



ГОРШЕНИН Сергей Дмитриевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМАТИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ В АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ
ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Ледуховский Григорий Васильевич**

Официальные оппоненты:

Шарапов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», руководитель научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки»

Чагин Олег Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Защита состоится «16» июня 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertacia_Gorghenin_S.D..pdf .

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru .

Автореферат разослан «___»_____2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Термические деаэраторы атмосферного давления нашли широкое применение в энергетической отрасли благодаря высокой массообменной эффективности. При проектировании и эксплуатации деаэрационных установок требуется обеспечить нормативную эффективность деаэрации воды, в том числе по удалению углекислоты, путем выбора соответствующих значений конструктивных и режимных параметров. Эти задачи актуальны, в частности, для деаэраторов питательной воды котлов низкого и среднего давлений, в том числе котлов-утилизаторов газотурбинных и парогазовых установок ТЭС, работающих с добавкой химически очищенной воды (низкая эффективность декарбонизации воды в деаэраторах приводит к нарушению норм качества пара котлов по удельной электропроводности и содержанию свободной углекислоты), а также для деаэраторов подпитки тепловых сетей, так как в этом случае значения рН подпиточной и сетевой вод зависят от степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах. Поскольку эффективность массообменных процессов в деаэраторе зависит от значений многих факторов, для решения указанных задач необходимы математические модели, обеспечивающие расчет показателей эффективности деаэрации при заданных значениях влияющих факторов. В отношении отдельных параметров эффективности декарбонизации воды в деаэраторах в настоящее время такие методики отсутствуют или характеризуются недостаточной точностью. В связи с этим актуальной является разработка методов расчета, позволяющих формировать требуемые значения показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах путем выбора соответствующих значений конструктивных и режимных параметров при проектировании и эксплуатации деаэрационных установок. Актуальность темы диссертации подтверждает её соответствие приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (указ Президента РФ № 899 от 07.07.2011), критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

Степень разработанности темы работы. Химическое качество деаэрированной воды нормируется, в частности, по значению водородного показателя $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ и отсутствию свободной углекислоты $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$, мг/дм³. Для деаэраторов питательной воды паровых котлов низкого и среднего давлений при оценке максимального содержания свободной углекислоты в паре котлов применяется дополнительный показатель эффективности – степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе σ , ед. К настоящему времени подробно изучены процессы тепломассообмена при контакте воды с паром и десорбции растворенного кислорода в элементах деаэраторов, разработаны соответствующие математические модели; однако опубликованные данные не позволяют моделировать работу деаэраторов по удалению углекислоты. В частности, методики расчета $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ и $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ отсутствуют, а существующая методика расчета σ характеризуются низкой точностью. Опубликованы экспериментальные данные о процессах декарбонизации воды в деаэраторах, которые могут быть использованы для идентификации математической модели, обеспечивающей расчет σ . Известна также

методика оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах, которая может служить основой для разработки методик расчета pH_{25}^d и $C_{CO_2}^d$.

Целью диссертации является обеспечение конструктивными и режимными мероприятиями нормативного химического качества деаэрированной воды при проектировании и эксплуатации деаэрационных установок на основе разработки методики расчета показателей эффективности декарбонизации воды.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведение анализа факторов, влияющих на эффективность термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления, с целью выявления причин появления существенных разбросов в экспериментальных значениях кинетических характеристик процесса.

2. Разработка методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке.

3. Выполнение с использованием разработанной методики обработки опубликованных экспериментальных данных для уточнения значений параметров идентификации модели термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах.

4. Разработка методики расчета pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при известных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора путем синтеза опубликованной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах и разработанной уточненной модели процесса термического разложения гидрокарбонатов.

5. Разработка и программная реализация алгоритма расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах атмосферного давления.

6. Апробация результатов работы при обосновании технических решений по обеспечению нормативной эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах при их проектировании и повышении эксплуатационной эффективности.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности*: «проблемы совершенствования действующих ... систем ... водоподготовки; ... совершенствовани(е) действующих ... конструкций ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций; ... вопросы ... водных режимов»; *в части области исследования специальности* – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета ... показателей качества ... работы агрегатов...»; пункту 2: «Исследование ... процессов, протекающих в агрегатах ...»; пункту 3: «... исследование, совершенствование действующих ... технологий ... использования ... водных и химических режимов...»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования ...».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена новая методика обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости, позволяющая рассчитать кинетические характеристики процесса термического разложения гидрокарбонатов с учетом различного времени пребывания разных элементарных объемов воды в деаэраторном баке.

2. С использованием предложенной методики статистически значимо уточнены экспериментальные значения константы скорости реакции, обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах.

3. Путем синтеза разработанной методики расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов и известной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах составлена методика прогнозирования pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при заданных характеристиках деаэратора, позволяющая формулировать и решать задачи обеспечения конструктивными и режимными мероприятиями нормативной эффективности декарбонизации воды.

Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что изучено влияние гидродинамической обстановки в баке деаэратора на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов при наличии и отсутствии парового барботажа; изложен подход к моделированию рассматриваемого процесса с учетом неравномерности течения воды в деаэраторном баке; проведена модернизация существующей методики прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах и количественно установлена связь этого показателя с концентрацией свободной углекислоты в деаэрированной воде и pH_{25} этой воды.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. На основе предложенных методик разработан алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах, обеспечивающий нахождение значений степени термического разложения гидрокарбонатов, массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде и водородного показателя пробы деаэрированной воды с точностью, сопоставимой с нормативной точностью соответствующих методов количественного химического анализа. Алгоритм предназначен для решения задач проектирования и повышения эксплуатационной эффективности атмосферных деаэрационных установок.

2. Выполнена программная реализация разработанного алгоритма в виде модуля «Декарбонизация» прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды».

3. Разработанный алгоритм расчета и средства его компьютерной поддержки позволили решить практически значимую задачу расчета показателей эффективности декарбонизации для проектируемого деаэратора с ужесточенными относительно нормативов требованиями к химическому качеству деаэрированной воды, а также ряд задач режимной наладки и повышения эксплуатационной эффективности действующих деаэрационных установок, в том числе путем их модернизации.

Методы исследований. Для получения результатов работы использованы методы экспериментальных исследований, математического и статистического моделирования, теории вероятностей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования теплоэнергетических процессов; использованием экспериментальных данных, полученных в условиях промышленной эксплуатации деаэраторов разных энергообъектов; совпадением в пределах погрешности экспериментальных данных и результатов расчёта показателей работы деаэраторов; согласованностью результатов работы с опубликованными данными других авторов.

