces and the Proximity of Cooling Towers to Each Other. *Nature*, 1966, vol. 210, pp. 1142 – 1143. DOI: 10.1038/211735a0.
164. Jiang, L., Han, Q., Wang, N., Gao M., He, S., Guan, H., Tan, X. The effects of water droplet diameter distribution in the rain zone on the cooling capacity and water-splashing noise for natural draft wet cooling towers. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 164, 2021, pp. 106875. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106875
165. Kong, Y., Wang, W., Huang, X., Yang, L., Du, X., Yang, Y. Wind leading to improve cooling performance of natural draft air-cooled condenser. *Applied Thermal Engineering*, 2018, pp. 63 – 83. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.100.
166. Kranc, S. C. Optimal spray patterns for counter flow cooling towers with structured packing. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, vol. 31, no 4, pp. 676 – 686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.11.027>.
167. Leeper, S. A. Wet cooling towers: rule – of – thumb desingn and simulation. Deparatament of Energy, *Idaho National Eng. Laboratory*, 1981, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/5281927>.

168. Li, X., Dong, P. A novel method integrating windbreak walls with water distribution to mitigate the crosswind effects on natural draft dry cooling towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 205, 2020, pp. 104318. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104318.

169. Li, X., Xia, L., Gurgenci, H., Guan, Zh. Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 107, pp. 271 – 280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.046>.

170. Liao, H. T., Yang, L. J., Wu, X. P., Du, X. Z., Yang, Y. P. Impacts of tower spacing on thermo-flow characteristics of natural draft dry cooling system. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 102, pp.168 – 184. DOI: /10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.019.

171. Pavlenko, A. N., Li, X., Zhukov, V. E., Pecherkin, N. I., Volodin, O. A., Surtaev, A. S., Gao, X., Zhang, L., Sui, H., Li, H. Effect of Dynamically Controlled Irrigation of a Structured Packing on Mixture Separation Efficiency. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, vol. 24, № 3, pp. 210 – 221.

172. Pavlenko, A. N., Zhukov, V. E., Pecherkin, N. I., Chekhovich, V. Yu., Sunder, S., Houghton, P. Development of Mixture Composition Maldistribution in a Distillation Column with Structured Packing. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2010, vol. 44, № 6, pp. 869 – 876.

173. Pavlenko, A.N., Pecherkin, N.I., Chekovich, V.Yu., Zhukov, V.E., Sunder, S., Houghton, P., Serov, A.F., Nazarov, A.D. Large industrial-scale model of structured packing distillation column. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, vol. 13, №1, pp. 1 – 18.

174. Pavlenko, A. N., Zhukov, V. E., Pecherkin, N. I., Chekhovich, V. Y., Volodin, O. A., Shilkin, A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing. *AIChE Journal*, 2014, vol. 60, pp. 690 – 705. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.14298>.

175. Perry, J. H. *Chemical Engineers' Handbook*. McGraw – Hill Book Company: New York – Toronto – London – Sydney, 1963.

176. Rahman, H., Hossain, A., Ali, M. Heat transfer performance prediction of a cooling tower with nanofluid using fuzzy expert system. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 22 (1), pp. 1-12. DOI: 10.17654/HM022010001.

177. Serikuly, Zh., Volnenko, A. A., Kenig, E. Y. Hydrodynamics of Apparatuses with Preformed Packing Bodies / *The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013)*. Romania, 2013, pp. 375 – 381. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.502.

178. Sun, Y., Guan, Zh., Gurgenci, H., Hooman, K., Li, X., Xia, L. Investigation on the influence of injection direction on the spray cooling performance in natural draft dry cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 113 – 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.069>.

179. Vlasov, S. M., Chichirov, A. A., Chichirova, N. D., Filimonova, A. A., Vinogradov, A. S. Physical modeling of stabilization water processes of reverse cooling system the thermal power plant. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, pp. 012205. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012275.

180. Wang, K., Sun, F., Zhao, Y., Gao, M., Ruan, L. Experimental research of the guiding channels effect on the thermal performance of wet cooling towers subjected to crosswinds – Air guiding effect on cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30. № 5, pp. 533 – 538. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.10.015.

