

На правах рукописи



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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: канд. т. наук, доцент Ледуховский
Григорий Васильевич

Реферат

Диссертация 161 стр., 45 рис., 14 табл., 176 библ.

Термический деаэратор, декарбонизация, диоксид углерода, гидрокарбонат, барботаж, эксплуатационный режим, программный комплекс

Объектами исследования являются процессы декарбонизации воды в термических деаэраторах атмосферного давления струйно-барботажного типа.

Целью работы 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.

Выполнен аналитический обзор опубликованных результатов исследований процессов декарбонизации воды в термических деаэраторах атмосферного давления струйно-барботажного типа. Предложена новая методика обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием специализированных программных средств моделирования течений жидкости. Разработана методика расчета степени термического разложения гидрокарбонатов баках деаэратора, позволившая прогнозировать указанный показатель с точностью, сопоставимой с точностью метода количественного химического анализа. Составлена методика расчета pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при заданных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора, реализованная при проектировании и обосновании мероприятий по повышению эффективности декарбонизации воды струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	11
1.1. Назначение термических деаэраторов и область их применения в энергетических установках.....	11
1.2. Общие сведения об атмосферных деаэраторах струйно-барботажного типа	12
1.3. Термическая деаэрации воды как абсорбционный процесс	18
1.4. Следствия присутствия углекислоты в теплоносителях ТЭС. Нормирование качества деаэрированной воды. Показатели эффективности работы деаэратора по удалению соединений углекислоты ...	24
1.5. Опубликованные данные об эффективности декарбонизации воды атмосферными деаэраторами	33
1.5.1. Деаэрационные колонки.....	33
1.5.2. Деаэраторные баки.....	37
1.6. Формулировка задач исследования	51
Глава 2. УТОЧНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРОКАРБОНАТОВ В АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРОВ.....	52
2.1. Выявление причин появления наблюдаемых разбросов экспериментальных данных	52
2.2. Уточнение эмпирического обеспечения модели	55
2.2.1. Обзор программного комплекса FlowVision применительно к решаемой задаче.....	56
2.2.2. Моделирование течения воды в баках атмосферных деаэраторов в среде FlowVision и методика расчета уточненных значений константы скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов.....	60
2.2.3. Результаты расчетов по уточнению экспериментальных значений константы скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах	75
2.3. Выводы по второй главе	85

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	
ОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ	
В АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ	87
3.1. Методика прогнозирования степени термического разложения	
гидрокарбонатов	87
3.2. Методика прогнозирования pH деаэрированной воды.....	92
3.3. Методика прогнозирования массовой концентрации	
в деаэрированной воде свободной углекислоты	99
3.4. Выводы по третьей главе	102
Глава 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	
РАБОТЫ.....	104
4.1. Общая характеристика направлений практической реализации	
результатов работы.....	104
4.2. Разработка алгоритма прогнозирования показателей эффективности	
декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах	105
4.3. Разработка модуля «Декарбонизация» прикладного программного	
комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных	
деаэраторов воды»	108
4.4. Расчет показателей декарбонизации для проектируемого деаэратора	
ДА-30 при ужесточенных относительно нормативов требованиях	
к химическому качеству деаэрированной воды	115
4.5. Обоснование технических решений по модернизации деаэрационной	
установки питательной воды Родниковской ПГУ-ТЭС	124
4.6. Выводы по четвертой главе.....	133
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	134
Список литературы	137
ПРИЛОЖЕНИЕ. Документы, подтверждающие практическую	
реализацию результатов работы	156

ВВЕДЕНИЕ

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 добавком 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 pH 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 характеризуется 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 $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ и $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$.

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 характе-

ристиках деаэратаора путем синтеза опубликованной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэратаорах и разработанной уточненной модели процесса термического разложения гидрокарбонатов.

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

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

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена новая методика обработки результатов испытаний деаэратаоров 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 деаэратаорном баке.

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

3. Путем синтеза разработанной методики расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов и известной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэратаорах составлена методика прогнозирования pH_{25} деаэрированной воды и концентрации в ней свободной углекислоты при заданных характеристиках деаэратаора, 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 деаэратаора на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов при наличии и отсутствии парового барботажа; изложен подход к моделированию рассматриваемого процесса с учетом неравномерности течения воды в деаэратаорном баке; проведена модернизация существующей методики прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэратаорах 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 жид-

кости, учитывающую влияние гидродинамической обстановки в деаэрационном 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 деаэрационном баке; проведении обработки результатов экспериментальных исследований с определением уточненных значений константы скорости реакции, обобщенно модели-

рующей 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 энергосистемы» (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.

Глава 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1. Назначение термических деаэраторов и область их применения в энергетических установках

Термические деаэраторы являются разновидностью аппаратов смешивающего типа, в которых протекают процессы тепломассообмена между жидкой и паровой фазой. Паровую фазу составляет греющий пар, который подается непосредственно в деаэратор, либо пар, образующийся из воды при ее вскипании в зонах с более низким давлением, чем давление насыщения воды. Основным назначением деаэраторов является перевод в паровую фазу и последующее удаление присутствующих в воде в растворенной и химически связанной форме газов (главным образом, кислорода и диоксида углерода), участвующих в коррозионных процессах в тепломеханическом оборудовании объектов «большой» и «малой» энергетики.

По рабочему давлению деаэраторы разделяют на деаэраторы повышенного давления (рабочее давление от 0,6 до 1,2 МПа), деаэраторы атмосферного типа (от 0,11 до 0,13 МПа) и вакуумные деаэраторы (от 0,0075 до 0,05 МПа). По способу организации соприкосновения фаз выделяют следующие типы деаэрационных устройств [1–11]: струйные; барботажные; капельные; пленочные. Современные деаэраторы с точки зрения организации поверхности раздела фаз преимущественно являются комбинированными, так как могут сочетать в себе различные по принципу действия деаэрационные устройства.

Область применения деаэраторов на объектах энергетики связана с рабочим давлением. Вакуумные деаэраторы нашли применение в схемах подпиточной воды тепловых сетей и испарительных установках. Деаэраторы атмосферного типа применяются для деаэрации питательной воды в котельных и тепловых электрических станциях со средними и низкими давлениями свежего пара, добавочной воды цикла теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с давлениями свежего пара выше среднего, в качестве деаэраторов подпитки тепловых сетей закрытого типа и питательной воды испарительных установок электростанций. Деаэраторы повышенного давления нашли применение только в тепловых схемах электростанций высокого и сверхкритического давления свежего пара для деаэрации питательной воды.

Таким образом, наиболее широкое применение на объектах «малой» и «большой» энергетики нашли деаэраторы атмосферного типа. Причинами этого является относительная простота их конструкции по сравнению с деаэраторами повышенного давления из-за отсутствия больших избыточных давлений и относительная простота эксплуатации по сравнению с вакуумными деаэраторами, так как не требуется уделять пристального внимания газоплотности системы. Нужно отметить, что среди всего многообразия возможных конструкций атмосферных деаэраторов наибольшее распространение получили струйно-барботажные аппараты, техническое обслуживание которых относительно простое, а массообменные характеристики сравнительно высоки [1–11].

1.2. Общие сведения об атмосферных деаэраторах струйно-барботажного типа

Существует множество различных конструктивных решений для деаэраторов данного типа. Во многих случаях даже однотипные деаэраторы имеют конструктивные отличия, обусловленные разного рода реконструкциями и модернизациями. Однако все их многообразие определяется, главным образом, особенностями конструкции деаэрационных колонок. Основными элементами, составляющими основу конструкций деаэрационных колонок, являются струйный отсек, провальный и непровольный барботажные листы и барботажный коллектор [9–11], в последнее время НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова (далее – ЦКТИ) уделяется пристальное внимание деаэраторам с капельной ступенью [141].

Основным разработчиком большинства типовых конструкций атмосферных деаэраторов струйно-барботажного типа является ЦКТИ. В настоящее время в эксплуатации находятся как современные модели таких деаэраторов (ДА и ДА-м), так и устаревшие их аналоги (ДСА).

В зависимости от номинальной производительности существует стандартный ряд типоразмеров атмосферных деаэраторов: 1, 3, 5, 15, 25, 50, 100, 200 и 300 т/ч [12, 13, 15, 16]. Готовы для серийного производства аппараты с капельной ступенью производительностью до 800 т/ч [141].

Атмосферные деаэраторы большой производительности (5 т/ч и более) состоят из деаэраторного бака и установленной на нем одной (реже двух) деаэрационной колонки. Деаэраторные баки служат для создания определенного запаса деаэрированной воды, необходимого для обеспечения нормального технологического процесса энергетических объектов. Кроме этого, увеличенное время пребывания воды в деаэраторном баке при температуре, близкой к температуре насыщения, повышает эффективность процесса деаэрации.

Атмосферные деаэраторы комплектуются баками типовых конструкций вместимостью 2, 4, 8, 15, 25, 35, 50 и 75 м³ [12, 13, 16], для мощных деаэраторов ЦКТИ с капельной ступенью разработаны баки вместимостью 100 м³ и более [140, 141]. Как правило, вместимость деаэраторного бака подбирается по производительности деаэрационной колонки, однако по требованию заказчика возможны поставки деаэрационных колонок с баками из стандартного ряда, несоответствующих им по вместимости. Если на технологические нужды требуется малый расход деаэрированной воды (до 5 т/ч), то для создания необходимого запаса воды можно обойтись без отдельного деаэраторного бака; запас воды в этом случае формируется в корпусе деаэратора. Такие деаэраторы получили название «бесколонковые».

В качестве примера рассмотрим подробнее один из вариантов конструкции термического атмосферного деаэратора производительностью 5 т/ч и более (рисунок 1.1). Аппарат состоит из деаэраторного бака и установленной на нем деаэрационной колонки [9–13]. В колонке рассматриваемой конструкции размещены струйные отсеки, образуемые струями воды, вытекающими через отверстия перфорированных тарелок, а также барботажные устройства в виде барботажного листа и/или затопленного барботажного коллектора.

Деаэрируемая вода через штуцер 2 поступает в смесительный колодец, откуда попадает на верхнюю перфорированную тарелку 4, далее, разбиваясь на струйки, стекает на нижнюю струеобразующую тарелку 5. Струйный поток воды, стекающий с перфорированной части тарелки 5, поступает на расположенную ниже перепускную тарелку. С этой тарелки вода стекает в барботажный колодец 6, в котором установлен перфорированный коллектор. Основное предназначение данного коллектора заключается в подогреве воды перед барботажным листом 7. При от-

сутствии подачи пара в барботажный коллектор колодца 6, нагрев воды в ущерб эффективности деаэрации осуществляется непосредственно на барботажном листе 7. Далее поток воды, переливаясь через порог барботажного листа 7, поступает в сливной колодец. Из него для исключения повторного заражения воды удаляемыми газами по двум опускным трубопроводам 8 (применяются для деаэраторов ДА-200м и ДА-300м) отводится в деаэраторный бак.

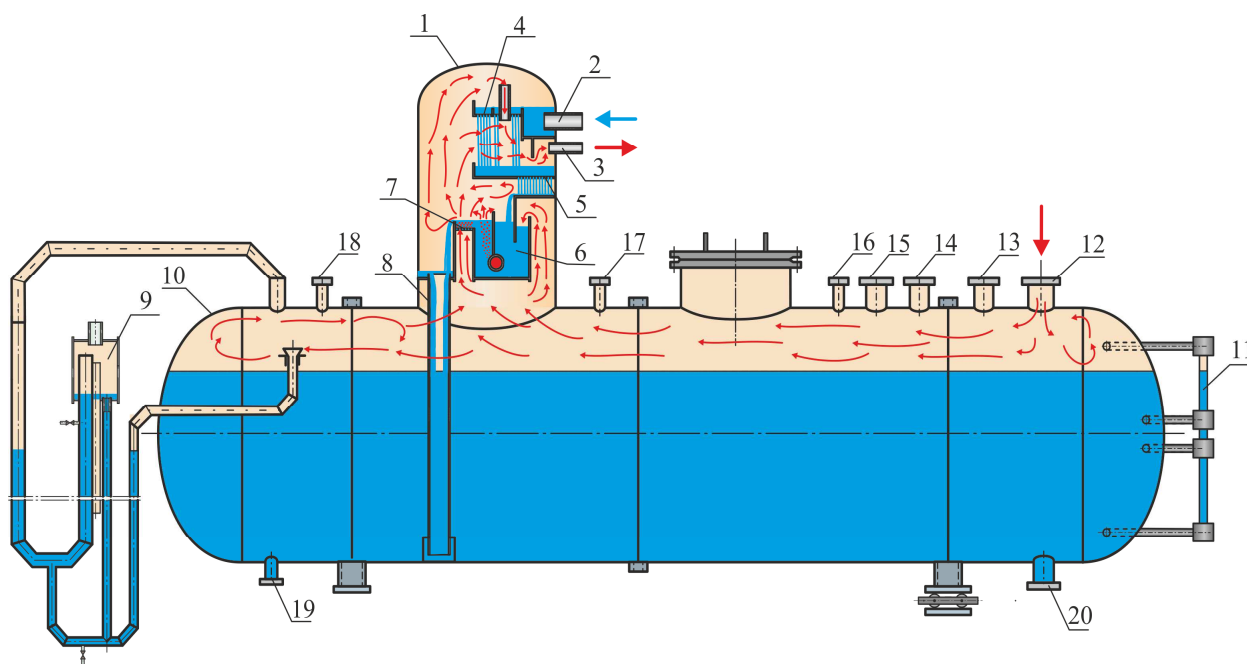


Рисунок 1.1. **Принципиальная схема деаэратора струйно-барботажного типа атмосферного давления:** 1 – деаэрационная колонка; 2 – подвод основного потока воды; 3 – отвод выпара; 4 – тарелка струеобразующая; 5 – перепускная тарелка; 6 – барботажный колодец; 7 – барботажный лист; 8 – опускной трубопровод; 9 – предохранительно-сливное устройство; 10 – деаэраторный бак; 11 – указатель уровня; 12 – подвод основного пара; 13 – штуцер для сброса от сепаратора непрерывной продувки котла; 14 – штуцер ввода перегретых конденсатов; 15 – резервный штуцер; 16 – штуцер подвода пара к затопленному барботажному устройству деаэраторного бака (при наличии); 17 – штуцер для ввода питательной воды из линии рециркуляции питательных насосов; 18 – штуцер для ввода паровоздушной смеси из парового пространства подогревателей; 19 – дренажный штуцер; 20 – штуцер отвода деаэрированной воды

Основной поток пара подводится в надводное пространство деаэраторного бака через штуцер 12. Проходя надводное пространство бака, паровой поток увлекает за собой выделившиеся воды газы и поступает в деаэрационную колонку под

барботажный лист 7, который в нормальных условиях работает в беспровальном режиме. После барботажа на листе 7 несконденсировавшаяся часть пара поступает в струйный отсек колонки. Основная его часть конденсируется, подогревая струи воды, сформированные тарелками 4, 5, а оставшаяся – вместе с удаленными газами в виде выпара через штуцер 3 отводится в атмосферу, либо в охладитель выпара.

В некоторых конструкциях атмосферных деаэраторов в дополнение к указанным элементам можно встретить барботажные устройства деаэраторного бака, выполненные по системе ЦКТИ [9–11] или в виде затопленного перфорированного барботажного коллектора [9–11, 14]. Через специальный трубопровод на барботажное устройство подается пар, давление которого должно быть выше статического давления воды в баке в месте установки барботажного устройства.

Для защиты от недопустимого повышения давления в корпусе деаэратора и уровня воды в деаэраторном баке, на деаэраторах устанавливается предохранительно-сливное устройство. В схему обвязки деаэраторов также входят: указатели уровня; уравнильные трубопроводы по пару и воде; дренажный трубопровод; охладитель выпара.

Конструкции атмосферных деаэраторов за длительный период их развития в ходе накопления опыта эксплуатации претерпели ряд общих изменений. Первые деаэраторы в 30-е годы прошлого века выпускались со струйной деаэрационной колонкой, включающей до пяти струйных отсеков (такие колонки в литературе получили название «высокие»); барботажные устройства не предусматривались. В 50-е годы был разработан ряд стандартных типоразмеров таких аппаратов производительностью от 25 до 200 т/ч. Однако эффективность таких деаэраторов оказалась недостаточной. В 60-е годы ЦКТИ был создан модернизированный деаэратор, объединяющий струйную колонку, имеющую, как правило, не более трех отсеков, и бак с затопленным барботажным устройством специально разработанной конструкции (см. рисунок 1.2 [140, 141]).

Учитывая специфику производственного процесса, деаэраторы заказчикам поставлялись в виде колонки со смонтированными внутренними элементами и барботажного устройства бака [140]. Сам бак изготавливался заказчиком, после чего в него устанавливались элементы барботажного устройства. Опыт показал, что

последнее не обеспечивает правильность сборки аппарата, в результате эффективность и надежность деаэратора существенно ухудшались. ЦКТИ было принято решение о переносе барботажного устройства из бака в колонку. В результате в 70-е годы появилась следующая конструкция деаэратора, выпускавшегося с производительностью до 300 т/ч; колонка этого деаэратора включала один или два струйных отсека и непровальный барботажный лист [140]. Для деаэраторов производительностью 200 и 300 т/ч позже была проведена модернизация, в колонке был размещен дополнительно затопленный барботажный коллектор, а сброс воды из колонки в бак выполнен опускными трубами для исключения повторной аэрации деаэрированной воды (такой деаэратор показан на рисунке 1.1).

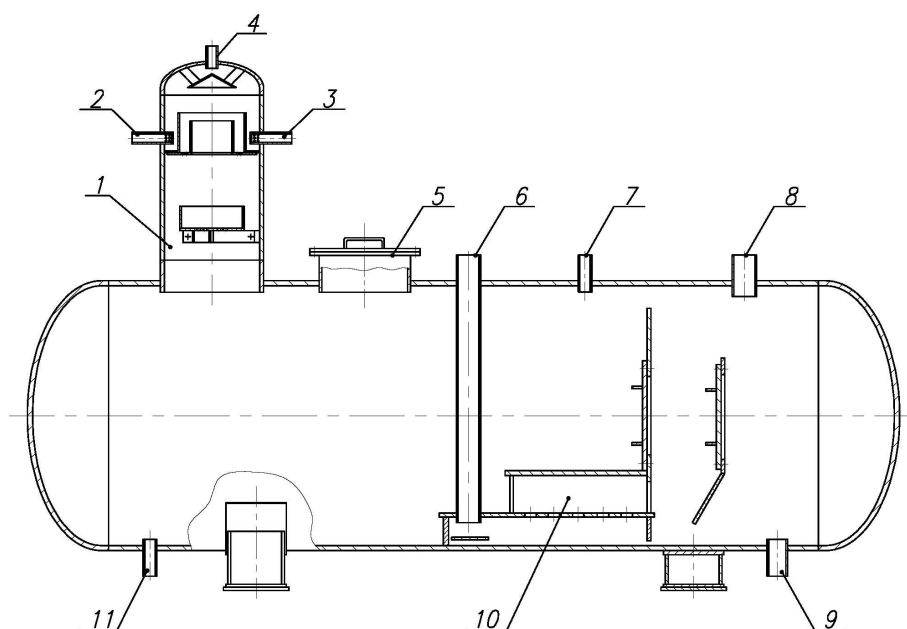


Рисунок 1.2 **Принципиальная схема двухступенчатого деаэратора атмосферного давления [140, 141]:** 1 – деаэрационная колонка; 2 – подвод исходной воды; 3 – подвод конденсатов; 4 – отвод выпара; 5 – люк; 6 – подвод барботажного пара; 7 – рециркуляция насосов; 8 – подвод основного пара; 9 – отвод деаэрированной воды; 10 – барботажное устройство; 11 – дренаж

В настоящее время ЦКТИ продолжает совершенствовать конструкцию атмосферных деаэраторов. Учитывая тенденцию перехода к тепловым сетям закрытого типа, а также необходимость деаэрации подпиточной воды теплосетей при температуре не менее 100 °С [124], актуальна разработка деаэраторов повышенной про-

изводительности (800 т/ч и более). Для таких аппаратов ЦКТИ использует низконапорное водораспределение в колонке в виде гидравлической струйной форсунки. Это позволяет существенно увеличить площадь поверхности контакта фаз и, соответственно, интенсифицировать процесс нагрева при сохранении относительно небольших габаритов колонки. Барботажная ступень вновь переносится в деаэрационный бак. Эти решения применены ЦКТИ еще в 90-е на деаэраторах производительностью до 300 т/ч. Конструкция головного образца деаэратора большой производительности (800 т/ч), разработанная ЦКТИ, приведена на рисунке 1.3 [141]. Деаэратор производительностью 500 т/ч аналогичной конструкции разработан ЦКТИ для схемы подпитки теплосети Юго-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.

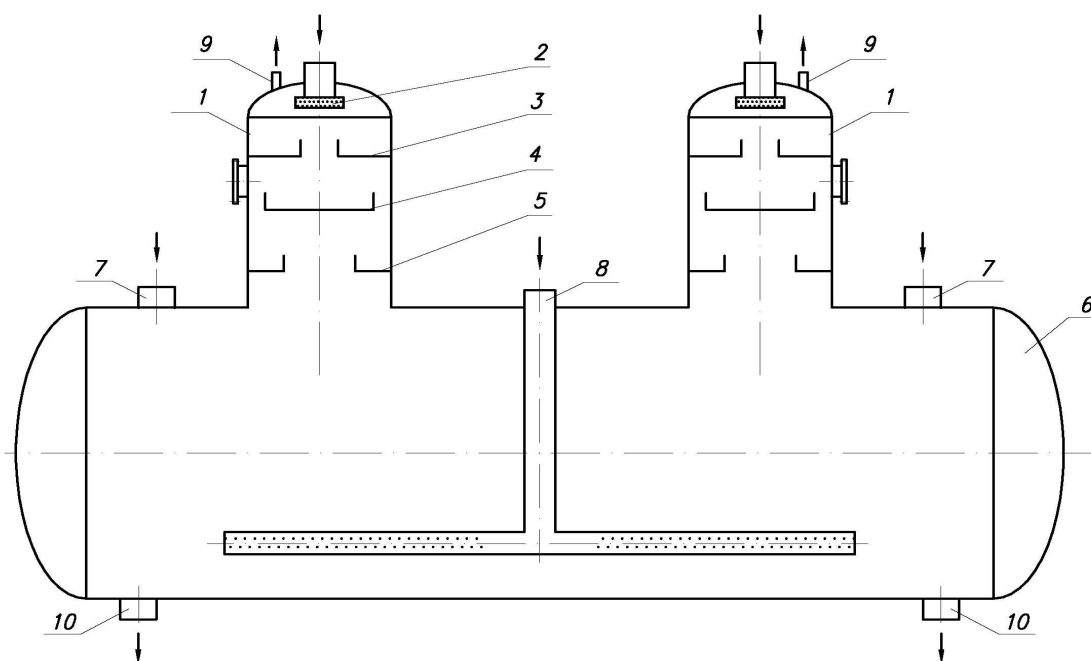


Рисунок 1.3. Принципиальная схема деаэратора атмосферного давления производительностью 800 т/ч [141]: 1 – колонка деаэрационная; 2 – низконапорное водораспределительное устройство; 3,4,5 – перфорированная тарелка; 6 – бак деаэрационный; 7 – штуцер подвода основного пара; 8 – штуцер подвода барботажного пара; 9 – штуцер отвода пара; 10 – штуцер отвода деаэрированной воды.

Испытания деаэратора, выполненные ЦКТИ [140], показали следующее:

- регулировочный диапазон нагрузок составляет от 10 до 105 %, деаэратор внутри регулировочного диапазона работает устойчиво без заметной вибрации и гидравлических ударов;

- массовая концентрация растворенного кислорода в деаэрированной воде не превосходит 10 мкг/кг во всех эксплуатационных режимах;
- значения pH деаэрированной воды составляют от 9,0 до 9,5.

Отметим, что аналогичное качество деаэрированной воды было получено группой сотрудников ИГЭУ во всех режимах работы при наладке деаэратора ДА-300м при отключенном барботажном коллекторе деаэрационной колонки с организацией барботажа в деаэраторном баке [103, 105, 109, 139].

ЦКТИ выполняется также конструктивная проработка новых деаэраторов производительностью до 1200 т/ч для крупных систем теплоснабжения и горячего водоснабжения. При этом предусматривается возможность использования в качестве теплоносителя в деаэраторах вместо пара «перегретой» деаэрированной воды соответствующих параметров [141].

1.3. Термическая деаэрации воды как абсорбционный процесс

Термическую деаэрацию можно представить как результирующий процесс абсорбции и десорбции газов [8–11]. Эффект деаэрации в этом случае будет наблюдаться только в том случае, если массовая скорость десорбции превышает массовую скорость процесса адсорбции газов.

Деаэрация, как любой нестационарный процесс, характеризуется равновесными и кинетическими параметрами [17–29]. Равновесными (статическими) считаются параметры, которые будут наблюдаться в системе спустя длительное время при неизменном воздействии на нее внешних факторов. Применительно к деаэраторам равновесие между газовой и жидкой фазами определяется температурой и давлением системы, составом любой из фаз и термодинамическими свойствами компонентов обеих фаз. Кинетические параметры являются характеристиками степени отклонения системы от состояния равновесия. Чем больше отклонение системы от равновесного состояния, тем быстрее в системе протекают процессы, стремящиеся вернуть ее к равновесию [17–29].

Для большинства теплоносителей ТЭС как бесконечно разбавленных растворов [10, 11, 18, 22, 30–36] справедливы следующие соотношения:

- константа фазового равновесия [11, 17–21]:

$$K_{\phi} = C_{\text{п}} / C_{\text{ж}}, \quad (1.1)$$

где $C_{\text{п}}$ – концентрация газа в газовой фазе; $C_{\text{ж}}$ – концентрация газа в жидкой фазе.

Значение K_{ϕ} в большинстве случаев определяется опытным путем и зависит от способа выражения концентрации, физических свойств газа и жидкости, давления и температуры в системе [11, 17–21];

- закон Генри:

$$p = K_{\text{Г}} x, \quad (1.2)$$

где p – парциальное давление рассматриваемого газа над раствором; x – молярная доля рассматриваемого газа в растворе; $K_{\text{Г}}$ – коэффициент Генри.

Коэффициент Генри в выражении (1.2) имеет размерность давления, определяется температурой системы и не зависит от значений концентраций газа в паровой и газовой фазах и общего давления системы [10, 11, 18, 20]. Значения коэффициента Генри для систем «кислород – вода» и «диоксид углерода – вода» опубликованы разными авторами [9–11, 18, 20, 23, 25, 27, 39] и содержат ряд противоречий. Наиболее достоверными согласно [14] следует считать значения, приведенные в [9–11, 18, 20];

- коэффициент абсорбции, показывающий отношение объема газа, приведенного к нормальным условиям (760 мм рт. ст.; 0 °C), к единице объема растворителя [9–11]:

$$\alpha = \frac{p_0 V \rho_{\text{ж}}}{M_{\text{ж}} K_{\text{Г}}}, \quad (1.3)$$

где $p_0 = 760$ мм рт. ст. – нормальное атмосферное давление; $V = 22,414 \cdot 10^{-3}$ м³/моль – молярный объем газа при нормальных условиях; $\rho_{\text{ж}}$, кг/м³ – плотность воды при заданной температуре системы; $M_{\text{ж}} = 18,015 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молекулярная масса воды; $K_{\text{Г}}$, мм рт. ст. – коэффициент Генри при заданной температуре.

Значения коэффициентов абсорбции диоксида углерода и кислорода чистой водой в зависимости от температуры системы приведены в [9–11];

- равновесная молярная доля газа в растворе (отношение числа молей газа к общему числу молей раствора):

$$x_r = \alpha_r \frac{M_{\text{ж}} p_r}{p_0 V \rho_{\text{ж}}}, \quad (1.4)$$

Поскольку число молей газа в растворе много меньше числа молей растворителя (собственно воды), без ощутимой потери точности вместо мольной доли газа в растворе x , можно использовать его относительную мольную долю X (отношение числа молей газа в растворе к числу молей растворителя (воды)), поэтому:

$$X_r \approx x_r = \alpha_r \frac{M_{\text{ж}} p_r}{p_0 V \rho_{\text{ж}}}, \quad \bar{C}_r = \frac{X_r}{M_{\text{ж}}} = \alpha_r \frac{p_r}{p_0 V \rho_{\text{ж}}}, \quad (1.5)$$

$$C_r = \bar{C}_r V \rho_{\text{ж}} \cdot 10^6 = \alpha_r \frac{p_r \rho_{\text{ж}}}{p_0 \rho_{\text{ж}}} \cdot 10^6, \quad (1.6)$$

где $\bar{C}_r$, моль/кг – равновесная молярная концентрация газа в растворе; C_r , мг/кг – равновесная массовая концентрация газа в растворе; p_r , кг/м³ – плотность газа при нормальных условиях;

• закон Дальтона:

$$p_0 = p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} + \dots + p_{\text{п}}, \quad (1.7)$$

где p_0 – общее давление смеси; p_{ri} – парциальное давление i -ого газа; $p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара.

Важно отметить, что закон Генри применим лишь для идеальных растворов газов, при этом бесконечно разбавленный раствор может считаться идеальным, если газ не образует химических связей с растворителем. В том случае, если в растворе присутствуют химически связанные формы газа, например диоксида углерода, закон Генри применим в качестве первого приближения [18, 20, 22, 24].

В общем случае, даже если в воде отсутствуют химически связанные формы рассматриваемого газа, необходимо учитывать наличие в воде других примесей. Известны методики, которые позволяют количественно учесть влияние других примесей на константу фазового равновесия [18], однако, как показали практические расчеты [14], рассматриваемый эффект не является значимым для теплоносителей энергетических объектов: отличие констант фазового равновесия для случаев растворения рассматриваемого газа в воде с реальным содержанием примесей и без них составляет не более 2–3 % [14].

Основная сложность описания процессов удаления из воды диоксида углерода обусловлена необходимостью учета различных форм, в которых он существует в водных растворах. При растворении углекислого газа в чистой воде часть его молекул (порядка 0,2 – 0,3 %) подвергается гидратации с образованием угольной кислоты [9–11, 37], а молекулы угольной кислоты диссоциируют по первой и второй ступеням [9–11, 37]:



Количественные соотношения между различными компонентами раствора описываются константами первой (K_0 – истинной) и второй (K_2) ступеней диссоциации угольной кислоты [10, 37]:

$$K_0 = f_{\text{H}^+} [\text{H}^+] f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3]; \quad (1.11)$$

$$K_2 = f_{\text{H}^+} [\text{H}^+] f_{\text{CO}_3^{2-}} [\text{CO}_3^{2-}] / (f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]); \quad (1.12)$$

где f_{H^+} , $f_{\text{HCO}_3^-}$, $f_{\text{CO}_3^{2-}}$ – коэффициенты активности ионов; $[\text{H}^+]$, $[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$, $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ – концентрации компонентов, моль/л.

В практических расчетах чаще всего используется кажущаяся константа диссоциации K_1 , которая соответствует уравнению:



Численные значения констант диссоциации K_0 , K_1 и K_2 , соответствующие различным температурам водного раствора приведены, например, в [10].

Связь между различными формами угольной кислоты и водородным показателем pH раствора [10, 37] представлена на рисунке 1.4. Анализ данных рисунка 1.4 показывает, что при значениях pH₂₅ ниже 4,3 весь диоксид углерода находится в воде в молекулярной (свободной) форме (CO_2 и H_2CO_3). С увеличением pH раствора содержание гидрокарбонат-ионов HCO_3^- в воде увеличивается, доля молекулярных форм при этом уменьшается. При достижении значения pH₂₅ ≈ 8,33 содержание молекулярных форм диоксида углерода будет минимальным (менее 2 %). Дальнейшее увеличение pH приведет к увеличению содержания в растворе карбонат-ионов CO_3^{2-} и уменьшению содержания гидрокарбонат-ионов HCO_3^- , свободные формы диоксида углерода при этом будут практически отсутствовать.

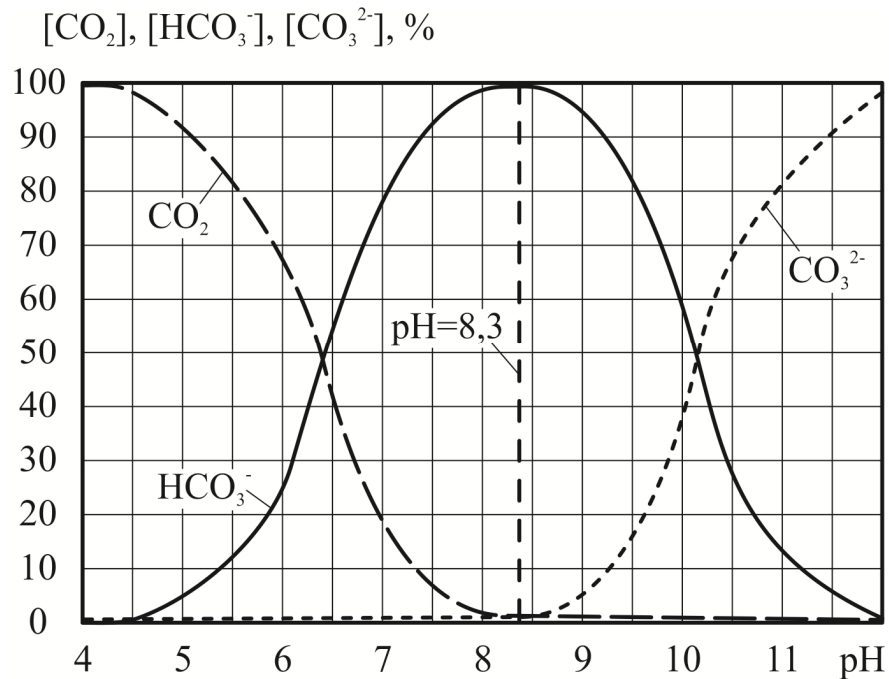


Рисунок 1.4. Зависимость соотношения между молярными концентрациями форм диссоциации угольной кислоты от значения pH_{25} водного раствора

Дополнительно осложняет расчет процессов десорбции диоксида углерода то обстоятельство, что в условиях эксплуатации деаэрации подвергаются технологические воды, содержащие в себе различные примеси, которые могут быть вовлечены в химические взаимодействия с различными формами диоксида углерода. С учетом этого текущая концентрация свободного диоксида углерода в воде будет определяться характеристиками целого комплекса химических реакций [125]. Решение системы кинетических уравнений этих реакций позволило бы при известных начальных концентрациях компонентов и значениях констант скоростей реакций определить концентрации продуктов этих реакций, в число которых входит свободный диоксид углерода, однако для большинства реакций константы скорости при заданных температурах оказываются неизвестными. Кроме того, нужно учитывать то обстоятельство, что интенсивность протекания химических процессов, в частности, условия диффузионного отвода диоксида углерода из воды, будут напрямую зависеть от гидродинамических условий в конкретной ступени деаэратора, что создает на практике ряд непреодолимых трудностей. По этой причине такой прямой путь расчета оказывается неприменимым на практике.

Если в системе отсутствует равновесие между фазами, то в ней протекает процесс массопередачи. Это результирующий процесс, который включает процессы переноса вещества в пределах каждой из фаз и через границу раздела фаз.

Перенос вещества в пределах каждой фазы в зависимости от гидродинамических условий может быть описан законом Фика, записанным для случаев молекулярной, конвективной или турбулентной диффузии [18]. Для случая турбулентной диффузии связь между количеством компонента, переносимого через поверхность в рассматриваемом направлении за единицу времени, может быть описана выражением [18]:

$$W = -F(D + \varepsilon_d) \frac{dC}{dz}, \quad (1.14)$$

где W – количество газа, переносимого в единицу времени в направлении z через поверхность площадью F ; dC/dz – градиент концентрации газа в направлении z ; D – коэффициент молекулярной диффузии газа в воде; ε_d – коэффициент турбулентной диффузии газа в воде.

Непосредственно применить закон Фика в расчетах процесса молекулярной диффузии в конкретной ступени деаэратора затруднительно: опубликованные значения коэффициента молекулярной диффузии, например, диоксида углерода в воде [18, 20, 23, 25, 27, 43] соответствуют диапазону температур от 18 до 25 °C и весьма противоречивы; определение значений коэффициента турбулентной диффузии сопряжено с существенными проблемами.

Следует отметить, что основное сопротивление массопередаче имеет место быть в жидкой фазе, то есть коэффициент массопередачи в целом определяется значением коэффициента массоотдачи в жидкости [22].

Таким образом, термическую деаэрацию можно рассматривать как результирующий процесс двух параллельно протекающих в двухфазной среде процессов: тепло- и массообмена в системе «вода – водяной пар» и газообмена между жидкой и газовой фазами. Процессы газообмена не оказывают заметного влияния на теплофизические свойства воды и водяного пара, поскольку технологические воды энергетических объектов можно считать бесконечно разбавленными растворами. Термодинамические и гидродинамические параметры системы, напротив, оказы-

вают существенное влияние на растворимость газов в воде и интенсивность процессов газообмена, особенно хемосорбции-десорбции химически связанных газов. Движущей силой в процессе переноса газов из одной фазы в другую является степень отклонения системы от равновесного состояния, которое в термических деаэраторах из-за недостаточности времени контакта фаз, как правило, не достигается. Состояние, наиболее близкое к равновесному, достигается, благодаря образованию и удалению газовых пузырьков и диффузии газов через поверхность контакта фаз. Образование газовых пузырьков будет наблюдаться в тот момент, когда сумма парциальных давлений всех растворённых в воде газов и водяного пара будет равна или превысит давление внутри жидкости. Считается, что при рациональной конструкции термического деаэратора с газовыми пузырями может быть удалено из воды от 90 до 95 % растворенных в ней газов. Остальные 5 – 10 % растворенных газов должны быть удалены за счет диффузии. Удаление из жидкости оставшихся 5–10 % растворенных газов является весьма трудной задачей, что предъявляет высокие требования к деаэриционным установкам [9–11].

При десорбции диоксида углерода, который может находиться в жидкости, как в свободной, так и в химически связанной форме, необходимо учитывать не только время, требуемое для завершения комплекса химических реакций с его участием, но и время диффузии, определяемое сложившимися в деаэраторе гидродинамическими условиями. Интенсивность хемосорбции-десорбции, при этом, будет определяться временем протекания наиболее «медленной» стадии процесса.

1.4. Следствия присутствия углекислоты в теплоносителях ТЭС.

Нормирование качества деаэрированной воды.

Показатели эффективности работы деаэратора по удалению соединений углекислоты

Свободная углекислота способна вызвать сильную коррозию трубопроводов и теплосилового оборудования, особенно при повышенной температуре [43, 45–48]. В присутствии свободной углекислоты снижается значение рН воды, что при наличии растворенного кислорода приводит к образованию на поверхности метал-

ла рыхлого слоя продуктов коррозии. В таких условиях процессы коррозии протекают интенсивно, оказывается существенным также вынос продуктов коррозии в теплообменное и котельное оборудование. Коррозионная активность углекислоты существенно зависит от температуры теплоносителя: при температуре менее 50 °С свободная углекислота относительно безопасна даже в присутствии растворенного кислорода; при более высоких температурах увеличивается степень диссоциации углекислоты, уменьшается pH воды, а коррозионная активность свободной угольной кислоты существенно возрастает. Важно отметить, что коррозионная активность свободной углекислоты усиливается, если в воде отсутствуют буферные ионы (CO_3^{2-} , HCO_3^-), препятствующие уменьшению pH [40, 43, 45, 48].

Механизм коррозии металла с участием свободной углекислоты можно описать следующим образом [125]. Свободная угольная кислота диссоциирует с образованием катионов водорода H^+ согласно реакциям (1.9), (1.10). Катионы водорода H^+ участвуют в катодном процессе с выделением свободного водорода, и гидрокарбонат-анионов, участвующих в анодном процессе с образованием растворимых гидрокарбонатов железа:



При гидролизе и термическом разложении гидрокарбоната железа выделяется свободная угольная кислота:



Гидроксид железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$ дегидратируется со скоростью, пропорциональной температуре воды, с образованием других форм продуктов коррозии ($\alpha\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$), например:



В катодной реакции с участием кислорода образуются анионы OH^- :

– в щелочной среде



– в нейтральной и кислой среде



Таким образом, кислород и угольная кислота участвуют в едином коррозионном процессе, что подтверждается экспериментальными данными [43–48]. Угольная кислота, в отличие от кислорода, в коррозионных процессах практически не расходуется (если не считать небольшое количество углекислоты, необходимое для образования промежуточных продуктов коррозии гидрокарбонатов и карбонатов железа).

Приведенные сведения обуславливают необходимость нормирования химического качества деаэрированной воды в деаэраторах атмосферного давления. Количественные характеристики показателей качества зависят от технологической схемы, в составе которой работает деаэратор (подготовка питательной воды паровых котлов низкого и среднего давления, деаэрация добавочной воды цикла ТЭС, деаэрация подпиточной воды тепловой сети). В таблицах 1.1 – 1.3 приведены требования основных нормативных документов в части химического качества этих теплоносителей [126 – 129].