Автор защищает:

– методику обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости, учитывающую влияние гидродинамической обстановки в деаэраторном баке на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов;

– результаты уточнения экспериментальных значений константы скорости реакции, обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах, выполненного с использованием разработанной методики;

– методику расчета pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при известных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора;

– алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах и средства его компьютерной поддержки;

– результаты апробации разработанных методик и программных средств при обосновании технических решений по обеспечению нормативной эффективности декарбонизации воды в деаэраторах применительно к задачам их проектирования и повышения эксплуатационной эффективности.

Реализация результатов работы. Методика расчета степени термического разложения гидрокарбонатов использована при обосновании технических решений по модернизации деаэрационной установки питательной воды котлов-утилизаторов парогазовой ТЭС в г. Родники Ивановской обл. Разработанный алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах и средства его компьютерной поддержки использованы в ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) при проектировании атмосферного деаэратора ДА-30 при ужесточенных относительно нормативов требованиях к химическому качеству деаэрированной воды. Разработанный для прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» модуль «Декарбонизация» внедрен в практику режимно-наладочных работ в АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново). Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке; проведении обработки результатов экспериментальных исследований с определением уточненных значений константы скорости реакции, обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах; составлении методики расчета pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при заданных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора; разработке алгоритма расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах и средств его компьютерной поддержки; в апробации разработанных методик и программных средств при решении задач проектирования и повышения эксплуатационной эффективности деаэрационных установок.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы и обсуждались на восьми международных и всероссийских конференциях: XXVII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27» (Тамбов, 2014 г.); Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014 г.); II и III Международных молодёжных форумах «Интеллектуальные энергоси-

стемы» (Томск, 2014 и 2015 гг.); XII Международной научно-технической конференции «Проблемы теплоэнергетики» (Саратов, 2014 г.); XXI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2015 г.); X Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015» (Иваново, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «XVIII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2015 г.).

Публикации. Материалы диссертации отражены в 13 опубликованных работах, в том числе, в 4 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК, 1 статье в прочих журналах и 8 тезисах и полных текстах докладов конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 176 наименований. Текст диссертации изложен на 161 стр. машинописного текста, содержит 45 рисунков, 14 таблиц и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована принадлежность диссертации заявленной научной специальности, обоснована достоверность результатов, дана характеристика структуры диссертации.

В первой главе выполнен анализ опубликованных данных о процессах удаления из воды в деаэраторах углекислоты. Обоснован выбор показателей ($C_{CO_2}^d$, pH_{25}^d и σ), подлежащих расчету при прогнозировании эффективности работы деаэраторов по удалению углекислоты, выполнен обзор подходов к решению этой задачи.

Анализ показал, что наиболее значимые результаты исследований в рассматриваемой области отражены в публикациях С.С. Кутателадзе, И.И. Оликера, В.А. Пермякова, И.К. Гришука, А.П. Мамета, В.И. Шарапова. Более 10 лет исследованиями процессов деаэрации занят коллектив ИГЭУ (Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, А.А. Коротков, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков). Математические модели массообмена при деаэрации воды входят в сферу научных интересов сотрудников Казанского государственного энергетического университета, работающих под руководством А.Г. Лаптева. Благодаря этим и другим исследованиям к настоящему времени выработаны принципы конструирования деаэраторов, созданы методы расчета с приемлемой для практических задач точностью процессов тепло-массообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода.

В отношении эффективности работы деаэраторов по удалению из воды углекислоты наиболее полные сведения обобщены в диссертации А.А. Короткова (ИГЭУ). Им было показано, что превращением связанных форм углекислоты с образованием и удалением из воды диоксида углерода в деаэрационных колонках можно пренебречь из-за малости располагаемого времени процесса, а верхние струйные отсеки по свободному диоксиду углерода работают преимущественно как абсорберы, что обуславливает в целом низкую эффективность декарбонизации воды в колонках. Поэтому основная нагрузка деаэратора по удалению углекислоты обеспечивается деаэраторным баком. В результатах проведенных экспериментальных исследований, как и в опубликованных данных других авторов, присутствуют существенные

разбросы значений σ и константы скорости реакции K , обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов. Причем отклонения существенно отличаются для деаэраторов с барботажем в баке и без него. Проведенные в первой главе по данным опытов А.А. Короткова расчеты показали, что наблюдаемые отклонения не во всех случаях могут быть объяснены метрологическими характеристиками используемых в эксперименте методов измерения параметров, то есть при моделировании не были учтены существенные факторы, определяющие кинетику рассматриваемого процесса.

Модели, позволяющие прогнозировать значения $C_{CO_2}^d$ и pH_{25}^d , в настоящее время отсутствуют. Однако в ИГЭУ под руководством профессора Б.М. Ларина разработана на основе теории химических равновесий в водных растворах методика оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах, позволяющая рассчитать суммарный эффект удаления в аппарате различных форм углекислоты по результатам измерения общей щелочности исходной воды и pH исходной и деаэрированной воды. Эта методика перспективна с точки зрения разработки методики прогнозирования значений $C_{CO_2}^d$ и pH_{25}^d , но для этого необходимо найти возможность расчета с достаточной точностью концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде.

Таким образом, имеющиеся в настоящее время данные не позволяют с требуемой для практических задач точностью прогнозировать показатели эффективности декарбонизации воды при известных конструктивных характеристиках, химических показателях качества исходной воды и значениях режимных параметров деаэраторов, что не позволяет формулировать и решать задачи обеспечения нормативной эффективности декарбонизации воды в деаэраторах при их проектировании и эксплуатации. Анализ опубликованных данных позволил сформулировать задачи диссертации.

Вторая глава посвящена выявлению причин появления существенных разбросов в экспериментальных значениях кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов и разработке уточненной методики их расчета.

Выдвинуто предположение, что наблюдаемые в комплексах экспериментальных данных разбросы значений могут быть обусловлены влиянием гидродинамической обстановки в деаэраторном баке на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов (включая его химическую стадию и стадию диффузионного и/или дисперсного выделения газа). Для проверки этой гипотезы возникла необходимость расчета кинетических характеристик процесса с учетом распределения времени пребывания различных элементарных объемов воды в деаэраторном баке. Эта задача решалась в работе путем моделирования в программном комплексе FlowVision течения воды в баке, предусматривающего поэтапное создание упрощенной геометрической модели бака, задание параметров физической модели, создание расчетной сетки, собственно расчет течения и обработку результатов расчета.