181. Wang, W., Lyu, J., Zhang, H., Liu, Q., Yue, G., Ni, W. A performance enhancement of a natural draft dry cooling tower in crosswind via inlet flow field reconstruction. *Energy & Buildings*, 2018, vol. 164, pp. 121 – 130. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.003.

182. Williamson, N., Armfeld, S., Behnia, M. Numerical simulation of flow in a natural draft wet cooling tower – The effect of radial thermofluid fields. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, № 2 – 3, pp. 178 – 189. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.036.

183. Williamson, N., Behnia, M., Armfield, S. Comparison of a 2D axisymmetric CFD model of a natural draft wet cooling tower and a 1D model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, pp. 2227–2236.

184. Yu, Z., Sun, C., Zhang, L., Bao, B., Li, Y., Bu, S., Xu, W. Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 169, pp. 120910. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120910.

185. Zhai, Z., Fu, S. Improving cooling efficiency of dry – cooling towers under cross – wind conditions by using wind – break methods. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, № 10, pp. 1008 – 1017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.016.

186. Zhang, G., Zheng, Y., Chen, Q. Water distribution below a single spray nozzle in a natural draft wet cooling tower. *The 14th IFToMM World Congress*. Taiwan, October 25 – 30, 2015, pp. 582 – 588.

187. Zhang, Z., Zhang, D., Han, Q., Wu, F., Gao, M., He, S. Numerical simulation on the three kinds of water droplet diameter treatments in rain zone of wet cooling towers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 170, 2021, pp. 121054.

188. Zhao, L., Ge, Y., Kareem, A. Fluctuating wind pressure distribution around full-scale cooling towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, vol. 165, pp. 34 – 45. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.02.016.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Характеристика башенной градирни

Таблица А.1 – Основные параметры башенной градирни БГ-2600

Параметр	Значение
Ввод в эксплуатацию	1985
Площадь орошения, м ²	2600
Номинальный расход воды, м ³ /ч	20600
Расчетный температурный перепад, °С	10
Плотность орошения, м ³ /м ² ·ч	8,0

Таблица А.2 – Конструктивное исполнение башенной градирни БГ-2600

Параметр конструкции	Исполнение
Тип и материал сопел	чашечные полиэтиленовые
Количество сопел, диаметр, мм	2616, $\phi 22$
Отметка установки сопел, м	6,35
Необходимый напор у сопла, м	0,8 – 1,2
Диаметр бассейна градирни, м	59
Глубина бассейна градирни, м	2
Высота башни, м	64,5
Диаметр верха, м	38
Материал обшивки	рифленый алюминий
Высота воздухоходных окон, м	3,6
Ороситель	полимерный блочный
Высота оросителя, м	1,95
Диаметр подающих труб, мм	1020
Количество поворотных щитов, тип	108, горизонтальные