Таблица 1.1. Показатели качества питательной воды котлов с естественной циркуляцией (в том числе котлы – бойлеры) и рабочим давлением пара до 4 МПа

Наименование показателя	Рабочее давление, МПа (кгс/см ²)			
	0,9 (9)	1,4 (14)	2,4 (24)	4 (40)
Прозрачность по шрифту, см, не менее	30	40	40	40
Общая жесткость, мкг-экв/кг	<u>30*</u> 40	<u>15*</u> 20	<u>10*</u> 15	<u>5*</u> 10
Содержание соединений железа (в пересчете на Fe), мкг/кг	Не нормируется	<u>300*</u> Не нормируется	<u>100*</u> 200	<u>50*</u> 100
Содержание соединений меди (в пересчете на Cu), мкг/кг	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется	<u>10</u> Не нормируется
Содержание растворенного кислорода, мкг/кг	<u>50*</u> 100	<u>30*</u> 50	<u>20*</u> 50	<u>20*</u> 30

Окончание таблицы 1.1

Наименование показателя	Рабочее давление, МПа (кгс/см ²)			
	0,9 (9)	1,4 (14)	2,4 (24)	4 (40)
Значение pH при температуре 25° С	8,5 - 10,5	8,5 - 10,5	8,5 - 10,5	8,5 - 10,5
Содержание нефтепродуктов, мг/кг	5	3	3	0,5

* В числителе указаны значения для котлов, работающих на жидком топливе, в знаменателе – на других видах топлива.

Таблица 1.2. Показатели качества подпиточной и сетевой воды (данные [128, 129])

Наименование показателя	Система теплоснабжения					
	открытая			закрытая		
	температура сетевой воды, °С					
	115	150	200	115	150	200
Прозрачность по шрифту, см, не менее	40	40	40	30	30	30
Карбонатная жесткость, мкг-экв/кг:						
при рН не более 8,5	<u>800*</u> 700	<u>750*</u> 600	<u>375*</u> 300	<u>800*</u> 700	<u>750*</u> 600	<u>375*</u> 300
при рН более 8,5	Не допускается			По расчету [130]		
Содержание растворенного кислорода, мкг/кг	50	30	20	50	30	20
Содержание соединений железа (в пересчете на Fe), мкг/кг	300	<u>300*</u> 250	<u>250*</u> 200	<u>600*</u> 500	<u>500*</u> 400	<u>375*</u> 300
Значение рН при температуре 25 °С	7-8,5	7-8,5	7-8,5	7,0-11,0	7,0-11,0	7,0-11,0
Содержание нефтепродуктов, мг/кг	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

* В числителе приведены данные для котлов на твердом топливе, в знаменателе – на жидком и газообразном топливе.

Таблица 1.3. Показатели качества подпиточной и сетевой воды (данные [126])

Наименование показателя	Система теплоснабжения	
	открытая	закрытая
Количество взвешенных веществ, мкг/дм ³	500	500
Содержание свободной углекислоты, мкг/дм ³	Не допускается	Не допускается
Содержание растворенного кислорода, мкг/дм ³	20	<u>50*</u> 20
Содержание соединений железа (в пересчете на Fe), мкг/дм ³	300	500
Значение pH при температуре 25 °С	8,3 – 9,0	8,3 – 9,5
Содержание нефтепродуктов, мг/кг	0,1	1,0

* В числителе приведены данные для подпиточной воды, в знаменателе – для сетевой воды.

Приведенные данные показывают, что качество деаэрированной воды нормируется, в частности, по показателям, характеризующим содержание в воде различных форм существования углекислоты: при эксплуатации деаэратора необходимо обеспечить отсутствие свободного диоксида углерода и значение pH₂₅ не ниже установленного соответствующими требованиями.

Однако отсутствие свободной углекислоты в деаэрированной воде не обеспечивает её отсутствия в расположенных за деаэратором технологических системах и оборудовании, поскольку свободная углекислота является одним из продуктов процессов термического разложения гидрокарбонатов и гидролиза карбонатов. В частности, при деаэрации в атмосферных деаэраторах Na-катионированной воды, как наиболее часто встречающегося случая, основной химически связанной формой диоксида углерода являются гидрокарбонаты, обуславливающие щелочность воды. Гидрокарбонаты при нагреве воды частично разлагаются с выделением свободного диоксида углерода и карбонатов, имеющих более сильные щелочные свойства и потому приводящих к увеличению pH воды [11]:



Если указанный процесс протекает в деаэраторе, то выделяющийся свободный диоксид углерода выводится с выпаром, соответственно уменьшается скорость коррозии металла оборудования, расположенного по тепловой схеме за деаэратором. Если же процесс термического разложения гидрокарбонатов протекает непосредственно в теплообменном и теплогенерирующем оборудовании, то образующийся свободный диоксид углерода участвует в коррозионных процессах. Таким образом, целесообразно обеспечить в деаэраторе максимальную степень термического разложения гидрокарбонатов.

Степень термического разложения гидрокарбонатов σ в атмосферном деаэраторе может быть подсчитана по значениям щелочности общей Щ_o^d и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{фф}}^d$ деаэрированной воды [123]:

$$\sigma = \frac{2\text{Щ}_{\text{фф}}^d}{\text{Щ}_o^d}. \quad (1.24)$$

При этом в [125] показано, что это выражение является приближенным, не учитывающим разбавление деаэрируемой воды конденсатом греющего пара; для точного расчета вместо общей щелочности деаэрированной воды следует использовать общую щелочность исходной воды, направляемой в деаэратор. Завышение значений σ , рассчитанных по формуле (1.24) относительно точных значений, учитывающих разбавление воды конденсатом греющего пара, обычно составляет около 6–9 %. Однако выражение (1.24) является общепринятым и потому будет использоваться нами в дальнейших вычислениях для обеспечения сопоставимости результатов расчета с данными других авторов.

Значение σ для деаэратора пропорционально времени пребывания воды в деаэраторном баке и увеличивается при наличии парового барботажа в деаэраторном баке [42, 123].

Процесс термического разложения гидрокарбонатов завершается в паровых котлах, степень разложения их в котле будет определяться по выражению:

$$\sigma_k = 1 - \sigma. \quad (1.25)$$

Помимо разложения гидрокарбонатов в паровом котле происходит процесс частичного гидролиза карбонатов:



Максимальная концентрация в паре свободного диоксида углерода $C_{CO_2}^n$, мг/дм³, достигаемая при протекании процессов термического разложения гидрокарбонатов и гидролиза карбонатов в деаэраторе (со степенью разложения σ) и котле (со степенью разложения σ_k), определяется формулой [42]:

$$C_{CO_2}^n = [\text{Щ}_0^{\text{пв}} (1 - \sigma) + \text{Щ}_0^{\text{пв}} \sigma_k] \cdot 22, \quad (1.27)$$

где $\text{Щ}_0^{\text{пв}}$ и $\text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{пв}}$, мг-экв/дм³ – щелочность питательной воды соответственно общая и по фенолфталеину.

Величина σ_k зависит от рабочего давления пара P_k [42]:

– P_k , кгс/см ²	14	24	28	40
– σ_k	0,70	0,85	0,87	0,95.

Выражения (1.25)–(1.27) позволяют оценить концентрацию свободной углекислоты в паре котлов $C_{CO_2}^n$, при различных значениях σ , σ_k и $\text{Щ}_0^{\text{пв}}$.

При известном значении $C_{CO_2}^n$ можно оценить pH пара (конденсата пара) по эмпирической формуле [37]:

$$\text{pH}_n = 5,5 - 0,5 \lg(C_{CO_2}). \quad (1.28)$$

Нужно учитывать, что при капельном уносе паром котловой воды, который содержит едкий натр и карбонат натрия, происходит частичная нейтрализация свободной углекислоты. Едкий натр и карбонат натрия при этом превращаются в гидрокарбонат натрия, а содержание свободной углекислоты уменьшается на величину, эквивалентную щелочности пара. Расчеты показывают, что в реальных условиях за счет обсуждаемого эффекта можно добиться уменьшения содержания свободной углекислоты в паре на величину не более 10 %.

Таким образом, эффективность удаления из воды в деаэраторах различных форм угольной кислоты принято оценивать следующим образом: свободной углекислоты – непосредственно по концентрации свободного диоксида углерода; связанных форм – по степени термического разложения гидрокарбонатов; показателем, интегрально учитывающим эффективность декарбонизации в деаэраторе, является pH деаэрированной воды.

В [125] показано, что в любом случае необходимо рассматривать эффективность работы деаэратора по удалению как свободного, так и химически связанного диоксида углерода. Причем при рассмотрении деаэрационных колонок можно пре-

небречь работой деаэратора по термическому разложению гидрокарбонатов ввиду малости времени пребывания воды в колонке, а применительно к деаэрационному баку нужно учитывать обе составляющих – десорбцию свободного диоксида углерода и хемосорбцию-десорбцию связанной угольной кислоты. Коротковым А.А. [125] предложена интегральная степень удаления угольной кислоты в деаэраторах как обобщенная характеристика эффективности десорбции свободного диоксида углерода и хемосорбции-десорбции химически связанных форм угольной кислоты. Но проведенный им расчетно-экспериментальный анализ показал, что такая интегральная характеристика не дает преимуществ по сравнению с традиционным подходом к раздельному учету эффективности удаления свободного и химически связанного диоксида углерода. Показано также, что одним и тем же условиям могут соответствовать разные значения интегральной степени удаления угольной кислоты, что создает существенное неудобство при использовании такой характеристики эффективности.

Выработке способов интегральной оценки эффективности работы деаэратора по удалению различных форм существования угольной кислоты посвящен ряд работ профессора Б.М. Ларина с коллегами (ИГЭУ, г. Иваново) [142, 143]. Задача решалась ими на основе теории ионных равновесий в водных растворах. Ниже приведены основные расчетные выражения, составляющие предложенную авторами методику.

Предполагая глубокое удаление в деаэраторе свободной угольной кислоты, содержащейся в исходной (химочищенной) воде, авторы пришли к следующей системе уравнений, описывающих равновесие в деаэрированной воде [142, 143]:

$$1,78C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{д}} f_{\text{II}} = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}} f_{\text{I}} 10^{\text{pH}_{\text{д}} - 10}; \quad (1.29)$$

$$C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{д}} = 0,5\Delta \text{HCO}_3^- - x; \quad (1.30)$$

$$C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}} = \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} 10^{-3} - \Delta \text{HCO}_3^- + x; \quad (1.31)$$

$$x = 10^{\text{pH}_{\text{д}} - 14} + 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} - 10^{-\text{pH}_{\text{д}}}, \quad (1.32)$$

где $C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{д}}$, $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}}$, моль/дм³ – концентрации карбонатов и гидрокарбонатов в охлажденной пробе деаэрированной воды; f_{II} , f_{I} – коэффициенты активности, которые для условий деаэрации химочищенной воды могут быть приняты равными 0,95 и

0,85 соответственно; pH_d и pH_{XOV} – значения pH в охлажденных пробах деаэрированной и химочищенной (исходной) воды соответственно; Π_o^{XOV} , мг-экв/дм³ – общая щелочность химочищенной (исходной) воды; ΔHCO_3^- , моль/дм³ – изменение концентрации гидрокарбонатов при термолизе; x , моль/дм³ – концентрация гидролизовавшихся карбонат-ионов.

Решая систему уравнений (1.29)–(1.32) авторы пришли к следующим соотношениям [143]:

$$C_{CO_3^{2-}}^d = \frac{5,62 \left(\Pi_o^{XOV} 10^{-3} - 10^{pH_d - 14} - 10^{-pH_{XOV}} + 10^{-pH_d} \right)}{\frac{f_{II}}{f_I} 10^{11-pH_d} + 11,24}; \quad (1.33)$$

$$C_{HCO_3^-}^d = \Pi_o^{XOV} 10^{-3} - 2 C_{CO_3^{2-}}^d - 10^{pH_d - 14} - 10^{-pH_{XOV}} + 10^{-pH_d}. \quad (1.34)$$

$$\Delta HCO_3^- = 2 \left(C_{CO_3^{2-}}^d + 10^{pH_d - 14} + 10^{-pH_{XOV}} - 10^{-pH_d} \right); \quad (1.35)$$

$$C_{H_2CO_3}^d = 2,2 \cdot 10^{6-pH_d} \cdot C_{HCO_3^-}^d, \quad (1.36)$$

где $C_{H_2CO_3}^d$, моль/дм³ – концентрация свободной углекислоты в деаэрированной воде.

Общий эффект декарбонизации воды в деаэраторе (учитывающий удаление всех форм существования углекислоты в растворе) можно рассчитать по выражению, мг/дм³ [143]:

$$\Delta CO_{2,d} = \left(C_{H_2CO_3}^{XOV} + 0,5 \Delta HCO_3^- \right) \cdot 44000. \quad (1.37)$$

Авторы предлагают использовать разработанную ими методику при оперативном контроле декарбонизации воды атмосферными деаэраторами [143]. Аprobация методики выполнена авторами по экспериментальным данным Г.В. Ледуховского и А.А. Короткова [96–99, 102, 103, 106, 108–112, 125]. Получена удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных значений показателей, однако выявлено некоторое завышение результатов химанализа по концентрации диоксида углерода в деаэрированной воде.

1.5. Опубликованные данные об эффективности декарбонизации воды атмосферными деаэраторами

Рассмотрим основные опубликованные данные о процессах тепло- и массообмена, протекающих в атмосферных деаэраторах струйно-барботажного типа, и имеющие отношение к характеристикам эффективности удаления из воды различных форм углекислоты [9–11, 14, 49–103, 131]. Здесь следует отметить прежде всего публикации авторских коллективов под руководством И.И. Оликера [9, 11, 53–55, 68, 99], В.А. Пермякова [11, 73, 75, 76, 100], С.С. Кутателадзе [47, 81], В.И. Шарпова [10, 56, 70–79, 102], а также ряд работ сотрудников ИГЭУ: Г.В. Ледуховского, В.Н. Виноградова, А.А. Короткова, Е.В. Барочкина, В.П. Жукова [14, 86–116, 125]. Отметим, что систематизация опубликованных данных, характеризующих работу деаэраторов по удалению растворенного кислорода, выполнена Г.В. Ледуховским [14], а по удалению свободной и химически связанной углекислоты – А.А. Коротковым [125].

1.5.1. Деаэрационные колонки

Сотрудниками ИГЭУ проведены экспериментальные исследования процессов деаэрации воды в деаэраторах атмосферного давления различных конструкций с отбором проб из внутренних элементов [94, 98, 100, 103]. По результатам этих и других исследований установлены, в частности, следующие характеристики работы деаэрационных колонок по удалению из воды различных форм углекислоты.

1. Удалением из воды в деаэрационных колонках связанных форм углекислоты (гидрокарбонатов, карбонатов) можно пренебречь, поскольку малое время пребывания воды в колонке и относительно малая температура воды в верхней её части не обеспечивают интенсивного протекания процессов термического разложения гидрокарбонатов и, тем более, гидролиза карбонатов [96–99, 102, 103, 106, 108–112, 125].

2. Верхние струйные отсеки по свободному диоксиду углерода преимущественно работают как абсорберы.

Сотрудниками ВТИ [10, 11, 67] установлено, что деаэрируемая вода по мере прохождения колонки может быть обогащена кислородом и свободным диоксидом углерода; в результате этих исследований авторами было высказано предположение, что имеет место механический захват газов падающими струйками воды вследствие возникновения эжектирующего эффекта, абсорбция газов при этом отрицалась в связи с тем, что парциальное давление удаляемых газов в любой части колонки значительно меньше их равновесного парциального давления в деаэрируемой воде (по мнению авторов). По результатам тех же опытов ВТИ [10, 11, 67], а позднее в работах ЦКТИ [10, 11, 55], было установлено, что при увеличении гидравлической нагрузки деаэратора процесс захвата газов струйками воды из паровой фазы усиливается. Было выявлено также, что наблюдаемый эффект обогащения воды диоксидом углерода не зависит от его начальной концентрации в воде.

Позднее в ходе экспериментальных исследований струйных отсеков деаэрационных колонок различных конструкций Г.В. Ледуховским эффект механического захвата кислорода стекающими струйками воды зафиксировать не удалось ни в одном из режимов [9, 89, 91], что противоречит данным [10, 11, 67]. Причину обнаруженных несоответствий автор связывает с различием гидродинамических режимов струйных колонок, исследованных ВТИ и ЦКТИ, и колонок современных атмосферных деаэраторов.

Выполненный А.А. Коротковым и Г.В. Ледуховским [96–99, 102, 103, 106, 108–112, 125] анализ процессов удаления из воды свободного диоксида углерода в тех же исследованиях, напротив, показал, что массовая концентрация свободного диоксида углерода за верхними струйными отсеками практически во всех опытах превосходит его массовую концентрацию в воде на входе в деаэратор. Если бы причина была только в дисперсном поглощении диоксида углерода струйками воды, то аналогичные выводы можно было сделать и для кислорода, для которого, как отмечено выше, подобный эффект не наблюдается. В [125] проведены расчеты статических условий протекания процесса декарбонизации в верхних струйных отсеках; в результате установлено существование физических предпосылок для абсорбции диоксида углерода водой.

Таким образом, доказано, что наблюдаемый эффект абсорбции свободного диоксида углерода обусловлен не только механическим захватом газа струйками воды, но и отличием равновесных условий протекания процессов десорбции растворенного кислорода и диоксида углерода в рассматриваемых элементах. Фактическая массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде в верхних струйных отсеках колонок практически во всех режимах мало отличаются от равновесной, при этом можно ожидать сосредоточение свободного диоксида углерода в паровом потоке вблизи границы раздела фаз (из-за его относительно низкой растворимости в воде). В результате этого система еще больше отклоняется от состояния равновесия в сторону абсорбции.

В [125] предложены критериальные уравнения, позволяющие оценить массовую концентрацию свободного диоксида углерода за верхними струйными отсеками деаэраторов различных конструкций, однако эти уравнения не носят обобщенного характера и характеризуются при этом низкой точностью.

3. В многочисленных исследованиях колонок струйного типа атмосферных деаэраторов [10, 11, 49–51] показано, что удельный расход выпара деаэратора оказывает существенное влияние на эффективность декарбонизации. Причину этого явления связывают с расходом выпара и влиянием его на скорость пара в струйных отсеках деаэрационной колонки. Считается, что при увеличении расхода выпара уменьшаются парциальные давления газов во всем паровом пространстве деаэратора, что в итоге сказывается на увеличении разности между текущей и равновесной концентрациями газов в деаэрируемой воде. Увеличение скорости пара в струйных отсеках деаэрационной колонки, кроме того, способствует большему дроблению струй и связанному с этим увеличению эффективной поверхности массообмена. По результатам этих исследований были определены рекомендованные значения удельного расхода выпара для деаэрационных колонок атмосферного давления струйного типа на уровне 1,5–2 кг/т д.в. (килограмм пара на тонну деаэрированной воды) [11]. При наличии в исходной воде большого количества свободной и связанной форм угольной кислоты рекомендованные значения удельного расхода выпара увеличены до 2–3 кг/т д.в.

4. В опытах ЦКТИ [10, 11, 49–51] выявлено, что при уменьшении температуры воды на входе в деаэрационную колонку увеличивается интенсивность процесса деаэрации. Объясняется это тем, что при уменьшении температуры воды на входе в деаэрационную колонку увеличивается расход греющего пара, что приводит к увеличению скоростей паровом пространстве колонки. При этом, однако, не учитывается влияние уменьшения температуры воды на растворимость газов в воде и скорость процессов десорбции.

5. Деаэрационная эффективность барботажных устройств деаэрационных колонок существенно зависит от величины недогрева воды до температуры насыщения на их входе [11]. Установлено, что для непровальных барботажных листов при величине недогрева воды на входе 4–5 °С интенсивность процесса деаэрации низка, поскольку не наступает достаточного развитого пенного режима работы устройства [11]. При увеличении величины недогрева воды на входе в устройство до 8 °С существенно увеличивается вероятность возникновения гидроударов в устройстве [14]. Эффективность декарбонизации воды на непровальном барботажном листе (при подаче на вход в лист воды, нагретой до температуры насыщения) зависит от динамического напора потока пара. Определено оптимальное значение динамического напора барботажного пара на уровне 0,115 кгс/см². Показано, что дальнейшее его увеличение не приводит к заметному повышению эффективности декарбонизации [11]. Данные результаты подтверждаются исследованиями [68], в которых сделано предположение, что при указанном значении динамического напора пара достигается максимальная площадь поверхности контакта фаз за счет максимально возможной турбулизации системы. Выявлено также, что абсолютное давление в деаэраторе не влияет на эффективность дегазации на непровальном барботажном устройстве [10, 11, 68].

В отличие от непровальных барботажных листов провальные листы в деаэраторах современных конструкций практически не применяются. Причиной этого является крайне узкий диапазон режимных параметров, при которых наблюдается эффективная их работа [9–11].

Опубликованы критериальные зависимости, позволяющие определять характеристики процесса дегазации воды на непровальных барботажных листах под

вакуумом в области оптимальных динамических напоров пара [10, 11]. Характеристики точности этих критериальных уравнений не известны.

В последнее время моделированием барботажной деаэрации воды занимаются сотрудники Казанского государственного энергетического университета, работающие под руководством профессора А.Г. Лаптева. В частности, для расчетов барботажных устройств предложена однопараметрическая диффузионная модель структуры потока жидкой фазы. Перенос растворенного кислорода из жидкости в паровую фазу учитывается при этом в виде объемного источника массы. Для определения основного параметра источника – коэффициента массоотдачи, – используется модель диффузионного пограничного слоя с учетом затухания турбулентных пульсаций в вязком подслое во второй степени. Модель по растворенному кислороду показывает удовлетворительное согласование с экспериментальными данными [132-138].

1.5.2. Деаэраторные баки

Деаэраторный бак так же является ступенью деаэрации даже при отсутствии барботажа в его водяном объеме [11]. В воде, поступающей в деаэраторный бак из колонки, содержатся диоксид углерода и кислород в растворенной и в дисперсной форме. При температуре воды за колонкой, мало отличающейся от температуры насыщения, растворимость указанных газов минимальна и основная их часть находится в дисперсной форме. По мере движения воды в деаэраторном баке происходит удаление мельчайших газовых пузырьков, кроме этого, при определенной выдержке и температурных условиях протекают реакции термического разложения гидрокарбонатов, карбонатов и нестойких органических веществ.

Ниже приведены основные выводы, которые сделаны по результатам анализа опубликованных исследований процессов удаления из воды в баках различных форм существования углекислоты.

1. Время пребывания воды в деаэраторном баке оказывает существенное влияние на эффективность декарбонизации [11, 14, 55, 118, 125]. Установлено, что процесс термического разложения гидрокарбонатов начинается только после уда-

ления свободной углекислоты [11, 118]. В опытах ЦКТИ выявлено, что полное удаление свободного диоксида углерода происходит при продолжительности пребывания воды в баке более 20 мин, величине удельного расхода вентиляционного пара 16–18 кг/т д. в. и значениях концентрации диоксида углерода в воде после деаэрационной колонки 3,3–9,4 мг/кг [11, 55, 18]. И.К. Гришуком показано [120], что в деаэраторе без барботажа в пределе можно добиться полного удаления свободной угольной кислоты, но только при содержании свободного диоксида углерода в исходной воде на уровне 2–3 мг/дм³ и гидрокарбонатной щелочности воды не менее 0,3 мг-экв/дм³. Эти частные результаты, количественные характеристики которых, очевидно, зависят от конструктивных и режимных особенностей объекта исследований, показывают, тем не менее, что существенное значение, кроме времени пребывания, имеет удельный расход пара, вентилирующего паровое пространство бака, а также концентрация гидрокарбонатов в исходной воде.

2. Для интенсификации процессов удаления из воды в деаэраторных баках растворенных газов применяются затопленные барботажные устройства, которые позволяют также обеспечить более глубокое разложение гидрокарбонатов и карбонатов [14, 119; 125]. В работах И.К. Гришука, М.А. Кротковой (ВТИ) [57, 67, 84, 85, 120] было показано, что при использовании парового барботажа в баке деаэратора существенно увеличивается эффективность удаления именно химически связанных форм углекислоты. В исследованиях ЦКТИ [11, 55, 118] установлено, что для деаэраторов с паровым барботажем в баке на эффективность газообмена и, в частности, декарбонизации большое влияние оказывает удельный расход пара на барботаж. Выявлено, что при работе барботажного устройства системы ЦКТИ уже при значении удельного расхода пара на барботаж на уровне 9–10 кг/т д.в. исключается возможность проскока в деаэрированную воду свободного диоксида углерода, при этом содержание диоксида углерода в барботажном паре не оказывает заметного влияния на эффективность декарбонизации воды. С точки зрения эффективности термического разложения гидрокарбонатов для устройства системы ЦКТИ были рекомендованы значения удельного расхода пара на уровне 25–30 кг/т д.в. [11, 55, 118].

3. А.П. Маметом (ВТИ) установлено, что зависимость термического разложения гидрокарбонатов от времени пребывания воды в баке имеет почти линейный вид [119]. И.К. Гришук показал при этом, что степень термического разложения гидрокарбонатов линейно зависит и от удельного расхода пара на барботаж [120]. Однако данный вывод базируется на результатах опытов, в которых значения удельного расхода пара на барботаж не превышали 27 кг/т д.в. При таких значениях удельного расхода пара на барботаж эту зависимость действительно в первом приближении можно принять линейной.

4. Сопоставление опубликованных значений степени термического разложения гидрокарбонатов σ в деаэраторах по данным ряда авторов выполнено А.А. Коротковым [125]. Приведем здесь основные результаты этого анализа, а также экспериментальные данные, полученные собственно А.А. Коротковым и Г.В. Ледуховским [106, 109, 125]:

а) для деаэраторов без парового барботажа в баке, согласно результатам исследований, проведенных сотрудниками ЦКТИ [11, 55, 118], можно ожидать предельных значений σ на уровне около 15 % (рисунок 1.5); по данным [36, 42] при времени пребывания воды в баке 1 час можно ожидать значение степени термического разложения гидрокарбонатов на уровне 40 %, что более чем вдвое превосходит оценки сотрудников ЦКТИ; результаты исследований Тильманса [120], приведенные на рисунке 1.6, напротив показывают существенное завышение значений σ относительно данных [42]. Вероятными причинами данных противоречий в значениях σ могут служить различия в том, что авторы понимали под понятием 100 %-ого разложения гидрокарбоната (под этим термином могут пониматься полный переход гидрокарбоната в гидроксид, то есть с учетом завершения реакции гидролиза карбоната, либо переход гидрокарбоната в карбонат; в настоящее время полное термическое разложение гидрокарбонатов оценивается как переход гидрокарбоната в гидроксид). Кроме того, А.А. Коротковым [125] выдвинуто предположение, что наблюдаемые различия связаны также с различиями в гидродинамических условиях протекания процессов. Для подтверждения этого А.А. Коротковым, Г.В. Ледуховским и др. проведены экспериментальные исследования для деаэраторов различных конструкций, результаты исследований по деаэраторам без барбо-

тажа в баке приведены на рисунке 1.7 [106, 109, 125]; зависимости степени термического разложения гидрокарбонатов от теплогидравлических параметров работы деаэратора А.А. Коротковым не выявлено [125]; приведенные данные доказывают отсутствие прямой связи между временем пребывания воды в баке и значением σ для аппаратов без парового барботажа в баке;

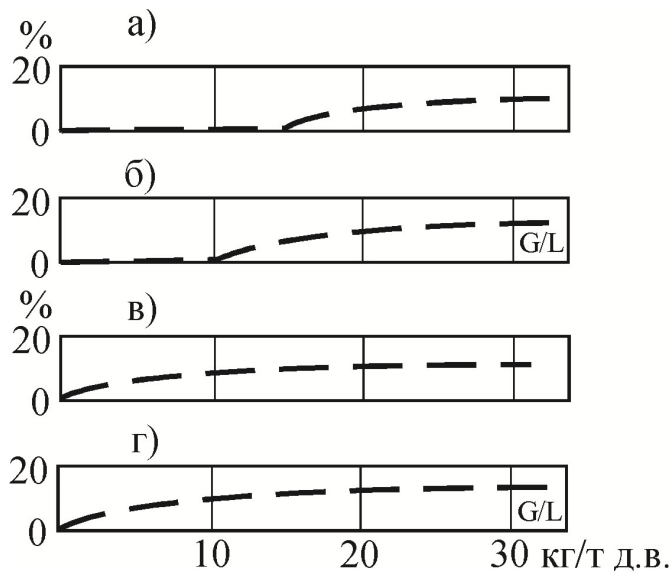


Рисунок 1.5. Степень термического разложения гидрокарбоната натрия (%) в зависимости от удельного расхода пара, вентилирующего паровой объем бака-аккумулятора G/L (кг / т д.в.): а, б, в, г – при времени выдержки воды в баке соответственно 23, 35, 44 и 75 мин

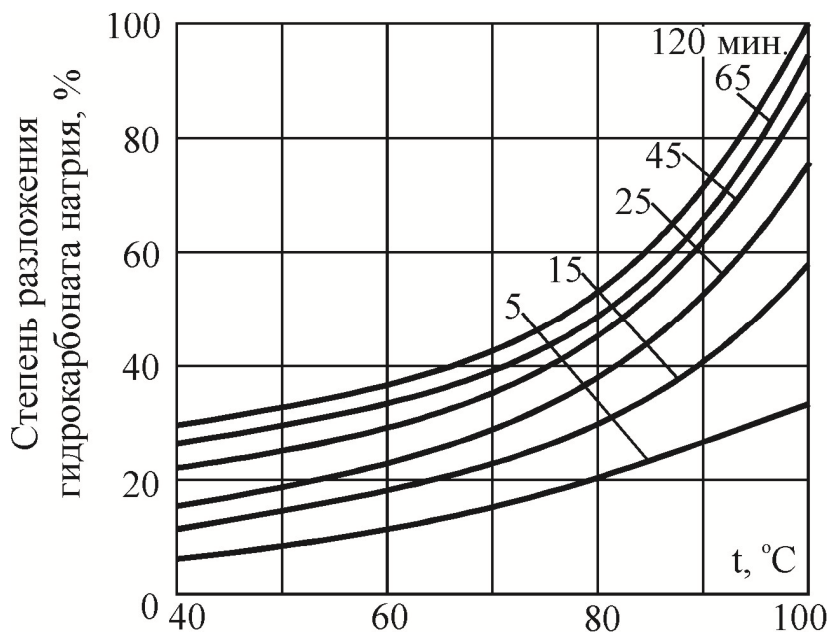


Рисунок 1.6. Степень разложения гидрокарбоната натрия (%) в зависимости от температуры воды t (°C) и времени выдержки (мин) (опыты Тильманса)

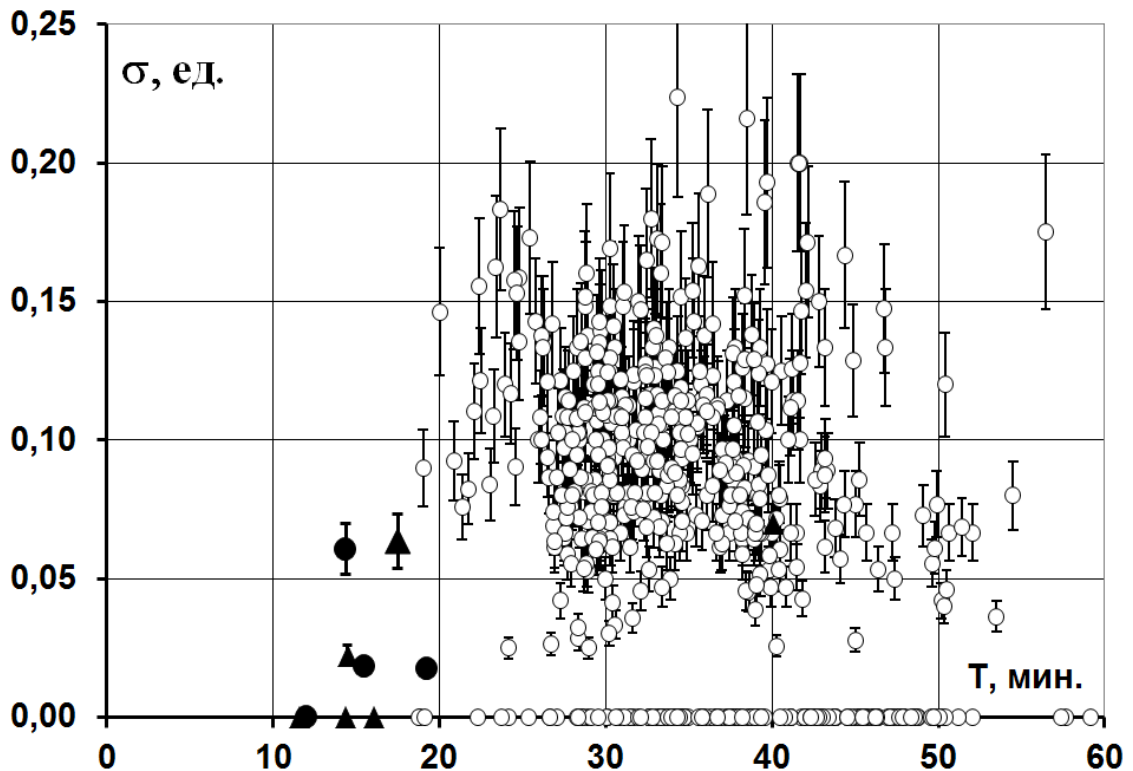


Рисунок 1.7. Экспериментальные значения (точки) степени разложения гидрокарбонатов (σ , ед.) в атмосферных деаэраторах различных конструкций без барботажа в баке в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе (T , мин): ▲ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); ● – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке); ○ – ДА-50

б) для деаэраторов с паровым барботажем в баке, согласно данным [53], при времени пребывания воды 1 ч можно ожидать значения σ более 20 %; причем большие значения удельного расхода пара на барботажи соответствуют большим значениям σ (рисунки 1.8, 1.9); аналогичные данные получены М.С. Скибицким и Г.И. Перли [82]. При этом по данным [36, 42] при том же времени пребывания воды в баке значение степени термического разложения гидрокарбонатов указано на уровне 60 %, что существенно превосходит приведенные выше оценки.

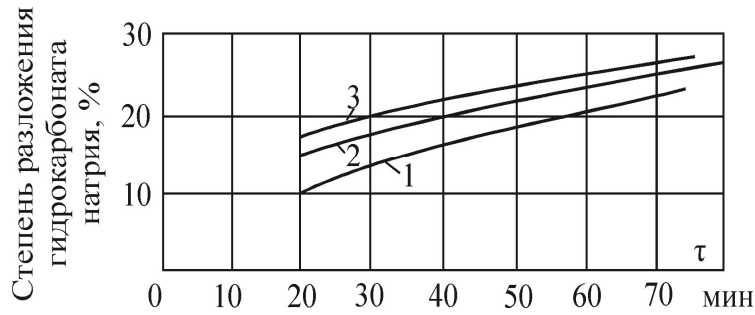


Рисунок 1.8. Степень разложения гидрокарбоната натрия (%) в зависимости от времени пребывания воды в баке τ (мин) и удельного расхода пара на барботаж через барботажное устройство системы ЦКТИ (1 – 10; 2 – 20; 3 – 30 кг/т д.в.)

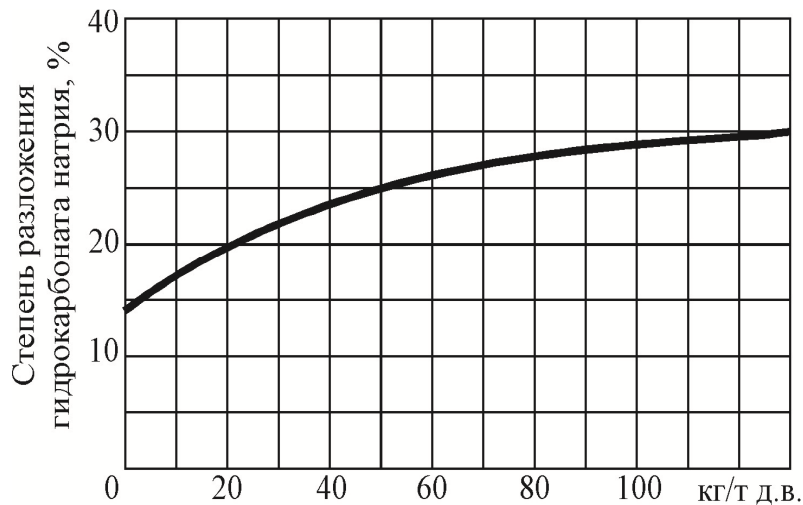


Рисунок 1.9. Степень разложения гидрокарбоната натрия (%) в зависимости от удельного расхода пара на барботаж (кг/т д.в.) при времени пребывания воды в баке 31-42 мин

А.А. Коротковым, Г.В. Ледуховским получены экспериментальные данные по деаэраторам различных конструкций с барботажным устройством в виде одиночного перфорированного горизонтального коллектора [106, 109, 125], результаты которых отражены на рисунке 1.10. Эти данные в целом подтверждают данные [36, 42]. А.А. Коротковым выполнена обработка приведенных на рисунке 1.10 экспериментальных данных, по результатам которой предложена статистическая зависимость для расчета степени термического разложения гидрокарбонатов, ед., в деаэраторах с барботажным устройством бака в виде одиночного перфорированного горизонтального коллектора:

$$\sigma = 0,0657 \left(\frac{T}{T_n} \right)^{0,571} d_{\text{БП}}^{0,318}, \quad (1.38)$$

где T и T_n – фактическое и номинальное значение времени пребывания воды в баке; последнее определяется как отношение номинальной полезной вместимости ба-

ка к номинальной гидравлической нагрузке деаэратора; $d_{\text{БП}}$, кг/т – удельный расход пара на барботаж.

Уравнение (1.38) характеризуется среднеквадратическим отклонением по прогнозированию значений σ , равным 4,8 %. Однако это уравнение применимо для исследованной автором конструкции барботажного устройства с конкретным числом и расположением отверстий и их диаметром и потому не может претендовать на общность.

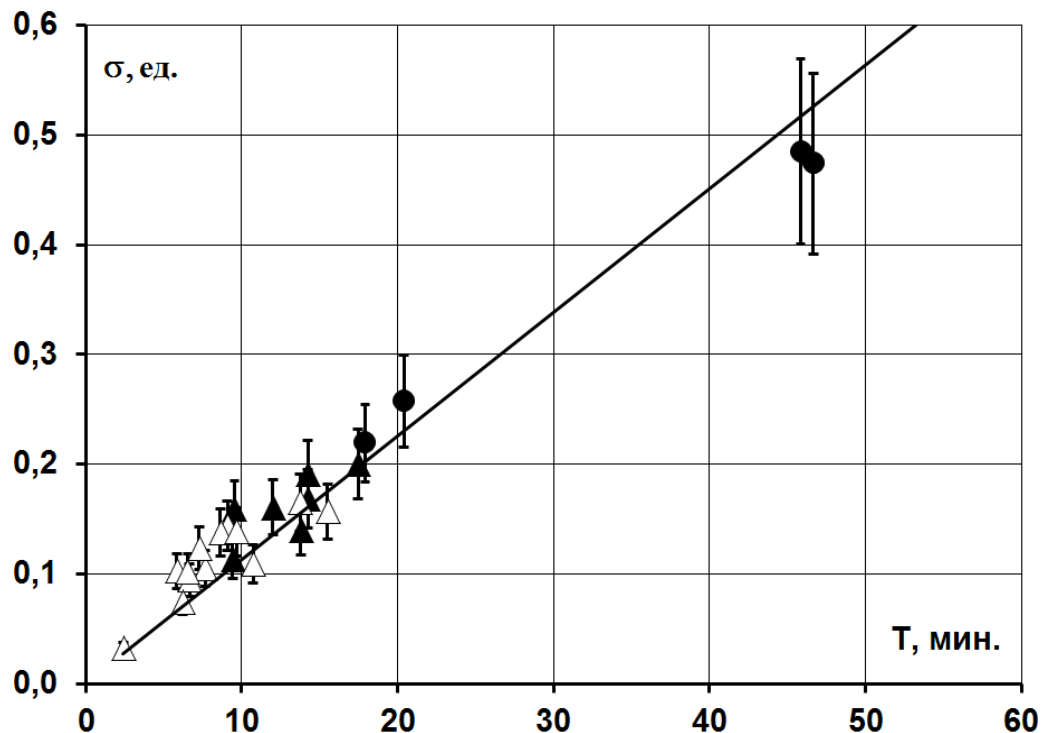


Рисунок 1.10. Экспериментальные значения степени разложения гидрокарбонатов (σ , ед.) в атмосферных деаэраторах различных конструкций с барботажом в баке в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе (T , мин): точки – экспериментальные данные; линия – аппроксимация экспериментальных данных (метод наименьших квадратов; линейная зависимость выбрана в соответствии с опубликованными данными других авторов [36, 42, 119]); Δ – ДА-300м; $\blacktriangle$ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); $\bullet$ – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке)

5. Опубликованные модели, позволяющие рассчитывать значения рН деаэрированной воды за деаэраторами различных конструкций в различных режимах их работы, отсутствуют. Приведенные в п. 4 данные демонстрируют, что в настоящее время не существует обобщенных моделей, удовлетворительно описывающих про-

цессы термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах. Опубликованные данные показывают, что при моделировании рассматриваемого процесса в общем случае недостаточно рассматривать зависимость степени термического разложения гидрокарбонатов от времени пребывания воды в деаэраторном баке и удельного расхода пара на барботаж; очевидно, на кинетику процесса оказывают влияние и другие существенные факторы.