Физическая модель течения воды в баке задана следующими параметрами: вещество – вода; агрегатное состояние – жидкость (для деаэраторов с барботажем дополнительно – пар); фаза – непрерывная; параметры движения – ньютоновская жидкость; турбулентность – стандартная k - ε модель. Отметим следующие особенности: 1) геометрическая модель бака выполнена в масштабе 1:1, что позволило избежать масштабных переходов при интерпретации результатов расчета; 2) поверхность воды в баке моделировалась идеальной стенкой (условие проскальзывания),

что позволило сократить область расчета и свести процесс моделирования течения в баке к решению стационарной внутренней задачи; 3) барботажное устройство моделировалось не набором отверстий в коллекторе, а эквивалентной щелью, что необходимо для уменьшения общего количества ячеек расчетной сетки и увеличения скорости решения; 4) установлено, что число Маха на выходе из отверстий барботажного устройства при эксплуатационных значениях удельного расхода пара на барботаж не превышает 0,3, что позволило представить барботажный пар при моделировании как несжимаемую жидкость; 5) граничные условия выбирались с учетом результатов измерения параметров в каждом из рассматриваемых опытов А.А. Короткова; б) число ячеек, необходимое для разрешения области расчета, выбиралось по результатам исследований сеточной сходимости, с учетом функции подсеточного разрешения геометрии итоговое число расчетных ячеек составляло при расчетах для условий разных опытов для деаэраторов без барботажа – от 42134 до 60986, для деаэраторов с барботажом – на порядок больше указанных значений; 7) сходимость расчета оценивалась по величинам невязок давления среды во входном сечении бака и барботажной щели и скорости в выходном сечении модели.

В результате расчета определялось распределение скоростей воды в деаэраторном баке. Дальнейшая обработка результатов расчета включала следующее:

- разбиение входного по воде сечения модели на m струек равного расхода;
- определение для каждой i -й струйки средствами FlowVision времени τ_i , затрачиваемого элементарным объемом воды на прохождение бака вдоль данной струйки (линии тока);

- расчет концентрации гидрокарбонатов C_i , мкг-экв/кг, в i -ом объеме воды на выходе из бака:

$$C_i^{n=1} = C_0 \exp(-K_{n=1} \tau_i); \quad C_i^{n=2} = [C_0^{-1} + K_{n=2} \tau_i]^{-1}, \quad (1)$$

где индексы $n = 1$ и $n = 2$ относятся соответственно к первому или второму порядку реакции; C_0 , мкг-экв/кг – концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в бак; K – константа скорости реакции, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$);

- расчет концентрации гидрокарбонатов в воде на выходе из бака C , мкг-экв/кг:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i; \quad (2)$$

– уточненные значения константы скорости реакции, обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, определены исходя из того, что эти значения должны быть одинаковыми для m струек, поскольку температура воды в баке во всех точках практически неизменна и равна температуре насыщения; с учетом этого при условиях каждого опыта значения $K_{n=1}$ и $K_{n=2}$ подобраны по условию совпадения расчетных и экспериментального значений концентрации гидрокарбонатов в воде на выходе бака.

Для выбора числа m струек воды, проведены тестовые расчеты по определению K при различных значениях m . Расчеты для условий одного из опытов показали, что при $m = 500$ значение K отличается от её значения при $m = 1000$ более чем на 4 %. Увеличение m до 1500 привело к отклонению значения K менее чем на 0,2 %. С учетом этого в дальнейших расчетах использовалось значение $m = 1000$.

На рисунке 1 приведен пример распределения числа струек воды (линий тока) по времени пребывания в баке для деаэрата ДСА-300 без барботажа (точки на этом и следующем рисунках соответствуют числу линий тока N , имеющих время пребывания воды в баке в пределах отклонений на величину шага Δt от абсциссы точки; значение Δt – разница между максимальным и минимальным значениями τ_i , деленная на $(m - 1)$). Распределение несимметрично; время пребывания воды в баке, рассчитываемое как время полного вытеснения путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак, не соответствует времени, отвечающему медиане полученного распределения, что и обуславливает отклонение значений константы скорости реакции, вычисляемой двумя способами. В примере эти значения составили: при $n = 1$ $K = 2,93 \cdot 10^{-4}$ 1/с при расчете через время вытеснения и $K = 3,43 \cdot 10^{-4}$ 1/с при расчете по (1), (2); при $n = 2$ $K = 2,57 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв·с) при расчете через время вытеснения и $K = 3,13 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв·с) при расчете по (1), (2).

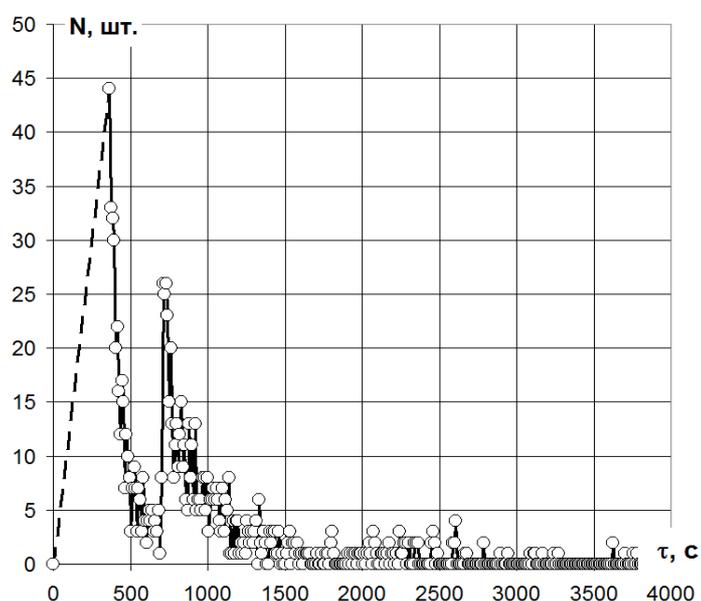


Рисунок 1. Распределение числа линий тока N , шт., по времени пребывания воды в баке τ_i , с (для наглядности отображен не весь диапазон по времени, максимальное время пребывания 10230 с, характер распределения в диапазоне от 3500 до 10230 с аналогичен характеру распределения в диапазоне от 3000 до 3500 с)

для получения статистических функций плотности распределения вероятности времени пребывания воды в баке. Для анализа полученных распределений привлечен математический аппарат теории вероятности. Выявлено, что при увеличении d_6 распределение приближается к симметричному (коэффициент асимметрии уменьшается с 1,37 при $d_6=0$ до значений около нуля при $d_6 > 15$ кг/т), уменьшается отклонение медианы распределения от математического ожидания, что и обуславливает уменьшение разницы между уточненными и не уточненными значениями K . Таким образом, установлено, что уточнение экспериментальных значений K по разработанной методике имеет смысл при значениях удельного расхода пара на барботажа не более 15 кг/т.