Рисунок А.1 – Биологическое обрастание Рисунок А.2 – Коррозия на каркасе

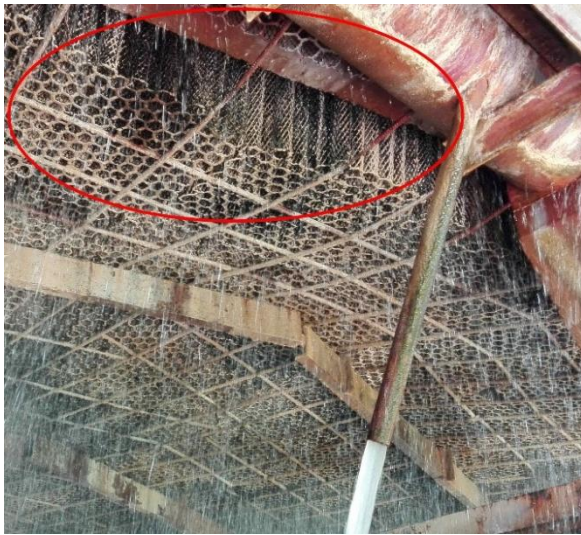


Рисунок А.3 – Дефекты оросительного устройства



Рисунок А.4 – Поломленные и засоренные сопла



Рисунок А.5 – Биологические обрастания на поверхности ВРС



Рисунок А.6 – Разнородное положение воздуховодных окон БГ-2600



Рисунок А.7 – Общий вид воздуховодных окон БГ-2600

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Приборы измерения



Рисунок Б.1 – Цифровой термометр ТЦМ – 9410

Таблица Б.1 – Характеристики цифрового термометра ТЦМ – 9410

Параметр	Значение
Входные сигналы	-10...+100 мВ, 0...320 Ом
Диапазон измерения температуры	-50...+1700 °С
Варианты исполнения	общепромышленное
Степень защиты от пыли и влаги	IP40
Электромагнитная совместимость	II-A—III-B
Напряжение питания	4,8 В (от аккумулятора)
Масса	не более 0,5 кг
Погрешность измерения	± 0,05 °С
Межповерочный интервал	2 года

Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Татарстан»
(ФБУ «ЦСМ Татарстан»)

Регистрационный номер аттестата аккредитации № RA.RU.311394

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№ 9802935

Действительно до 06.03.2020 г.

Средство измерений **Термометр цифровой малогабаритный ТЦМ 9410, регистрационный номер 32156-06**
наименование, тип, модификация, регистрационный номер

в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (если в состав средства измерений

входят несколько автономных блоков, то приводится их полный перечень и заводские номера)

отсутствует

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) **011-2957**

поверено **в соответствии с описанием типа**

наименование величин, диапазонов, на которых поверено средство измерений

(если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с **рекомендация МИ2996-2006 "Термометры цифровые малогабаритные ТЦМ9410. Методика поверки"**

наименование и обозначение документа,

на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: **Государственный рабочий эталон единицы температур ы 1 разряда в диапазоне значений от 0 °С до 660 °С, регистрационный номер 3.1.ZAM.0588.2013 - Термометр сопротивления платиновый эталонный, ПТС-10М, зав.№2395, 1 разряд, (0,01-660,323) °С; Государственный рабочий эталон единицы температуры 1 разряда в диапазоне значений от минус 196 °С до 0 °С, регистрационный номер 3.1.ZAM.0590.2013 - Термометр сопротивления платиновый эталонный, ПТС-10М, зав.№2398, 1 разряд, ((-196,15)-0,01) °С; Государственный рабочий эталон единицы напряжения постоянного тока 3 разряда в диапазоне значений от минус 1,1 до 1,1 В; единицы силы постоянного электрического тока 2 разряда в диапазоне значений от минус 24 до 24 мА; единицы электрического сопротивления 3 разряда в диапазоне значений от 0,001 до 2000 Ом, регистрационный номер 3.1.ZAM.1654.2017 - Мультиметр многоканальный прецизионный, ЭЛМЕТРО-Кельвин, зав.№091, ПГ ± (0,0025-0,0065) %, ± 200,0 мВ ± 1,1В (0-400) Ом (400-2000) Ом ± (0-25) мА; Государственный рабочий эталон единицы температуры при следующих значениях влияющих факторов: **Температура окружающего воздуха 22,5 °С, относительная влажность 50,0 %, атмосферное давление 100,3 кПа, параметры сети: U=220 В, f=50,0 Гц****

и на основании результатов периодической поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Начальник филиала
должность руководителя подразделения

Поверитель

Дата поверки 07.03.2018 г.


подпись

В.П. Стефак

инициалы, фамилия

Р.Г. Низамова

инициалы, фамилия



№ счета 9810798

1286076

Рисунок Б.2 – Свидетельство о поверке цифрового термометра ТЦМ – 9410



Рисунок Б.3 – Термогигрометр ИВТМ-7 Р-03-И-Д

Таблица Б.2 – Характеристики термогигрометра ИВТМ-7 Р-03-И-Д

Параметр	Значение
Диапазон измерения относительной влажности	0...99 %
Основная погрешность измерения относительной влажности, не более	±2,0 %
Дополнительная погрешность измерения влажности от температуры окружающего воздуха в диапазоне рабочих температур, не более	0,2 %
Диапазон измеряемых температур	-20...+50 °С
Максимальная потребляемая мощность, не более	0,1 Вт
Масса прибора, не более	0,1 кг
Потребляемая прибором мощность, не более	0,1 Вт
Межповерочный интервал	1 год