6. Одним из путей описанной в п. 5 проблемы моделирования является использование не степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах, а более фундаментальной кинетической характеристики рассматриваемого процесса – константы скорости реакции. Такой подход предложен в ряде работ [110, 119, 125]. В общем случае кинетическое уравнение, моделирующее процесс термического разложения гидрокарбонатов, записывается в виде:

$$\frac{dC}{dT} = -KC^n, \quad (1.39)$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде, K – константа скорости реакции; T – время; n – порядок реакции.

Необходимо указать на ряд важных свойств рассматриваемой величины – константы скорости реакции:

- в общем случае её величина не зависит от концентрации C , а зависит от порядка реакции n и температуры системы t ;
- в данном случае её следует рассматривать не как кинетическую характеристику собственно химического процесса, а как кинетическую характеристику этого процесса, протекающего в конкретных условиях (гидродинамических, термодинамических) работы деаэратора;
- её использование само по себе не дает ощутимых преимуществ при прогнозировании показателей работы деаэратора по сравнению с традиционно применяемой степенью термического разложения гидрокарбонатов, однако знание K в конкретных условиях протекания процесса позволило бы отдельно оценивать влияние различных режимных параметров работы деаэратора на стадию химического превращения и стадию диффузионного отвода продуктов реакции, в частности свободного диоксида углерода.

7. Согласно исследованиям И.Е. Орлова в изложении В.А. Пермякова [119] порядок реакции n в выражении (1.39) следует принять равным 2. Данный вывод был сделан по результатам преимущественно лабораторных исследований, в которых не учитывалась реальная гидродинамическая обстановка в деаэраторе. В рамках диссертационного исследования В.А. Пермякова [119], позднее А.А. Коротковым [125], определены значения константы скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов в баках атмосферных деаэраторов; результаты этих исследований в виде экспериментальных значений K в зависимости от общей щелочности исходной воды приведены на рисунке 1.11. Во всех случаях значения константы скорости реакции были получены в результате решения кинетического уравнения (1.39) процесса термического разложения гидрокарбонатов при порядках реакции $n = 1$ и $n = 2$ и времени реакции, соответствующем времени полного вытеснения, т.е. полученном путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак в условиях каждого из опытов.

8. Анализ данных рисунка 1.11, после исключения нулевых значений констант скорости реакции из совокупности данных (так как они получены при отсутствии щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды, что вносит неопределенность в результаты), а также данных В.А. Пермякова (из-за недостаточности по ним исходной информации), позволяет сделать следующие выводы:

- по деаэраторам с барботажем в баке:

- средние значения константы скорости реакции

$$\text{при } n = 1 \quad K = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с;}$$

$$\text{при } n = 2 \quad K = 1,89 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(мкг-экв}\cdot\text{с);}$$

- среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции

$$\text{при } n = 1 \quad 22,3 \%;$$

$$\text{при } n = 2 \quad 16,5 \%;$$

- значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 1,83$;

- критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 24 и уровне значимости 0,05 $F_{кр} = 1,99$;

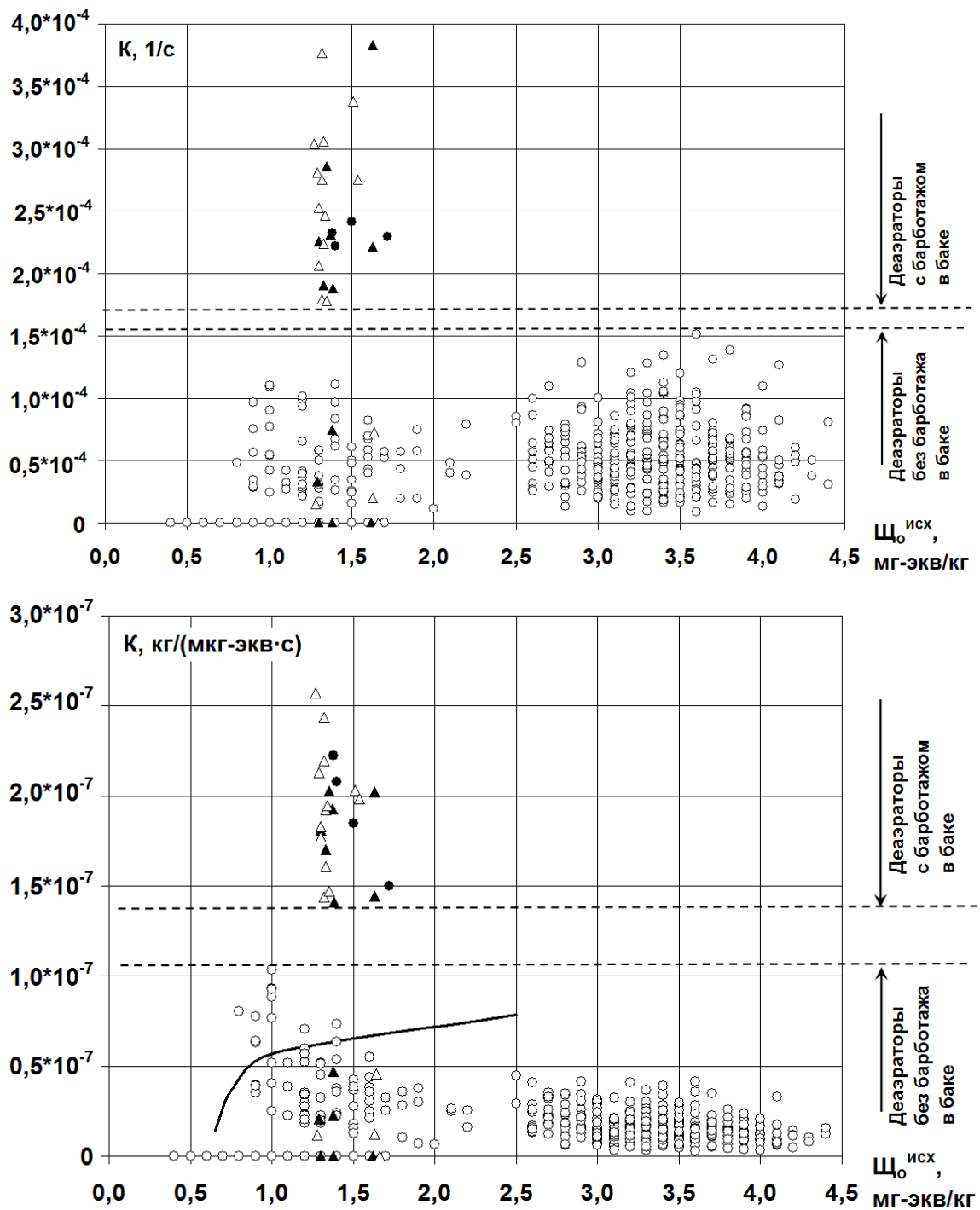


Рисунок 1.11. Экспериментальные значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от общей щелочности исходной воды при отсутствии и наличии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака: n – порядок реакции ($n = 1$ – верхний рисунок; $n = 2$ – нижний рисунок); K – константа скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, $\text{кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с})$ (при $n = 2$) или $1/\text{с}$ (при $n = 1$); $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ – щелочность общая воды перед деаэратором, $\text{мг-экв}/\text{кг}$; прочие обозначения те же, что на рисунках 1.7 и 1.10; линией показаны данные В.А. Пермякова (деаэратор с барботажем) [119]

– поскольку $F < F_{кр}$, комплексы значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ статистически не различимы;

- по деаэраторам без барботажа в баке А.А. Коротков отмечает [125] существенную разницу в разбросе значений K относительно среднего в диапазонах общей щелочности более 2,3 мг-экв/кг и менее этого значения, поэтому далее приведем характеристики комплексов значений K для этих диапазонов щелочности раздельно;

- по деаэраторам без барботажа в баке при общей щелочности воды менее 2,3 мг-экв/кг:

- средние значения константы скорости реакции

при $n = 1$ $K = 0,51 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с};$

при $n = 2$ $K = 0,39 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(мкг-экв}\cdot\text{с)};$

- среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции

при $n = 1$ 28,1 %;

при $n = 2$ 30,4 %;

- значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 1,17$;

- критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 254 и уровне значимости 0,05 $F_{кр} = 1,23$;

- поскольку $F < F_{кр}$, комплексы значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ статистически не различимы;

- по деаэраторам без барботажа в баке при общей щелочности воды более 2,3 мг-экв/кг:

- средние значения константы скорости реакции

при $n = 1$ $K = 0,53 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с};$

при $n = 2$ $K = 0,16 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(мкг-экв}\cdot\text{с)};$

- среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции

при $n = 1$ 48,0 %;

при $n = 2$ 46,8 %;

- значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 1,05$;
- критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 358 и уровне значимости 0,05 $F_{кр} = 1,19$;
- поскольку $F < F_{кр}$, комплексы значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ статистически не различимы.

Таким образом, имеется существенный разброс экспериментальных значений K относительно среднего, особенно по деаэраторам без барботажа в баке. Вероятными причинами существенных разбросов значений K могут быть как погрешности методов количественного определения химических и теплотехнических параметров, так и неполнота принятой в исследованиях гипотезы о механизме протекания процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе. Статистически доказанных оснований считать более вероятным протекание процесса как реакции первого или второго порядка нет.

Средние значения K , приведенные в п. 8, могут быть приняты за основу при расчете значений степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах. Методика расчета степени термического разложения гидрокарбонатов включает в себя следующие этапы [36, 42, 119]:

1) определение начальной концентрации C_0 гидрокарбонатов в воде на входе в бак, удовлетворяющей выражению $C_0 \approx \text{Щ}_o^{\text{исх}}$, где $\text{Щ}_o^{\text{исх}}$ – общая щелочность исходной воды; соотношение $C_0 \approx \text{Щ}_o^{\text{исх}}$ является следствием из углекислотного равновесия, а пренебрежение произведением $G_n \text{Щ}_o''$ (произведение расхода пара на его общую щелочность) обусловлено малой общей щелочностью пара в сравнении с общей щелочностью воды;

2) определение среднего значения константы скорости реакции K в соответствии с выбранным порядком реакции n по данным п. 8;

3) определение располагаемого времени реакции $\tau = f(G_d; H)$ как времени полного вытеснения (полученном путем деления объема воды в баке, зависящем от его геометрии и уровня воды в нем H , на объемный расход воды через бак G_d);

4) расчет конечной концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде, соответствующей первому ($n = 1$) или второму ($n = 2$) порядкам реакции:

$$C^{n=1} = C_0 \exp(-K_{n=1} \tau), \quad (1.40)$$

$$C^{n=2} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + K_{n=2} \tau}; \quad (1.41)$$

5) расчет собственно степени термического разложения гидрокарбонатов:

$$\sigma = 1 - C / C_0. \quad (1.42)$$

Применив изложенную методику для совокупности опубликованных опытных данных А.А. Короткова, Г.В. Ледуховского и др. [106, 109, 125], определим значения степени термического разложения гидрокарбонатов σ . Результаты отражены на рисунке 1.12 в сопоставлении с экспериментальными значениями σ . В расчетах принят порядок реакции $n = 2$. Анализ данных рисунка 1.12 показывает, что значения σ для деаэраторов без барботажа в баке, рассчитанные по средним значениям K , не могут быть напрямую использованы при прогнозировании эффективности работы деаэраторов по удалению соединений угольной кислоты, поскольку также характеризуются существенным разбросом: среднее отклонение расчетных значений σ от экспериментальных составляет 37 %. Для деаэраторов с барботажем в баке это отклонение существенно меньше – 20 %; в этом случае подход может быть использован для оценочных расчетов показателей эффективности термического разложения гидрокарбонатов.

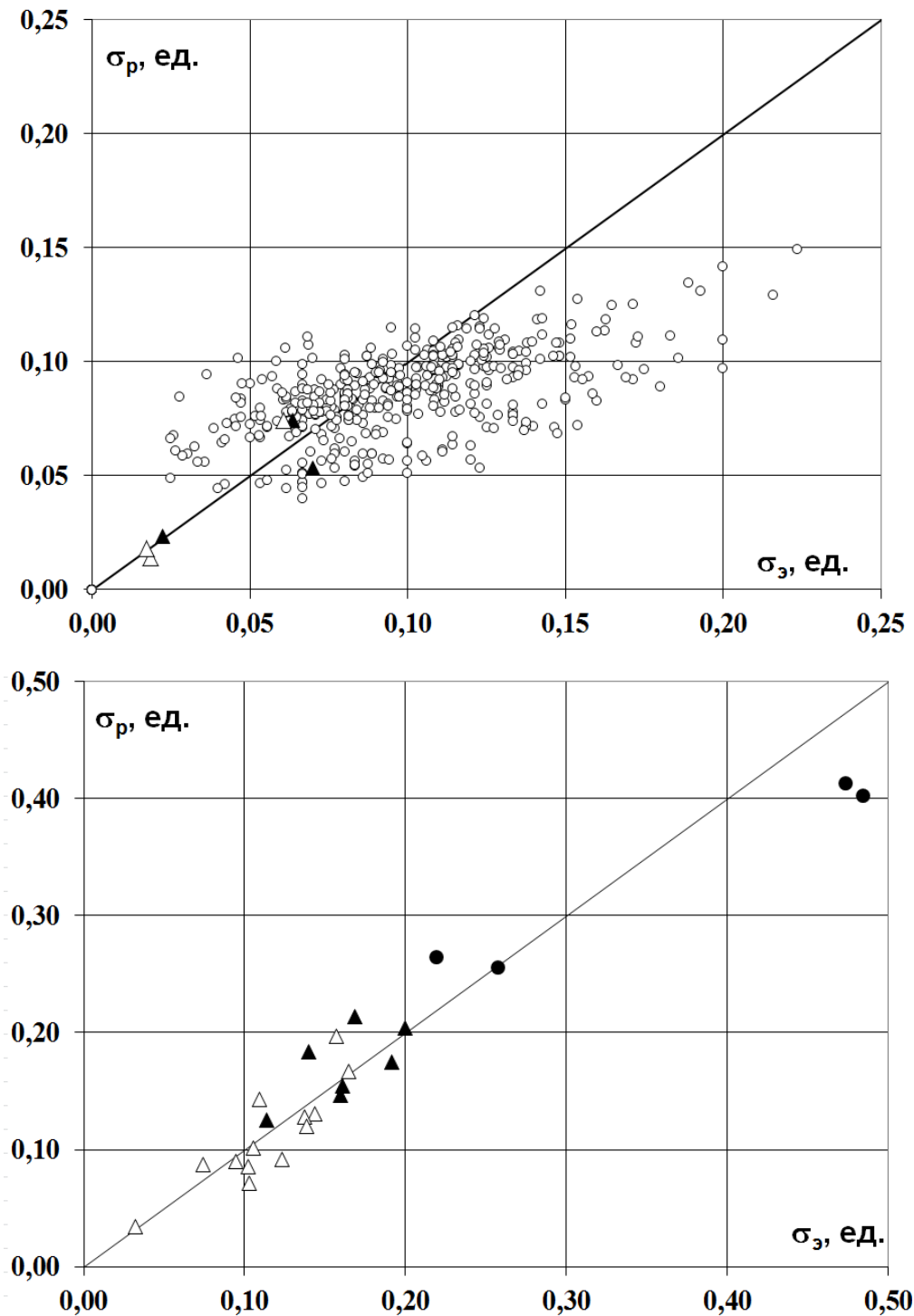


Рисунок 1.12. Значения степени термического разложения гидрокарбонатов в баках атмосферных деаэраторов, рассчитанные с использованием средних экспериментальных значений K по данным рисунка 1.11: σ_3 и σ_p – соответственно экспериментальные и расчетные значения степени термического разложения гидрокарбонатов; точки – результаты расчетов σ при условиях опытов; обозначения точек соответствуют рисункам 1.7 и 1.10; линия – совпадение расчетных и экспериментальных данных; вверху – для деаэраторов без барботажа в баке; внизу – для деаэраторов с барботажем в баке

1.6. Формулировка задач исследования

Проведенный анализ опубликованных данных позволяет сформулировать следующие задачи, решение которых обеспечит достижение поставленной в диссертации цели:

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 прогнозирования pH деаэрированной воды и содержания в ней свободной углекислоты при известных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора путем синтеза опубликованной методики оценки на основе теории химических равновесий 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 решении задач проектирования и повышения эксплуатационной эффективности деаэрационных установок.

Глава 2. УТОЧНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРОКАРБОНАТОВ В АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРОВ

2.1. Выявление причин появления наблюдаемых разбросов экспериментальных данных

Выполненный в гл. 1 анализ опубликованных значений константы скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, показал, что они характеризуются существенным разбросом. В общем случае наблюдаемые разбросы данных могут быть обусловлены рядом причин, анализ которых проведем далее.

Проведенный анализ экспериментальных данных А.А. Короткова [125] показал, что в расчетах рассматриваемого процесса в зависимости от общей щелочности деаэрируемой воды $Щ_0^{\text{исх}}$ можно использовать средние значения констант скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов, отраженные в таблице 2.1. При этом нет статистически доказанных оснований считать при моделировании процесс термического разложения гидрокарбонатов реакцией первого или второго порядка, поэтому в таблице указаны значения, характеризующиеся большей воспроизводимостью.

Для определенности приведем пример оценки для некоторого опыта относительной погрешности определения константы скорости реакции K как результата косвенного измерения, обусловленной метрологическими характеристиками используемых методов и средств теплотехнического и химического контроля, средние значения которых указаны в таблице 2.1. Для расчета K используются результаты измерения щелочности по фенолфталеину и дважды щелочности общей деаэрируемой воды. Нормируемая относительная погрешность определения щелочности общей при некотором её значении в опыте составляет 7%, щелочности по фенолфталеину 18% [157]. Учтем также погрешности измерения расхода деаэрируемой воды (1,8%), уровня воды в деаэрационном баке (1,6%). Тогда погрешность косвенного определения константы скорости реакции K , обусловленная погрешностью

методов измерения параметров в опытах, составит [158]:
 $1,1\sqrt{(7^2 + 7^2 + 18^2 + 1,8^2 + 1,6^2)} = 23\%$. В таблице 2.1 приведены средние из определенных таким образом для всех опытов значений.

Таблица 2.1. Характеристика константного обеспечения математической модели процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах по опубликованным данным

Показатель, единица измерения	Значение для деаэраторов		
	с барботажем в баке	без барботажа в баке	
1. Диапазон изменения общей щелочности деаэрируемой воды Щ_0 , мг-экв/кг	Весь диапазон	до 2,3	более 2,3
2. Порядок реакции n	2	1	2
3. Константа скорости реакции K , 1/с при $n = 1$ или кг/(мкг-экв·с) при $n = 2$	$1,89 \cdot 10^{-7}$	$0,51 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-7}$
4. Среднеквадратическое отклонение относительно среднего для комплекса экспериментальных значений константы скорости реакции, %	16,5	28,1	46,8
5. Относительная погрешность определения константы скорости реакции K как результата косвенного измерения, обусловленная метрологическими характеристиками используемых методов и средств теплотехнического и химического контроля, %	13,0	16,5	18,2

Сопоставление характеристик разброса данных, приведенных в таблице 2.1, позволяет заключить, что для деаэраторов с паровым барботажем в баке среднеквадратическое отклонение экспериментальных значений K относительно среднего практически совпадает с погрешностью определения K как результата косвенного

измерения, то есть можно полагать, что наблюдаемый разброс экспериментальных данных обусловлен, в основном, несовершенством использованных в ходе испытаний методов и измерения параметров, прежде всего щелочности воды. То есть для деаэраторов с барботажем можно использовать для моделирования процесса термического разложения гидрокарбонатов выражение (1.39), принимая значение константы скорости реакции по данным таблицы 2.1; точность такой модели сопоставима с точностью косвенного измерения K .

В отношении данных для деаэраторов без парового барботажа в баке наблюдаемый фактический разброс экспериментальных данных в среднем более чем вдвое превосходит погрешность косвенного измерения K в опытах, модель такой точности не может быть рекомендована для решения практически значимых задач.

Поскольку при моделировании процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах с барботажем в баке и без него механизм собственно химического процесса полагается неизменным, можно предположить, что наблюдаемая разница в характеристиках точности экспериментальных данных обусловлена влиянием изменений гидродинамической обстановки в деаэраторном баке, которая существенно отличается для деаэраторов с барботажем и без него.

Иными словами, следует полагать, что значения константы скорости реакции K , вычисленные по экспериментальным данным, являются не кинетической характеристикой собственно химического процесса, а кинетической характеристикой процесса, протекающего в конкретных условиях работы деаэратора, т.е. значение K учитывает и гидродинамическую обстановку в системе.

Это влияние выражается в том, что время пребывания в баке разных элементарных объемов воды различно, следовательно, располагаемое время реакции для них также различается. В рассмотренном в гл. 1 случае требуемое для расчетов по уравнению (1.39) время пребывания воды в деаэраторном баке определялось как время полного вытеснения, т.е. путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак в условиях каждого из опытов. Учет разного времени пребывания различных объемов воды в деаэраторном баке позволил бы повысить, в частности, точность расчета константы скорости реакции термического разложения

гидрокарбонатов, а, соответственно, и точность методики определения степени их термического разложения в целом.

Учитывая изложенное, сформулированы следующие задачи настоящего этапа исследований:

- 1) разработка методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэрационном баке;
- 2) обработка результатов экспериментальных исследований с учетом различного времени пребывания разных элементарных объемов воды в деаэрационном баке с целью уточнения значений константы скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, в опытах;
- 3) проведение статистического анализа значимости выполненного уточнения константного обеспечения модели.

2.2. Уточнение эмпирического обеспечения модели

Для проверки гипотезы о влиянии гидродинамической обстановки в баке на точность методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов необходимо знать распределение значений времени пребывания различных элементарных объемов воды в нем. Ввиду неоднородности и трехмерного характера течения воды в деаэрационных баках решить эту задачу теоретическим путем не представляется возможным. Проведение экспериментальных исследований на физических моделях или реальных деаэраторах потребует применения специализированного оборудования и значительных финансовых вложений. Рациональнее данная задача решается с использованием специализированных программных пакетов для моделирования трехмерных течений жидкостей и газов в каналах произвольной формы. Процедура нахождения решения при этом сводится к расчету полей скоростей и давлений воды в деаэрационном баке, разбиению области течения на определенное число линий тока и определению времен прохождения элементарными объемами воды каждой линии тока.

В настоящее время существует множество специализированных программных продуктов, позволяющих моделировать трехмерные течения жидкостей, а также сопровождающие их физические процессы и явления. Среди зарубежных

наибольшей популярностью пользуются ANSYS CFX, ANSYS Fluent, SolidWorks Flow Simulation, Star-CCM, Star-CD, Autodesk Simulation CFD, COMSOL CFD, NUMECA [144 – 146]. Среди отечественных продуктов стоит отметить FlowVision, разработанный компанией «ТЭСИС» [147 – 149]. Данный программный комплекс, несмотря на меньшую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами, способен решать широкий спектр практических и научных задач, встречающихся во всех областях промышленности: авиакосмической, автомобильной, энергетике и металлургии, турбомашиностроении и двигателестроении, судостроении, медицине, экологии и других отраслях [147 – 149]. В связи с тем, что в ФГБОУВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина» имеется лицензия на право использования программного комплекса FlowVision, задача по определению времен пребывания различных элементарных объемов воды в баках атмосферных деаэраторов различных конструкций будет решаться с использованием указанного расчетного инструмента.

2.2.1. Обзор программного комплекса FlowVision применительно к решаемой задаче

В общем случае решение задачи численного моделирования течения жидкости (газа) в программном комплексе FlowVision состоит из следующих основных этапов: выбор расчетной области; задание математической модели; задание начальных и граничных условий; задание расчетной сетки; собственно проведение расчета; просмотр и анализ полученных результатов.

Под областью расчета понимается объем, в котором определены уравнения в соответствии с выбранной математической моделью, а также границы данного объема, на которых расставлены граничные условия. Все задачи по моделированию течений жидкостей и газов можно разделить на две группы – задачи внешнего и внутреннего обтекания. Внутренними течениями являются течения, ограниченные твердыми границами (течения внутри каналов различной формы); внешними являются течения обтекания безграничной средой поверхностей различных тел. Стоит отметить, что область расчета в задачах внешнего обтекания не может быть бесконечной, поэтому для данного типа задач границы расчетного объема, на которых задаются граничные условия, находятся значительном удалении от рассматривае-

мого объекта. В рассматриваемом программном комплексе отсутствуют собственные инструменты по созданию расчетных областей (геометрических моделей). Указанное действие выполняется с привлечением сторонних программных средств – геометрических процессоров, например, Solid Works [145].

Работа программного комплекса FlowVision основана на решении системы трехмерных уравнений Навье-Стокса (закон сохранения массы и импульса) и уравнений переноса энтальпии (закон сохранения энергии). В зависимости от поставленной задачи система уравнений может быть дополнена другими уравнениями, описывающими моделируемые процессы и явления (турбулентность, горение, наличие поверхности раздела фаз и т. д.). Совокупность всех уравнений, начальных и граничных условий называют математической моделью [149].

FlowVision позволяет рассчитывать течения ньютоновских и неньютоновских жидкостей. Моделирование турбулентных течений осуществляется с использованием следующих моделей турбулентности:

- Стандартная k-ε модель;
- Низкорейнольдсовая k-ε модель AKN;
- Квадратичная k-ε модель;
- SA (Spalart-Allmaras);
- SST (Shear Stress Transport);
- Модель Смагоринского.

В программный комплекс также включен ряд специальных моделей, напрямую не связанных с уравнениями Навье–Стокса – модели переноса фазы, горения, свободной поверхности, перемешивания и химии. FlowVision допускает также использование моделей теплопроводности в твердом теле, сопрягаемой с процессами тепломассообмена в жидкости (газе).

Для задания границ расчетной области в FlowVision имеется широкий набор граничных условий, комбинация которых зависит от конкретной задачи. Они объединены в группы по типам границ: стенка; симметрия; вход/выход; свободный выход; связанные; неотражающие.

Варианты задания переменных на указанных группах граничных условий приведены в таблице 2.2. Следует заметить, что для решения ряда нестационарных

задач конкретные граничные условия и значения задаваемых на них переменных могут быть переменными по времени.

В FlowVision численное интегрирование уравнений осуществляется с использованием прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки. При решении задач с относительно простой геометрией такой подход дает возможность использовать простую равномерную неадаптивную сетку. При решении задач со сложной геометрией имеется возможность проводить адаптацию (подстройку) расчетной сетки вблизи границ, либо для разрешения отдельных областей расчетной области при больших градиентах рассчитываемых величин. Применение пристеночных функций позволяет не разрешать турбулентный пограничный слой вблизи твердой поверхности, что существенно сокращает требуемые вычислительные ресурсы [148].

Метод численного решения дифференциальных уравнений в FlowVision основан на консервативных схемах расчета нестационарных уравнений в частных производных, которые хорошо удовлетворяют законам сохранения. По выбору в свойствах решателя может быть выбрана как неявная (более надежная), так и явная (более быстрая, но расходящаяся при больших шагах по времени) схема решения итерационного процесса [148].

Для вывода и представления данных в FlowVision существует большой набор средств визуализации, которые могут быть применены на любом этапе расчета [149]. Расчетные данные могут быть представлены в виде скалярных полей (графики, цветовые контуры, изолинии и изоповерхности), векторных полей (векторы и линии тока) и особенностей расчетной сетки. Также имеется возможность вычисления интегральных характеристик.

Таблица 2.2. Варианты задания переменных на группах граничных условий в FlowVision

Переменная	Группа граничного условия				
	Стенка	Симметрия	Вход/выход	Свободный выход	Неотражающее
Температура	Значение	Нулевой поток	Статическая температура	Нулевой поток	Риман
	Нулевой поток		Полная температура	Значение	
	Поток				
	Внешнее сопряжение				
Скорость	Прилипание	Проскальзывание	Нормальная массовая скорость	Статическое давление	Риман
			Нормальная скорость с давлением		
	Логарифмический закон		Статическое давление на входе	Сверхзвуковой выход	
			Полное давление		
ТурбЭнергия	Значение в ячейке рядом со стенкой	Нулевой поток	Пульсации	Нулевой поток	Пульсации
	Значение		Значение	Значение	Значение
	Нулевой поток			Пульсации	
ТурбДиссипация	Значение в ячейке рядом со стенкой	Нулевой поток	Масштаб турбулентности	Нулевой поток	Масштаб турбулентности
			Значение	Значение	Значение
				Масштаб турбулентности	
ТурбКинВязкость	Фиксированное значение	Нулевой поток	Значение	Нулевой поток	Значение
				Значение	
ОбъемФазы	Нулевой поток	Нулевой поток	Значение	Нулевой поток	Значение

Различные способы отображения информации во время расчета облегчают ее восприятие, а отображение различных переменных позволяет контролировать качество вычислений и избежать потенциальных ошибок моделирования.

2.2.2. Моделирование течения воды в баках атмосферных деаэраторов в среде FlowVision и методика расчета уточненных значений константы скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов

С целью уточнения значений констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в условиях опытов, описанных А.А. Коротковым [125], в рамках настоящей работы проведено моделирование течения воды в деаэраторных баках методом численного эксперимента в среде FlowVision. Рассмотрим этапы численных исследований при наличии и отсутствии парового барботажа в баках на примере деаэратора ДСА-300.

Рассматриваемый деаэратор оборудован баком объемом 75 м^3 , представляющим собой горизонтально расположенный цилиндрический сосуд с эллиптическими днищами. Для организации барботажа бак укомплектован затопленным барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного коллектора. Его геометрические характеристики приведены на рисунке 2.1.

Для проведения численных экспериментов для рассматриваемого деаэратора разработана упрощенная геометрическая модель деаэраторного бака, приведенная на рисунке 2.2. Геометрическая модель выполнена в масштабе 1:1, что позволило сократить количество вычислительных операций за счет отсутствия необходимости использования критериев подобия при переходе от условий опытов к условиям численного эксперимента.

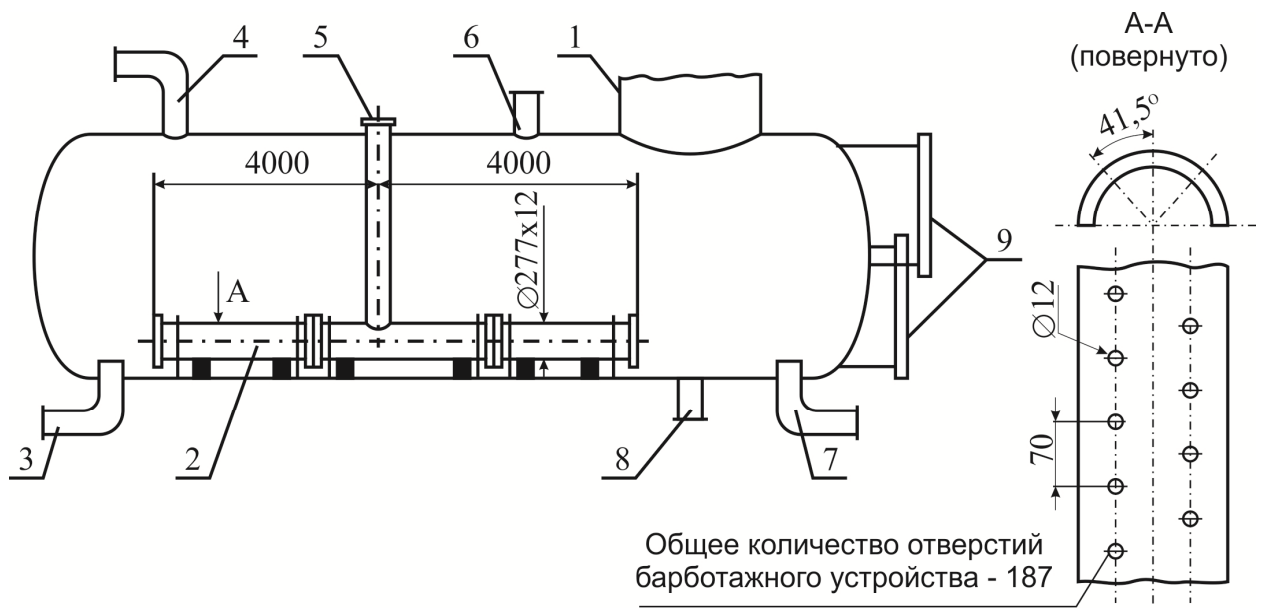


Рисунок 2.1. **Конструктивная схема бака деаэратора ДСА-300:** 1 – деаэрационная колонка; 2 – перфорированный барботажный коллектор; 3 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 4 и 5 – трубопроводы ввода соответственно основного и барботажного пара; 6 и 7 – трубопроводы подключения деаэратора к паровой и водяной уравнивающим линиям; 8 – трубопровод дренажный; 9 – уровнемерные стекла

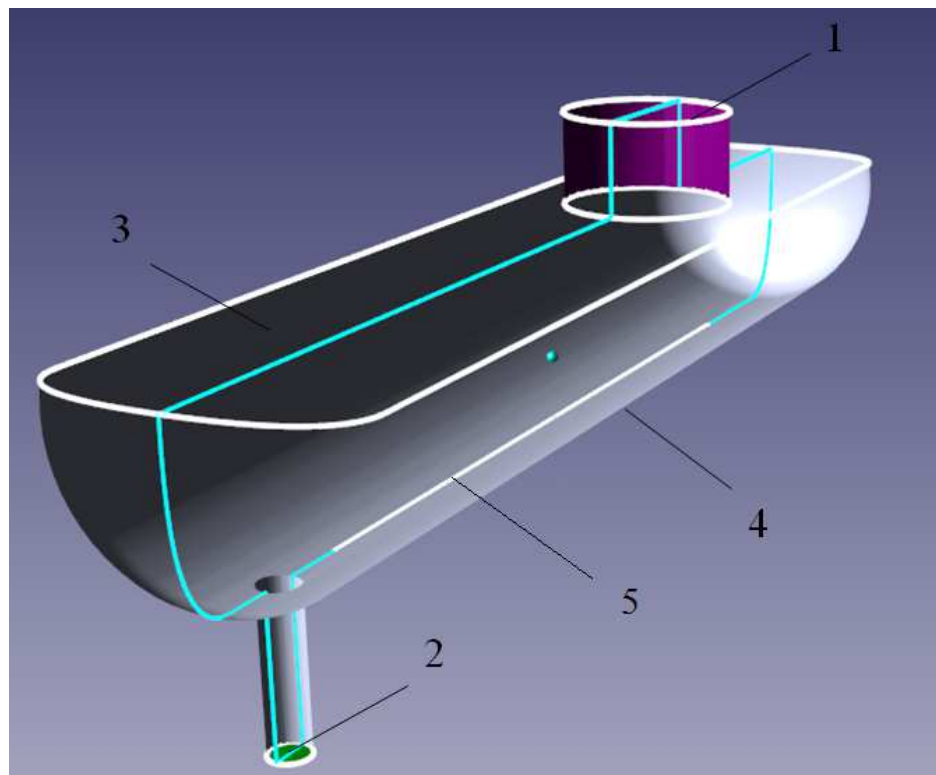


Рисунок 2.2. **Упрощенная геометрическая модель бака деаэратора ДСА-300:** 1 – входное сечение; 2 – выходное сечение; 3 – стенка, моделирующая свободную поверхность; 4 – стенка деаэрационного бака; 5 – барботажная щель

В реальных условиях работы деаэратора бак заполнен не полностью, а лишь до определенного уровня, соответствующего заданному режиму. При решении задачи в такой постановке потребовалось бы моделировать поверхность раздела между жидкой и паровой фазами бака, а также течения в его паровом пространстве. Это, с одной стороны, значительно усложняет сам процесс моделирования, с другой – увеличивает время решения задачи. С целью упрощения поверхность раздела фаз в геометрической модели деаэраторного бака учтена идеальной стенкой (условие проскальзывания). Это позволило сократить область расчета и свести процесс моделирования течения в баке к решению стационарной внутренней задачи.

Для моделирования барботажа на дне бака предусмотрена щель, длина которой соответствует длине затопленного барботажного коллектора рассматриваемого деаэратора, а ширина определена исходя из условия равенства площади её проходного сечения по пару суммарной площади проходного сечения отверстий реального барботажного коллектора (см. рисунок 2.2). Упрощение представления барботажного коллектора в виде щели обусловлено необходимостью уменьшения общего количества ячеек расчетной сетки, требуемых для разрешения области расчета, что позволит в итоге увеличить скорость решения вариантов, в которых требуется моделирование барботажа.

Моделирование гидродинамической обстановки в баке деаэратора ДСА-300 при отсутствии барботажа. Физико-математическая модель течения воды в деаэраторном баке, необорудованном затопленным барботажным устройством, задана следующими параметрами: вещество – вода; агрегатное состояние – жидкость; фаза – непрерывная; параметры движения – ньютоновская жидкость; турбулентность – стандартная k - ϵ модель. Для задания границ расчетной области в FlowVision использовался набор граничных условий, приведенных в таблице 2.3.

Число расчетных ячеек, необходимое для разрешения области расчета, выбрано по результатам исследований сеточной сходимости. С учетом функции подсеточного разрешения геометрии итоговое число расчетных ячеек составляло при расчетах для условий разных опытов от 42134 до 60986. Сходимость расчета оценивалась по величине невязок давления среды во входном сечении и скорости в выходном сечении модели.

Таблица 2.3. Принятые граничные условия (деаэратор без барботажа в баке)

№ граничного условия в соответствии с рисунком 2.2	Наименование граничного условия	Тип граничного условия	Параметр	Значение
1	Вход	Вход / Выход	Нормальная массовая скорость	В соответствии с результатами экспериментальных исследований [125]
2	Выход	Вход / Выход	Статическое давление	
3	Стенка 1	Стенка	–	Проскальзывание
4	Стенка 2	Стенка	–	Прилипание
5	Стенка 3	Стенка	–	Прилипание

В результате расчета определялось, в частности, распределение скоростей воды в деаэрационном баке. Для решения поставленной задачи по уточнению значений константы скорости реакции необходимо определить время, затрачиваемое различными объемами жидкости на прохождение деаэрационного бака.

Анализ средств визуализации FlowVision показал, что готового инструмента, позволяющего получить распределение времен пребывания различных элементарных объемов в деаэрационном баке, нет. Имеется возможность создать в области расчета слой, состоящий из линий тока, выпущенных из входного отверстия модели (рисунок 2.3), среди основных свойств которого доступны следующие переменные: «Максимальное время» и «Максимальный путь». Основная сложность заключается в том, что указанные переменные являются характеристикой всего пучка, а не отдельно взятых линий тока. «Обойти» указанное ограничение можно путем построения в расчетной области слоя, содержащего только одну линию тока. Тогда указанные свойства будут характеризовать только данную линию тока.

С учетом сделанных замечаний разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать время пребывания элементарных объемов воды в баке деаэратора в среде FlowVision, включающий в себя следующие этапы:

- 1) разбивка входного сечения модели на m участков;

- 2) создание слоя «Линии тока» содержащего всего одну линию;
- 3) создание объекта «Сфера» и назначение ее источником слоя «Линии тока»;
- 4) помещение в середину i -го участка объекта «Сфера»;
- 5) выгрузка значения переменной «Максимальное время» из информационного окна слоя «Линии тока».