Для деаэраторов с барботажем предварительные расчеты по различным опытам показали, что отклонение уточненных значений K от значений до уточнения существенно зависит от удельного расхода пара на барботажа d_6 и варьируется от 20–30 % при малых значениях d_6 до 3–5 % при больших значениях d_6 . Выявлено, что такая связь обусловлена влиянием d_6 на интенсивность перемешивания воды в деаэраторном баке. Для определения количественных характеристик этого влияния проведены специальные исследования, в ходе которых выполнялось моделирование течения воды в баке при пяти различных значениях d_6 и равных прочих условиях. При каждом d_6 полученный диапазон τ_i разбивался на $z = 19$ интервалов (принято по рекомендациям руководящих документов и литературных источников)

На рисунке 2 для деаэраторов без барботаж в баке приведены результаты уточнения экспериментальных значений K по разработанной методике. Для наглядности указаны также данные до уточнения (при обработке опытов А.А. Короткова без учета влияния гидродинамической обстановки в баке). Данные В.А. Пермякова исключены, поскольку для их уточнения описанным методом недостаточно исходной информации. Исключены также нулевые значения констант скорости реакции: они получены при отсутствии щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды, что вносит неопределенность в результаты. Видно, что уточнение позволило значительно сократить разброс значений K относительно среднего при следующих условиях: при $n = 1$ и $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2,3$ мг-экв/кг; при $n = 2$ и $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2,3$ мг-экв/кг. При других условиях (при $n = 1$ и $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2,3$ мг-экв/кг; $n = 2$ и $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2,3$ мг-экв/кг) заметного уменьшения разброса значений K не наблюдается, что может указывать на смену порядка реакции при общей щелочности около 2,3 мг-экв/кг.

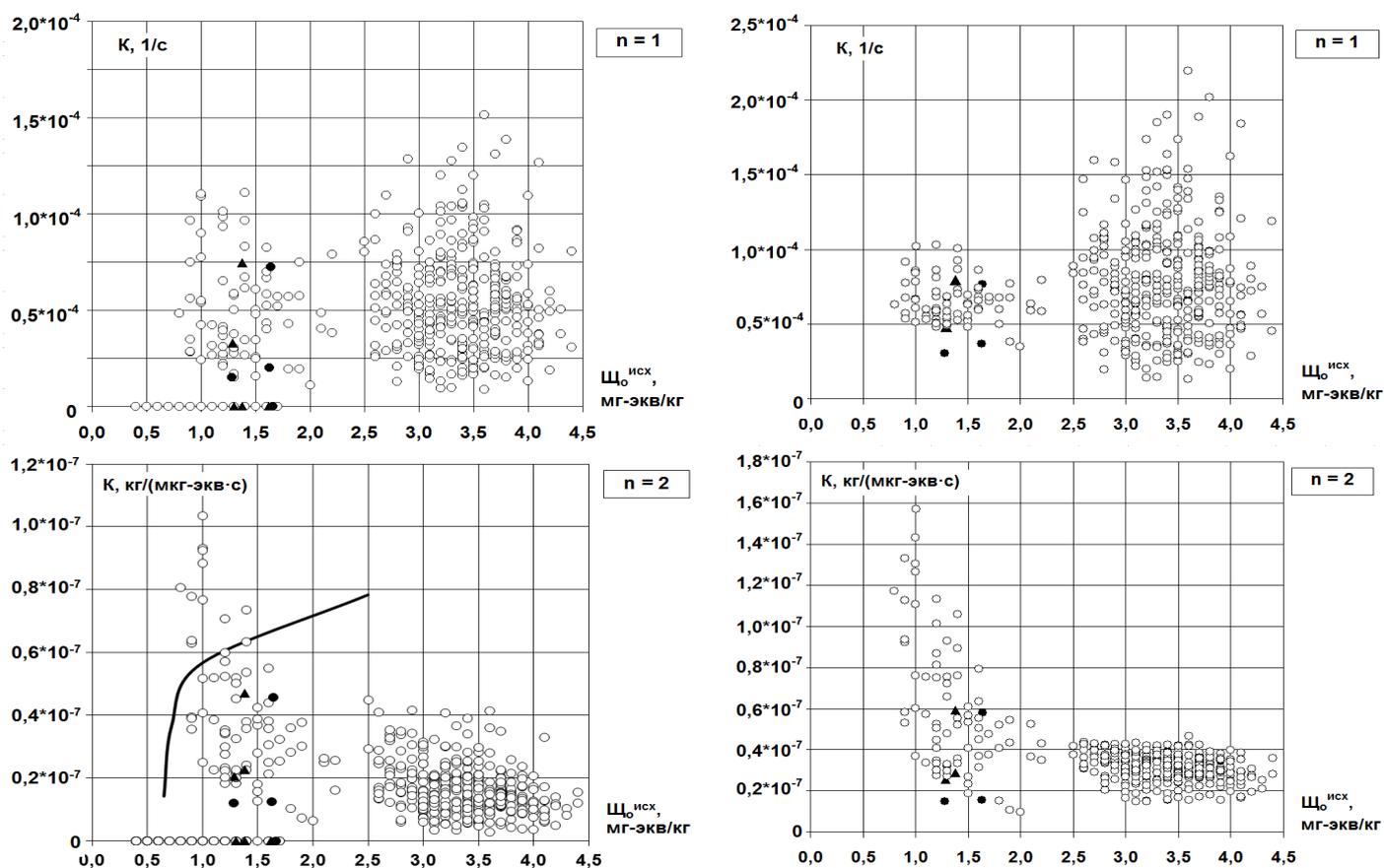


Рисунок 2. Экспериментальные значения K при отсутствии парового барботаж в водяном объеме деаэраторного бака (слева – данные А.А. Короткова, справа – значения, уточненные по разработанной методике): $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ – общая щелочность воды перед деаэратором, мг-экв/кг; линией показаны данные В.А. Пермякова в обработке А.А. Короткова; точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей: ● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300 (колонка с двумя струйными отсеками); ○ – ДА-50

Для деаэраторов с барботажом в баке расчеты по уточнению констант K не привели к существенному их изменению, поскольку большинство опытов А.А. Короткова проведены при $d_6 > 15$ кг/т, поэтому результаты этих опытов, согласно полученным ранее сведениям, оставлены без изменения.

В таблице 1 приведены характеристики комплексов экспериментальных значений K до и после уточнения. Статистическая значимость уточнения доказывалась

по критерию Фишера. Видно, что величина разброса в комплексах уточненных значений K соответствует относительной погрешности определения K как результата косвенного измерения, то есть может считаться обусловленной метрологическими характеристиками используемых методов и средств измерения параметров. Дальнейшее уточнение этих данных возможно только при использовании более точных методов измерения, прежде всего щелочности деаэрируемой воды. Отметим также, что незначимость уточнения для деаэраторов с барботажем в баке обусловлена указанной ранее причиной: большинство опытов проведены при значениях $d_6 > 15$ кг/т. При этом величина разброса экспериментальных значений K и до уточнения имела тот же порядок, что погрешность косвенного измерения этого показателя.