ООО НПК «ЭТАЛОН-ТЕСТ»
 Аттестат аккредитации № RA.RU.311710 от 19.07.2016 г.
 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-кт, д. 10, комн. 45
 www.etalontest.ru; телефон/факс: (495) 229-69-16

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

 № 1912-01538 Действительно до
10 марта 2020 г.
(включительно)

Средство измерений **Измеритель влажности и температуры**
наименование, тип, модификация средства измерений
ИВТМ-7 Р-03-И-Д, рег. № 71394-18
регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению
единства измерений, присвоенный при утверждении типа

заводской (серийный) номер **59037**

в составе _____

номер знака предыдущей поверки _____

поверено **в полном объеме**
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии **МП 2411-0151-2018**
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: **3.2.ВСА.0065.2016, 3.2.ВСА.0066.2016, 3.6.БКШ.0001.2017,**
регистрационный номер и (или) наименование, тип,
Метран 501-ПКД-Р-2 М1 № 2327
заводской номер, разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке
 при следующих значениях влияющих факторов: **t=21 °С, отн. влажность**
перечень влияющих факторов
33 %, Pатм 725 мм рт. ст., Uсети=220 В, fсети=50 Гц
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений
 и на основании результатов первичной поверки признано пригодным к
 применению.

Начальник отдела _____
должность руководителя подразделения **Знак поверки**

Поверитель _____
 Дата поверки **11 марта 2019 г.**

А.Н. Дымов
инициалы, фамилия

А.Л. Зук
инициалы, фамилия



 Бланк № 806614873

Рисунок Б.4 – Свидетельство о поверке термогигрометра ИВТМ-7 Р-03-И-Д



Рисунок Б.5 – Анеморумбометр М63М-1

Таблица Б.3 – Характеристики анеморумбометра М63М-1

Параметр	Значение
Диапазоны измерения скорости ветра	от 1,5 до 60 м/с
Диапазоны измерения по направлению ветра	от 0 до 360 °
Погрешность измерения скорости ветра, не более	$\pm(0,5 + 0,05V)$ м/с
Погрешность измерения направления ветра, не более	$\pm 10^\circ$
Питание от источника постоянного тока	12 В
Мощность от источника постоянного тока, не более	5 Вт
Питание от сети переменного тока	220 В
Мощность от сети переменного тока, не более	15 Вт
Межповерочный интервал	2 года

8 ХРАНЕНИЕ

8.1 Анеморумбометр должен храниться в сухом, отапливаемом и проветриваемом помещении при температуре от плюс 10 до плюс 35 °С и относительной влажности не более 80 %. В помещении не должно быть паров кислот и других летучих веществ, вызывающих коррозию металлов и узлов изделия.

9 ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ

9.1 Транспортирование упакованных анеморумбометров производится всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах при температуре воздуха от минус 50 до плюс 50 °С и относительной влажности до 95 % при температуре 35 °С.

10 СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

10.1 Анеморумбометр М63М-1 № 27
заводской номер

соответствует методике поверки МП РТ 1526-2011 и признан годным для эксплуатации.

Дата поверки 09.10.2018

Поверитель Ири
подпись



Межповерочный интервал два года.
Производится изготовителем.

11 СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ УПАКОВЫВАНИИ

11.1 Анеморумбометр М63М-1 № 27
заводской номер

упакован на АО «Сафоновский завод «Гидрометприбор» согласно требованиям, предусмотренным в действующей технической документации.