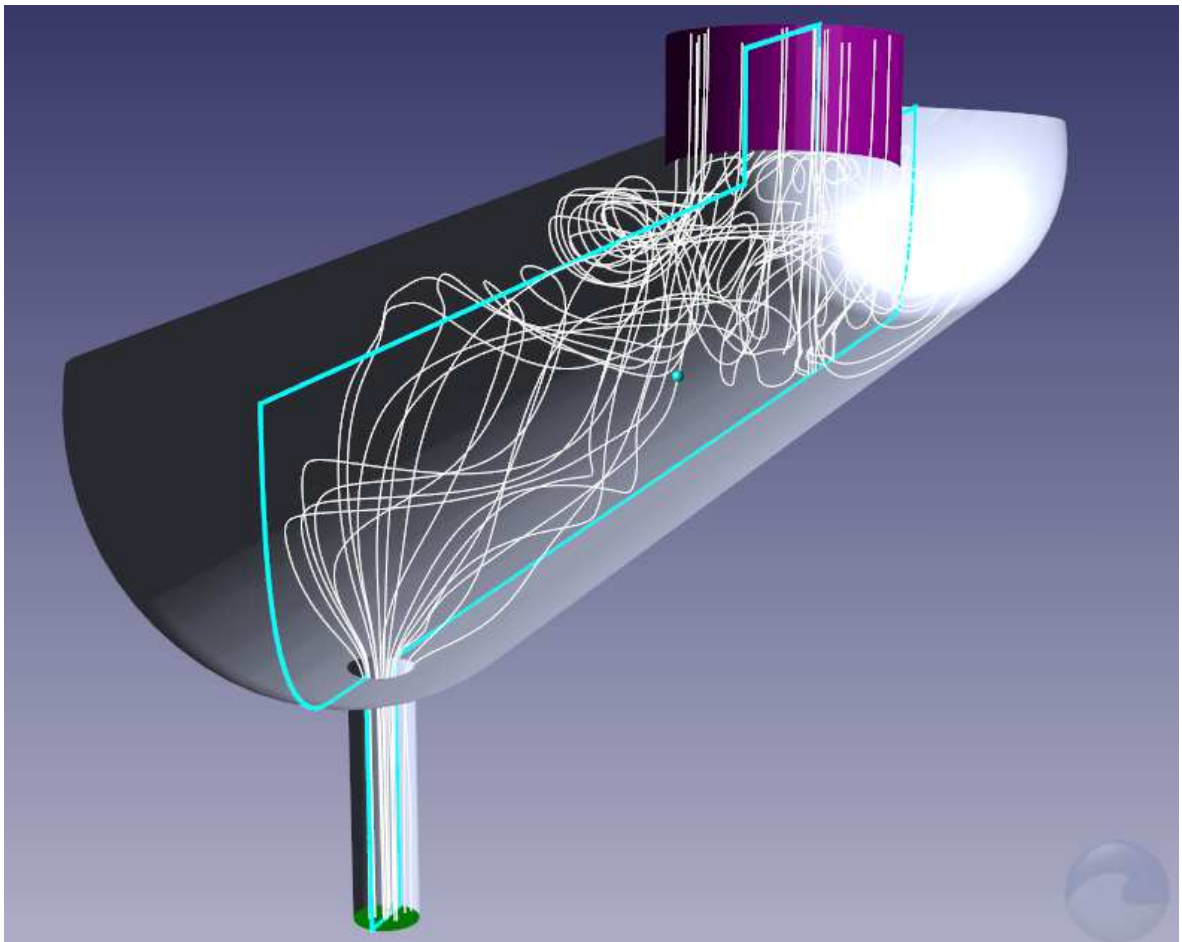


Рисунок 2.3 Пример визуализации слоя «Линии тока» в среде FlowVision для упрощенной модели бака деаэратора ДСА-300 при отсутствии парового барботажа в его водяном объеме

Последовательное выполнение четвертого и пятого этапов алгоритма для каждого из m выделенных объемов воды позволяет получить соответствующие значения времени пребывания τ_i в деаэраторном баке в условиях конкретного опыта. Пример реализации данного алгоритма для отдельно взятого элементарного объема воды в деаэраторном баке проиллюстрирован на рисунке 2.4.

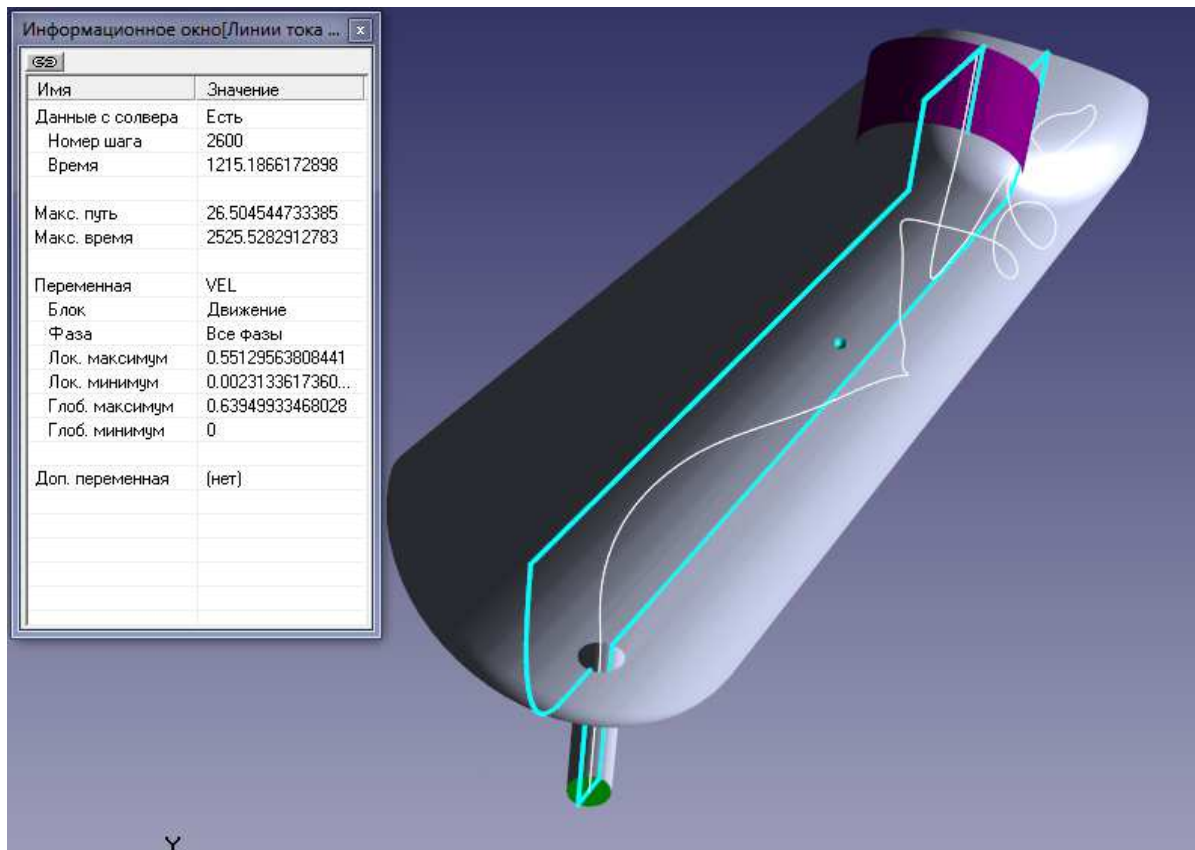


Рисунок 2.4. Пример реализации в среде FlowVision алгоритма, позволяющего определить время пребывания элементарных объемов воды в деаэрационном баке, на примере отдельно взятой линии тока

Для дальнейших расчетов по уточнению значений констант скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, необходимо определиться с числом выделенных объемов воды m , для которых будут рассчитаны значения времени пребывания в деаэрационном баке. С этой целью проведены дополнительные тестовые расчеты по определению констант скорости реакции при различных значениях m . Расчеты для условий одного из опытов показали, что при $m = 500$ значение константы скорости реакции отличается от значения при $m = 1000$ более чем на 4%. В то же время, увеличение числа разбиений до $m = 1500$ привело к отклонению значения константы скорости реакции менее чем на 0,2 %. С учетом этого в дальнейших расчетах по уточнению констант скорости реакции использовалось значение m , равное 1000.

Собственно уточненное значение константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов определялось исходя из того, что это значение

должно быть одинаковым для всех линий тока, поскольку температура воды в баке во всех точках практически одинакова и равна температуре насыщения. В этом случае конечная концентрация гидрокарбоната C_i , мкг-экв/кг, в i -ом объеме воды составит (аналогично выражениям (1.40) и (1.41)):

$$C_i^{n=1} = C_0 \exp(-K_{n=1} \tau_i), \quad (2.1)$$

$$C_i^{n=2} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + K_{n=2} \tau_i}, \quad (2.2)$$

где индексы $n = 1$ и $n = 2$ относятся соответственно к первому или второму порядку реакции; C_0 , мкг-экв/кг – начальная концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в деаэрационный бак; K – константа скорости реакции, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$); τ_i , с – время пребывания в баке i -го объема воды.

Расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака C , мкг-экв/кг, определяется по выражению:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i, \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) получено с учетом того, что каждый i -ый объем воды содержит равные количества жидкости (суммарный расход воды через бак G , кг/с, разделен на m струек равного расхода $g = G/m$, кг/с).

Уточненные значения константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ определялись с использованием выражений (2.1) – (2.3) путем подбора одного и того же для всех линий тока значения K по условию совпадения расчетных и экспериментальных значений концентрации гидрокарбонатов C в воде в выходном сечении бака при условиях каждого опыта.

Для примера рассмотрим результаты расчета τ_i для одного из моделируемых режимов (деаэрактор ДСА-300, уровень воды в баке $H = 2199$ мм, расход воды через бак $G = 64,95$ кг/с, начальная концентрация гидрокарбонатов в воде $C_0 = 1330$ мкг-экв/кг; конечная концентрация гидрокарбонатов в деаэрированной воде $C = 895$ мкг-экв/кг). На рисунке 2.5 показано распределение числа линий тока (суммарно $m = 1000$ линий тока) по времени пребывания воды в баке (точки соот-

ветствуют числу линий тока N , имеющих время пребывания воды в баке в пределах отклонений ± 5 секунд от абсциссы точки).

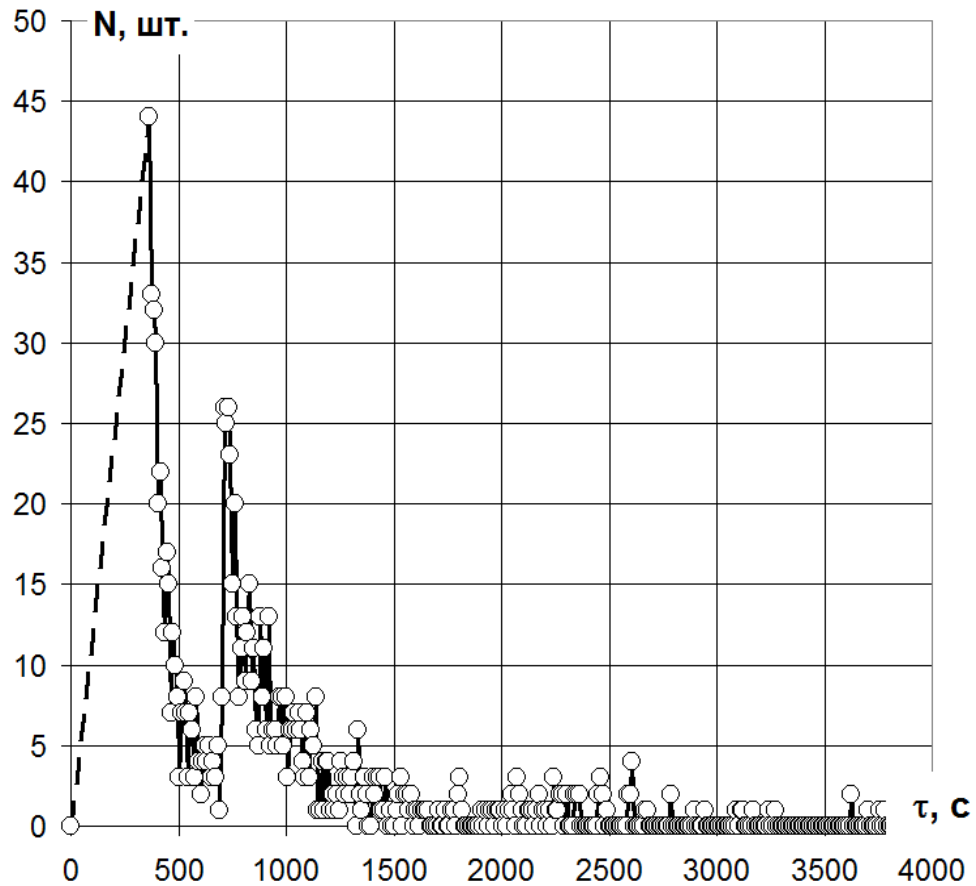


Рисунок 2.5. Распределение числа линий тока N , шт., по времени пребывания воды в баке τ , с (диапазон по времени сокращен для наглядности, максимальное время пребывания 10230 с, характер распределения в диапазоне от 3500 до 10230 с аналогичен характеру распределения в диапазоне от 3000 до 3500 с)

Анализ данных, представленных на рисунке 2.5, позволяет заключить следующее. Распределение числа линий тока по времени пребывания воды в баке деформировано в сторону уменьшения времени (второй – правый – максимум обусловлен образованием застойной зоны в водяном объеме деаэрационного бака со стороны установки деаэрационной колонки, противоположной торцу бака, из которого осуществляется слив деаэрированной воды). Соответственно 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. Это обуславливает отклонение значений константы скорости реакции, вычисляемой двумя рассматриваемыми способами. В данном 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 (2.1) – (2.3);
- 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 (2.1) – (2.3).

Моделирование гидродинамической обстановки в баке деаэратора ДСА-300 при работе затопленного барботажного устройства. Моделирование течения воды в деаэраторном баке при работе затопленного барботажного коллектора производилось с использованием той же геометрической модели, что и для варианта без парового барботажа, однако по несколько отличной методике. Используемая версия FlowVision (3.08) не позволяет рассчитывать течение дисперсной среды, которой применительно к условиям работы деаэратора выступает вода в присутствии паровых пузырьков. Это обуславливает невозможность моделирования работы деаэраторного бака при наличии барботажа при такой постановке задачи.

В ходе предварительных расчетов установлено, что число Маха на выходе из отверстий барботажного устройства при эксплуатационных значениях удельного расхода пара на барботаж не превышает 0,3, что позволяет при моделировании представить барботажный пар как несжимаемую жидкость [150]. Учитывая, что температура в водяном объеме деаэраторного бака в регулировочном диапазоне нагрузок деаэратора мало отличается от температуры насыщения при давлении в надводном пространстве бака, конденсацией пара можно пренебречь и использовать однофазную модель перемешивания двух несжимаемых жидкостей.

Физико-математическая модель была задана следующими параметрами:

- Вещества: вода, агрегатное состояние – жидкость; водяной пар, агрегатное состояние – жидкость;
- фаза – непрерывная;
- физические процессы: движение – ньютоновская жидкость; турбулентность – стандартная k-ε модель, массоперенос.

Для задания границ расчетной области в FlowVision использовались граничные условия, приведенные в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Принятые граничные условия (деаэратор с барботажем в баке)

№ граничного условия в соответствии с рисунком 2.2	Наименование граничного условия	Тип граничного условия	Параметр	Значение
1	Вход	Вход / Выход	Нормальная массовая скорость	В соответствии с результатами экспериментальных исследований [125]
2	Выход	Вход / Выход	Статическое давление	
3	Стенка 1	Стенка	—	Проскальзывание
4	Стенка 2	Стенка	—	Прилипание
5	Стенка 3	Стенка	Нормальная массовая скорость	В соответствии с результатами экспериментальных исследований [125]

Число ячеек, необходимое для разрешения области расчета при моделировании гидродинамической обстановки в баке с барботажем, несмотря на сделанные упрощения, почти на порядок превосходит количество ячеек в условиях опытов без барботажа. Это связано с более сложным характером течения и наличием больших градиентов скоростей в окрестности затопленного барботажного устройства.

Сходимость расчета в данном случае оценивалась по величинам невязок давления среды во входном сечении бака и барботажной щели и скорости в выходном сечении модели.

Методика обработки результатов численных экспериментов аналогична методике, используемой на предшествующем этапе исследований гидродинамической обстановки в деаэрационных баках без парового барботажа. Пример семейства

линий тока для баков с работающими барботажными устройствами приведен на рисунке 2.6.

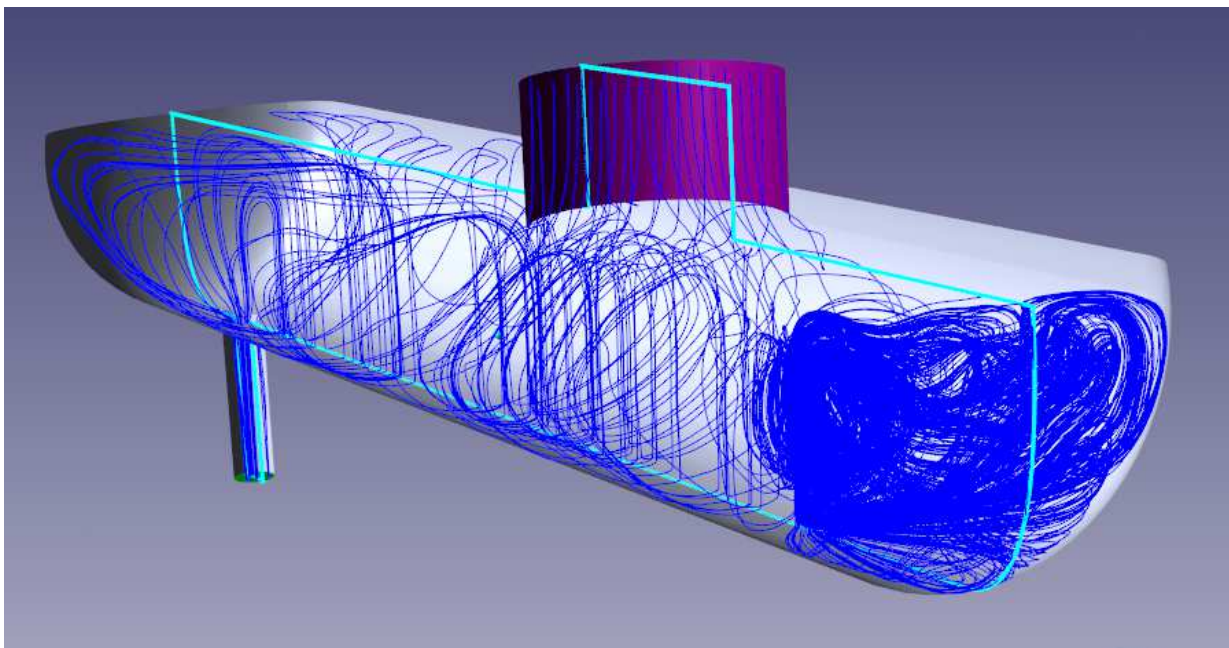


Рисунок 2.6. Пример визуализации слоя «Линии тока» в среде FlowVision для упрощенной модели бака деаэратора ДСА-300 при работе парового барботажа в его водяном объеме

Предварительные расчеты по различным опытам показали, что отклонение уточненных значений константы скорости реакции K от значений до уточнения (по данным рисунка 1.11) существенно зависит от удельного расхода пара на барботаж d_6 и варьируется от 20–30 % при малых значениях d_6 до 3–5 % при больших значениях d_6 . В ходе анализа причин появления такой связи выявлено, что она обусловлена влиянием d_6 на интенсивность перемешивания воды в деаэрационном баке.

Для примера на рисунке 2.7 приведены результаты расчета τ_i по каждой из m линий тока для одной и той же гидравлической нагрузки деаэратора типа ДСА-300 (180 т/ч по деаэрированной воде) при значениях $d_6 = 0$ и $d_6 = 25$ кг/т д.в. (килограмм пара на тонну деаэрированной воды). В обоих случаях уровень воды в баке принят $H = 1800$ мм. Точки на рисунке соответствуют числу линий тока N , имеющих время пребывания воды в баке в пределах отклонений на величину шага Δt от абсциссы точки. Значение Δt определялось как разница между максимальным и минимальным значениями τ_i , деленная на $(m - 1)$.

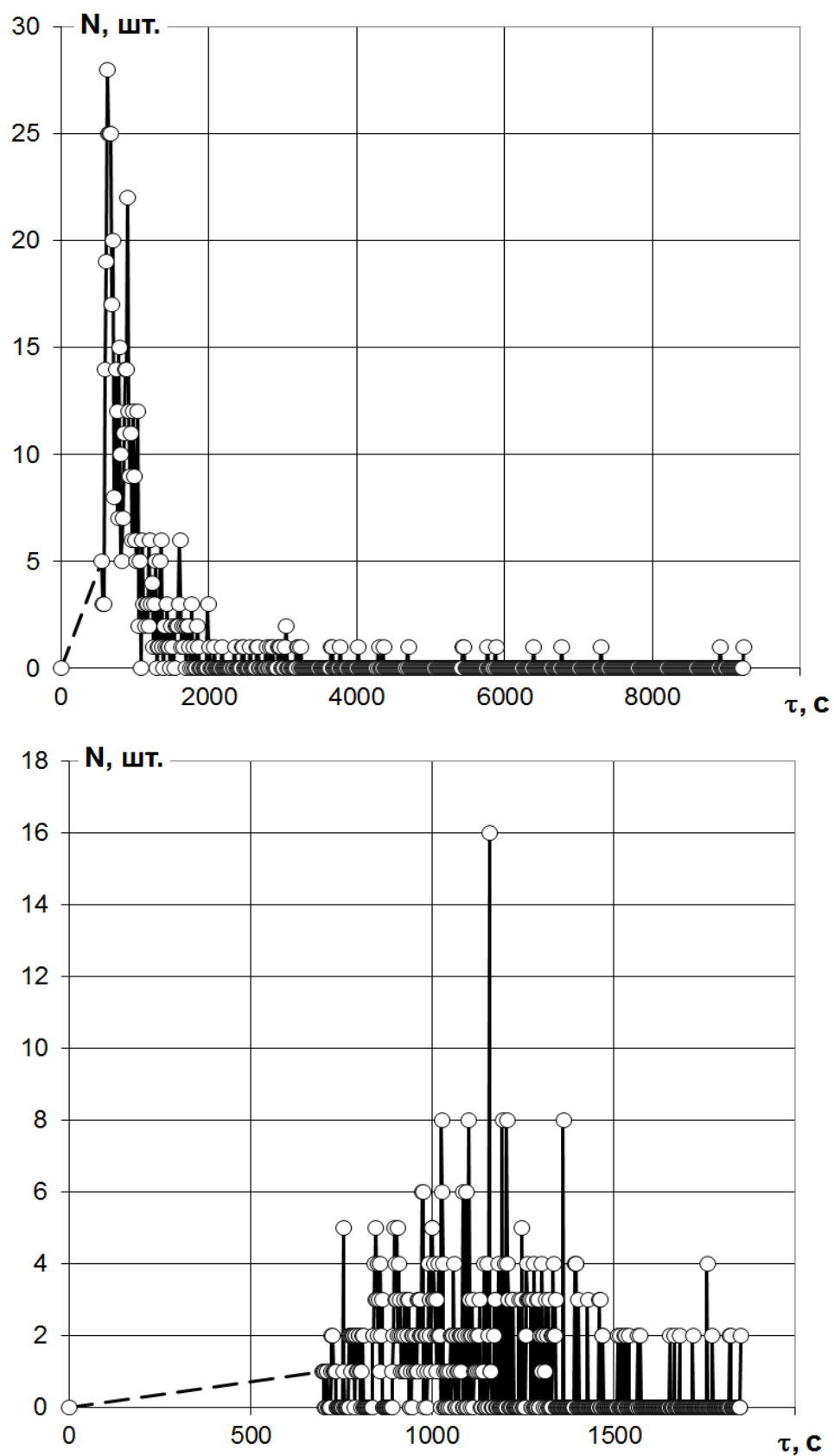


Рисунок 2.7 Распределение числа линий тока N , шт., по времени пребывания воды в баке τ , с, при удельном расходе пара на барботаж $d_6 = 0$ (вверху) и $d_6 = 25$ кг/т д.в. (внизу)

Данные, представленные на рисунке 2.7, доказывают существенное влияние удельного расхода пара на барботаж на вид распределения числа линий тока по времени пребывания воды в баке. При отсутствии барботажа это распределение деформировано в сторону уменьшения времени пребывания (как и показано выше при обсуждении результатов моделирования для деаэраторов без барботажа). Включение в работу барботажного устройства приводит к тому, что рассматриваемое распределение визуально становится более симметричным.

Для количественной оценки выявленного эффекта проведены специальные численные исследования. В ходе них в дополнение к двум расчетным опытам, результаты которых приведены на рисунке 2.7, выполнено еще три опыта при значениях $d_6 = 3; 7,5$ и 15 кг/т д.в при тех же условиях. Поскольку ранее выявлено, что разница между значениями константы скорости реакции K , вычисленной по времени вытеснения воды из бака и по рассматриваемой авторской методике, обусловлена асимметрией распределения числа линий тока по времени пребывания воды в баке, возникла необходимость расчета параметров распределения, характеризующих эту асимметрию. В качестве таковых целесообразно использовать коэффициент асимметрии, а также значения матожидания и медианы распределения в сопоставлении между собой.

Для того чтобы использовать инструменты теории вероятности и математической статистики, необходимо предварительно по полученным результатам численных экспериментов рассчитать статистические функции плотности распределения вероятности случайной величины – времени пребывания в деаэраторном баке для отдельных элементарных объемов воды. Строго говоря, время пребывания в баке не является случайной величиной, поскольку течение воды в баке в целом является детерминированным процессом. Однако в данном случае задача состоит лишь в том, чтобы средствами статистики количественно оценить наблюдаемые интегральные эффекты.

При построении статистических функций плотности распределения вероятности основной проблемой является выбор количества интервалов. В рамках настоящей работы при количестве опытных значений $m = 1000$ определены рекомендуемые значения количества интервалов z по разным источникам: $z = 11$ по

формуле Стёрджеса [151]; $z = 15$ по формуле Брукса и Каррузера [151]; $z = 32$ по рекомендациям [152]; $z = 17$ по рекомендациям ВНИИМ им. Д.И. Менделеева [153]. Для дальнейших расчетов принято среднее из приведенных значений $z = 19$. Полученные при этом статистические функции плотности распределения вероятности приведены на рисунке 2.8.

В таблице 2.5 приведены сводные данные [151] по параметрам полученных распределений. Полученные результаты показывают, что при увеличении удельного расхода пара на барботаж распределение приближается к симметричному, в результате уменьшается отклонение медианы распределения от математического ожидания, что и обуславливает уменьшение разницы между уточненными и не уточненными значениями константы скорости реакции K . При этом следует отметить, что при значениях $d_6 = 15$ кг/т д.в. распределение близко к симметричному, а увеличение d_6 до 25 кг/т д.в. не приводит к существенному изменению параметров распределения.

Это косвенно подтверждает выводы, сделанные Г.В. Ледуховским [14] и А.А. Коротковым [125], что при указанных значениях удельного расхода пара на барботаж (для рассматриваемой конструкции барботажного устройства) обеспечивается наилучшее перемешивание воды в деаэрационном баке и складываются условия для максимального развития площади поверхности контакта фаз и уменьшения диффузионного сопротивления процессам газообмена. Такие выводы были сделаны как в отношении растворенного кислорода, так и в отношении свободного диоксида углерода.

Таким образом, проведенные расчетные исследования позволили установить, что уточнение экспериментальных значений константы скорости реакции K по рассматриваемой авторской методике имеет смысл при значениях удельного расхода пара на барботаж менее 15 кг/т д.в.

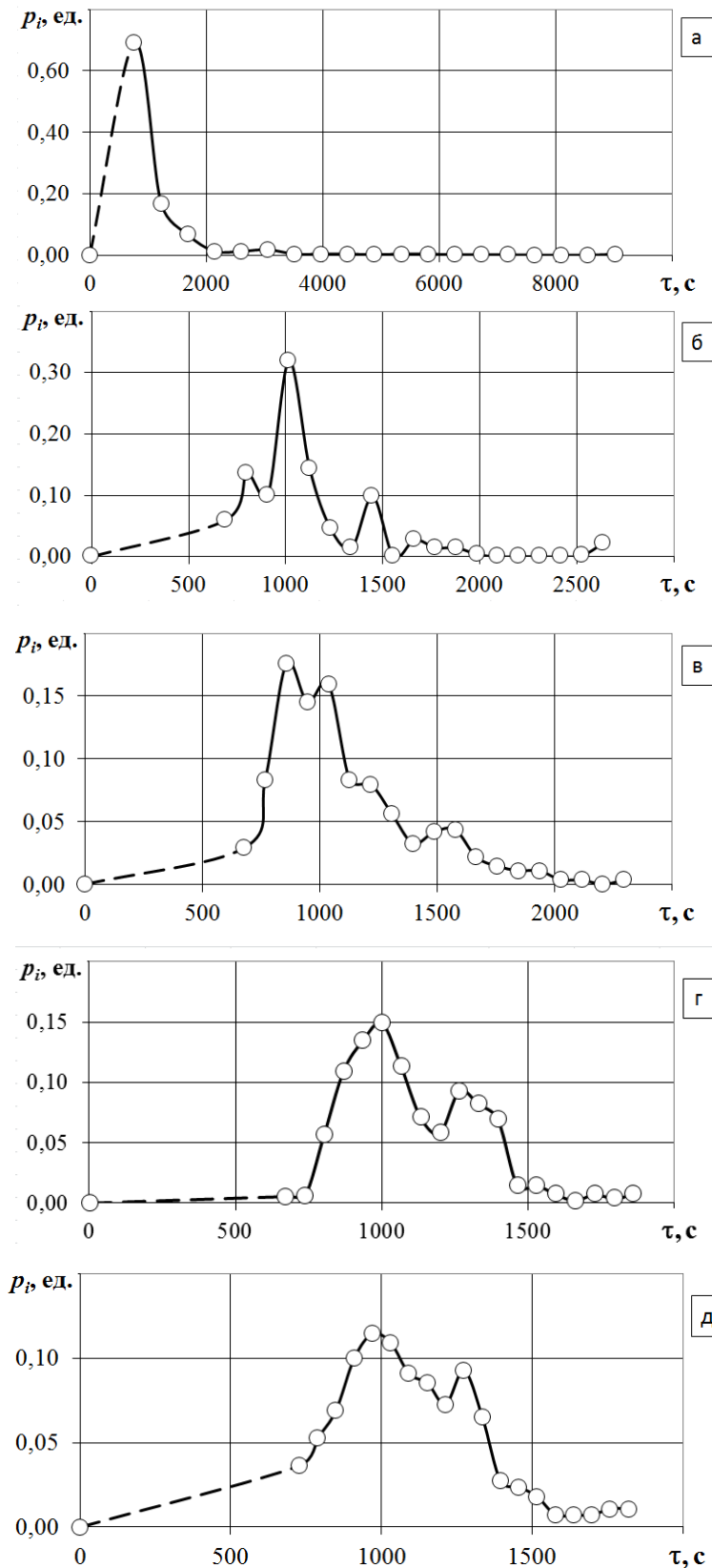


Рисунок 2.8. Статистические функции плотности распределения вероятности для времени пребывания элементарных объёмов воды в деаэрационном баке: p_i – частота; значения удельного расхода пара на барботаж, кг/т д.в.: а – $d_6 = 0$; б – $d_6 = 3$; в – $d_6 = 7,5$; г – $d_6 = 15$; д – $d_6 = 25$

Таблица 2.5. Параметры статистических функций плотности распределения вероятности для времени пребывания элементарных объемов воды в баке при различных значениях удельного расхода пара на барботаж

Параметр, обозначение, единица изменения	Значение для распределения при удельном расходе пара на барботаж, кг/т д.в.				
	0	3	7,5	15	25
1. Медиана M_e , с	858	1007	1034	1054	1082
2. Матожидание M_o , с	1105	1105	1105	1105	1105
3. Отклонение M_e от M_o , %	22,4	8,9	6,5	4,7	2,1
4. Коэффициент асимметрии, ед.	1,37	1,14	0,88	–0,04	–0,12

2.2.3. Результаты расчетов по уточнению экспериментальных значений константы скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах

Рассмотрим результаты применения разработанной методики по уточнению константы скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах для опытных данных, описанных в гл. 1. Расчеты выполнены при порядке реакции $n = 1$ и $n = 2$.

Деаэраторные баки при отсутствии парового барботажа. Обобщение результатов уточнения значений константы скорости реакции по всем имеющимся опытам для деаэраторов атмосферного типа без парового барботажа выполнено на рисунке 2.9. Для наглядности на рисунке 2.9 также приведены обсуждаемые в гл. 1 значения констант скорости реакции, полученные А.А. Коротковым по тем же опытным данным [125]. Данные В.А. Пермякова, представленные в результатах А.А. Короткова, в данном случае 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.

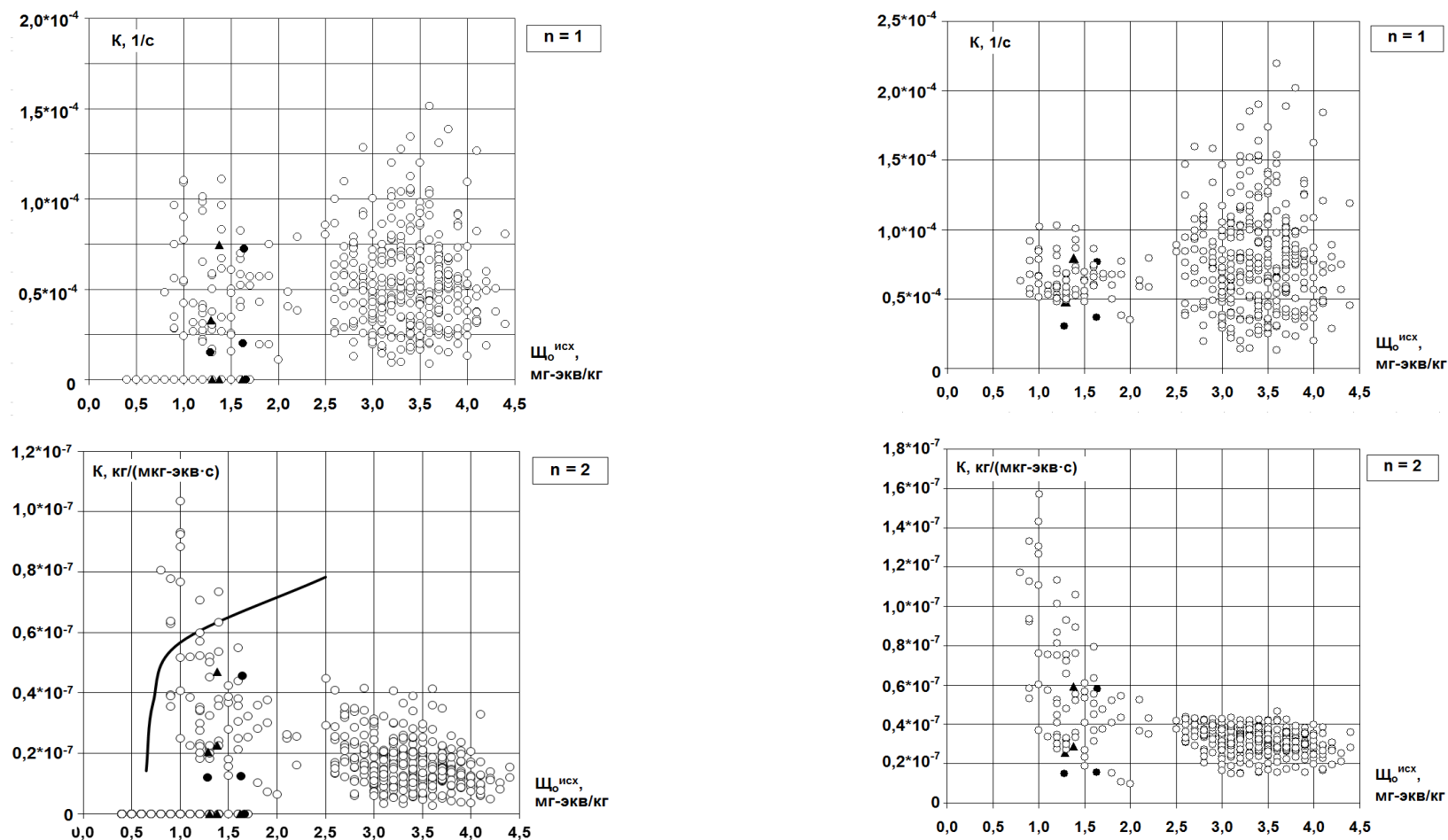


Рисунок 2.9. Экспериментальные значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах при отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака (слева – данные А.А. Короткова [125], справа – значения, уточненные по разработанной методике): n – порядок реакции; K – константа скорости реакции моделируемого процесса термического разложения гидрокарбонатов, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$); $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ – щелочность общая воды перед деаэратором, мг-экв/кг; линиями показаны данные В.А. Пермякова [119]; точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей: $\bullet$ – ДА-300м; $\blacktriangle$ – ДСА-300 (колонка с двумя струйными отсеками); $\circ$ – ДА-50

Визуальный анализ данных рисунка 2.9 показывает, что уточнение экспериментальных значений констант скорости реакции по разработанной выше методике позволило значительно сократить разброс их значений относительно среднего при следующих условиях: $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2,3$ мг-экв/кг при порядке реакции $n = 1$ и $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2,3$ мг-экв/кг при порядке реакции $n = 2$. При других условиях ($\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2,3$ мг-экв/кг и $n = 1$; $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2,3$ мг-экв/кг и $n = 2$) заметного уменьшения разброса значений K не наблюдается, что может говорить о смене порядка реакции химической стадии рассматриваемого процесса при общей щелочности около 2,3 мг-экв/кг.

Далее приведем характеристики полученных комплексов уточненных значений K для двух рассматриваемых диапазонов общей щелочности деаэрируемой воды (как это было сделано в гл. 1 для данных А.А. Короткова):

- по деаэраторам без барботажа в баке при общей щелочности воды менее 2,3 мг-экв/кг:

- средние значения константы скорости реакции:

при $n = 1$ $K = 0,65 \cdot 10^{-4}$ 1/с;

при $n = 2$ $K = 0,60 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв·с);

- среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции:

при $n = 1$ 12,6 %;

при $n = 2$ 30,0 %;

- значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 5,65$;

- критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 254 и уровне значимости 0,05 $F_{\text{кр}} = 1,23$;

- поскольку $F > F_{\text{кр}}$, в комплексах значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ имеются статистически значимые различия;

- по деаэраторам без барботажа в баке при общей щелочности воды более 2,3 мг-экв/кг:

- средние значения константы скорости реакции

при $n = 1$ $K = 0,78 \cdot 10^{-4}$ 1/с;

при $n = 2$ $K = 0,32 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв·с);

– среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции

при $n = 1$ 46,9 %;

при $n = 2$ 19,9 %;

– значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 5,54$;

– критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 358 и уровне значимости 0,05 $F_{кр} = 1,19$;

– поскольку $F > F_{кр}$, в комплексах значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ имеются статистически значимые различия.

Для оценки значимости выполненных уточнений значений K проведены дополнительные исследования с использованием методов статистического анализа [154 – 156]. Результаты статистического анализа сведены в таблицу 2.6. Уровень значимости для всех случаев, рассматриваемых в таблице 2.6, принят равным 0,05.

Таким образом, анализ показал, что во всех рассматриваемых диапазонах щелочности деаэрируемой воды использование предложенной методики учета гидродинамической обстановки в деаэраторном баке при расчете кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов привело к статистически значимому уточнению константного обеспечения модели. С учетом приведенных выше количественных характеристик полученной совокупности данных можно полагать наиболее вероятным протекание процесса как реакции первого порядка при общей щелочности воды менее 2,3 мкг-экв/кг и как реакции второго порядка при общей щелочности воды более указанного значения.

Сводные данные по уточненным экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов с указанием диапазонов наиболее вероятного протекания процесса как реакции первого и второго порядка представлены на рисунке 2.10.