Таблица 1. Характеристика константного обеспечения модели по опубликованным данным и после их уточнения предложенным методом

Показатель, единица измерения	Значение для деаэраторов					
	с барботажем		без барботажа			
	до уточ- нения	после уточ- нения	до уточ- нения	после уточ- нения	до уточ- нения	после уточ- нения
1. $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$, мг-экв/кг	Весь диапазон		до 2,3		более 2,3	
2. Рекомендуемое значение n	2		1		2	
3. Среднее значение K , 1/с при $n = 1$ или кг/(мкг-экв·с) при $n = 2$	$1,89 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$0,51 \cdot 10^{-4}$	$0,64 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-7}$	$0,32 \cdot 10^{-7}$
4. Среднеквадратическое отклонение для комплекса экспериментальных значений K , %	16,5	16,6	28,1	12,6	46,8	19,9
5. Относительная погрешность определения K как результата косвенного измерения, %	13,0		16,5		18,2	
6. Значимо ли уточнение статистически?	Нет		Да		Да	

В третьей главе приведены результаты разработки методики расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах (σ , $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ и $\text{C}_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$), выбор которых обоснован в первой главе.

Разработанная методика прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах σ включает следующее: 1) выбор из данных таблицы 1 рекомендуемых значений n и K при заданном значении $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$, мкг-экв/дм³, при отсутствии или наличии барботажа в баке; 2) моделирование течения воды в баке в программном комплексе FlowVision, как описано ранее, для расчета комплекса значений времени пребывания τ_i каждого из m выделенных элементарных объемов воды при заданных геометрических характеристиках бака и значениях теплотехнических параметров работы деаэратора; 3) расчет для каждого из m выделенных объемов воды конечной концентрации гидрокарбонатов по выражениям (1) (здесь $\text{C}_0 \approx \text{Щ}_0^{\text{исх}}$, мкг-экв/дм³, а для пробы воды при температуре 25 °С можно принять равенство 1 мкг-экв/кг = 1 мкг-экв/дм³); 4) вычисление концентрации гидрокарбона-

тов в деаэрированной воде C , мкг-экв/дм³, по выражению (2); 5) расчет собственно степени термического разложения гидрокарбонатов $\sigma = 1 - C/C_0$. На рисунке 3 приведены результаты расчета σ в сравнении с экспериментальными данными для рассмотренных ранее опытов. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений σ от экспериментальных составило: для деаэраторов без барботажа в баке 13,9 % (что в 2,7 раза меньше, чем для результатов расчета по методике до уточнения K); для деаэраторов в барботажем в баке 15,4 % (до уточнения – 20 %). Статистическая значимость перехода от упрощенной методики расчета (упрощенной здесь и далее будем называть методику, в которой используются значения K до их уточнения, а время пребывания воды в баке рассчитывается как для реактора идеального вытеснения) к уточненной методике доказана по критерию Фишера. Для деаэраторов с барботажем здесь и далее переход от упрощенной методики к уточненной оказывается статистически не значимым, поскольку преимущественно рассматриваются опыты со значениями удельного расхода пара на барботажа $d_6 > 15$ кг/т.

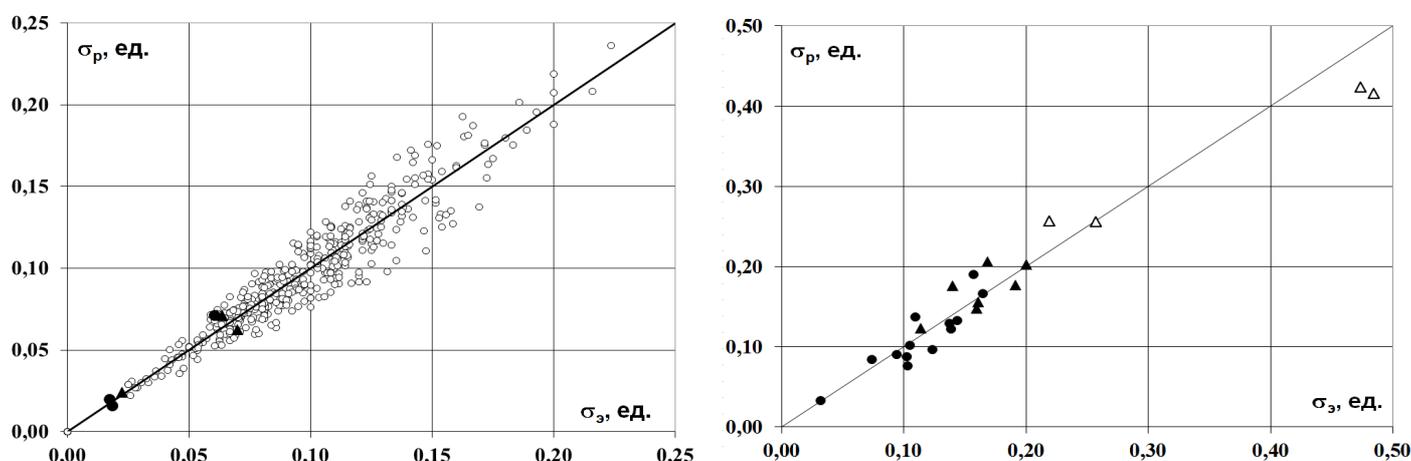


Рисунок 3. Сопоставление экспериментальных (σ_x) и рассчитанных по методике (σ_r) значений степени термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без барботажа в баке (слева) и с барботажем в баке (справа): точки – результаты расчетов по разработанной методике при условиях опытов; обозначения точек соответствуют рисунку 2; линия – совпадение расчетных и экспериментальных данных

При разработке методики прогнозирования рН деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной углекислоты за основу принята методика оценки эффективности декарбонизации воды деаэраторами атмосферного давления на основе измерений общей щелочности и рН исходной воды и рН деаэрированной воды, разработанная в ИГЭУ под руководством профессора Б.М. Ларина.