Ири
должность

Ири
личная подпись

Ири
расшифровка подписи

2018. 10. 09
год, месяц, число

Рисунок Б.6 – Свидетельство о поверке анеморумбометра М63М-1



Рисунок Б.7 – Анемометр АТТ-1004

Таблица Б.4 – Характеристики анемометра АТТ-1004

Параметр	Значение
Диапазоны измерения скорости воздуха	от 0,2 до 20 м/с
Погрешность измерения скорости воздуха, не более	$\pm(0,2 + 0,05V)$ м/с
Разрешение погрешности	0,1 м/с
Диапазон измерения температуры	от 0 до 50 °С
Абсолютная погрешность измерения температуры	± 1 °С
Разрешение погрешности	0,1 °С
Потребляемый ток	30 мА
Питание от источника постоянного тока	9 В
Подключение к ПК, интерфейс	RS 232
Межповерочный интервал	1 год

Федеральное бюджетное учреждение "Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Татарстан"

(ФБУ «ЦСМ Татарстан»)

Регистрационный номер аттестата аккредитации № RA.RU.311394

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ 5861360

Действительно до 08.10.2019 г.

Средство измерений Анемометр цифровой АТТ-1004, регистрационный номер 46056-11

наименование, тип, модификация, регистрационный номер

в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (если в состав средства измерений

входят несколько автономных блоков, то приводится их полный перечень и заводские номера)

номер и серия знака поверки отсутствуют

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) Q849565

поверено в диапазоне измерения скорости потока воздуха (0,5-20) м/с

наименование величин, диапазонов, на которых поверено средство измерений

(если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с "Анемометры цифровые АТТ-1000, АТТ-1002, АТТ-1003, АТТ-1004,

наименование и обозначение документа,

АТТ-1005, АТТ-1006, АТТ-1021, АТЕ-1033, АТЕ-1034 с использованием товарного знака

на основании которого выполнена поверка

АКТАКОМ" МП 06\001-10

с применением эталонов: Государственный рабочий эталон единицы скорости потока воздуха в

наименование, тип, заводской номер, регистрационный

диапазоне значений от 0,1 до 30,0 м/с, регистрационный номер 3.1.ZAM.1170.2014 - Установка аз-

номер (при наличии), разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке

родинамическая, АУ-2, зав. №030, ПГ ± (0,02+0,02V) м/с, от 0,1 до 30,0 м/с

при следующих значениях влияющих факторов: Температура окружающего воздуха 21,3 °С, от-

приводится перечень влияющих

носительная влажность 41,1 %, атмосферное давление 101,8 кПа

факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов периодической поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки



Начальник отдела
должность руководителя подразделения

подпись

А.К. Баязитов

инициалы, фамилия

Поверитель

подпись

А.Р. Хусаннов

инициалы, фамилия

Дата поверки 09.10.2018 г.

1431101

№ счета 5843602

Рисунок Б.8 – Свидетельство о поверке анемометра АТТ-1004

	<p>Санкт-Петербургская научно-производственная фирма</p> <p>"ЭКОТЭП"</p> <p>◆ Экология ◆ Теплотехника ◆ Энергетика ◆ Производство ◆</p> <p>http://www.ekotep.ru</p>	<p>ООО "ЭКОТЭП"</p> <p>Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21, корп.2, лит.А тел./ф. (812) 309-01-04, E-Mail: info@ekotep.ru</p>

Утверждаю:

Генеральный директор, к.т.н.


 Б.Л. Свердлин
 «03» 12 2019 г.



А К Т

об использовании результатов научного исследования по теме
 «Разработка методики корректировки рабочих характеристик башенных градирен
 в условиях неравномерности потоков воды и воздуха»

ООО «ЭКОТЭП» является одним из ведущих российских предприятий в области эксплуатации оборудования систем оборотного водоснабжения, свыше 50 башенных градирен укомплектовано оборудованием собственного производства. ООО «ЭКОТЭП» помимо поставки занимается оценкой эффективности работы градирен.

В рамках выполнения договора между ПАО «ТГК-1» и ООО «ЭКОТЭП» по эксплуатационным испытаниям башенных градирен БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ в августе 2019 г. были проведены экспериментальные исследования неравномерности распределения воды и воздуха. На их основании, с применением методики ассистента Бадриева А.И. и д.т.н., профессора Шарифуллина В.Н., построены рабочие характеристики БГ-1600 с учётом неравномерности потоков для конкретных метеоусловий.