Таблица 2.6. Статистический анализ полученных результатов
(деаэраторы без барботажа в баке)

Вопрос	Ответ и его обоснование	Вывод
1. Равноточны ли совокупности уточненных и неуточненных значений константы скорости реакции K , 1/с, (реакция первого порядка) на рисунке 2.9 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2,3$ мг-экв/кг	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $5,13 \cdot 10^{-8} (1/\text{с})^2$ до уточнения и $1,70 \cdot 10^{-8} (1/\text{с})^2$ после уточнения. Критерий Фишера равен 3,03, что больше критического значения критерия Фишера, равного 1,23	Уточненные значения константы скорости реакции K , 1/с, (реакция первого порядка) при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2,3$ мг-экв/кг характеризуются большей воспроизводимостью, чем значения до уточнения. Рекомендуется использовать в расчетах уточненное значение $K = (0,65 \pm 0,08) \cdot 10^{-4} 1/\text{с}$
2. Равноточны ли совокупности уточненных и неуточненных значений константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв·с), (реакция второго порядка) на рисунке 2.9 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 > 2,3$ мг-экв/кг	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $2,09 \cdot 10^{-14} (\text{кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с}))^2$ до уточнения и $1,47 \cdot 10^{-14} (\text{кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с}))^2$ после уточнения. Критерий Фишера равен 1,43, что больше критического значения критерия Фишера, равного 1,19	Уточненные значения константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв·с), (реакция второго порядка) при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 > 2,3$ мг-экв/кг характеризуются большей воспроизводимостью, чем значения до уточнения. Рекомендуется использовать в расчетах уточненное значение $K = (0,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \text{ кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с})$

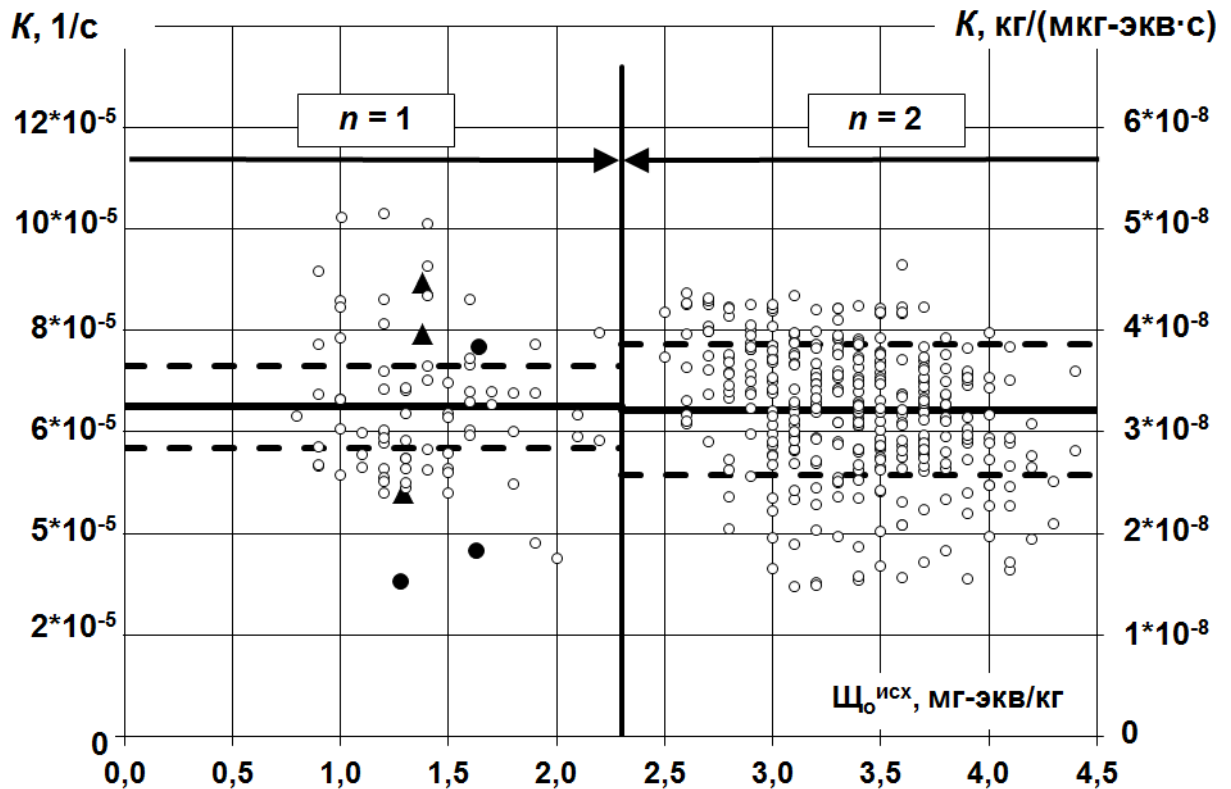


Рисунок 2.10. Сводные данные по уточненным экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэраторном баке: сплошные горизонтальные линии – рекомендуемые значения; штриховые линии – границы доверительного интервала погрешности определения рекомендуемых значений константы скорости реакции (доверительная вероятность 0,95); прочие обозначения те же, что на рисунке 2.9

Деаэраторные баки с работающими затопленными барботажными устройствами. С учетом выводов, сделанных в п. 2.2.2 по результатам моделирования гидродинамической обстановки в деаэраторном баке ДСА-300 при работе затопленного барботажного устройства, выполнена повторная обработка экспериментальных данных А.А. Короткова, приведенных в гл. 1 на рисунке 1.11. При этом данные для опытов при значениях удельного расхода пара на барботаж 15 кг/т д.в. и более оставлены без изменений, поэтому фактически уточнение выполнено лишь для восьми опытов по деаэратору ДА-300м. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.11.

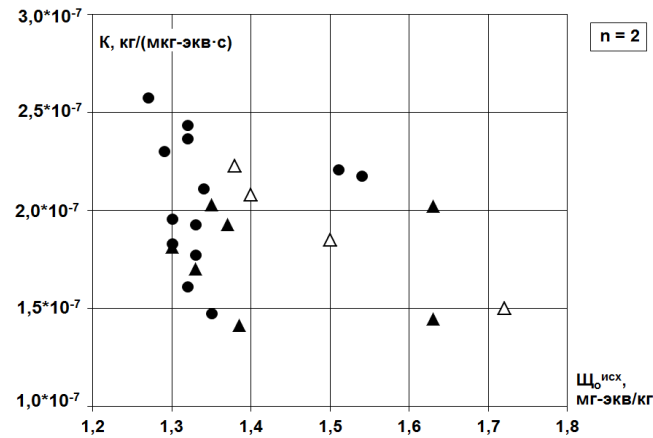
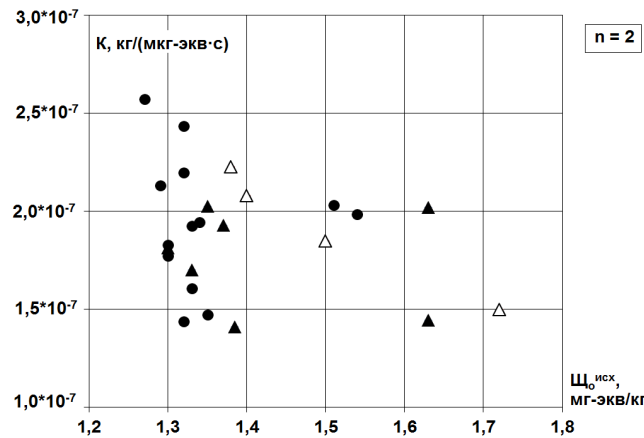
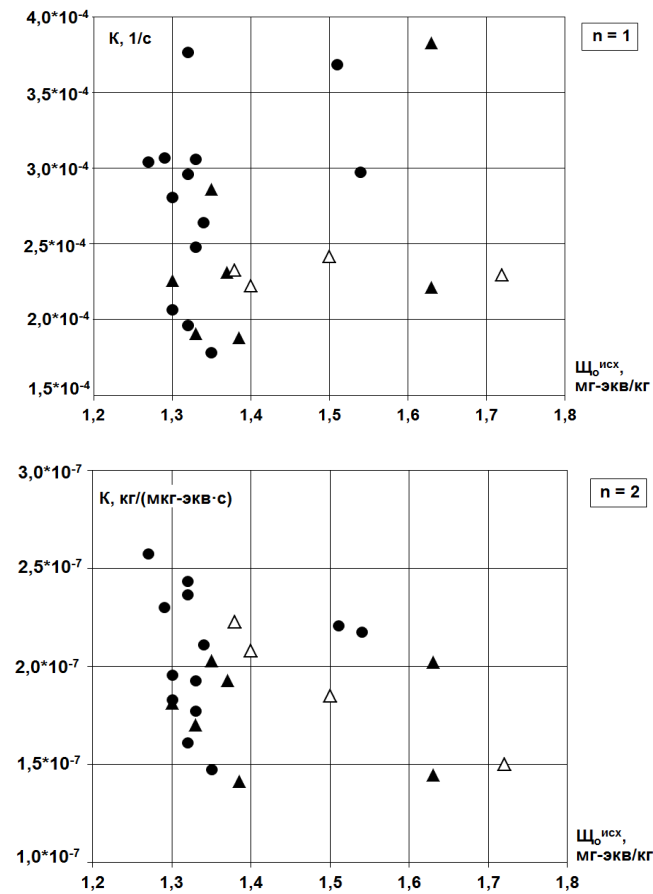
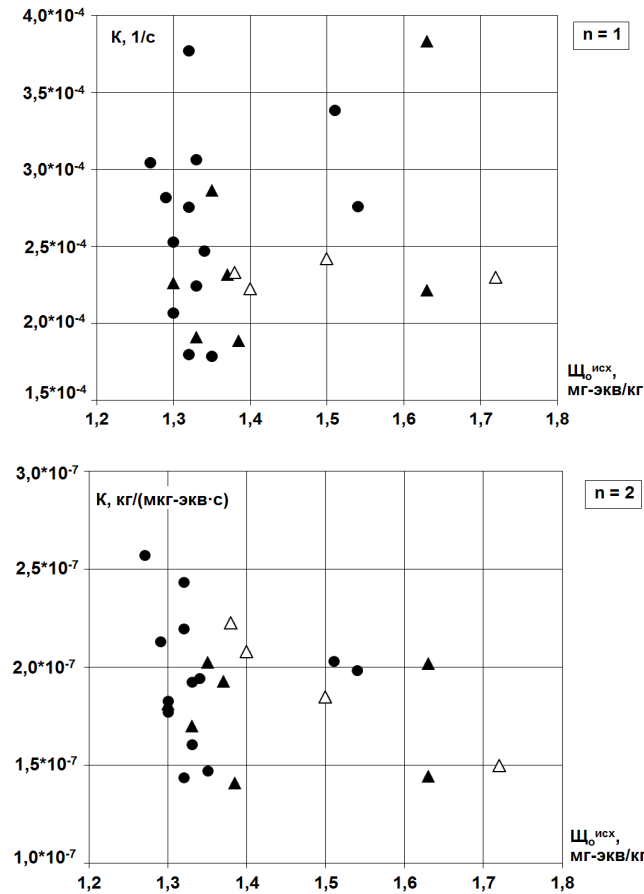


Рисунок 2.11. Экспериментальные значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах при работе затопленных барботажных устройств в водяном объеме деаэрационного бака (слева – данные А.А. Короткова [125], справа – значения, уточненные по разработанной методике): точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей: Δ – ДСА-300 (колонка с одним струйным отсеком); прочие обозначения соответствуют рисунку. 2.9

Для уточненных данных по рисунку 2.11 определено следующее:

– средние значения константы скорости реакции

$$\text{при } n = 1 \quad K = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с};$$

$$\text{при } n = 2 \quad K = 1,95 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(мкг-экв}\cdot\text{с)};$$

– среднеквадратическое отклонение для комплексов значений константы скорости реакции

$$\text{при } n = 1 \quad 22,7 \%;$$

$$\text{при } n = 2 \quad 16,6 \%;$$

– значение критерия Фишера (отношение дисперсий относительно среднего для комплексов значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$) $F = 1,87$;

– критическое значение критерия Фишера при количестве опытных значений 24 и уровне значимости 0,05 $F_{кр} = 1,99$;

– поскольку $F < F_{кр}$, комплексы значений константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ статистически не различимы.

В таблице 2.7 выполнена проверка значимости проведенного уточнения. Видно, что проведенное для деаэраторов с барботажем уточнение константного обеспечения модели статистически незначимо. Это связано, прежде всего, с тем, что в комплексе экспериментальных значений относительно мало данных, полученных при значениях удельного расхода пара на барботаж менее 15 кг/т д.в., а, как показано выше, это оказывается определяющим при оценке целесообразности использования разработанной методики для деаэраторов с барботажем в баке. При этом необходимо отметить, что величины отклонений экспериментальных значений K до и после уточнения практически соответствуют погрешности косвенного определения константы скорости реакции по результатам измерения теплотехнических и химических параметров теплоносителей, которая оценена в таблице 2.1 и составила 13%. То есть можно полагать, что наблюдаемые на рисунке 2.11 разбросы значений констант скорости реакции обусловлены в основном метрологическими характеристиками методов и средств измерения.

Таблица 2.7. Статистический анализ полученных результатов
(деаэраторы с барботажем в баке)

Вопрос	Ответ и его обоснование	Вывод
1. Равноточны ли совокупности уточненных и неуточненных значений константы скорости реакции K , 1/с, (реакция первого порядка) на рисунке 2.11	Да. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $8,12 \cdot 10^{-8} (1/\text{с})^2$ до уточнения и $7,41 \cdot 10^{-8} (1/\text{с})^2$ после уточнения. Критерий Фишера равен 1,10, что меньше критического значения критерия Фишера, равного 1,99	Проведенное уточнение данных статистически незначимо
2. Равноточны ли совокупности уточненных и неуточненных значений константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв·с), (реакция второго порядка) на рисунке 2.11	Да. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $2,24 \cdot 10^{-14} (\text{кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с}))^2$ до уточнения и $2,14 \cdot 10^{-14} (\text{кг}/(\text{мкг-экв} \cdot \text{с}))^2$ после уточнения. Критерий Фишера равен 1,07, что меньше критического значения критерия Фишера, равного 1,99	Проведенное уточнение данных статистически незначимо

Дальнейшее уточнение этих данных возможно только при использовании более точных методов измерения, главным образом, щелочности деаэрируемой воды. Поскольку при оперативном контроле деаэраторов используются методы измерения щелочности, соответствующие руководящему документу [157], такое дополнительное уточнение не имеет практического смысла.

В заключение приведем сводную таблицу, демонстрирующую результаты уточнения константного обеспечения модели предложенным методом (таблица 2.8). Как и ранее в гл. 1, если нет статистически доказанных оснований считать при моделировании процесс термического разложения гидрокарбонатов реакцией первого или второго порядка, то в таблице указаны значения, характеризующиеся большей воспроизводимостью.

Таблица 2.8. Характеристика константного обеспечения математической модели процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах по опубликованным данным и после их уточнения предложенным методом

Показатель, единица измерения	Значение для деаэраторов					
	с барботажом в баке		без барботажа в баке			
	до уточне- ния	после уточнения	до уточне- ния	после уточнения	до уточне- ния	после уточнения
1. Диапазон изменения общей щелочности деаэрируемой воды Щ_0 , мг-экв/кг	Весь диапазон		до 2,3		более 2,3	
2. Порядок реакции n	2		1		2	
3. Константа скорости реакции 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 относительно среднего для комплекса экспериментальных значений константы скорости реакции, %	16,5	16,6	28,1	12,6	46,8	19,9
5. Относительная погрешность определения константы скорости реакции K как результата косвенного измерения, обусловленная метрологическими характеристиками используемых методов и средств теплотехнического и химического контроля, %	13,0		16,5		18,2	
6. Значимо ли уточнение статистически?	Нет		Да		Да	

2.3. Выводы по второй главе

1. Проведен анализ факторов, влияющих на эффективность термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления, по результатам которого выдвинута гипотеза о влиянии гидродинамической обстановки в деаэраторном баке на вычисляемые по результатам экспериментальных исследований значения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов.

2. Разработана 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.

3. С использованием предложенной методики проведены расчеты по уточнению экспериментальных значений константы скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления. Учет различного времени пребывания разных малых объемов воды в деаэраторном баке при моделировании рассматриваемого процесса позволил достичь следующих результатов:

- *для деаэраторов без барботажа в баке:*

- статистически значимо уточнить значения констант скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, уменьшив величину разброса экспериментальных данных до значений, сопоставимых с характеристиками точности используемых в испытаниях методов теплотехнического и химического контроля;

- определить, что при общей щелочности воды менее 2,3 мкг-экв/кг можно считать наиболее вероятным протекание процесса как реакции первого порядка, а при общей щелочности воды более указанного значения – как реакции второго порядка;

- *для деаэраторов с барботажем в баке:*

- выявить, что степень влияния гидродинамической обстановки в деаэраторе на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов зависит от удельного расхода пара на барботаж;

– для деаэраторов с барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного коллектора определить диапазон значений удельного расхода пара на барботаж, в котором из-за особенностей гидродинамических характеристик потока воды в баке целесообразно использовать предложенный метод обработки результатов испытаний при расчете констант скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов;

– определить, что для указанных деаэраторов при значениях удельного расхода пара на барботаж, превышающих 15 кг/т д.в., константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, рассчитываемые как для реактора идеального вытеснения, оказываются статистически неотличимы от уточненных по предложенной методике значений, полученных с учетом реальных параметров течения воды в баке.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ В АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ

При анализе опубликованных данных [125], описывающих процессы декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах (см. гл. 1) было выявлено, что деаэрационные колонки (в том числе, оборудованные непровальными барботажными листами) характеризуются низкой эффективностью по удалению свободного диоксида углерода. Это объясняется близостью фактических статических условий для системы «диоксид углерода – вода» к термодинамически равновесным условиям с возможностью перехода из зоны десорбции в зону абсорбции в условиях работы верхних струйных отсеков. Поэтому при работе атмосферного деаэратора основная нагрузка по удалению свободного и химически связанного диоксида углерода приходится на деаэрационный бак.

В гл. 1 показано, что эффективность декарбонизации воды в деаэраторах характеризуется значениями следующих параметров:

- массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде;
- водородного показателя pH_{25} деаэрированной воды;
- степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе.

При этом первые два параметра являются нормируемыми показателями качества деаэрированной воды. Последний показатель имеет значение для деаэраторов, работающих в схемах питательной воды паровых котлов среднего давления, поскольку используется при оценке предельного содержания свободной углекислоты в производимом ими паре.

Разработке методик прогнозирования указанных параметров посвящена настоящая глава.

3.1. Методика прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов

В п. 1.5.2 приведена методика прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах, базирующаяся на решении кинетического уравнения (1.39) реакции, моделирующей рассматриваемый процесс. При этом

время пребывания воды в деаэраторе τ вычисляется как для реактора идеального вытеснения (путем деления объема воды в баке, зависящем от его геометрии и уровня воды в нем H , на объемный расход воды через бак G_d). Константа скорости реакции K принимается по данным рисунка 1.11 при выбранном значении порядка реакции n . Учитывая, что проведенный в п. 1.5.2 анализ показал отсутствие статистически значимых различий в комплексах значений K для $n = 1$ и $n = 2$, значение n следует выбирать таким, чтобы соответствующие данные по K характеризовались большей воспроизводимостью.

Результаты использования рассмотренной методики прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в сопоставлении с экспериментальными данными приведены на рисунке 1.12. Полученные при этом значения средне-квадратического отклонения результатов расчета от опытных данных (37 % для деаэраторов без барботажа в баке и 20 % для деаэраторов с барботажем в баке) не позволяют использовать рассмотренную методику для решения практических задач. В гл. 2 показано, что основной причиной появления указанных разбросов является влияние гидродинамической обстановки в деаэраторном баке на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов. Учет различного времени пребывания разных элементарных объемов воды в деаэраторных баках позволил сократить разброс экспериментальных значений констант скорости реакции для баков без парового барботажа, а также для баков с работающими барботажными устройствами при удельных расходах пара на барботаж менее 15 кг/т д.в.

Используя разработанную в гл. 2 методику обработки результатов испытаний деаэраторов с применением специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости, позволяющую учесть различное время пребывания разных элементарных объемов воды в деаэраторном баке при расчете кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов, а также уточненные с её помощью значения констант скорости реакции, можно определить значения щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды и степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе заданной конструкции. Рассмотрим основные положения рассматриваемой методики.

Исходными данными для расчета являются следующие параметры:

- уточненные значения константы скорости реакции K , 1/с (порядок реакции $n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$), выбираемые в соответствии с рекомендациями, приведенными в таблице 2.8, в зависимости от общей щелочности исходной воды $Щ_0^{\text{исх}}$;
- начальная концентрация гидрокарбонатов в воде на входе C_0 , удовлетворяющая выражению $C_0 \approx Щ_0^{\text{исх}}$, мкг-экв/дм³;
- совокупность значений располагаемого времени реакции τ_i , с, для каждого из m (по рекомендациям, обоснованным в гл. 2, целесообразно принимать значение $m = 1000$) выделенных элементарных объемов деаэрируемой воды, рассчитанных по результатам численного моделирования гидродинамической обстановки воды в деаэраторном баке в программном комплексе FlowVision при известных геометрических характеристиках деаэраторного бака, а также заданных значениях уровня воды в баке H и расхода воды на выходе из бака G_d ($\tau_i = f(G_d; H)$).

Рассмотрим основные этапы расчета значений степени термического разложения гидрокарбонатов по разработанной уточненной методике:

1) расчет конечных концентраций гидрокарбонатов, мкг-экв/дм³, для каждого из m выделенных элементарных объемов воды, соответствующих первому ($n = 1$) или второму ($n = 2$) порядку реакции (выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в таблице 2.8) по выражению:

$$C_i = \begin{cases} C_0 \exp(-K_{n=1} \tau_i) & \text{при } n = 1, \\ \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{K_{n=2} \tau_i}{\rho_{25} \cdot 10^{-3}}} & \text{при } n = 2, \end{cases} \quad (3.1)$$

где плотность охлажденной пробы воды при температуре 25 °С может быть принята равной $\rho_{25} = 1000$ кг/м³.

2) определение конечной концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде на выходе из деаэраторного бака C , мкг-экв/дм³; в случае равномерного разбиения области течения на элементарные струйки, расходы воды через них будут равны, соответственно для расчета конечной концентрации гидрокарбонатов в де-

аэрированной воде на выходе из деаэрационного бака может быть использовано следующее выражение:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i ; \quad (3.2)$$

3) определение собственно степени термического разложения гидрокарбонатов:

$$\sigma = 1 - C / C_0 , \quad (3.3)$$

4) расчет щелочности общей и по фенолфталеину деаэрированной воды:

$$Щ_o^{\text{л}} = (G_{\text{исх}} Щ_o^{\text{исх}} + G_{\text{п}} Щ_o^{\text{п}}) / G_{\text{д}} \approx G_{\text{исх}} Щ_o^{\text{исх}} / G_{\text{д}} , \quad (3.4)$$

$$Щ_{\text{ф}}^{\text{л}} = \sigma Щ_o^{\text{л}} / 2 , \quad (3.5)$$

где $G_{\text{исх}}$ – расход воды на входе в деаэратор; $G_{\text{п}}$ – расход греющего пара в деаэратор; $Щ_o^{\text{п}}$ – общая щелочность греющего пара.

Результаты сопоставления экспериментальных и рассчитанных по выражениям (3.1) – (3.3) значений степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах без парового барботажа в баке приведены на рисунке 3.1. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений σ от экспериментальных по рисунку 3.1 составляет 13,9 %, то есть примерно в 2,7 раза меньше, чем для результатов расчета по упрощенной методике, приведенной в гл. 1. Статистическая значимость перехода от упрощенной методики расчета к уточненной доказывается по критерию Фишера, который в данном случае равен 7,00, что больше критического (табличного) значения 1,14.

Результаты применения уточненной методики для деаэраторов с барботажем в баке приведены на рисунке 3.2. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений σ от экспериментальных составляет 15,4 %, что несколько меньше, чем для результатов расчета по упрощенной методике, приведенной в гл. 1 (20 %). Критерий Фишера, характеризующий переход от упрощенной методики расчета к уточненной, равен 1,71, что меньше критического (табличного) значения 1,99. То есть уточнение статистически незначимо. Причина этого заключается в том, что используемые в расчетах уточненные значения константы скорости реакции K статистически неотличимы от значений до уточнения. Однако, как показано в гл. 2, степень точности получаемых расчетных данных соответствует точности используемых методов и средств теплотехнического и химического контроля.

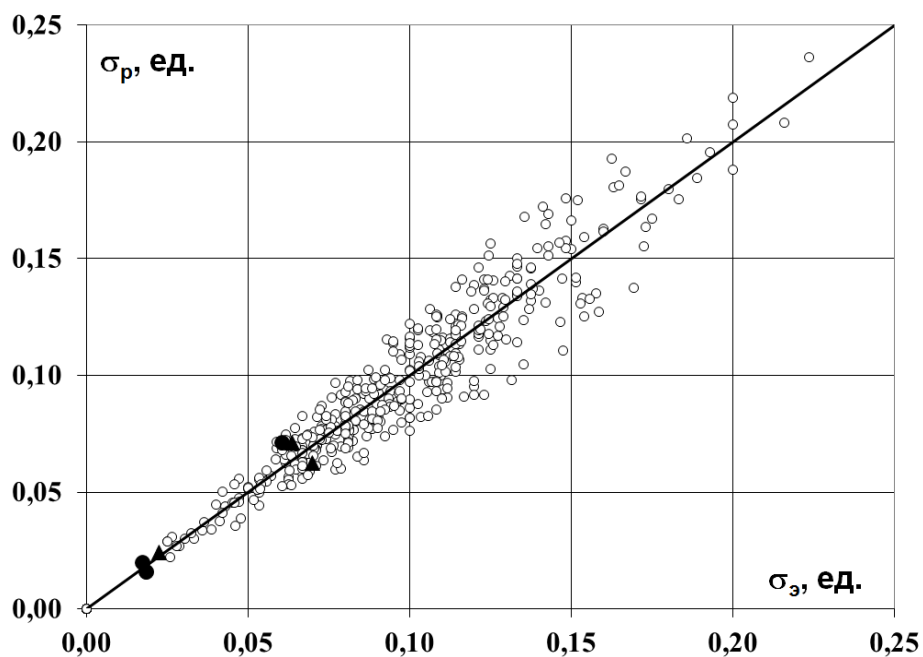


Рисунок 3.1. Сопоставление экспериментальных (σ_z) и рассчитанных по уточненной методике (σ_p) значений степени термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке: точки – результаты расчетов по выражениям (3.1) – (3.3) при условиях опытов; обозначения точек соответствуют рисунку 2.9; линия – совпадение расчетных и экспериментальных данных

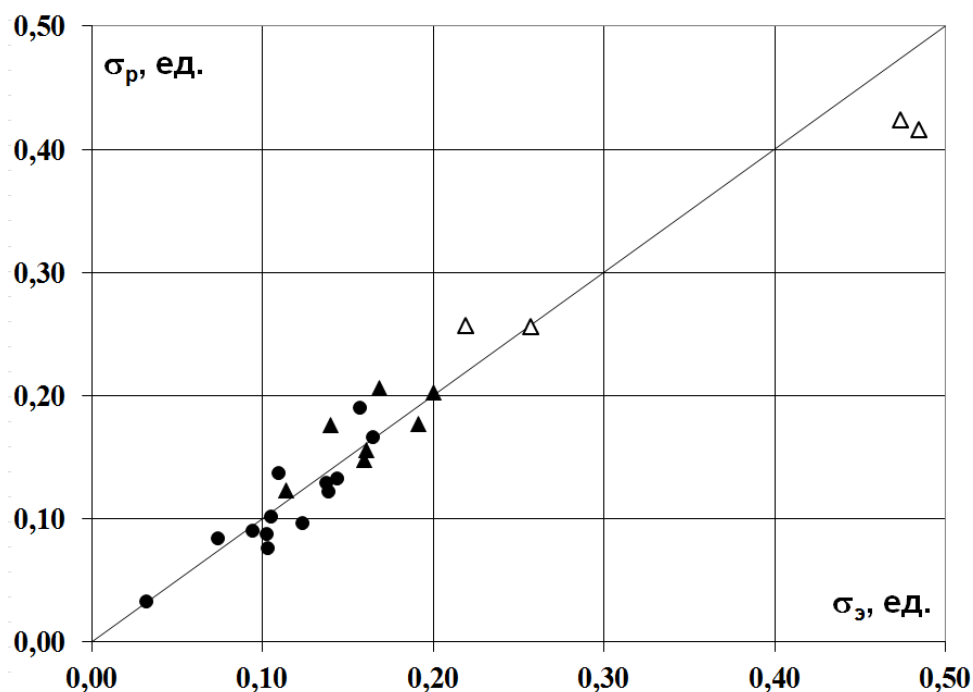


Рисунок 3.2. Сопоставление экспериментальных (σ_z) и рассчитанных по уточненной методике (σ_p) значений степени термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах с паровым барботажем в баке: обозначения точек соответствуют рисунку 2.11; прочие обозначения те же, что на рисунке 3.1

3.2. Методика прогнозирования pH деаэрированной воды

В гл. 1 показано, что водородный показатель pH относится к нормируемым химическим показателям качества деаэрированной воды. В общем случае необходимо организовывать режим термической деаэрации таким образом, чтобы на выходе из деаэрационной установки получать воду с заданными значениями pH. Для условий атмосферной деаэрации pH деаэрированной воды обычно должен составлять не менее 8,3. Это обусловлено тем, что такой режим соответствует относительно большим значениям степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторном баке и, соответственно, сравнительно большой эффективности деаэратора по удалению из воды химически связанных форм угольной кислоты. В этом случае при дальнейшем (после деаэратора) нагреве воды в бойлерах или водогрейных котлах (деаэрация подпиточной воды теплосети), или паровых котлах (деаэрация добавочной воды паровых котлов) выход свободного диоксида углерода в процессах термического разложения гидрокарбонатов уменьшается, что благоприятно сказывается на эффективности защиты металлов энергетического оборудования от коррозии [42].

Потребность в расчетной оценке pH деаэрированной воды по заданным конструктивным характеристикам деаэратора, теплотехническим показателям режима его работы, а также заданным химическим параметрам качества исходной воды возникает в процессе проектирования деаэрационных установок и в условиях их эксплуатации при решении задач режимной наладки. Наличие соответствующей методики расчета позволило бы существенно повысить степень обоснованности проектных решений, а также уменьшить эксплуатационные затраты на проведение режимно-наладочных работ. Таким образом, задача разработки методики прогнозирования pH воды, вырабатываемой термическими деаэраторами атмосферного давления, является актуальной.

За основу при разработке указанной методики примем методику оценки эффективности декарбонизации воды деаэраторами атмосферного давления на основе измерений общей щелочности и pH исходной воды и pH деаэрированной воды, разработанную под руководством профессора Б.М. Ларина [142, 143]. Основные положения этой методики описаны в гл. 1, необходимые расчеты выражения – формулы (1.33–1.36).

В рассматриваемой авторами [142, 143] постановке задачи известны результаты измерения общей щелочности химически очищенной воды ($\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$, мг-экв/дм³), водородных показателей деаэрированной и химически очищенной воды ($\text{pH}_\text{д}$ и $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$) и требуется рассчитать общий эффект декарбонизации воды в деаэраторе $\Delta\text{CO}_{2,\text{д}}$. В нашем же случае решается обратная задача – прогнозирование значений pH деаэрированной воды при заданных значениях $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$ и $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$, известной конструкции деаэратора и значениях режимных параметров.

Для решения поставленной задачи решим систему уравнений (1.33) и (1.34) относительно $10^{\text{pH}_\text{д}}$. Общий вид полученного квадратного уравнения представлен выражениями (3.10) – (3.13). Промежуточные результаты решения системы уравнений (1.33) и (1.34) представлены выражениями (3.6) – (3.9).

$$\begin{aligned} C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} = & \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^{-3} - \\ & - \frac{11,24 \cdot \left[\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^{-3} - 10^{\text{pH}_\text{д}-14} - 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + 10^{-\text{pH}_\text{д}} \right]}{\frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11-\text{pH}_\text{д}} + 11,24} - \\ & - 10^{\text{pH}_\text{д}-14} - 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + 10^{-\text{pH}_\text{д}}; \end{aligned} \quad (3.6)$$

Приведем выражение (3.6) к следующему виду:

$$\begin{aligned} C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} + C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} \cdot 11,24 - \\ - \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{-3} - 11,24 \cdot \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^{-3} + \\ + 11,24 \cdot \left[\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^{-3} - 10^{\text{pH}_\text{д}} \cdot 10^{-14} - 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} \right] + \\ + \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} \cdot 10^{\text{pH}_\text{д}} \cdot 10^{-14} + 11,24 \cdot 10^{\text{pH}_\text{д}} \cdot 10^{-14} + \\ + \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} \cdot 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + 11,24 \cdot 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} - \\ - \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} - 11,24 \cdot \frac{1}{10^{\text{pH}_\text{д}}} = 0. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Умножим левую и правую часть уравнения (3.7) на $\frac{10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}}}{11,24}$, получим:

$$\begin{aligned}
 & \frac{10^{\text{pH}_\text{д}}}{11,24} \cdot C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} + C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} \cdot 10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}} - \\
 & - \frac{10^{\text{pH}_\text{д}}}{11,24} \cdot \Pi_{\text{o}}^{\text{хов}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{-3} - 10^{3 \cdot \text{pH}_\text{д}} \cdot 10^{-14} - \\
 & - 10^{-\text{pH}_{\text{хов}}} \cdot 10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}} + \frac{10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}}}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot 10^{-14} + \\
 & + 10^{3 \cdot \text{pH}_\text{д}} \cdot 10^{-14} + \frac{10^{\text{pH}_\text{д}}}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot 10^{-\text{pH}_{\text{хов}}} + 10^{-\text{pH}_{\text{хов}}} \cdot 10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}} - \\
 & - \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} = 0.
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

После упрощения (3.8) получим следующее квадратное уравнение:

$$\begin{aligned}
 & 10^{2 \cdot \text{pH}_\text{д}} \cdot \left[C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} + \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{-3} \right] + \\
 & + 10^{\text{pH}_\text{д}} \cdot \left[\frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \cdot \left(C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} - \Pi_{\text{o}}^{\text{хов}} \cdot 10^{-3} + 10^{-\text{pH}_{\text{хов}}} \right) \right] + \\
 & + \left[-\frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \right] = 0.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Перепишем уравнение (3.9) в виде:

$$a \left(10^{\text{pH}_\text{д}} \right)^2 + b \cdot 10^{\text{pH}_\text{д}} + c = 0, \tag{3.10}$$

где

$$a = C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} + \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{-3}, \tag{3.11}$$

$$b = \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11} \times \left(C_{\text{HCO}_3^-}^\text{д} - \Pi_{\text{o}}^{\text{хов}} 10^{-3} + 10^{-\text{pH}_{\text{хов}}} \right), \tag{3.12}$$

$$c = -\frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_\text{II}}{f_\text{I}} \cdot 10^{11}. \tag{3.13}$$

Решение полученного уравнения позволяет найти искомое значение pH_d . Итоговое расчетное выражение при этом выглядит следующим образом:

$$pH_d = \lg \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right). \quad (3.14)$$

Для расчета pH_d по уравнению (3.14) с учетом выражений (3.11) – (3.13) необходимо определить концентрацию гидрокарбонатов $C_{HCO_3^-}^d$. Для этого используем разработанную в гл. 2 и п. 3.1 модель процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах с учетом влияния гидродинамической обстановки в баке. Отметим, что для выражений (3.10) и (3.11) следует использовать значение $C_{HCO_3^-}^d$ из выражения $C_{HCO_3^-}^d = C \cdot 10^{-6}$, где концентрация C определена по выражению (3.2) и измерена в мкг-экв/дм³. Кроме того, общая щелочность исходной воды Σ_0^{XOB} в наших расчетах также измеряется в мкг-экв/дм³.

С учетом этого перепишем основные расчетные выражения для коэффициентов a и b квадратного уравнения в обозначениях и с учетом единиц измерения, использованных нами ранее в гл. 2 и п. 3.1:

$$a = C \cdot 10^{-6} + \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{-3}, \quad (3.15)$$

$$b = \frac{1}{11,24} \cdot \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{11} \times \left(C \cdot 10^{-6} - \Sigma_0^{XOB} 10^{-6} + 10^{-pH_{XOB}} \right), \quad (3.16)$$

где Σ_0^{XOB} и C измерены в мкг-экв/дм³.

С использованием полученной методики применительно к условиям имеющихся опытов получены расчетные значения pH деаэрированной воды. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными выполнено на рисунке 3.3. Прогнозные значения pH деаэрированной воды определены по выражениям (3.14), (3.15), (3.16) и (3.13), значения концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воды приняты из расчетов степени термического разложения гидрокарбонатов, выполненных в п. 3.1.

Относительные среднеквадратичные отклонения расчетных значений pH от экспериментальных составили: 1,9 % для деаэраторов с паровым барботажем в баке и 2,0 % для деаэраторов без барботажа в баке.

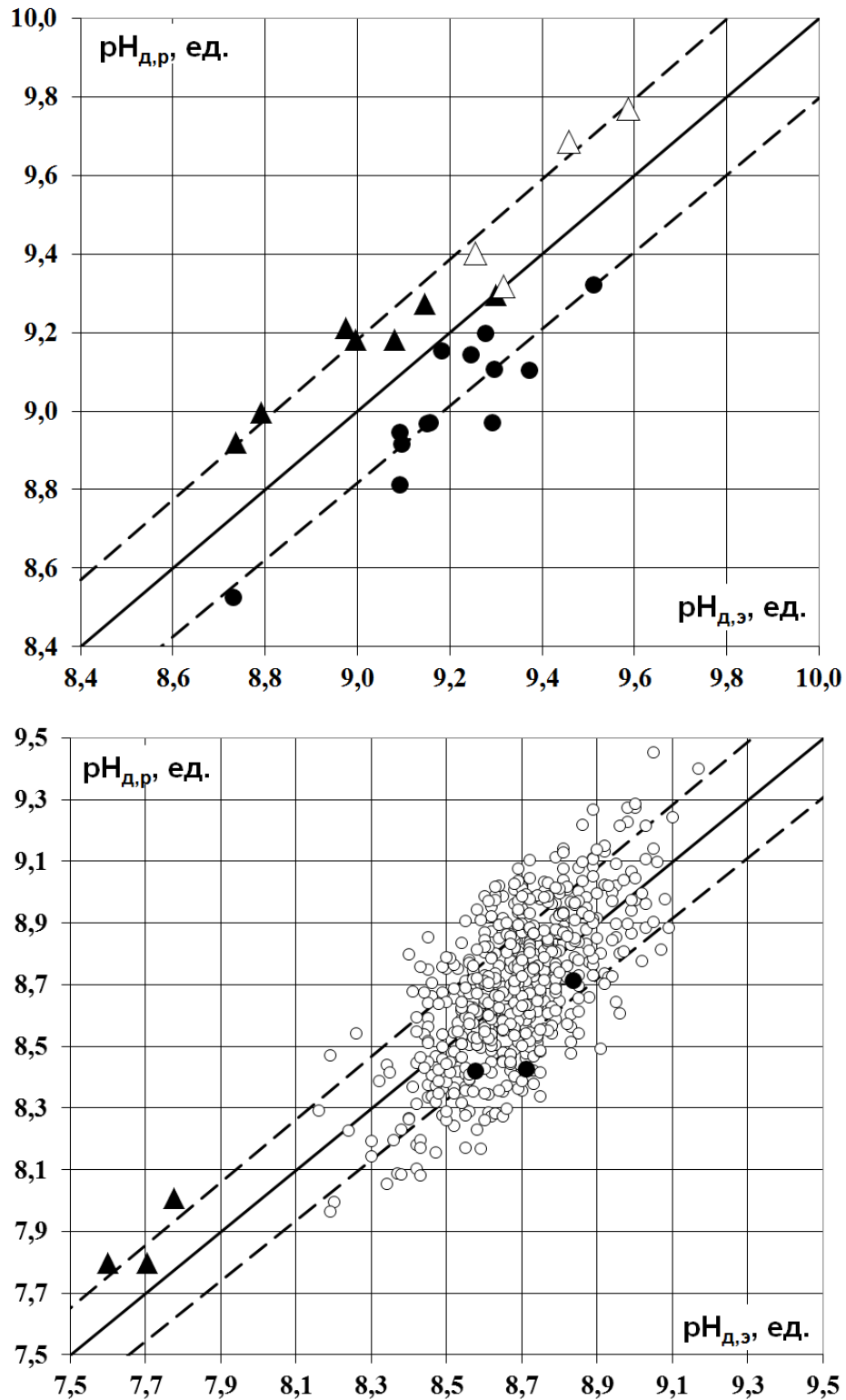


Рисунок 3.3. Сопоставление экспериментальных значений pH деаэрированной воды для деаэраторов с паровым барботажем в баке (вверху) и без него (внизу) с результатами расчета по уточненной методике: $pH_{д,р}$ и $pH_{д,э}$ – соответственно расчетные и экспериментальные значения pH деаэрированной воды; сплошные линии – совпадение расчетных и экспериментальных данных; пунктирные линии показывают среднее квадратичное отклонение $pH_{д,р}$ от $pH_{д,э}$; точки – результаты расчета в условиях отдельных опытов для деаэраторов разных моделей; обозначения точек соответствуют рисункам 2.9 и 2.11

Адекватность полученной методики расчета рН деаэрированной воды докажем с использованием критерия Фишера [151 – 156]:

– для выборки по деаэраторам без парового барботажа в баке остаточная дисперсия составила $3,11 \cdot 10^{-2}$, дисперсия относительно среднего 0,31; соответственно критерий Фишера равен 9,9 при критическом (табличном) значении 1,1 (уровень значимости здесь и далее принят равным 0,05);

– для выборки по деаэраторам с паровым барботажом в баке получены следующие результаты статистического анализа: остаточная дисперсия составила $3,45 \cdot 10^{-2}$, дисперсия относительно среднего – 3,70, критерий Фишера – 107,2 при критическом значении равным 2,0.

Нормируемая погрешность инструментального определения рН воды потенциометрическим методом [159, 160] варьируется от 0,05 до 0,2 ед. рН, что при рассматриваемых диапазонах измерения рН в деаэраторе эквивалентно погрешности от 0,6 до 2,4 %. Таким образом, полученная методика прогнозирования значений рН деаэрированной воды характеризуется погрешностью, практически совпадающей с метрологическими характеристиками средств измерения рН воды. Это можно признать удовлетворительным результатом.

Методика прогнозирования рН деаэрированной воды может быть применена и в упрощенном виде, если не учитывать зависимость значений константы K скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, от гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. В этом случае для расчета концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде следует использовать исходный комплекс значений K по данным рисунка 1.11, характеризующийся существенно большим разбросом значений относительно среднего, чем уточненные данные (таблица 2.8). При расчете по упрощенной методике время пребывания воды в баке определяется как время полного вытеснения, т.е. путем деления водяного объема деаэратора на объемный расход воды через него. Полученные при использовании упрощенной методики результаты приведены на рисунке 3.4.