В рассматриваемой авторами методики постановке задачи известны результаты измерения общей щелочности химически очищенной воды на входе в деаэратор ($\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$, мкг-экв/дм³), водородных показателей деаэрированной и химически очищенной воды (pH_d и $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$) и требуется рассчитать общий эффект декарбонизации воды в деаэраторе. В нашем случае решается обратная задача – расчет значений рН деаэрированной воды при заданных значениях $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$ и $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$, известной конструкции деаэратора и значениях режимных параметров. При решении задачи получено квадратное уравнение, позволяющее рассчитать искомое значение pH_d :

$$a \left(10^{\text{pH}_d} \right)^2 + b \cdot 10^{\text{pH}_d} + c = 0 \Rightarrow \text{pH}_d = \lg \left[\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right] \quad (3)$$

$$a = C \cdot 10^{-6} + \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{-3}; \quad b = \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{C \cdot 10^{-6}}{-\Psi_0^{XOB} 10^{-6} + 10^{-pH_{XOB}}} \right); \quad c = -\frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{11}, \quad (4)$$

где pH_d и pH_{XOB} – значения рН в охлажденных пробах деаэрированной и химочищенной воды соответственно; C , мкг-экв/дм³ – концентрация гидрокарбонатов в охлажденной пробе деаэрированной воды, рассчитанная по разработанной ранее методике; f_{II} , f_I – коэффициенты активности, которые для условий деаэрации химочищенной воды могут быть приняты равными 0,95 и 0,85 соответственно.

Отметим, что разработанная методика также может применяться в упрощенном или уточненном виде, в зависимости от того, каким способом определена концентрация C – с учетом гидродинамической обстановки в баке или нет. Результаты расчетов для условий рассмотренных ранее опытов отражены на рисунке 4.

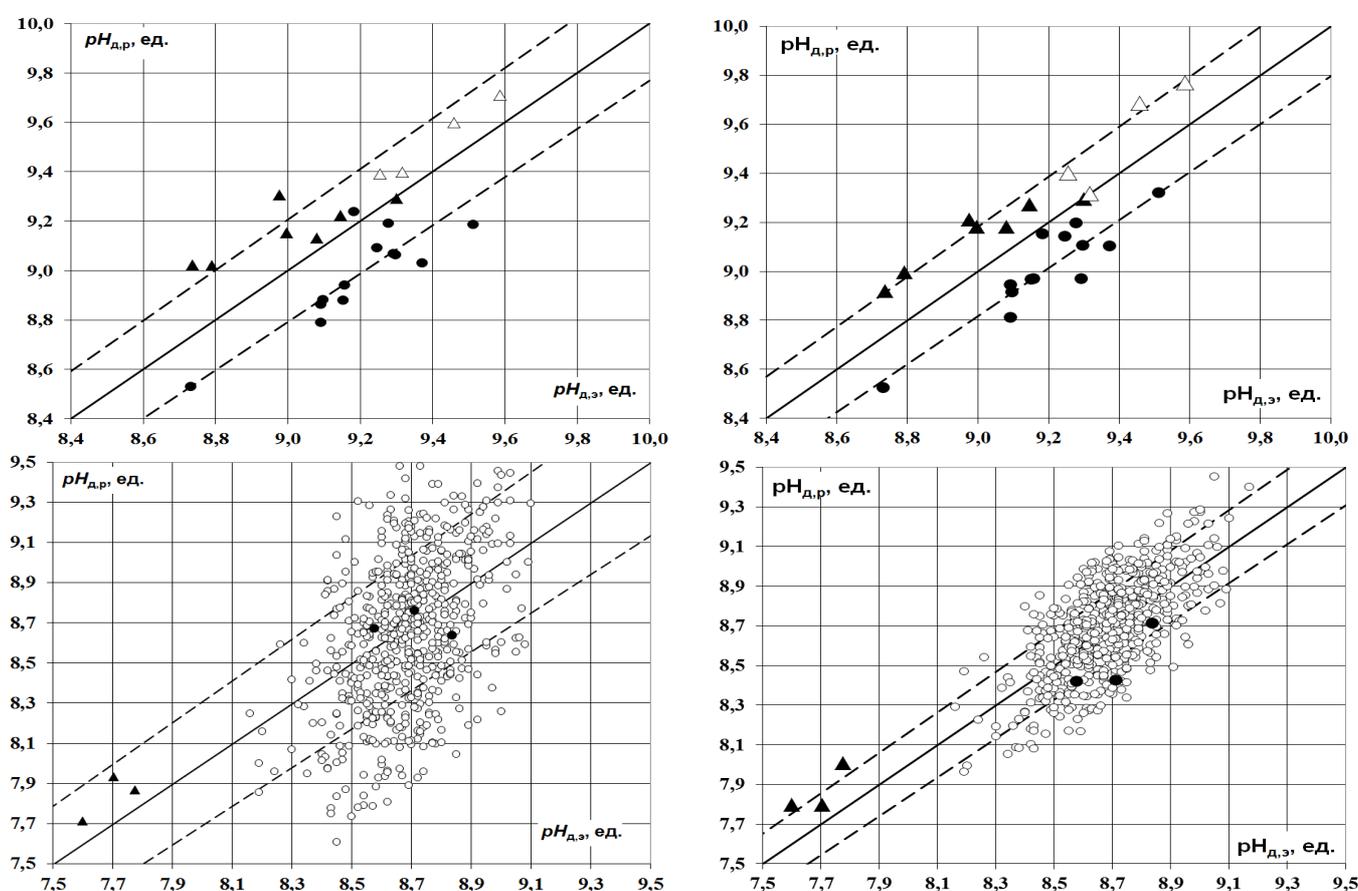


Рисунок 4. Сопоставление расчетных ($pH_{д,р}$) и экспериментальных ($pH_{д,э}$) значений рН деаэрированной воды для деаэраторов с паровым барботажом в баке (вверху) и без него (внизу): слева – при расчете по упрощенной методике; справа – расчет по уточненной методике; сплошные линии – совпадение расчетных и экспериментальных данных; пунктирные линии показывают среднеквадратическое отклонение результатов расчета от экспериментальных данных; точки – результаты расчета в условиях отдельных опытов для деаэраторов разных моделей; обозначения точек соответствуют рисунку 2

При расчете по уточненной методике относительные среднеквадратичные отклонения расчетных значений pH_{25} от экспериментальных составили: 1,9 % для деаэраторов с барботажом в баке и 2,0 % для деаэраторов без барботажа в баке, – что соответствует нормируемой погрешности инструментального определения рН воды потенциометрическим методом (от 0,05 до 0,2 ед. рН, что при рассматриваемых диа-

пазонах измерения рН в деаэраторе эквивалентно погрешности от 0,6 до 2,4 %). При расчете по упрощенной методике среднеквадратические отклонения увеличиваются до 2,3 % и 3,9 % соответственно для деаэраторов с барботажем в баке и без него. Статистическая значимость перехода от упрощенной методики прогнозирования рН₂₅ к уточненной для деаэраторов без барботажа доказана по критерию Фишера.