Настоящий акт удостоверяет, что методика апробирована на исследуемой башенной градирне БГ-1600, полученные результаты соответствуют исследуемым эксплуатационным режимам.

Методика вызывает безусловный практический интерес и может быть использована для построения скорректированных характеристик и оценки влияния неравномерности потоков воды и воздуха на эффективность охлаждения башенной градирни.

Ассистент Набережночелнинского института КФУ  Бадриев А.И.

Ведущий инженер ООО «ЭКОТЭП»  Еранкин С.В.

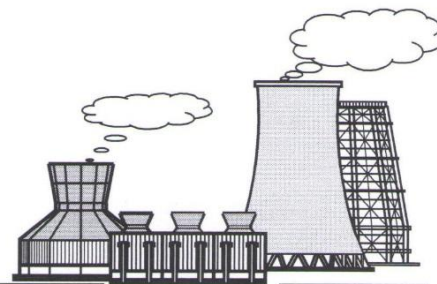


Рисунок Д.2 – Акт использования результатов диссертации

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельство программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019661889

Программа управления воздухопроводными окнами башенной градирни в условиях неравномерности потоков воды и воздуха

Правообладатель: *Бадриев Айрат Ирекович (RU)*

Автор: *Бадриев Айрат Ирекович (RU)*

Заявка № 2019660869

Дата поступления 19 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 сентября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Израиль



Рисунок Г.1 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Дипломы и грамоты



Рисунок Д.1 – Почетная грамота международной конференции «Энергия-2016»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ



КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

участник XI Международной молодежной
научной конференции «Тинчуринские чтения»

Бадриев Айрат Ирекович

соискатель

К(П)ФУ

за высокий научный уровень представленного доклада

Ректор



Э.Ю. Абдуллазянов

Казань, 23-25 марта 2016 г.

Рисунок Д.2 – Диплом международной конференции «Тинчуринские чтения»



ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ МИНИСТРЛАР КАБИНЕТЫ
«ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ИНВЕСТИЦИЯ-ВЕНЧУР ФОНДЫ»
КОММЕРЦИЯҒА КАРАМАҒАН ӨШМАСЫ
ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ФӨННӨР АКАДЕМИЯСЕ

КАБИНЕТ МИНИСТРОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«ИНВЕСТИЦИОННО-ВЕНЧУРНЫЙ ФОНД РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН»
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ОАО «РОССИЙСКАЯ ВЕНЧУРНАЯ КОМПАНИЯ»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ОАО «ТАТНЕФТЕХИМИНВЕСТ-ХОЛДИНГ»
ОАО «СВЯЗЬИНВЕСТНЕФТЕХИМ»
ОАО «АК БАРС» БАНК
ТЕХНОПАРК «ИДЕЯ»
ОАО «ХИМИРАД»
ОАО «РОСНАНО»

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ МАЛЫХ ФОРМ ПРЕДПРИЯТИЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СФЕРЕ
ТОРГОВО - ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
АССОЦИАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ



ДИПЛОМ

50 ЛУЧШИХ ИННОВАЦИОННЫХ ИДЕЙ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
НОМИНАЦИЯ
«МОЛОДЕЖНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

Бадриев Айрат Ирекович

ПО ПРОЕКТУ

Разработка системы управления распределением потока воздуха при неравномерном орошении
воды в башенной градирне

Директор Инвестиционно – венчурного
фонда Республики Татарстан

Региональный представитель фонда
содействия развитию малых форм
предприятий в научно-технической сфере

А.Т. Айдельдинов

С.В. Юшко

КАЗАНЬ 2017

Рисунок Д.3 – Диплом конкурса «50 лучших инновационных идей для РТ»

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ
ИННОВАЦИЯМ

ДИПЛОМ

победителя программы «УМНИК»

**Бадриев
Айрат Ирекович**

2017



Генеральный директор
С.Г. Поляков

A handwritten signature in blue ink, corresponding to the name S.G. Polyakov.

Рисунок Д.4 – Диплом конкурса «УМНИК»