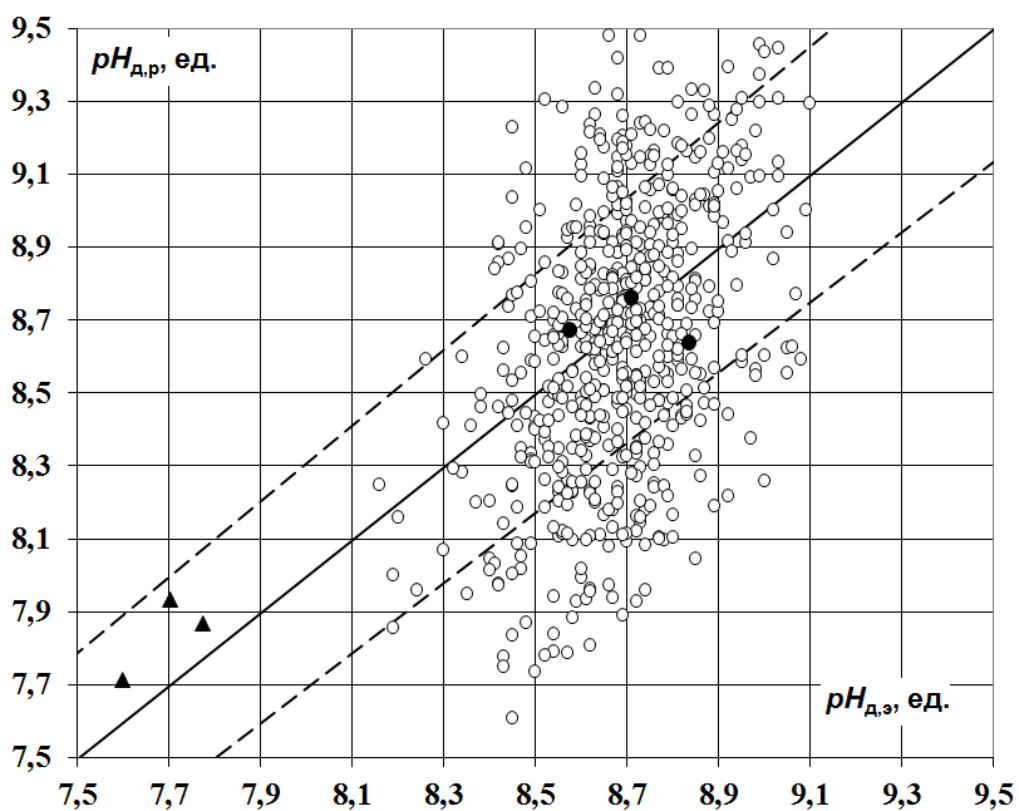
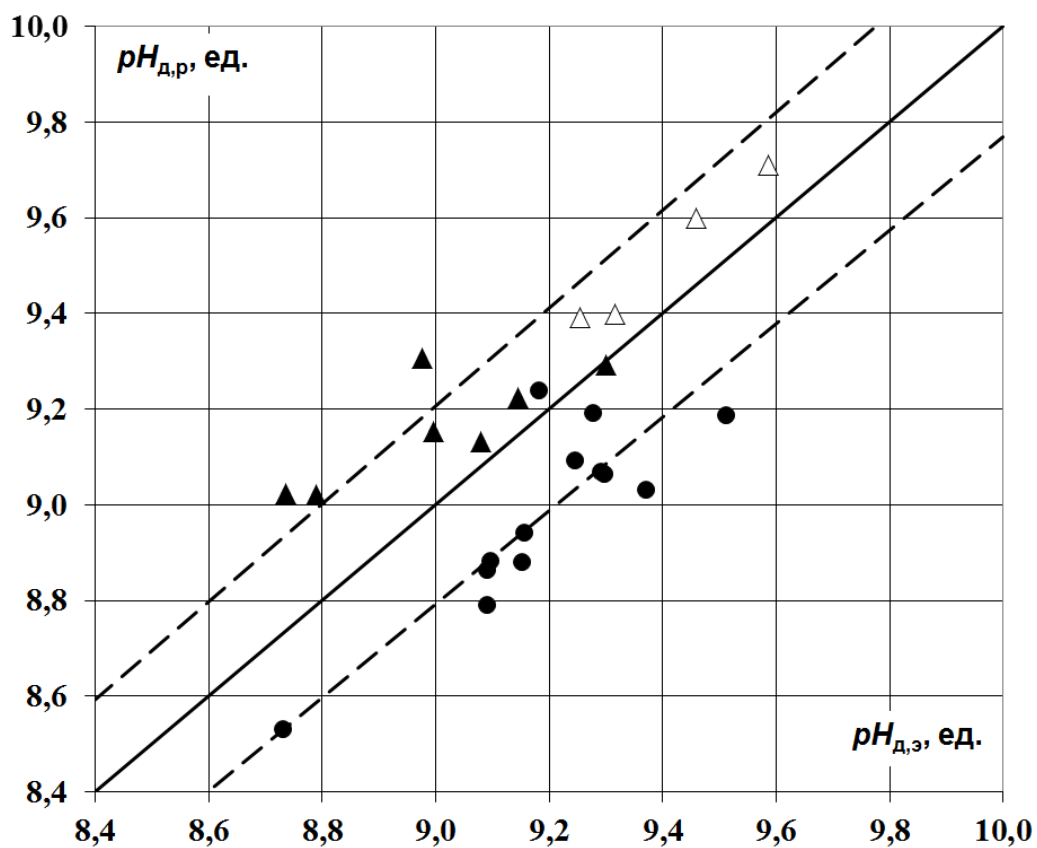


Рисунок 3.4. Сопоставление экспериментальных значений рН деаэрированной воды для деаэраторов с паровым барботажом в баке (вверху) и без него (внизу) с результатами расчета по упрощенной методике: обозначения соответствуют рисунку 3.3

Относительные среднеквадратичные отклонения расчетных значений рН от экспериментальных при использовании упрощенной методики составили: 2,3 % для деаэраторов с паровым барботажем в баке и 3,9 % для деаэраторов без барботажа в баке.

Статистическую значимость перехода от упрощенной методики прогнозирования рН к уточненной также оценим по критерию Фишера. Для деаэраторов без барботажа критерий Фишера, характеризующий переход от упрощенной методики к уточненной составляет 3,8 при критическом (табличном) значении 1,14, то есть результаты расчета по уточненной методике статистически значимо отличаются от результатов расчета по упрощенной методике.

Для деаэраторов с барботажем в баке критерий Фишера равен 1,47 при критическом значении 1,99, то есть переход от упрощенной методики к уточненной не дает статистически значимых преимуществ. Как и для этапа расчета степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах (см. п. 3.1), причина этого заключается в том, что используемые в расчетах уточненные значения константы скорости реакции K статистически неотличимы от значений до уточнения. Однако и в данном случае подтверждается, что степень точности получаемых расчетных значений рН воды соответствует точности используемых в испытаниях методов и средств химического контроля.

3.3. Методика прогнозирования массовой концентрации в деаэрированной воде свободной углекислоты

Массовая концентрация свободной углекислоты так же, как и водородный показатель рН относится к нормируемым химическим показателям качества деаэрированной воды.

При относительно малых значениях рН деаэрированной воды (конкретные значения определяются технологической системой, в составе которой работает деаэратор) возникает необходимость в определении концентрации свободной углекислоты. Для этого снова обратимся к методике, разработанной в ИГЭУ под руководством профессора Б.М. Ларина [142, 143]. Система уравнений, описывающих химическое равновесие в деаэрированной воде, приводит к следующей зависимо-

сти для расчета массовой концентрации свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода [142, 143]:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{д}} = 44000 \left(2,2 \cdot 10^{6-\text{pH}_\text{д}} C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}} \right) = 96,8 \cdot 10^{9-\text{pH}_\text{д}} C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}}, \quad (3.17)$$

где $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$, мг/дм³ – искомая массовая концентрация свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода; $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}}$, моль/дм³ – концентрация гидрокарбонатов в охлажденной пробе деаэрированной воды; $\text{pH}_\text{д}$ – показатель pH в охлажденной пробе деаэрированной воды.

Значения $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}}$ и $\text{pH}_\text{д}$ для расчета по (3.17) будем принимать из методики прогнозирования pH деаэрированной воды (см. п. 3.2). С учетом обозначений и единиц измерения параметров, введенных нами ранее в гл. 2 и п. 3.1, а также учитывая, что $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}} = C \cdot 10^{-6}$, расчетное выражение (3.17) можно переписать в виде

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{д}} = 96,8 \cdot 10^{3-\text{pH}_\text{д}} C, \quad (3.18)$$

где концентрация C определена по выражению (3.2) и измерена в мкг-экв/дм³.

На рисунке 3.5 выполнено сопоставление результатов расчета $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ по (3.18) с экспериментальными данными по деаэраторам без барботажа в баке (см. гл. 1). По деаэраторам с барботажем такое сопоставление не выполняется, поскольку в ходе экспериментальных исследований не выявлено режимов работы с подачей барботажного пара, характеризующихся значениями pH_{25} деаэрированной воды менее 8,33 (при значениях pH_{25} более указанного количественный химический анализ на содержание свободной углекислоты не выполнялся). На рисунке 3.5 отражены только те результаты, по которым в [125] имеются экспериментальные значения концентрации свободной углекислоты, а также достаточно данных для расчета $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{д}}$ и $\text{pH}_\text{д}$ по методике, изложенной в п. 3.2.

Характеристики точности полученной методики прогнозирования массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде: среднеквадратическое отклонение расчетных данных от экспериментальных при использовании упрощенной методики расчета pH деаэрированной воды составляет 65,6 %; при использовании уточненной методики – 44,3 %. Оценка статистической значимости

перехода при расчете $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ от упрощенной к уточненной методике не выполняется ввиду малости размера выборки.

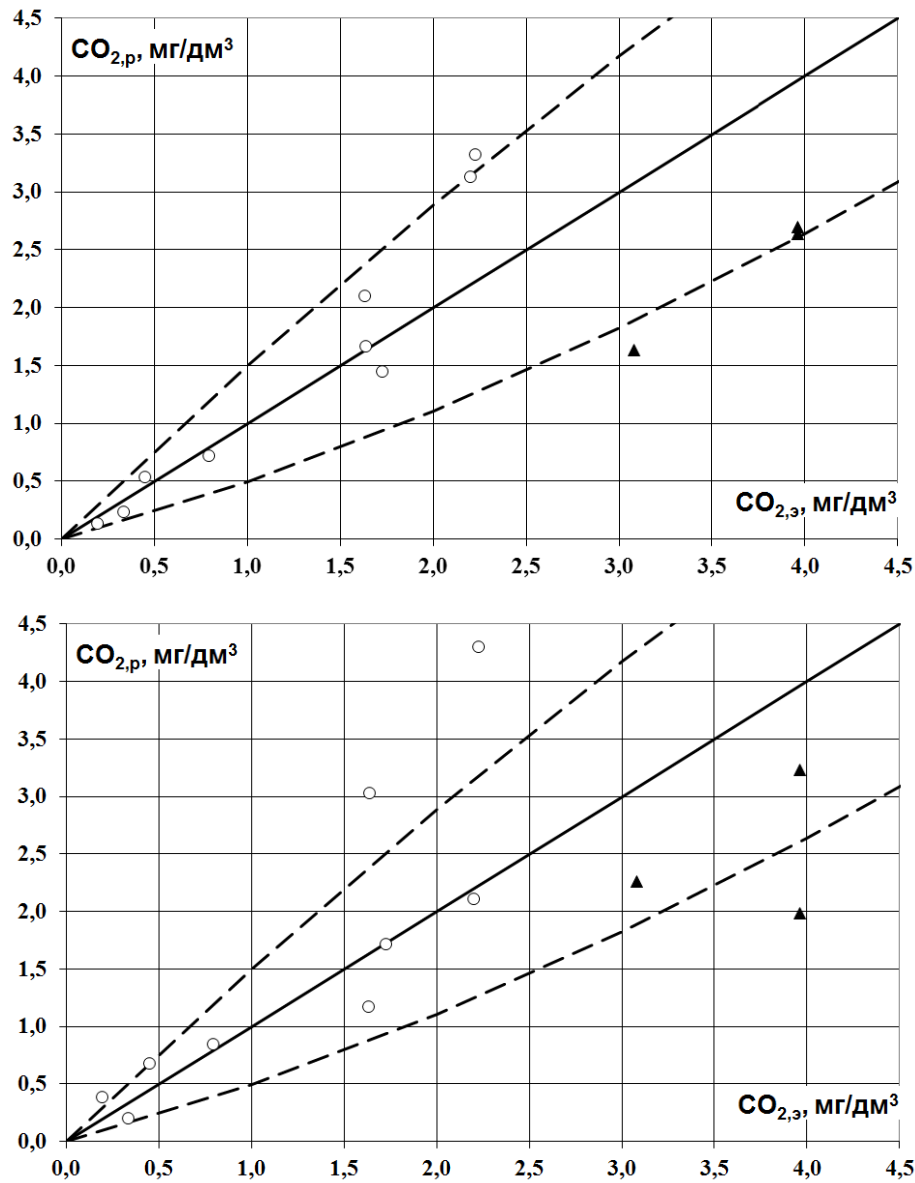


Рисунок 3.5. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений массовой концентрации свободной углекислоты для деаэраторов без парового барботажа в баке: сверху – при использовании $\text{pH}_{\text{д}}$, рассчитанных по уточненной методике; внизу – при использовании $\text{pH}_{\text{д}}$, рассчитанных по упрощенной методике; $\text{CO}_{2,\text{p}}$ и $\text{CO}_{2,\text{э}}$ – соответственно расчетные и экспериментальные значения массовой концентрации свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода в деаэрированной воде; сплошные линии – совпадение расчетных и экспериментальных данных; пунктирные линии показывают границы доверительного интервала, обусловленного нормативными характеристиками точности метода измерения концентрации свободной углекислоты [161]; точки – результаты расчета в условиях отдельных опытов для деаэраторов разных моделей; обозначения точек соответствуют рисунку 3.3

Результаты проведенного анализа позволяют заключить, что при использовании разработанной уточненной методики расчета концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке удастся прогнозировать значения массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде с точностью, сопоставимой с нормативной погрешностью соответствующего метода количественного химического анализа. Однако для детальной статистической оценки точности полученной методики требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Разработана методика расчета степени термического разложения гидрокарбонатов с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке, предусматривающая использование уточненных значений констант скорости реакции и расчет с использованием специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости различных значений времени пребывания разных элементарных объемов воды в деаэраторном баке. Предложенная уточненная методика позволила существенно увеличить точность прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов: 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. Статистическая значимость перехода от упрощенной методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов к уточненной для деаэраторов без барботажа в баке доказана по критерию Фишера. Для деаэраторов с барботажем в баке уточнение статистически незначимо, однако точность получаемых при этом расчетных данных соответствует точности используемых в испытаниях методов и средств теплотехнического и химического контроля.

2. Путем синтеза разработанной методики расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов и известной методики оценки эффективности декарбонизации воды в деаэраторах составлена методика прогнозирования рН деаэрированной воды и содержания в ней свободной углекислоты при заданных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора.

Адекватность полученной методики расчета рН деаэрированной воды доказана с использованием критерия Фишера. Адекватность методики расчета массовой концентрации свободной углекислоты не оценена ввиду малости размера выборки. Полученная методика характеризуется следующими показателями точности:

- среднеквадратическое отклонение расчетных значений рН деаэрированной воды от экспериментальных составило 1,9 % для деаэраторов с паровым барботажом 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 оценено для деаэраторов без барботажа в баке и составило 44,3 %, что сопоставимо с нормируемой погрешностью соответствующего метода количественного химического анализа; по деаэраторам с барботажом в баке проверка точности не выполнялась из-за отсутствия соответствующих экспериментальных данных.

3. Выполнена проверка точности методики прогнозирования рН деаэрированной воды и содержания в ней свободной углекислоты при использовании упрощенной методики расчета кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов. Выявлено, что среднеквадратическое отклонение расчетных значений рН деаэрированной воды от экспериментальных при этом увеличивается до 2,3 % для деаэраторов с паровым барботажом в баке и 3,9 % для деаэраторов без барботажа, а среднеквадратическое отклонение расчетных значений массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде от экспериментальных увеличивается до 65,6 %. Статистическая значимость перехода от упрощенной методики прогнозирования рН к уточненной для деаэраторов без барботажа в баке доказана по критерию Фишера. Для деаэраторов с барботажом в баке уточнение статистически незначимо, как и в случае с расчетом степени термического разложения гидрокарбонатов.

Глава 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

4.1. Общая характеристика направлений практической реализации результатов работы

Практическая реализация результатов работы проводилась по следующим направлениям:

1 – разработка алгоритма прогнозирования 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 разработанного для прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» 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 прогнозирования показателей 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 прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов технических решений по модернизации действующей деаэрационной установки питательной воды котлов-утилизаторов парогазовой ТЭС в г. Родники Ивановской обл.;

Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения.

Далее приведена характеристика каждого из указанных направлений практической реализации результатов работы.

4.2. Разработка алгоритма прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах

При разработке алгоритма прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах за основу приняты методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе, значений pH деаэрированной воды и массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде, описанные в гл. 3.

Разработанный алгоритм расчета предназначен для решения задач проектирования и повышения эксплуатационной эффективности атмосферных деаэрационных установок и обеспечивает нахождение значений степени термического разложения гидрокарбонатов, массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде и водородного показателя пробы деаэрированной воды за деаэратором 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. Укрупненная блок-схема расчетного алгоритма приведена на рисунке 4.1, где использованы следующие обозначения: $D_{\text{вн}}$ – диаметр бака внутренний; L – длина бака; $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$ – соответственно расходы воды на входе и выходе бака; $t_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в бак; $G_{\text{бп}}$ – расход пара на барботаж в баке; H – уровень воды в баке; $h_{\text{бп}}$ – энтальпия барботажного пара; $P_{\text{бп}}$ – давление барботажного пара; P_6 – давление в надводном пространстве бака; $\text{Щ}_0^{\text{вх}}$, $\text{Щ}_0^{\text{вых}}$ и $\text{Щ}_0^{\text{бп}}$ – общая щелочность соответственно воды на входе и выходе бака и барботажного пара на выходе в бак; $C_{\text{CO}_2}^{\text{вх}}$, $C_{\text{CO}_2}^{\text{вых}}$, $C_{\text{CO}_2}^{\text{бп вх}}$ – массовые концентрации свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода соответственно в воде на входе и выходе бака и барботажном паре на входе в бак; R – параметр, определяющий режим расчета; τ_i – время пребывания i -го элементарного объема воды в баке; τ – время полного вытеснения; m – число струек, на которое разбивается область течения при моделировании гидродинамической обстановки в баке; K – константа скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов; n – порядок реакции; C_0 , C , C_i – концентрация гидрокарбонатов в воде соответственно на входе в бак, на выходе из бака средняя, на выходе из бака в i -й струйке; σ – степень термического разложения гидрокарбонатов; $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$ – общая

щелочность воды перед деаэратором; pH_d и pH_{XOB} – pH деаэрированной воды и воды на входе в деаэратор.

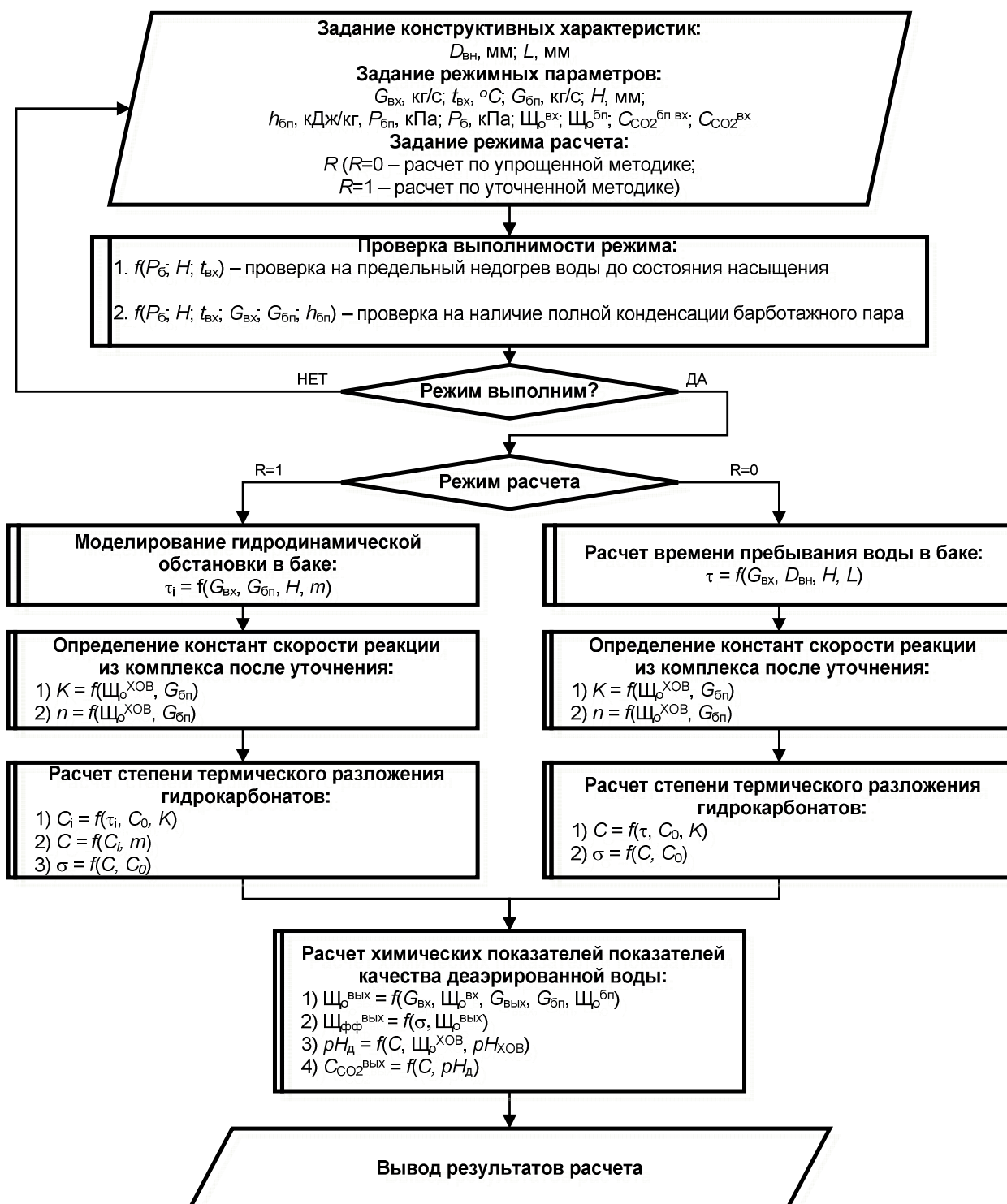


Рисунок 4.1. Блок-схема алгоритма расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторном баке атмосферного деаэратора: обозначения приведены в тексте

Исходными данными являются значения конструктивных и режимных параметров, перечень которых приведен на рисунке 4.1. Значения режимных параметров теплоносителя на входе в деаэрационный бак в общем случае определяются по результатам расчета деаэрационной колонки.

Собственно расчету показателей эффективности декарбонизации воды в деаэрационном баке предшествует проверка выполнимости режима по следующим направлениям:

- проверка на предельный недогрев воды на входе в бак до температуры насыщения, который по условию отсутствия предпосылок для возникновения гидроударов должен составлять не более $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]; при выявлении режима работы деаэрационного бака с величиной недогрева, превышающей предельную величину, выводится сообщение с предупреждением;

- для барботажных режимов работы деаэрационного бака производится проверка на наличие полной конденсации барботажного пара; данные режимы барботажного устройства считаются нерасчетными и не должны допускаться в эксплуатации, поскольку характеризуются низкой эффективностью.

После проверки на выполнимость режима, если выбран расчет по уточненной методике, выполняется этап моделирования гидродинамической обстановки с использованием сторонних программных средств вычислительной гидрогазодинамики (в рассматриваемом случае – программного комплекса FlowVision), в ходе которого определяется распределение времени пребывания выделенных элементарных объемов воды в деаэрационном баке, τ_i . Если же выбран расчет по упрощенной методике, не учитывающей влияние гидродинамической обстановки в баке на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов, то вычисляется время пребывания воды в деаэраторе как для реактора идеального вытеснения – путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак.

В соответствии с выбранным режимом расчета определяются значения констант скорости реакции K , моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов, и соответствующий порядок реакции n ; для этого используются данные таблицы 2.8.

Собственно алгоритм расчета степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе представлен выражениями (3.1)–(3.3), если расчет выполняет-

ся по разработанном уточненной методике. Если же используется упрощенная методика, то по формулам, аналогичным (3.1), с заменой τ_i на время полного вытеснения τ вычисляется непосредственно значение концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде; выражение для расчета степени термического разложения гидрокарбонатов (3.3) для обоих режимов расчета одинаково.

Алгоритм расчета химических показателей качества деаэрированной воды представлен следующими этапами расчета:

- расчет общей щелочности воды на входе из бака $\text{Щ}_o^{\text{вх}}$ по уравнению материального баланса (3.4);
- определение щелочности по фенолфталеину воды на выходе из бака $\text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{вх}}$ по выражению (3.5);
- расчет водородного показателя рН пробы деаэрированной воды по выражениям (3.14), (3.15), (3.16) и (3.13);
- вычисление массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде по выражению (3.18).

4.3. Разработка модуля «Декарбонизация» прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды»

Программная реализация разработанного алгоритма выполнена в виде модуля «Декарбонизация» в составе прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды».

Программный комплекс «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» [162] разработан на кафедре ТЭС ИГЭУ Ледуховским Г.В. и Коротковым А.А. под руководством Барочкина Е.В. Данный программный комплекс позволяет по значениям конструктивных и режимных параметров атмосферных деаэраторов струйно-барботажного типа рассчитать параметры деаэрированной воды на входе и выходе каждого отдельного конструктивного элемента.

Работа с указанным программным комплексом подразумевает выполнение следующих этапов [125]:

1) разработка расчетной схемы деаэратора; цель данного этапа состоит в анализе конструктивной схемы деаэратора, выделении отдельных элементов с определением их типа и конструктивных характеристик, а также задании схемы движения потоков теплоносителей в виде матрицы коммутации;

2) задание параметров внешних потоков деаэратора;

3) собственно расчет с возможностью просмотра и анализа полученных результатов.

Расчет процессов теплообмена и удаления растворенного кислорода из воды в струйных и барботажных элементах деаэрационной колонки, а также в деаэраторном баке производится с использованием математических моделей, разработанных Г.В. Ледуховским [18].

Расчет процессов декарбонизации воды в деаэраторных баках базируются на результатах исследований А.А. Короткова [125]. Этот модуль представляет интерес с точки зрения решаемых нами задач. Обобщенная схема алгоритма расчета, реализованная в модуле расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторном баке с затопленным барботажным устройством приведена на рисунке 4.2 [125].

Расчет по указанному выше алгоритму производится в два этапа.

На первом этапе, как и в разработанном в п. 4.2 алгоритме, производится проверка выполнимости режима на предельный недогрев воды на входе в бак до температуры насыщения и на наличие полной конденсации барботажного пара. После успешной проверки выполнимости режима выполняется расчетный блок, в котором реализован линейный алгоритм расчета следующих показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторных баках, оборудованных затопленными барботажными устройствами:

- степени термического разложения гидрокарбонатов σ ;
- общей щелочности воды на входе из бака $\text{Щ}_0^{\text{ВЫХ}}$;
- щелочности по фенолфталейну воды на выходе из бака $\text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{ВЫХ}}$;
- расхода ($G_{\text{CO}_2}^{\text{бп ВЫХ}}$) и массовой концентрации ($C_{\text{CO}_2}^{\text{бп ВЫХ}}$) свободного диоксида углерода в барботажном паре на выходе объема воды.

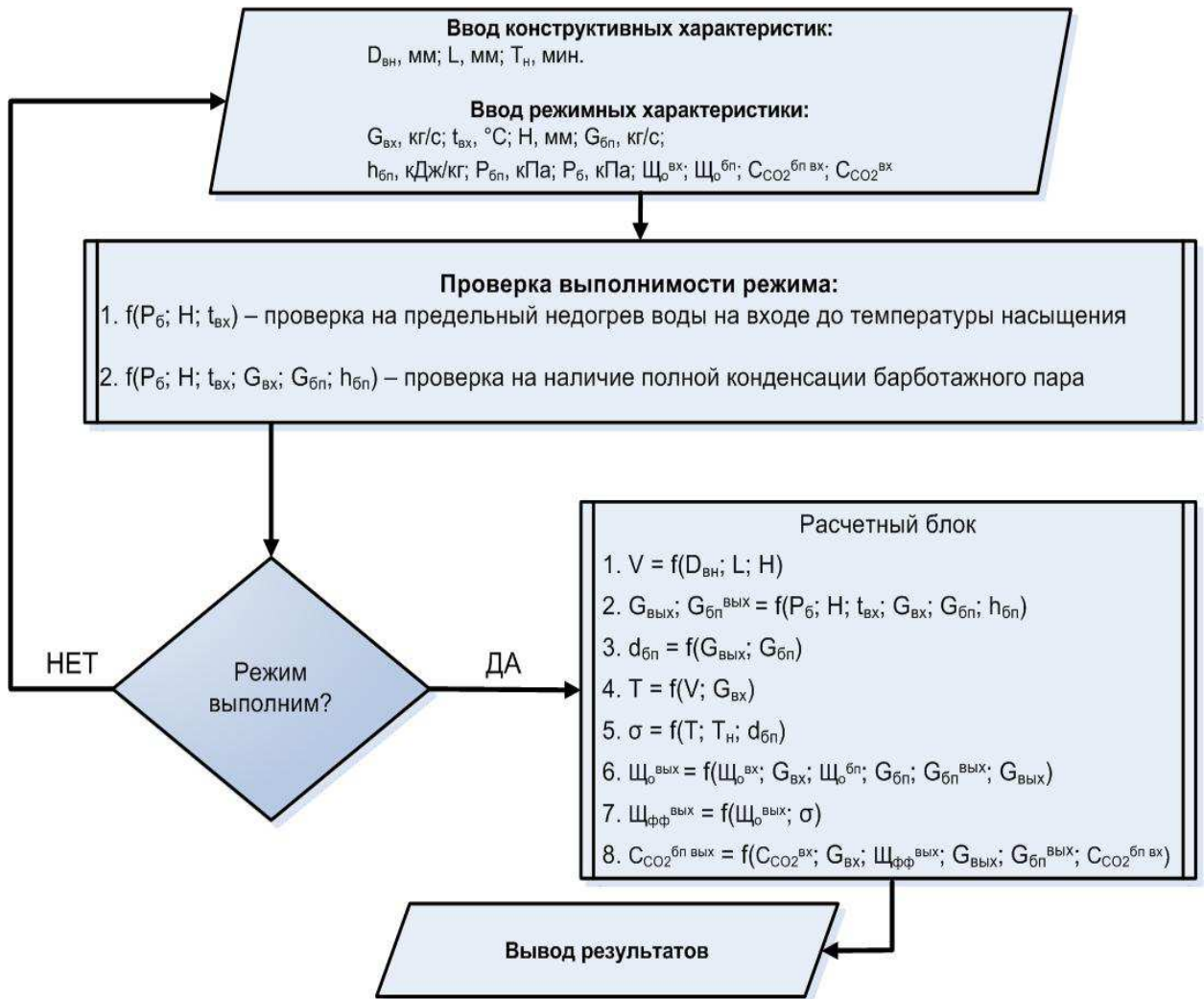


Рисунок 4.2. Блок-схема алгоритма, реализованного в модуле расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэрационном баке с затопленным барботажным устройством: T_n – номинальное время пребывания воды в баке (при номинальной производительности деаэратора и номинальном уровне воды в баке); $C_{CO_2}^{бп\text{ вых}}$ – массовая концентрация свободного диоксида углерода в барботажном пара на выходе объема воды; V – объем воды в баке; $d_{бп}$ – удельный расход пара на барботаж; T – время пребывания воды в баке; прочие условные обозначения соответствуют рисунку 4.1

Расчет степени термического разложения гидрокарбонатов выполняется по предложенной А.А. Коротковым [125] регрессионной зависимости (1.38) указанного параметра от удельного расхода пара на барботаж $d_{бп}$, кг/т, и времени пребывания воды в баке T . Данная двухпараметрическая регрессионная зависимость справедлива для деаэрационных баков, оборудованных барботажным устройством в виде перфорированного коллектора.

Анализ алгоритма расчета процессов декарбонизации воды в деаэрационных баках, приведенного на рисунке 4.2, и функциональности рассматриваемого про-

граммного комплекса в целом позволил выявить следующие недостатки, существенно ограничивающие его применимость при решении практически значимых задач:

- отсутствует возможность проведения расчета показателей эффективности работы атмосферных деаэраторов, работающих в режимах без парового барботажа в деаэрационных баках;

- отсутствует возможность расчета водородного показателя pH_{25} деаэрированной воды и массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде, являющихся нормируемыми показателями.

Разработанный в п. 4.2 алгоритм позволяет преодолеть эти недостатки.

Задачей настоящего этапа работы является доработка рассматриваемого программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» путем разработки нового модуля «Декарбонизация», реализующего разработанный в п. 4.2 алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в деаэрационном баке при наличии и отсутствии парового барботажа.

Разработанный программный модуль представлен двумя основными рабочими окнами: «Исходные данные» и «Результаты расчета», стандартными элементами меню «Файл», «База данных», «О программе», а также меню «Режим расчета», предназначенного для выбора упрощенной или уточненной методики расчета.

Расчет начинается с заполнения формы, содержащей исходные данные (рисунок 4.3). При этом данные могут быть занесены вручную или же загружены по кнопке «Загрузить из расчета деаэратора» при использовании модуля в составе программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды». Если выбран режим расчета по уточненной методике, как показано на рисунке 4.3, то необходимо занести в качестве исходных данных результаты моделирования гидродинамической обстановки в деаэрационном баке, реализованного во внешней программе (в данном случае – в программном комплексе FlowVision). Для этого реализована процедура обмена данными через файл в формате «.xls»: результаты моделирования течения воды в баке выгружаются из программного комплекса FlowVision файл Excel, откуда могут быть загруже-

ны в рассматриваемый модуль «Декарбонизация» по кнопке «Загрузить из файла...».

The screenshot shows the 'Декарбонизация' (Decarbonization) software window. It has a menu bar with 'Файл', 'Режим расчета', 'База данных', and 'О программе'. There are two tabs: 'Исходные данные' (selected) and 'Результаты расчета'. The 'Исходные данные' tab is divided into three sections: 'Общие данные по деаэрационному баку', 'Параметры воды на входе в деаэрационный бак', and 'Параметры барботажного пара'. The 'Результаты моделирования гидродинамической обстановки в баке' section contains a table with 12 rows of data. At the bottom, there are buttons for 'Загрузить из файла...', 'Очистить таблицу', 'Загрузить из расчета деаэратора', and 'Расчет'.

Нструйки	Время пребывания i-го объема в баке, с
1	637,93
2	657,05
3	680,6
4	681,173
5	681,97
6	683,68
7	683,91
8	684,24
9	685,73
10	686,05
11	686,6
12	690,045

Число струек: 551

Рисунок 4.3. Экранная форма, содержащая исходные данные к расчету по уточненной методике

Для выполнения расчета необходимо активировать кнопку «Расчет» (рисунок 4.3), после чего откроется закладка «Результаты расчета», содержащая при выбранном режиме расчета по уточненной методике следующую информацию (рисунок 4.4):

- результаты проверки исходных данных на наличие ошибок и выполнимости рассчитываемого режима;
- краткий отчет, содержащий значения основных рассчитываемых величин;
- представленные в графическом виде результаты статистического анализа по определению распределения числа линий тока и плотности распределения вероятности для времени пребывания элементарных объёмов воды в деаэрационном баке.

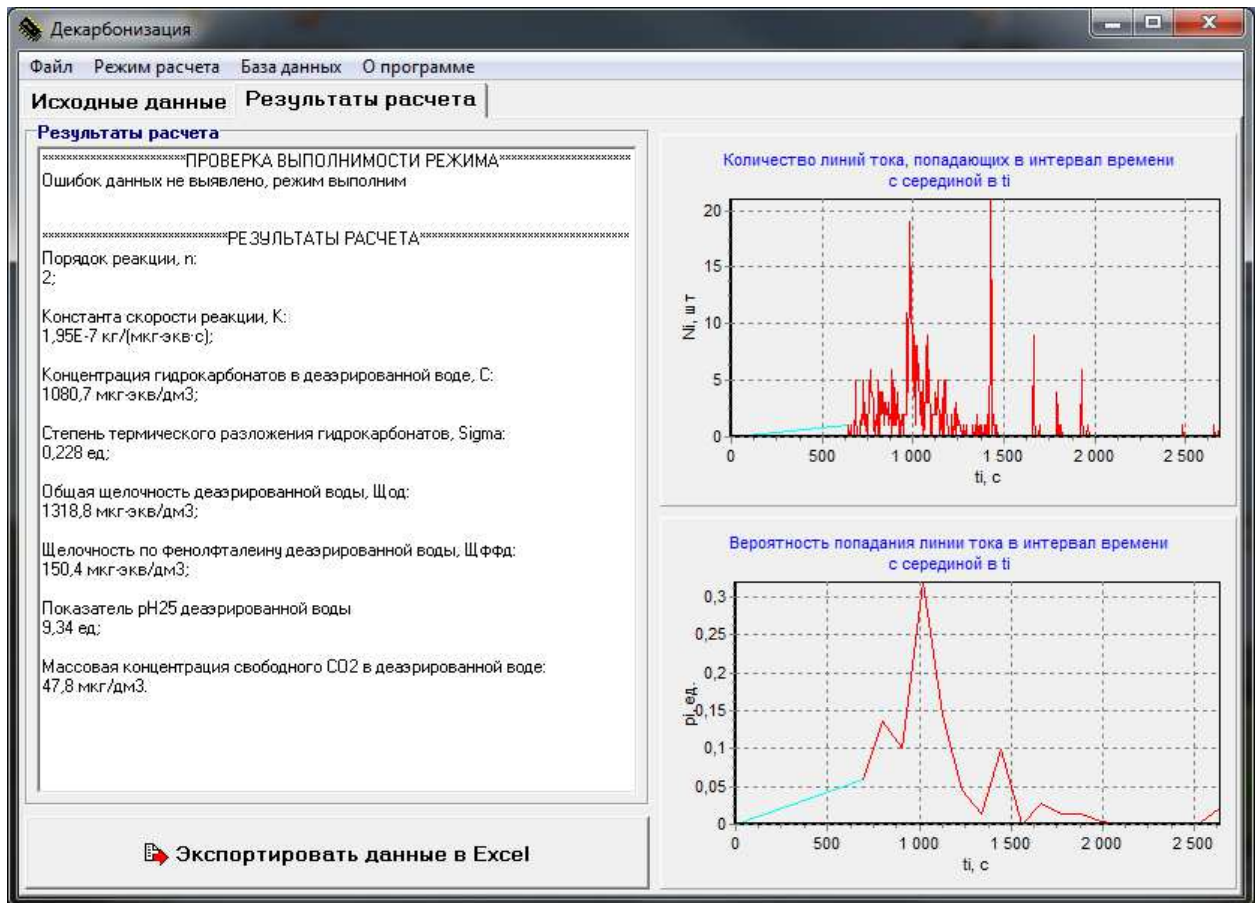


Рисунок 4.4. Экранная форма, содержащая результаты расчета по уточненной методике

Результаты расчета могут быть выгружены в MS Excel по кнопке «Экспортировать данные в Excel» для расчета встроенными средствами Excel параметров распределения: математического ожидания, медианы, коэффициента асимметрии распределения и др.

При выборе режима расчета по упрощенной методике на закладке «Исходные данные» вместо результатов моделирования гидродинамической обстановки в баке необходимо указать (или загрузить из результатов расчета деаэратора в программном комплексе «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды») дополнительные данные, необходимые для расчета среднего времени пребывания воды в баке, как времени полного вытеснения (рисунок 4.5).

Результаты расчета при выборе упрощенной методики (рисунок 4.6) не содержат статистических данных о распределении элементарных объемов воды по времени пребывания в баке.