Рассчитав прогнозные значения рН₂₅ деаэрированной воды и массовой концентрации в ней гидрокарбонатов С, по методике Б.М. Ларина можно определить прогнозные значения массовой концентрации свободной углекислоты, мг/дм³:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{д}} = 96,8 \cdot 10^{3-\text{pH}_d} C. \quad (5)$$

Расчеты выполнены для условий рассматриваемых в работе опытов. Однако среди этих опытов оказалось относительно мало режимов, в которых деаэраторы работали при наличии свободной углекислоты в деаэрированной воде. Малый размер выборки не позволяет провести детальный анализ адекватности полученной модели, но по имеющимся данным можно заключить, что среднеквадратическое отклонение расчетных значений $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ от экспериментальных при использовании упрощенной методики расчета рН деаэрированной воды составляет 65,6 %; при использовании уточненной методики – 44,3 %. Последнее сопоставимо с нормативными показателями точности соответствующего метода количественного анализа (39 % при измененных значениях концентрации свободной углекислоты в опытах).

В четвертой главе приведены результаты апробации разработанных в диссертации методик по следующим направлениям: 1 – разработка алгоритма расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах; 2 – программная реализация разработанного алгоритма в виде модуля «Декарбонизация» прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды»; 3 – внедрение программного модуля «Декарбонизация» в практику режимно-наладочных работ в АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново); 4 – решение с использованием разработанного алгоритма и средств его компьютерной поддержки практически значимой задачи обеспечения требуемой эффективности декарбонизации для проектируемого в ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) деаэратора ДА-30 с ужесточенными относительно нормативов требованиями к химическому качеству деаэрированной воды; 5 – обоснование с использованием разработанного метода расчета степени термического разложения гидрокарбонатов технических решений по модернизации деаэрационной установки питательной воды котлоутилизаторов парогазовой ТЭС в г. Родники Ивановской обл.

При разработке алгоритма расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах за основу приняты разработанные в предшествующих главах диссертации методики. Алгоритм предназначен для решения задач проектирования и повышения эксплуатационной эффективности атмосферных деаэрационных установок и обеспечивает нахождение значений σ , рН₂₅^д и $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ для деаэратора известной конструкции при заданных теплогидравлических параметрах режима его работы и химических показателях качества исходной воды с точностью, сопоставимой с нормативной точностью соответствующих методов количественного химического анализа. Алгоритм включает этап проверки выполнимости заданного режима работы по условиям отсутствия полной конденсации барботажного пара в объеме воды в баке и

предельного, с точки зрения возникновения гидроударов при барботаже, недогрева воды на входе в бак до температуры насыщения, а также позволяет выбрать режим расчета, отвечающий применению упрощенной или уточненной методик расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов.

Программная реализация разработанного алгоритма выполнена в виде модуля «Декарбонизация» в составе программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды». Разработанный программный модуль внедрен в практику режимно-наладочных работ в АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново). Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения.

Для ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) выполнены расчеты проектируемого нетипового деаэратора ДА-30 с ужесточенными относительно нормативов требованиями к химическому качеству деаэрированной воды. Разработке подлежала конструкция деаэратора на рабочее давление 1,5 бар (абс.) номинальной производительностью 30 т/ч, работающего при общей щелочности исходной воды около 0,5 мг-экв/дм³ и обеспечивающего получение деаэрированной воды с массовой концентрацией растворенного кислорода не более 10 мкг/дм³ и рН₂₅ деаэрированной воды не менее 8,7. Основные проектные технические решения обоснованы расчетами деаэрационной колонки и деаэраторного бака в разработанном в ИГЭУ программном комплексе «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды». Выявлено, что для обеспечения требуемого содержания в воде растворенного кислорода необходимо оснащение деаэраторного бака барботажным устройством. Важной задачей являлась расчетная оценка возможности получения деаэрированной воды с требуемыми значениями рН₂₅. Отметим, что такая задача как прогнозирование рН деаэрированной воды для проектируемого деаэратора сформулирована впервые. Ранее из-за отсутствия соответствующих методик расчета нельзя было оценить рН деаэрированной воды до изготовления деаэратора и пуска его в работу.

Задача решалась путем моделирования процесса декарбонизации воды в деаэраторе в разработанном программном модуле «Декарбонизация» с привлечением программного комплекса FlowVision для моделирования течения воды в баке. Рассматривались описанные в таблице 2 граничные по производительности режимы работы деаэратора при отсутствии барботажа в баке (режимы 1 и 2) и при работе барботажного устройства (режимы 3 и 4). Выявлено, что деаэратор при работе с барботажом в баке обеспечивает во всем диапазоне нагрузок получение деаэрированной воды с рН₂₅ не менее 8,7, что и требуется согласно заданию на проектирование. Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения.

Таблица 2. Характеристика моделируемых режимов и результаты расчетов

Наименование параметра	Значение в режиме			
	1	2	3	4
1. Расход деаэрированной воды, т/ч	30	9	30	9
2. Удельный расход пара на барботаж, кг/т	0	0	15	15
3. Концентрация гидрокарбонатов в деаэрированной воде, мкг-экв/дм ³	467	435	427	296
4. Степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе, ед.	0,066	0,130	0,146	0,408
5. Щелочность по фенолфталеину деаэрированной воды, мкг-экв/дм ³	16,0	33,0	36,0	102,0
6. рН ₂₅ деаэрированной воды, ед.	8,68	9,00	9,06	9,64

Разработанный метод расчета степени термического разложения гидрокарбонатов использован при обосновании технических решений по модернизации действующих деаэраторов ДА-50 питательной воды котлов-утилизаторов парогазовой ТЭС (ПГУ-ТЭС) в г. Родники Ивановской обл. Проведены испытания деаэраторов, в ходе которых показана их недостаточная эффективность по удалению из воды углекислоты. Из-за малой степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах наблюдалось большое содержание свободной углекислоты в паре котлов (массовая концентрация свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода в среднем 122 мг/дм^3 с эпизодическими увеличениями до 160 мг/дм^3 при норме для пара, отпускаемого внешним потребителям для данного энергообъекта, не более 20 мг/дм^3); пар котлов направляется, в основном, потребителям; большое содержание свободной углекислоты в паре обуславливало наличие интенсивной углекислотной коррозии конденсатопроводов возвратного конденсата и существенные ремонтные затраты. В качестве одного из путей решения проблемы предложено оборудовать деаэраторные баки затопленными барботажными устройствами. В связи с этим возникла необходимость проведения сравнительных расчетов степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах и массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов до и после организации барботажа. Исходными были экспериментальные данные, характеризующие эффективность деаэраторов в первоначальном их конструктивном исполнении, в 354 опытах. Решение задачи выполнялось в два этапа.