Декарбонизация

Файл Режим расчета База данных О программе

Исходные данные Результаты расчета

Общие данные по деаэрационному баку

Уровень воды в баке, мм..... 2000

Абс. давление в надводном пространстве, кгс/см²..... 1,192

Параметры воды на входе в деаэрационный бак

Расход, кг/с..... 49,9

Температура, °C..... 99

Щелочность общая, мкг-экв/дм³..... 1400

Массовая концентрация CO₂ (своб), мкг/дм³..... 3233

pH 7,56

Параметры барботажного пара

Расход, кг/с..... 3,1

Температура, °C..... 194,5

Абс. давление, кгс/см²..... 1,613

Щелочность общая, мкг-экв/дм³..... 11

Массовая концентрация CO₂ (своб), мкг/дм³..... 1300

Дополнительные параметры:

Внутренний диаметр бака, мм..... 3000

Длина бака, мм..... 12450

Вариант днища деаэрационного бака..... Платное

Расчет

Загрузить из расчета деаэратора

Рисунок 4.5. Экранная форма, содержащая исходные данные к расчету по упрощенной методике

Декарбонизация

Файл Режим расчета База данных О программе

Исходные данные **Результаты расчета**

Результаты расчета

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНИМОСТИ РЕЖИМА

Ошибок данных не выявлено, режим выполнен

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Располагаемое время реакции: 1024 с;

Порядок реакции, n: 2;

Константа скорости реакции, K: 1,89E-7 кг/(мкг-экв-с);

Концентрация гидрокарбонатов в деаэрированной воде, C: 1101,5 мкг-экв/дм³;

Степень термического разложения гидрокарбонатов, Sigma: 0,213 ед;

Общая щелочность деаэрированной воды, Щод: 1318,8 мкг-экв/дм³;

Щелочность по фенолфталеину деаэрированной воды, Щфд: 140,6 мкг-экв/дм³;

Показатель pH25 деаэрированной воды 9,3 ед;

Массовая концентрация свободного CO₂ в деаэрированной воде: 53 мкг/дм³;

Экспортировать данные в Excel

Рисунок 4.6. Экранная форма, содержащая результаты расчета по упрощенной методике

Разработанный для прикладного программного комплекса «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» модуль «Декарбонизация», описание которого приведено в настоящем разделе, передан на безвозмездной основе в АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново), где используется при режимно-наладочных работах на деаэрационных установках котельных. Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения (см. Приложение). В акте отмечено, что *«при использовании программы в рамках режимно-наладочных работ обеспечивается экономия ресурсов и затрат рабочего времени специалистов на проведение теплехимических испытаний деаэрационных установок за счет сокращения количества опытов, упрощается поиск технологически целесообразных режимов работы деаэраторов, обеспечивающих нормативное химическое качество деаэрированной воды»*.

4.4. Расчет показателей декарбонизации для проектируемого деаэрата ДА-30 при ужесточенных относительно нормативов требованиях к химическому качеству деаэрированной воды

Выполняется решение с использованием разработанного алгоритма и средств его компьютерной поддержки практически значимой задачи прогнозирования показателей эффективности декарбонизации для проектируемого в ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) деаэрата ДА-30 с ужесточенными относительно нормативов требованиями к химическому качеству деаэрированной воды.

Целью работы являлась разработка конструкции и расчёт геометрических параметров деаэрационной колонки и затопленного барботажного устройства деаэрационного бака, которые позволят обеспечить требуемые параметры качества деаэрированной воды при следующих основных исходных данных:

- 1) параметры потоков воды, направляемых на деаэрацию:
 - поток 1 – расход $25 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура $55 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - поток 2 – расход $5 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура $90 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) средние по потокам показатели качества воды на входе в деаэрактор:
 - массовая концентрация растворенного кислорода 2500 мкг/дм^3 ;
 - pH 7,2;

- общая щелочность 0,5 мг-экв/дм³.

3) требуемые показатели работы деаэратора:

- массовая концентрация растворенного кислорода не более 10 мкг/дм³;
- pH не менее 8,7;
- рабочее давление в верхней части деаэрационной колонки 1,5 бар (абс.);

4) параметры греющего пара перед регуляторами давления:

- давление 2,4-2,6 бар (абс.);
- температура 140-143 °С.

5) геометрические характеристики деаэрационного бака:

- геометрический объем 10,2 м³;
- длина общая 5350 мм;
- длина цилиндрической части (без днищ) 4500 мм;
- диаметр внутренний 1600 мм.

Основные проектные технические решения по деаэрационной колонке показаны на рисунке 4.7.

Технологические расчеты колонки и деаэратора в целом, в которых определены характеристики процессов теплообмена и десорбции растворенного кислорода, выполнены в программном комплексе «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды». Расчеты были проведены для следующих режимов работы деаэрационной колонки:

- Режим №1 – проектный номинальный режим; на верхнюю тарелку подается турбинный конденсат с расходом 25 м³/ч и температурой 55 °С и напорный конденсат с расходом 5 м³/ч и температурой 90 °С; массовая концентрация растворенного кислорода в исходной воде 2500 мкг/дм³;

- Режим №2 – проектный номинальный режим с подачей напорного конденсата в нижнюю часть колонки; на верхнюю тарелку подается турбинный конденсат с расходом 25 м³/ч и температурой 55 °С, на вход в барботажный лист вводится также напорный конденсат с расходом 5 м³/ч и температурой 90 °С; массовая концентрация растворенного кислорода в исходной воде 2500 мкг/дм³;

- Режим №3 – режим минимальной гидравлической нагрузки; на верхнюю тарелку подается турбинный конденсат с расходом 7,5 м³/ч и температурой 55 °С и

напорный конденсат с расходом $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температурой 90°C ; массовая концентрация растворенного кислорода в исходной воде $2500 \text{ мкг}/\text{дм}^3$.

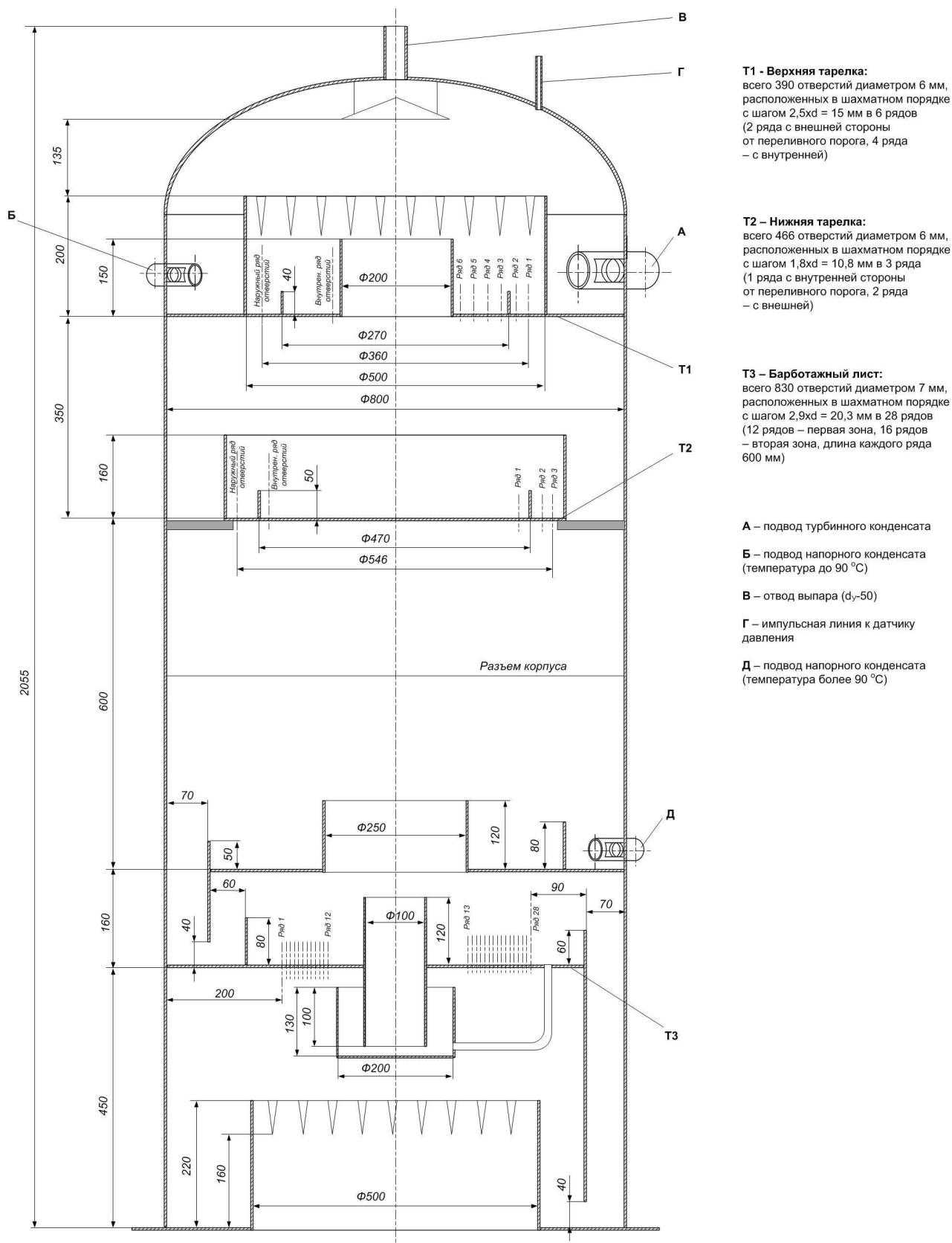


Рисунок 4.7. Конструктивная схема деаэрационной колонки

Удельный расход выпара в режимах 1 и 2 принят равным 1,5 кг выпара на тонну деаэрированной воды, в режиме 3 – определяется расчетом при неизменном положении арматуры на трубопроводе отвода выпара.

Основные результаты расчета деаэрационной колонки в рассматриваемых режимах приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты теплогидравлических и массообменных расчетов деаэрационной колонки

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя для режимов		
	№1	№2	№3
1. Расход воды на входе в верхнюю тарелку, кг/с	8,25	6,88	2,48
2. Расход выпара, кг/с	0,0136	0,0136	0,0136
3. Расход воды на выходе верхнего струйного отсека, кг/с	8,557	7,160	2,542
4. Температура воды на выходе верхнего струйного отсека, °С	81,7	78,4	76,1
5. Массовая концентрация растворенного в воде кислорода на выходе верхнего струйного отсека, мкг/дм ³	1474	1517	1752
6. Расход воды на выходе нижнего струйного отсека, кг/с	8,855	7,436	2,615
7. Температура воды на выходе нижнего струйного отсека, °С	100,5	99,2	92,0
8. Массовая концентрация растворенного в воде кислорода на выходе нижнего струйного отсека, мкг/дм ³	456	510	1037
9. Расход воды на выходе из барботажного листа, кг/с	9,041	9,038	2,712
10. Температура воды на выходе барботажного листа, °С	111,5	111,5	111,4
11. Массовая концентрация растворенного в воде кислорода на выходе барботажного листа, мкг/дм ³	24	38	22

Расчеты показали, что деаэрационная колонка не обеспечивает требуемого качества деаэрированной воды по растворенному кислороду. Для обеспечения заданного значения массовой концентрации растворенного в деаэрированной воде

кислорода предложено использовать барботажное устройство деаэрационного бака (рисунок 4.8). Спроектировано барботажное устройство в виде одиночного перфорированного коллектора, размещенного на дне деаэрационного бака вдоль его образующих со следующими конструктивными характеристиками:

- диаметр коллектора 150 мм;
- расположение отверстий – в 2 ряда;
- диаметр отверстий 8 мм;
- шаг между отверстиями в ряду 30 мм;
- количество отверстий в ряду 70;
- количество отверстий всего 140;
- длина перфорированной части коллектора 2070 мм.

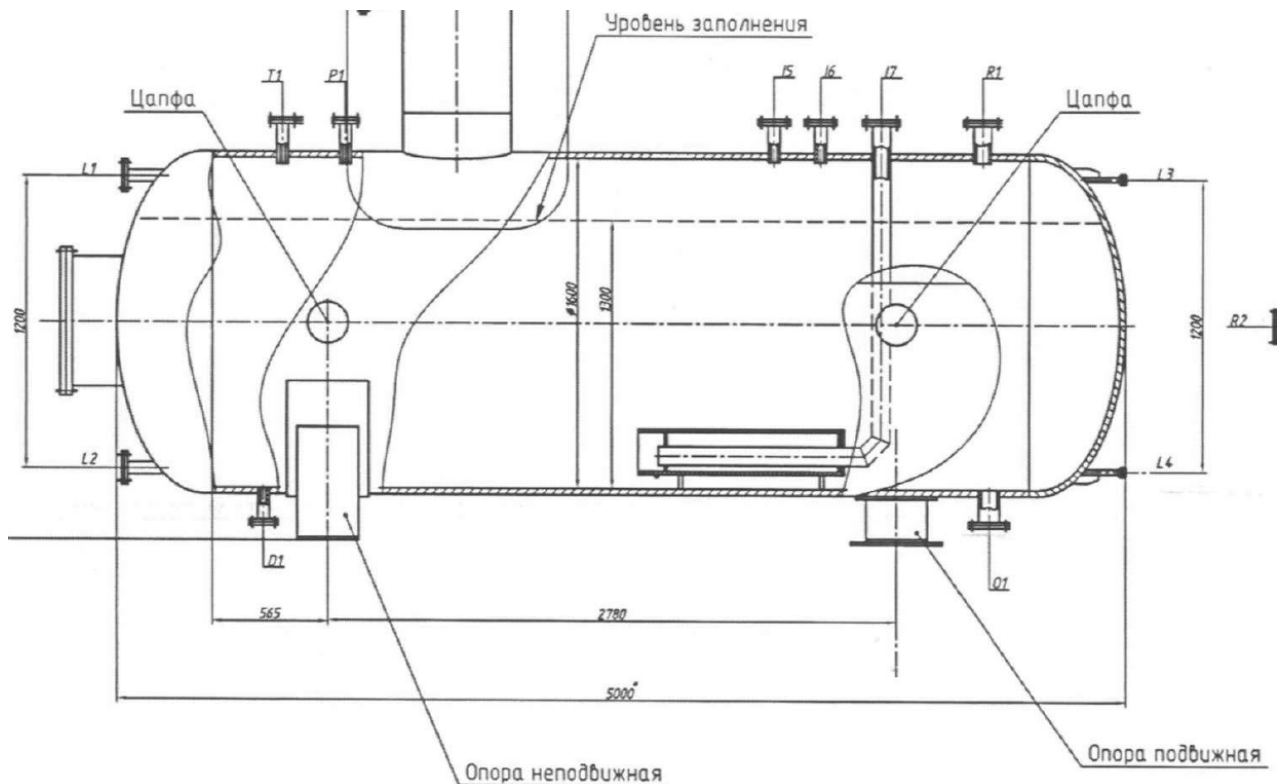


Рисунок 4.8. Конструктивная схема деаэрационного бака с барботажным устройством

Расчетом в программном комплексе «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» показано, что при значении удельного расхода пара на барботаж на уровне 15 кг/т д.в. (килограмм пара на тонну деаэрированной воды) расчетная массовая концентрация растворенного в деаэрированной воде кислорода составляет от 2 до 5 мкг/дм³ во всех режимах.

Задачей настоящего этапа работы в рамках рассматриваемой в диссертации темы являлась расчетная оценка значений показателей качества декарбонизации воды в проектируемом деаэраторе.

Расчету собственно показателей эффективности декарбонизации воды предшествовал этап моделирования гидродинамической обстановки в деаэраторном баке при различных режимах работы затопленного барботажного устройства. Использовалась упрощенная геометрическая модель бака деаэратора, аналогичная моделям, рассмотренным в гл. 2. Методика проведения и обработки результатов численных экспериментов также изложена в гл. 2. В таблице 4.2 приведены условия расчета рассматриваемых далее предельных режимов минимальной и максимальной гидравлических нагрузок при отсутствии и наличии парового барботажа в деаэраторном баке.

Таблица 4.2. Характеристика моделируемых режимов

Наименование параметра	Значение параметра			
	Режим №1	Режим №2	Режим №3	Режим №4
Уровень воды в деаэраторном баке Н, мм	1300	1300	1300	1300
Расход деаэрированной воды $G_{дв}$, т/ч	30	9	30	9
Удельный расход пара на барботаж, кг/т	0	0	15	15

Результаты моделирования гидродинамической обстановки в деаэраторном баке при отсутствии парового барботажа приведены на рисунке 4.9.

На основании анализа представленных на рисунке 4.9 данных можно сделать следующие выводы:

1) течение воды в деаэраторном баке не является однородным; в нижней части деаэраторного бака между его входным и выходным сечениями имеется зона с ламинарным характером течения; линии тока в этой зоне располагаются параллельно друг, при этом время, затрачиваемое элементарными объемами воды на их прохождение, а следовательно и располагаемое время реакции термического разложения гидрокарбонатов меньше среднего времени пребывания воды в деаэраторном баке, рассчитываемого как время полного вытеснения;

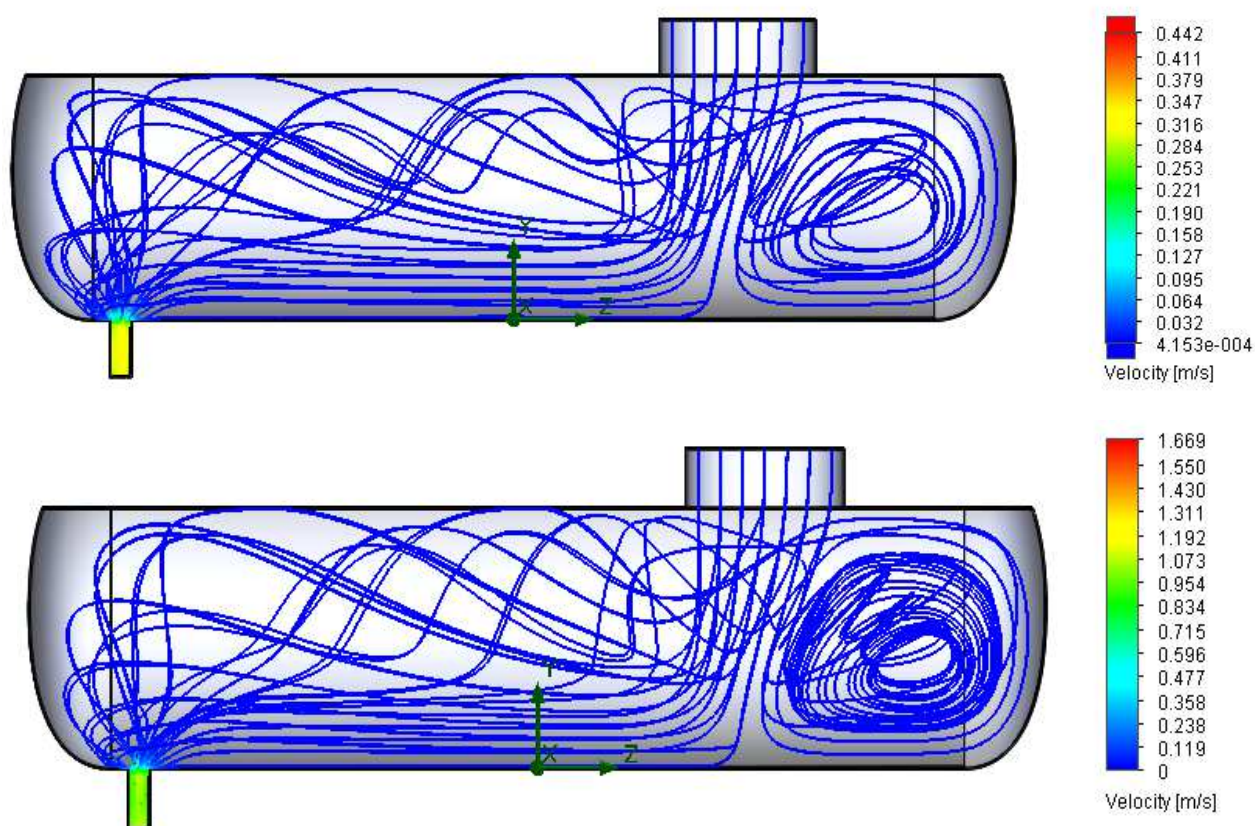


Рисунок 4.9. Результаты моделирования гидродинамической обстановки в деаэра-
торном баке при отсутствии парового барботажа при $G_{\text{дв}} = 9$ т/ч (вверху)
и $G_{\text{дв}} = 30$ т/ч (внизу)

2) в противоположном от сливного отверстия торце бака наблюдается застойная вихревая зона, на прохождение которой элементарными объемами затрачивается намного больше времени, чем на прохождение зоны ламинарного течения; следовательно, степень термического разложения гидрокарбонатов в струйках воды на выходе из бака, прошедших эту зону, будет выше, чем в струйках, прошедших зону ламинарного течения;

3) гидродинамическая картина течения в баке при отсутствии барботажа практически не зависит от расхода деаэрированной воды.

Результаты моделирования гидродинамической обстановки в деаэра-
торном баке при работе затопленного барботажного устройства приведены на рисун-
ке 4.10.

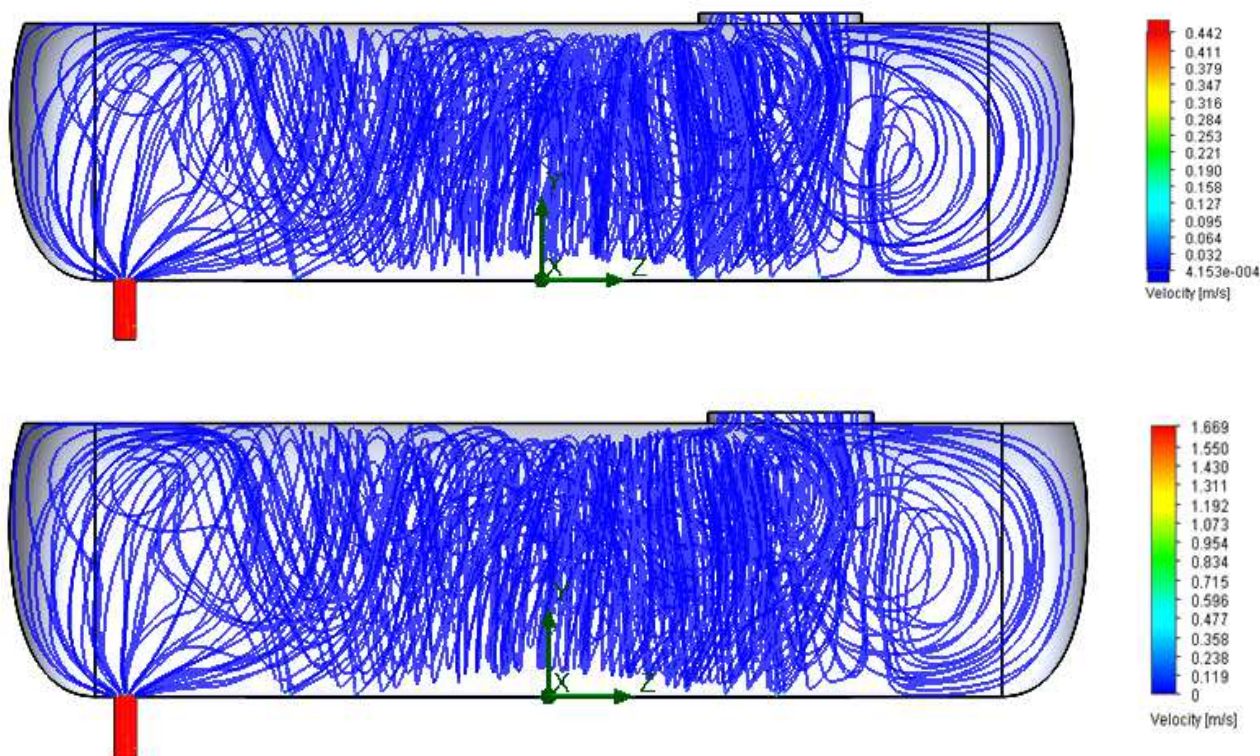


Рисунок 4.10. Результаты моделирования гидродинамической обстановки в деаэрационном баке при работе затопленного барботажного устройства при $G_{\text{дв}} = 9$ т/ч (вверху) и $G_{\text{дв}} = 30$ т/ч (внизу)

Анализ представленных на рисунке 4.10 результатов моделирования течения в баке при работе затопленного барботажного устройства позволяет сделать следующие выводы:

- 1) течение воды в деаэрационном баке носит ярко выраженный турбулентный характер;
- 2) в центральной части бака над затопленным барботажным устройством располагается зона интенсивного перемешивания, что способствует интенсификации процессов массообмена, а также позволяет обеспечить более глубокое разложение гидрокарбонатов;
- 3) в противоположном от сливного отверстия торце бака наблюдается застойная вихревая зона, однако ее размеры несколько меньше, чем в режимах без барботажа;
- 4) гидродинамическая картина течения в баке при наличии барботажа, так же как и при его отсутствии, практически не зависит от расхода деаэрированной воды.

Результаты расчета конечной концентрации гидрокарбонатов в воде на выходе из бака, степени их термического разложения, а также pH_{25} деаэрированной воды в рассматриваемых режимах приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Результаты расчета показателей эффективности термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе

Наименование параметра	Значение параметра			
	Режим №1	Режим №2	Режим №3	Режим №4
Конечная концентрация гидрокарбонатов на выходе из деаэрационного бака, мг-экв/дм ³	467	435	427	296
Степень термического разложения гидрокарбонатов, ед.	0,066	0,130	0,146	0,408
Щелочность по фенолфталеину деаэрированной воды, мкг-экв/дм ³	16,0	33,0	36,0	102,0
Расчетное значение pH_{25} деаэрированной воды на выходе из деаэрационного бака (охлажденная проба воды при 25 °C), ед.	8,68	9,00	9,06	9,64

Таким образом, в ходе моделирования и технологических расчетов установлено, что проектируемый деаэратор при работе с паровым барботажем в баке обеспечивает во всем регулировочном диапазоне нагрузок получение деаэрированной воды с pH_{25} не менее 8,7, что и требуется согласно заданию на проектирование.

Реализация описанных в настоящем разделе результатов работы подтверждена актом внедрения (см. Приложение).

4.5. Обоснование технических решений по модернизации деаэрационной установки питательной воды Родниковской ПГУ-ТЭС

Разработанный метод прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов использован при обосновании технических решений по модернизации действующей деаэрационной установки питательной воды котлов-утилизаторов парогазовой ТЭС (ПГУ-ТЭС) в г. Родники Ивановской области.

В рамках работы проведены испытания деаэраторов ДА-50, в ходе которых показана их недостаточная эффективность по удалению соединений углекислоты. В частности, выявлено следующее:

- pH_{25} деаэрированной воды в среднем составлял 8,1 при нормативных значениях, установленных для питательной воды котлов-утилизаторов рассматриваемой ТЭС, от 8,5 до 9,5;

- наблюдались существенные сезонные колебания pH_{25} деаэрированной воды при изменении общей щелочности исходной воды с эпизодическим уменьшением до значений 7,5 (минимально 6,7);

- из-за низкой степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах наблюдалось большое содержание свободной углекислоты в паре котлов (массовая концентрация свободной углекислоты в пересчете на CO_2 в среднем 122 мг/дм^3 с эпизодическими увеличениями до 160 мг/дм^3 при норме для пара, отпускаемого внешним потребителям, не более 20 мг/дм^3); пар котлов, в числе прочего, направляется потребителям; большое содержание свободной углекислоты в паре обуславливает наличие интенсивной углекислотной коррозии конденсатопроводов возвратного конденсата и существенные ремонтные затраты.

По результатам испытаний был предложен эскизный проект модернизации деаэраторов ДА-50 с установкой затопленного барботажного устройства деаэрационного бака (см. рисунок 4.11 [125]), который был внедрен в промышленных условиях в 2013 году. Собственно проект и результаты модернизации, выразившиеся в экспериментально доказанном увеличении pH_{25} деаэрированной воды в среднем до 9,1 и уменьшении более чем вдвое сезонных колебаний этого параметра при изменении общей щелочности исходной воды, отражены в кандидатской диссертации А.А. Короткова [125].

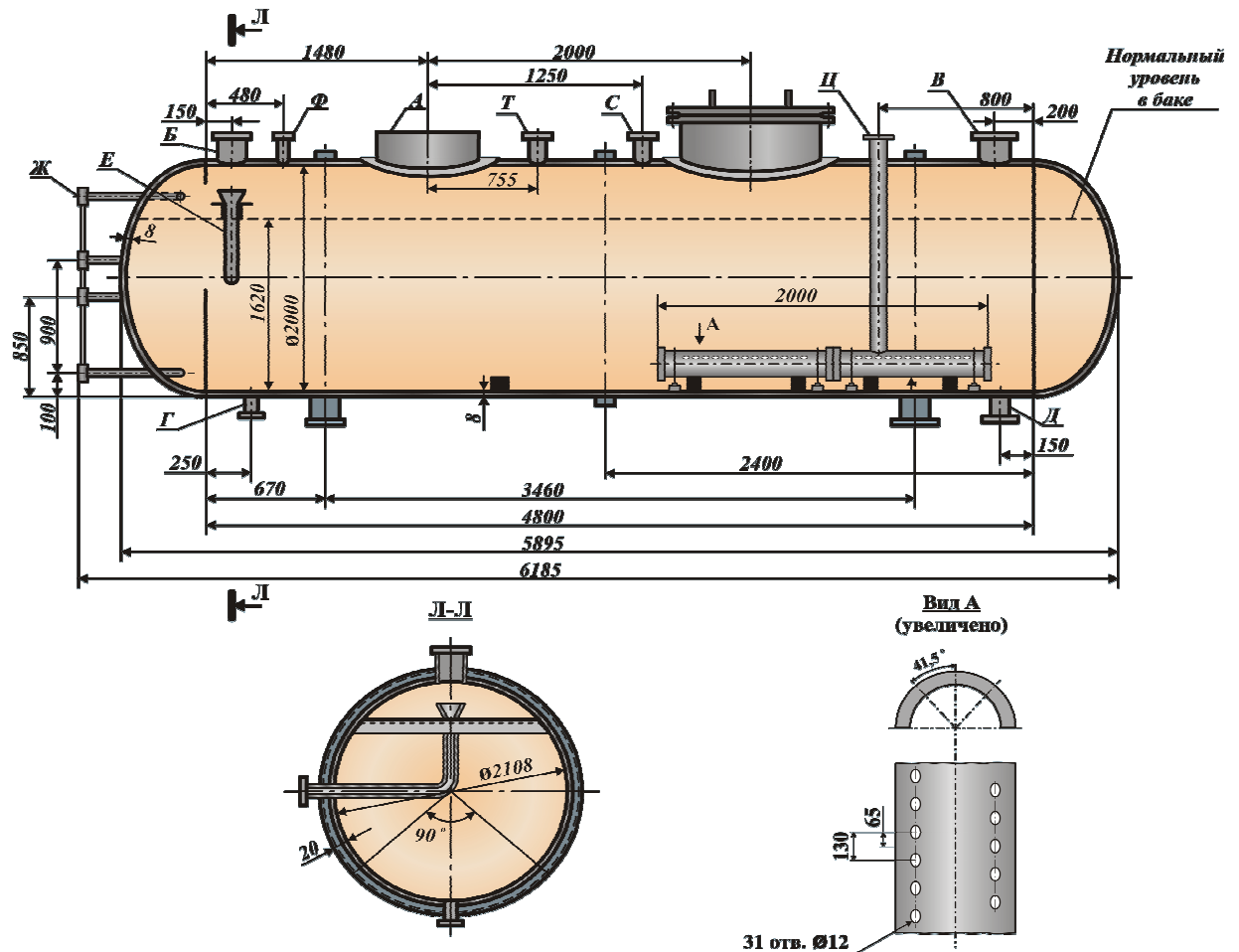


Рисунок 4.11. Проект модернизации деаэраторов ДА-50 Родниковской ПГУ-ТЭЦ с организацией барботажа в деаэрационных баках [125]

Конкретной задачей рассматриваемой работы в рамках настоящей диссертации являлось проведение сравнительных расчетов степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах до и после организации парового барботажа в баке и оценки максимальной массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов. Далее рассмотрим этапы решения рассматриваемой задачи, основой в котором являлись данные эксплуатационных наблюдений в 354 опытах.

А. Расчетная оценка по формуле (1.27) концентрации свободной углекислоты в паре котлов $C_{CO_2}^{п(р)}$, мг/дм³, при фактической общей щелочности питательной воды $Щ_0^{пв}$, мг-экв/дм³, фактической степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе σ , определяемой по выражению (1.24) при известных значениях $Щ_0^{пв}$ и щелочности по фенолфталеину питательной воды $Щ_{фф}^{пв}$, мг-экв/дм³, а также при таком значении степени термического разложения гидрокарбонатов в котле σ_k , которое обеспечивает минимальное в среднем по всем опытам рассогла-

сование $C_{\text{CO}_2}^{\text{п (р)}}$ и фактических значений концентрации свободной углекислоты в паре котлов $C_{\text{CO}_2}^{\text{п (ф)}}$, мг/дм³. Подобранный по указанному условию значение σ_k составило 0,74; отметим, что в соответствии с рекомендациями [42] для котлов на давление пара в барабане 26,3 кгс/см² – в данном случае для котлов КГТ-25/2,4-380 – следовало бы принять $\sigma_k = 0,87$. Соотношение расчетных и фактических значений $C_{\text{CO}_2}^{\text{п}}$ выполнено на рисунке 4.12. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений $C_{\text{CO}_2}^{\text{п}}$ от экспериментальных составило 2,0 %. Таким образом, можно полагать, что имеется адекватная методика расчетной оценки содержания свободной углекислоты в паре котлов, полученная путем идентификации существующей методики [42] для рассматриваемых условий путем выбора соответствующего значения σ_k .

Б. Проведение расчетов концентрации свободной углекислоты в паре котлов $C_{\text{CO}_2}^{\text{п (р)}}$, мг/дм³, при наличии парового барботажа в баке деаэратора ДА-50 по идентифицированной на этапе 1 методике. Отличие в данном случае состоит лишь в том, что степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе σ определяется для условий каждого опыта путем расчета по предложенной методике, описание которой приведено в п. 3.1. Удельный расход пара на барботаж принят равным 15 кг/т д.в., поэтому с учетом сделанных в гл. 3 выводов допустим расчет по упрощенной методике. Полученные в расчетах результаты отражены на рисунке 4.13, где для сравнения показаны также фактические значения массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов $C_{\text{CO}_2}^{\text{п (ф)}}$, мг/дм³, для условий каждого из рассмотренных опытов.

Учитывая показатели точности составленной в п. А настоящего раздела методики расчета массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов, а также разработанной в п. 3.1 методики прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах, при организации барботажа в баках деаэраторов ДА-50 можно с высокой степенью уверенности ожидать уменьшения массовой концентрации углекислоты в паре котлов в среднем до значения 76 мг/дм³, а также некоторой стабилизации химического качества пара по рассматриваемому показателю (среднеквадратическое отклонение уменьшается с 10,3 % для данных без барботажа до 8,1 % для расчетных данных при наличии барботажа в баке). Эти данные позволили принять проект оснащения деаэраторов барботажным устройством к реализации.

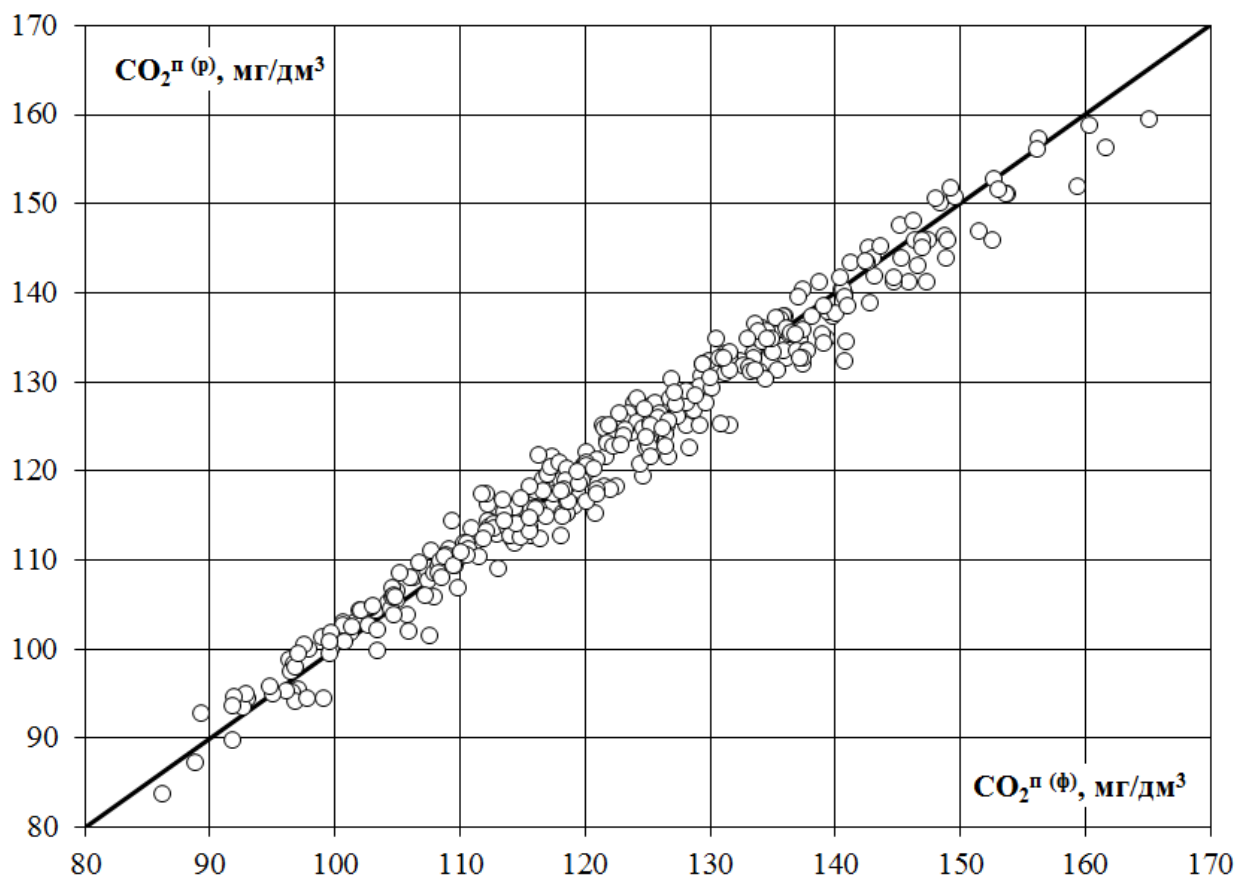


Рисунок 4.12. Сопоставление расчетных ($C_{\text{CO}_2^{\text{п}}(\text{Р})}$) и экспериментальных ($C_{\text{CO}_2^{\text{п}}(\text{Ф})}$) значений массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов: точки – результаты расчета для условий опытов; линия – совпадение расчетных и экспериментальных данных

Полученные данные демонстрируют также, что 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 Н-Na-катионирования (технология, предусмотренная проектом – двухступенчатое Na-катионирование). В комплексе рассматриваемые мероприятия позволили добиться нормативного качества отпускаемого потребителям пара.

Реализация описанных в настоящем разделе результатов работы подтверждена актом внедрения (см. Приложение).

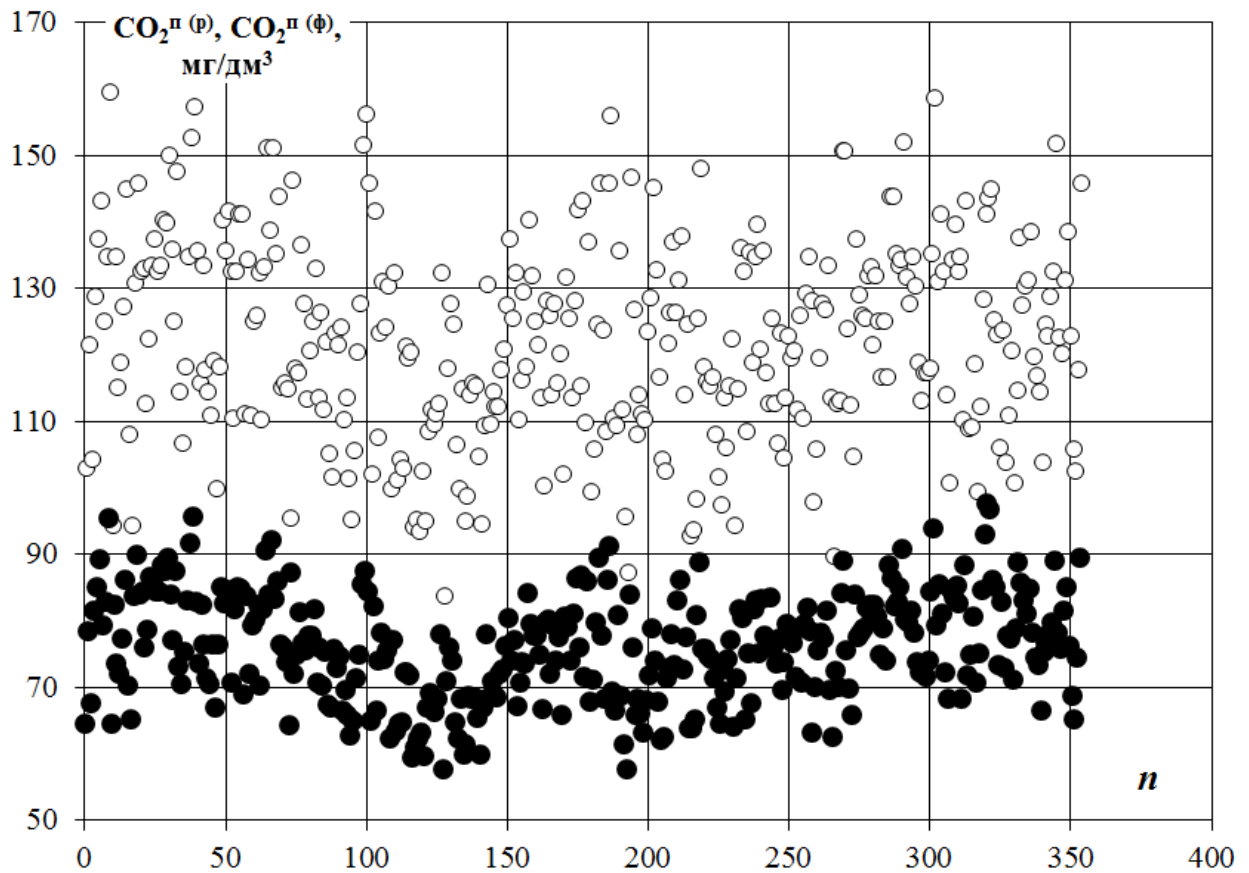


Рисунок 4.13. Сопоставление результатов расчета массовой концентрации свободной углекислоты в паре котлов $CO_2^{п(р)}$, мг/дм³, при организации парового барботажа в баке деаэратора ДА-50 с экспериментальными значениями этой концентрации $CO_2^{п(ф)}$, мг/дм³: n – номер опыта; ○ – фактические данные расчета; ● – результаты расчета при наличии барботажа в деаэраторном баке

На рисунках 4.14 и 4.15 в виде графических зависимостей приведены 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 регулировочном диапазоне гидравлической нагрузки. Эти зависимости позволяют выбрать для заданной общей щелочности исходной воды режимные мероприятия, обеспечивающие нормативные показатели химического качества деаэрированной воды.