На первом этапе выполнена идентификация существующей методики расчета концентрации свободной углекислоты в паре котлов по фактическим показателям работы оборудования. Использовалось следующее выражение для определения массовой концентрации свободной углекислоты, мг/дм^3 , в паре котлов:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{п}} = \left[\text{Щ}_0^{\text{пв}} (1 - \sigma) + \text{Щ}_0^{\text{пв}} \sigma_{\text{к}} \right] \cdot 22, \quad (6)$$

где при идентификации общая щелочность питательной воды $\text{Щ}_0^{\text{пв}}$, мг-экв/дм^3 , и степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах σ принимались равными фактическим (экспериментальным), а степень термического разложения гидрокарбонатов в котлах $\sigma_{\text{к}}$, являющаяся параметром идентификации модели, определялась таким образом, чтобы обеспечить минимальное рассогласование в среднем по всем опытам расчетных и фактических значений $C_{\text{CO}_2}^{\text{п}}$; получено значение $\sigma_{\text{к}} = 0,74$, что существенно отличается от рекомендованного в литературе значения $0,87$ для котлов с давлением в барабане $25,8 \text{ бар}$; среднеквадратическое отклонение расчетных значений $C_{\text{CO}_2}^{\text{п}}$ от фактических для полученной таким образом модели составило $2,0 \%$.

На втором этапе для условий каждого из опытов проведены расчеты $C_{\text{CO}_2}^{\text{п}}$ по выражению (6) с учетом найденного значения $\sigma_{\text{к}}$. При этом значения σ заменялись на расчетные, определенные по разработанной в диссертации методике, при условии оборудования деаэраторных баков барботажным устройством. Анализ полученных по всем рассматриваемым опытам данных показал, что при организации барботажа в баках деаэраторов можно ожидать уменьшения массовой концентрации углекислоты в паре котлов в среднем до значения 76 мг/дм^3 , то есть на 38% относительно исходных значений. То есть для достижения нормативного качества пара, отпускаемого внешним потребителям, по содержанию свободной углекислоты оказывается недостаточной модернизация только деаэрационного оборудования.

В условиях Родниковской ПГУ-ТЭС реализованы также дополнительные меры по переводу схемы подготовки добавочной воды на технологию совместного H-Na-катионирования (технология, предусмотренная проектом – двухступенчатое Na-катионирование). В комплексе рассматриваемые мероприятия позволили добиться нормативного качества отпускаемого потребителям пара. Проект модернизации деаэраторов реализован. Имеется акт внедрения.

В диссертации приведены в виде графических зависимостей результаты расчетных исследований для рассматриваемой Родниковской ПГУ-ТЭС по выявлению влияния режимных параметров на показатели эффективности декарбонизации воды в деаэраторах и концентрацию свободной углекислоты в паре котлов в регулируемом диапазоне гидравлической нагрузки. Эти зависимости позволяют выбрать для заданной общей щелочности исходной воды режимные мероприятия, обеспечивающие нормативные показатели химического качества деаэрированной воды.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведены исследования процессов удаления из воды углекислоты в атмосферных деаэраторах, по результатам которых предложена методика расчета показателей эффективности декарбонизации воды, позволившая сформулировать и решить ряд практически значимых задач по обеспечению нормативных показателей химического качества деаэрированной воды при проектировании и эксплуатации деаэрационных установок.

2. Предложена новая методика обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости, позволяющая учесть характеристики течения воды в деаэраторном баке при расчете процесса термического разложения гидрокарбонатов. С использованием предложенной методики статистически значимо уточнены экспериментальные значения константы скорости реакции, обобщенно моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, с уменьшением их разброса до значений, сопоставимых с характеристиками точности используемых в испытаниях методов измерения параметров. Определены количественные характеристики влияния удельного расхода пара на барботаж в деаэраторном баке на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов.

3. Разработана методика расчета степени термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке, позволившая существенно увеличить точность прогнозирования рассматриваемого показателя: среднеквадратическое отклонение расчетных значений от экспериментальных уменьшилось с 37,0 % до 13,9 % для деаэраторов без парового барботажа и с 20,0 % до 15,4 % для деаэраторов с барботажем в баке.

4. Путем синтеза разработанной методики расчета процесса термического разложения гидрокарбонатов и известной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах составлена методика прогнозирования pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при заданных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора, позволяющая формулировать и решать задачи обеспечения конструктивными и режимными мероприятиями нормативной эффективности декарбонизации воды. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений pH_{25} деаэрированной воды от экспериментальных составило

1,9 % для деаэраторов с паровым барботажем в баке и 2,0 % для деаэраторов без барботажа в баке, что соответствует нормируемой погрешности инструментального определения рН воды потенциометрическим методом (от 0,6 до 2,4 % для условий работы атмосферных деаэраторов). Среднеквадратическое отклонение расчетных значений массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде от экспериментальных для деаэраторов без барботажа в баке составило 44,3 %, что также сопоставимо с нормируемой погрешностью соответствующего метода количественного химического анализа (39 %).

5. Для деаэраторов без барботажа в баке статистически доказана значимость перехода при прогнозировании степени термического разложения гидрокарбонатов и рН₂₅ деаэрированной воды к предложенной методике расчета процесса термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. Для деаэраторов с барботажем в баке уточнение статистически незначимо, однако точность расчета при этом соответствует точности используемых в испытаниях и при эксплуатации деаэраторов методов и средств теплотехнического и химического контроля.

6. Для обоснования технических решений по обеспечению нормативного химического качества деаэрированной воды при проектировании и эксплуатации деаэраторов разработан алгоритм прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды, обеспечивающий нахождение значений степени термического разложения гидрокарбонатов, массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде и рН₂₅ деаэрированной воды с точностью, сопоставимой с нормативной точностью соответствующих методов количественного химического анализа. Выполнена программная реализация разработанного алгоритма в виде модуля «Декарбонизация» прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды».

7. Разработанный алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах и средства его компьютерной поддержки использованы для обоснования конструктивных и режимных мероприятий по обеспечению нормативной эффективности декарбонизации воды при модернизации деаэрационной установки питательной воды котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭС в г. Родники Ивановской обл., при проектировании для ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) атмосферного деаэратора ДА-30 при ужесточенных относительно нормативов требованиях к химическому качеству деаэрированной воды, а также внедрены в практику режимно-наладочных работ в АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново). Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Горшенин, С.Д.** Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках с затопленным барботажным устройством / **Горшенин С.Д.,** Ненаездников А.Ю., Ледуховский Г.В. [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 5. с. 9-13.
2. Ледуховский, Г.В. Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа / Ледуховский Г.В., **Горшенин С.Д.,** Коротков А.А. // Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 3. с. 9-15.