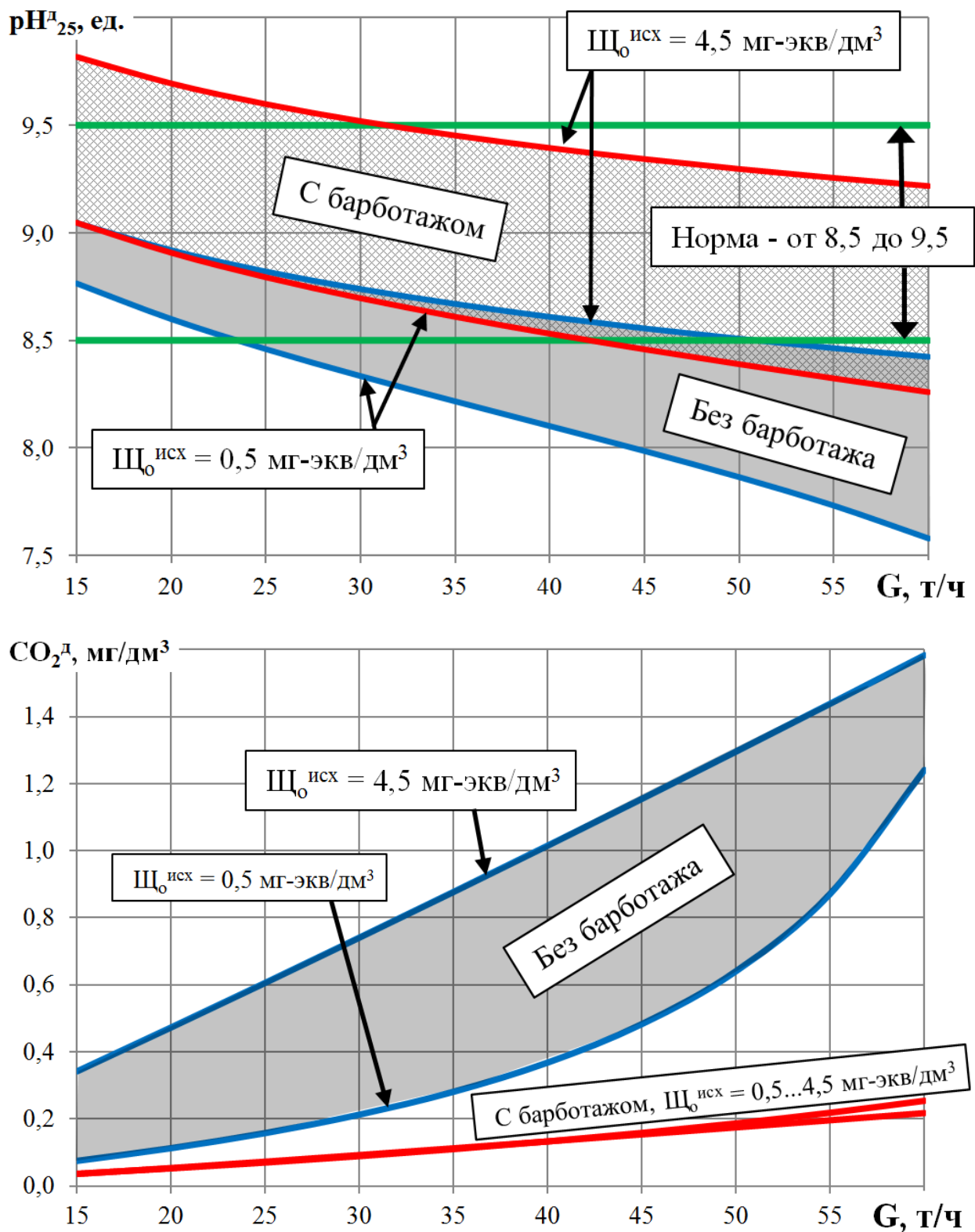


Рисунок 4.14. Расчетные зависимости показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах ДА-50 Родниковской ПГУ-ТЭС от режимных параметров при нормальном уровне воды в деаэраторном баке, часть 1: G , т/ч – расход деаэрированной воды; $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$, мг-экв/дм³ – общая щелочность воды перед деаэратором; pH₂₅, ед. – водородный показатель пробы деаэрированной воды; CO₂^д, мг/дм³ – массовая концентрация свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода в деаэрированной воде

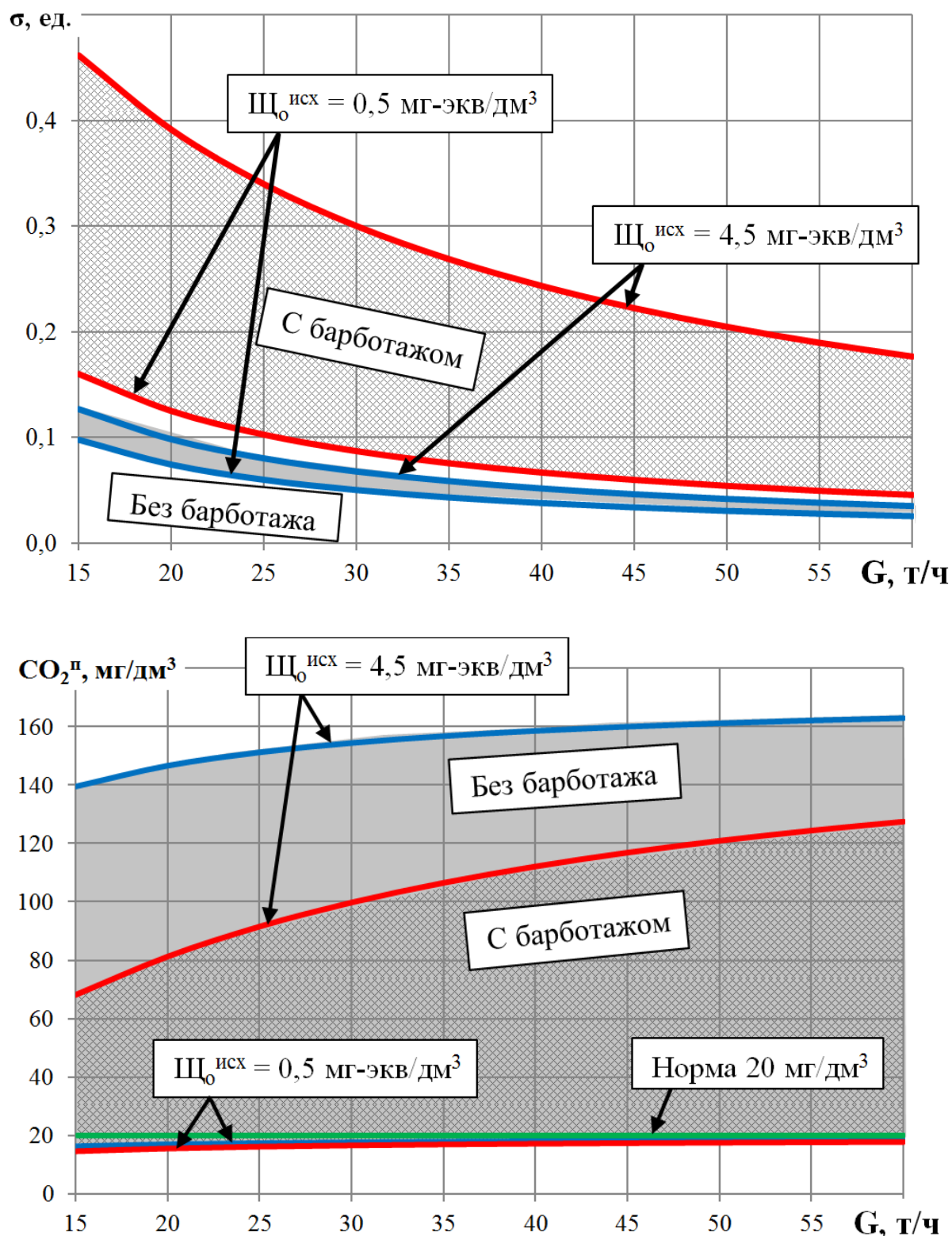


Рисунок 4.15. Расчетные зависимости показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах ДА-50 Родниковской ПГУ-ТЭС от режимных параметров при нормальном уровне воды в деаэраторном баке, часть 2: σ , ед. – степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах; $\text{CO}_2^{\text{п}}$, мг/дм^3 – массовая концентрация свободной углекислоты в пересчете на диоксид углерода в паре котлов; прочие обозначения соответствуют рисунку 4.14

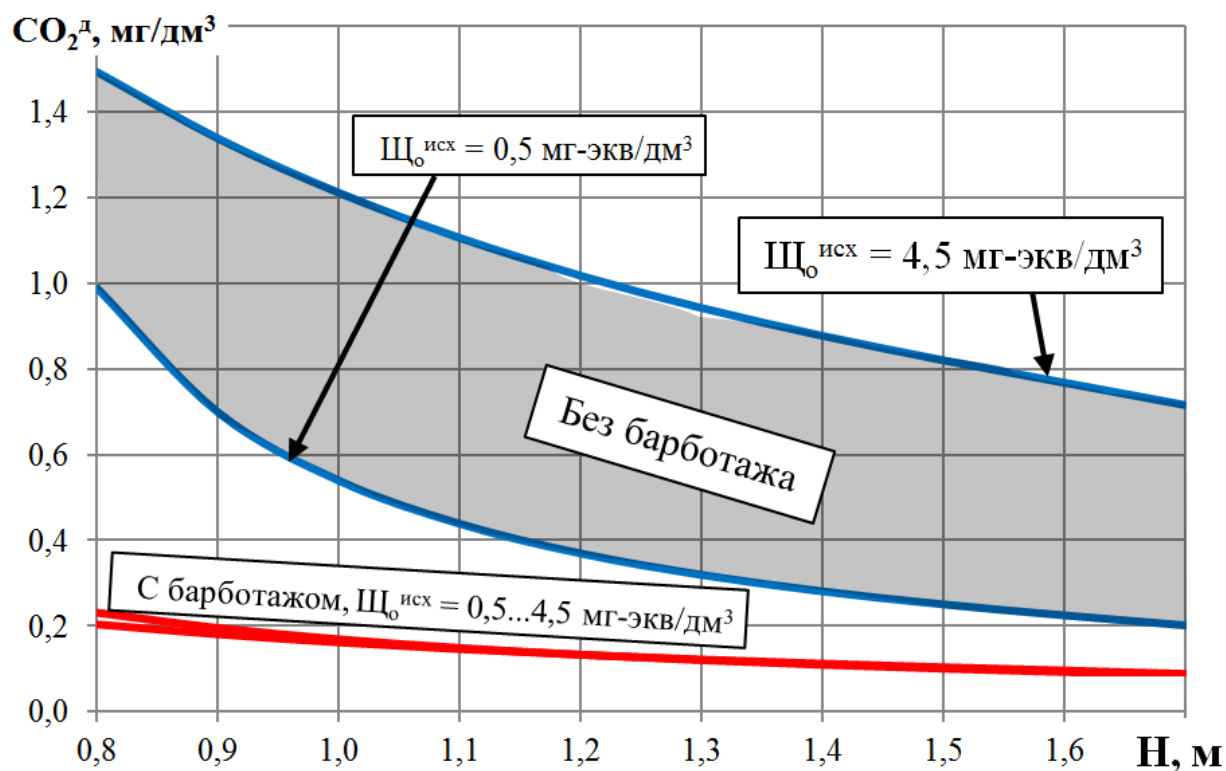
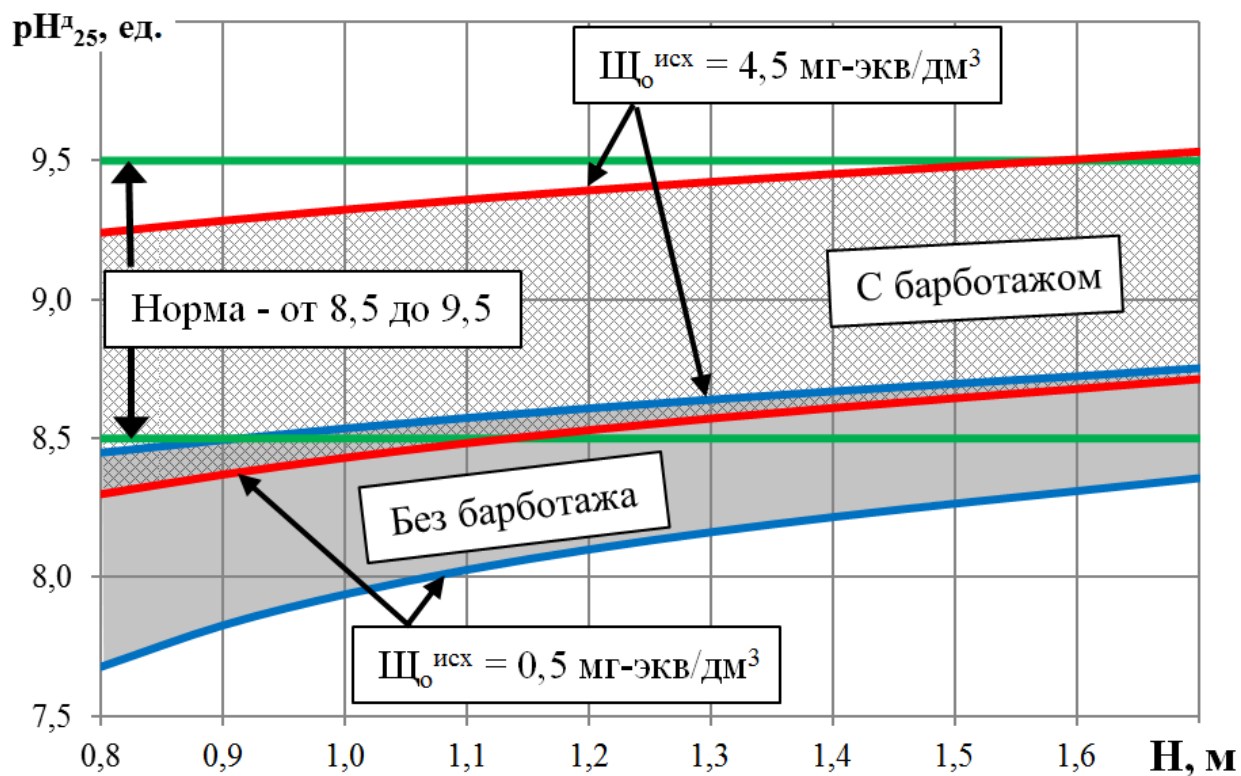


Рисунок 4.16. Влияние уровня воды в деаэрационном баке на показатели эффективности декарбонизации воды в деаэраторах ДА-50 Родниковской ПГУ-ТЭС (гидравлическая нагрузка 70 % от номинальной), часть 1: H , м – уровень воды в деаэрационном баке; прочие обозначения соответствуют рисункам 4.14 и 4.15

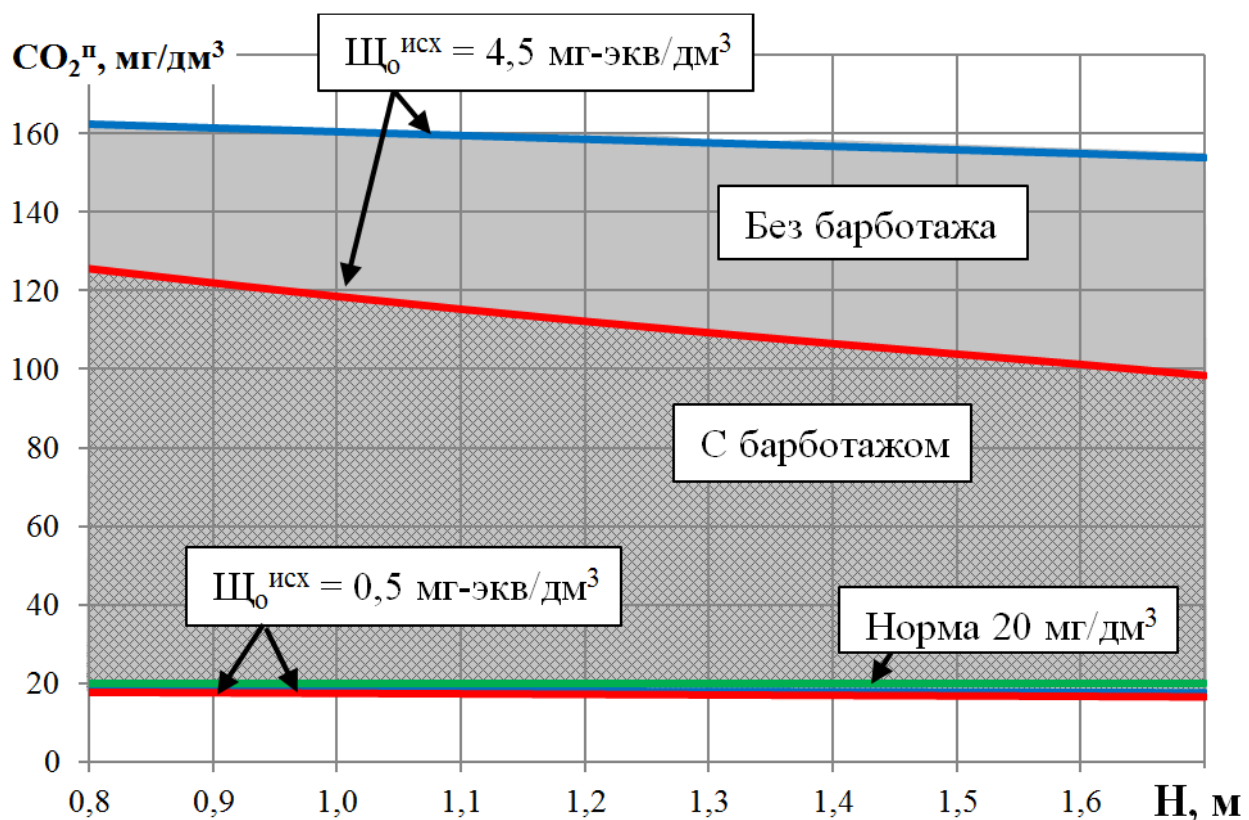
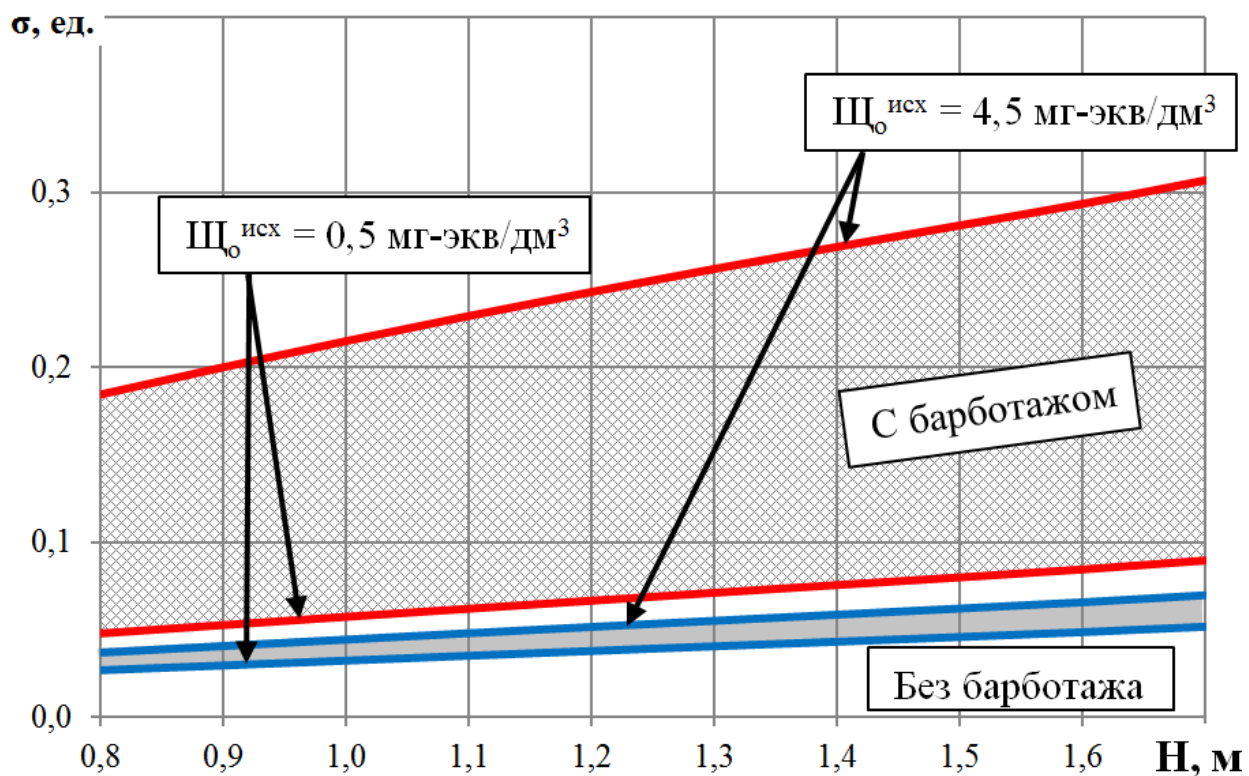


Рисунок 4.17. Влияние уровня воды в деаэрационном баке на показатели эффективности декарбонизации воды в деаэраторах ДА-50 Родниковской ПГУ-ТЭС (гидравлическая нагрузка 70 % от номинальной), часть 2: обозначения соответствуют рисункам 4.14, 4.15 и 4.16

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Разработан алгоритм прогнозирования 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. Метод прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов использован при обосновании технических решений по модернизации деаэрационной установки питательной воды котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭС в г. Родники Ивановской обл.

4. Разработанный алгоритм расчета показателей эффективности декарбонизации воды в атмосферных деаэраторах и средства его компьютерной поддержки использованы при проектировании для ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) атмосферного деаэратора ДА-30 при ужесточенных относительно нормативов требованиях к химическому качеству деаэрированной воды.

5. 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).

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 барботажом 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 откло-

нение 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 pH 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 pH_{25} 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 pH_{25} 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Назмеев, Ю.Г.** Теплообменные аппараты ТЭС / Ю.Г. Назмеев, В.М. Лавыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
2. **Тепловые** и атомные электростанции: Справочник / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 245 с.
3. **Теплоэнергетика** и теплотехника : в 3 кн. Кн. 1. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 528 с.
4. **Соколов, Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.
5. **Рихтер, Л.А.** Вспомогательное оборудование тепловых электростанций / Л.А. Рихтер, Д.П. Елизаров, В.М. Лавыгин. М.: – Энергоиздат, 1987. – 216 с
6. **Повышение** эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок / Под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург, 2004. – 464 с.
7. **Справочник** по теплообменным аппаратам энергетических установок / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков и др. ; под общ. ред. проф., докт. техн. наук, проф. Ю.М. Бродова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 480 с.
8. **Аронсон, К.Э.** Теплообменники энергетических установок : учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др. ; под ред. проф., докт. техн. наук Ю.М. Бродова. – Екатеринбург : Изд-во «Сократ», 2002. – 968 с.
9. **Оликер, И.И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях / И.И. Оликер. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
10. **Шарапов, В.И.** Термические деаэраторы / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра. – Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с.
11. **Оликер, И.И.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях / И.И. Оликер, В.А. Пермяков. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
12. **Деаэраторы** термические: отраслевой каталог 13-04. – М.: ИНПРОМКАТАЛОГ, 2004. – 108 с.

13. **Деаэраторы термические:** отраслевой каталог 77-94. – М.: ЦНИИТЭИ-маш, 1995. – 126 с.

14. **Ледуховский, Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Ледуховский Григорий Васильевич. – Иваново, 2008. – 226 с. – Библиогр.: с. 182–193.

15. **Деаэраторы термические.** Типы, основные параметры, приемка, методы контроля: ОСТ 16860-88. Введен в действие с 01.01.90. Переиздание 1999. – 56 с.

16. **Водоподготовительное** оборудование: информационно-справочный каталог, выпуск 1. – Саратов.: САРЭНЕРГОМАШ, 2007. – 168 с.

17. **Шервуд, Т.** Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки / перевод с английского. – М.: Химия, 1982. – 696 с.

18. **Рамм, В.М.** Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Химия», 1976 г. – 656 с.

19. **Александров, И.А.** Ректификационные и абсорбционные аппараты / И.А. Александров. – М.: Химия, 1971. – 296 с.

20. **Хоблер, Т.** Массопередача и абсорбция / Т. Хоблер. – пер. с польского. – Л.: Изд-во «Химия», 1964. – 480 с.

21. **Касаткин, А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М: Химия, 1971. – 832 с.

22. **Астарита, Дж.** Массопередача с химической реакцией / Дж. Астарита. – Л.: Изд-во «Химия», 1971. – 224 с.

23. **Рид, Р.** Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд / перевод с английского под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 532 с.

24. **Кафаров, В.В.** Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – М.: Наука, 1972. – 496 с.

25. **Пери, Дж. Г.** Справочник инженера-химика. В 2 т. Т. 1 / Джон Г. Перри. Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н.М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П.Г. – Л.: «Химия», 1969.

26. **Коган, В.Б.** Равновесие между жидкостью и паром: Справочное пособие / В.Б. Коган, В.М. Фридман, В.В. Кафаров. – М.: Изд-во «Наука», 1966. – 644, [1] с.

– (Равновесие между жидкостью и паром: Справочное пособие : в 2 кн. / В.Б. Коган, В.М. Фридман, В.В. Кафаров ; Кн. 1).

27. **Справочник** химика / 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3 Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. – М.: Изд-во «Химия», 1965 г., – 1008 с.

28. **Справочник** по теплообменникам: В 2 т. Т 1 / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

29. **Справочник** по теплообменникам: В 2 т. Т 2 / Пер. с англ., под ред. О.Г. Мартыненко, А.А. Михалевича, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

30. **Вихрев, В.В.** Водоподготовка: Учеб. для вузов / В.В. Вихрев, М.С. Шкроб / Под ред. М.С. Шкроба. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.

31. **Ларин, Б.М.** Теория математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС: Учеб. пособие / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2007. – 292 с.

32. **Воронов, В.Н.** Водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В.Н. Воронов, Т.И. Петрова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 390 с.

33. **Манькина, Н.Н.** Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций / Н.Н. Манькина. – М.: Изд-во «Энергия», 1977. – 256 с.

34. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат, 1976. – 398 с.

35. **Маргулова, Т.Х.** Водные режимы тепловых и атомных электростанций: Учеб. для вузов по спец. «Технология воды и топлива на тепловых и атомных электростанциях» / Т.Х. Маргулова, О.И. Мартынова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 319 с.

36. **Шкроб, М.С.** Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций / М.С. Шкроб, Ф.Г. Прохоров. – М.: Гос. энергетич. изд-во, 1961. – 472 с.

37. **Мартынова, О.И.** Расчеты водно-химических режимов теплоэнергетических установок / О.И. Мартынова и др. / Под ред. О.И. Мартыновой. – М.: МЭИ, 1985. – 152 с.

38. **Сутоцкий, Г.П.** Повреждения энергетического оборудования, связанные с водно-химическим режимом / Г.П. Сутоцкий – С.-Пб.: НПО ЦКТИ, 1992. – 256 с.
39. **Коэн, П.** Технология воды энергетических реакторов / П. Коэн. – пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1973. – 328 с.
40. **Аван, В.К.** Совершенствование водно-химического режима ТЭЦ среднего бавления : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Аван Васим Кайсир. – Иваново, 2011. – 140 с. – Библиогр.: с. 124–133.
41. **Жук, Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Изд-во «Металлургия», 1976. – 472 с.
42. **Кострикин, Ю.М.** Водоподготовка водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 252 с.
43. **Акользин, П.А.** Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования / Акользин П.А. – М.: Энероиздат, 1982. – 304 с.
44. **ГОСТ 16860-88.** Деаэраторы термические. Типы, основные параметры, приемка, методы контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 7 с.
45. **Акользин, П.А.** Контроль коррозии металла котлов / П.А. Акользин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 239 с.
46. **Тодт, Ф.** Коррозия и защита от коррозии / Ф. Тодт ; пер. с нем. Л.И. Акинфиева, А.Е. Егорова, Н.О. Оберштейна и др. – Л.: Изд-во «Химия», 1967. – 712 с.
47. **Йовчев, М.** Коррозия теплоэнергетического и ядерно-энергетического оборудования / М. Йовчев ; пер. с болг. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 222 с.
48. **Акользин, П.А.** Предупреждение коррозии металла паровых котлов / Акользин П.А. – М.: Изд-во «Энергия», 1975. – 296 с.
49. **Рачко, В.А.** О влиянии температуры воды и скорости пара на деаэрацию воды в деаэраторе / В.А. Рачко // Котлотурбостроение. – 1950. – № 1.
50. **Рачко, В.А.** Исследование процесса деаэрации воды в деаэраторе смешивающего типа / В.А. Рачко // Котлотурбостроение. – 1949. – № 2.
51. **Рачко, В.А.** Исследование влияние температуры паровоздушной смеси на эффективность деаэратора / В.А. Рачко // Котлотурбостроение. – 1949. – № 4.

52. **Кутателадзе, С.С.** Нагрев и деаэрация воды при непосредственном смешении её с паром / С.С. Кутателадзе, В.А. Зысин // За новое советское энергооборудование. – Л., 1939. – С. 86-124.

53. **Оликер, И.И.** Деаэраторы и блочные деаэрационно-питательные установки для малой энергетики / И.И. Оликер, В.А. Пермяков // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. – М.: Энергия, 1966 – Вып. 2.

54. **Оликер, И.И.** Исследование работы вакуумного деаэратора взамен декарбонизатора / И.И. Оликер, Т.И. Теплякова, Ж.К. Шашкова // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. – М.: Энергия, 1972 – Вып. 4.

55. **Оликер, И.И.** Исследование работы термического деаэратора повышенно давления с барботажным устройством ЦКТИ / И.И. Оликер, В.А. Пермяков, Ю.Л. Тоц // Теплоэнергетика, 1966. – № 12.

56. **Шарапов, В.И.** Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов / В.И. Шарапов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 176 с.

57. **Гришук, И.К.** Исследование работы барботажных тарелок / И.К. Гришук, Б.М. Столяров // Теплоэнергетика, 1960. – № 4.

58. **Курнык, Л.Н.** Удаление свободной углекислоты в деаэраторах с барботажными колонками / Л.Н. Курнык // Электрические станции. – 1980. – № 6.

59. **Сутоцкий, Г.П.** Водоподготовка конденсационных электростанций высокого давления с полным удалением углекислоты / Г.П. Сутоцкий // Теплоэнергетика, 1957. – № 9.

60. **Цюра, Д.В.** Разработка высокоэффективных технологий термической деаэрации воды в теплоэнергетических установках : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Цюра Дарья Валентиновна. – Ульяновск, 2002. – 145 с. – Библиогр.: с. 128–143.

61. **Дынькин, И.В.** Повышение производительности деаэрационных установок типа ДСА-150 / И.В. Дынькин, А.С. Бердичевский // Промышленная теплоэнергетика, 1971. – № 2.

62. **Расчет** и проектирование термических деаэраторов: РТМ 108.030.21-78 / В.А. Пермяков, А.С. Гиммельберг, Г.М. Виханский, Ю.М. Шубников. – Л.: НПО ЦКТИ, 1979. – 130 с.

63. **Сутоцкий, Г.П.** О саморегулирующей способности деаэрационных установок / Г.П. Сутоцкий // Электрические станции. – 1954. – № 6.

64. **Малинина, О.В.** Исследование влияния расхода пара и способов его утилизации на эффективность термической деаэрации воды : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Малинина Ольга Владимировна. – Ульяновск, 2004. – 150 с. – Библиогр.: с. 135–148.

65. **Сутоцкий, Г.П.** Обескислороживание воды на промышленных теплоэнергетических установках / Г.П. Сутоцкий // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. – М.: Энергия, 1969 – Вып. 3. – 216 с.

66. **Методические указания** по модернизации деаэрационных колонок атмосферного и повышенного давления: РД 34.40.201-91 (СО 153-34.40.201-91) утв. Главтехуправлением Мин. Энергетики и электрификации СССР 29.11.1990 – М., 1990. – 12 с.

67. **Гришук, И.К.** О механизме деаэрации воды в струях / И.К. Гришук // Теплоэнергетика, 1957. – № 4.

68. **Оликер, И.И.** Удаление аммиака из воды при паровом барботаже / И.И. Оликер // Теплоэнергетика, 1968. – № 6.

69. **Шарапов, В.И.** Деаэрация воды в теплогенерирующих установках малой мощности / В.И. Шарапов // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 5.

70. **Малинина, О.В.** Технология утилизации пара термических деаэраторов / О.В. Малинина, В.И. Шарапов // Матер. Четвертой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск.: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.

71. **Шарапов, В.И.** О регулировании термических деаэраторов / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра // Электрические станции. – 2000. – № 7.

72. **Цюра, Д.В.** Регулирование расхода пара термических деаэраторов / Д.В. Цюра, О.В. Малинина, В.И. Шарапов // Матер. Четвертой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск.: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.

73. **Шарапов, В.И.** О предельной массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов / В.И. Шарапов, О.В. Малинина, Д.В. Цюра // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – № 2.

74. **Шарапов, В.И.** О предельной массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов / В.И. Шарапов, О.В. Малинина // Промышленная теплоэнергетика. – 2002. – № 9.

75. **Шарапов, В.И.** Совершенствование методов управления тепломассообменными аппаратами тепловых электростанций / В.И. Шарапов, М.А. Сивухина, Д.В. Цюра // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 3-4.

76. **Шарапов, В.И.** Оптимальные схемы деаэрационных установок промышленных котельных / В.И. Шарапов, Е.Е. Злыгостев // Энергомашиностроение. – 1984. – № 8.

77. **Шарапов, В.И.** Влияние расхода выпара на массообмен в термических деаэраторах / В.И. Шарапов, О.В. Малинина, Д.В. Цюра // Матер. Четвертой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск.: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.

78. **Шарапов, В.И.** Энергосберегающие технологии термической деаэрации воды в теплоэнергетических установках / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра // Энергосбережение. – 1999. – № 3. – С. 39-41.

79. **Шарапов, В.И.** Технологии регулирования нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 128 с.

80. **Оликер, И.И.** Исследование процесса термической деаэрации воды под вакуумом при барботаже водяным паром: дис. ... канд. техн. наук : 0305 / Оликер Исай Иосифович. – Москва, 1964. – 218 с. – Библиогр.: с. 201 – 216.

81. **Кутателадзе, С.С.** Теплопередача при конденсации и кипении / С.С. Кутателадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроит. литер., 1952 – 231 с.

82. **Перли, Г.И.** Усовершенствование термических деаэраторов / Г.И. Перли, М.С. Скибицкий // Электрические станции, 1962. – № 1.

83. **Гришук, И.К.** Наладка, эксплуатация и испытание деаэрационных колонок БКЗ / И.К. Гришук // Электрические станции, 1957. – № 1.

84. **Гришук, И.К.** Малогабаритные деаэрационные колонки / И.К. Гришук, Р.А. Липатова // Теплоэнергетика, 1962. – № 4.

85. **Гришук, И.К.** Об условиях проведения теплехимических испытаний деаэрационных установок / И.К. Гришук // Электрические станции, 1961. – № 12.

86. **Барочкин, Е.В.** Опыт наладки деаэрационно-питательной установки при резко переменных нагрузках / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 1-3 июня 2005 г. В 2 т. Т 1. Секция 5 / Под. ред. В.Н. Нуждина, Ю.Я. Щелыкалова, Ю.А. Митькина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2005. – 216 с.

87. **Виноградов, В.Н.** Особенности организации водно-химического режима тепловых сетей средствами химической обработки и деаэрации воды / В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, И.А. Шатова // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2006. – вып. 4.

88. **Ненаездников, А.Ю.** Инкорпорация решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэрации / А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков и др. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2013 – вып. 4.

89. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование процессов тепломассообмена в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного типа / Г.В. Ледуховский // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2004. – вып. 6.

90. **Мошкарин, А.В.** Разработка эмпирического обеспечения матричной модели нагрева и деаэрации воды в струйных отсеках атмосферных деаэраторов / А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2012. – вып. 2.

91. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование процессов тепломассообмена в стационарных режимах работы деаэратора ДА-300м / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов // Материалы междунар. науч. - техн. конф. «XIV Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 29-31 мая 2007 г. В 2 т. Т 1 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.Н. Нуждина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2007. – 260 с.

92. **Мошкарин, А.В.** Водно-химический режим теплосети в условиях её аварийной подпитки / А.В. Мошкарин, Г.П. Малинов, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 4

93. **Ледуховский, Г.В.** Метод расчета многоступенчатых теплообменников сложной конфигурации с учетом фазового перехода теплоносителей / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2004. – вып. 3.

94. **Ледуховский, Г.В.** Исследование и моделирование процессов теплообмена при струйно-капельном режиме работы струйных отсеков деаэраторов / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, Е.В. Барочкин, А.А. Коротков // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 82-91.

95. **Ледуховский, Г.В.** Прикладной программный комплекс для проектирования, организации эксплуатационного контроля и наладки атмосферных деаэраторов / Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, А.Ю. Ненаездников // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2008. – вып. 4. – С. 20-23.

96. **Коротков, А.А.** Декарбонизация воды атмосферными деаэраторами / А.А. Коротков // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2011. – вып. 5. – С. 8-11.

97. **Коротков, А.А.** Характеристики барьерного барботажного устройства аккумуляторного бака атмосферного деаэратора / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, Е.В. Барочкин // Материалы междунар. науч. – техн. конф. «XV Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 27-29 мая 2009 г. В 2 т. Т 1 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, А.В. Мошкарина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2009. – 284 с. С. 169-170.

98. **Коротков, А.А.** Экспериментальные исследования статистики декарбонизации воды атмосферными деаэраторами / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов и др. // Сб. науч. тр. Шестой Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 21-22 апреля 2013 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 428 с. С. 165-169.

143. **Коротков, А.А.** Моделирование технологических процессов струйной деаэрации воды при атмосферном давлении / А.А. Коротков, Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов // Труды XXII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22». – Псков. – 2009. – С. 82-83.

99. **Коротков, А.А.** Моделирование процессов хемосорбции-десорбции углекислоты в атмосферных струйно-барботажных деаэраторах / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Материалы докл. IV-й молодежной междунар. научн. конф. «Тинчуринские чтения», 22 – 24 апр. 2009 г. / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т. Т 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009 – 236 с. С. 123-124.

100. **Мошкарин, А.В.** Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, А.Е. Барочкин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8, С. 21-25.

101. **Мошкарин, А.В.** Электронное учебное пособие «Атмосферные деаэрационные установки» / А.В. Мошкарин, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, Барочкин Ю.Е. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2010. – вып. 3. – С. 27-29.

102. **Мошкарин, А.В.** Проблемы моделирования процессов хемосорбции-десорбции углекислоты в тепломассообменных аппаратах энергетических установок / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2010. – вып. 2. – С. 15-18.

103. **Коротков, А.А.** Экспериментальные исследования процессов хемосорбции-десорбции диоксида углерода при термической деаэрации воды / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Материалы междунар. науч. – техн. конф. «XVI Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 1-3 июня 2011 г. В 2 т. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, А.В. Мошкарина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2011. – 344 с. С. 54-57.

104. **Коротков, А.А.** Результаты исследования технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, А.В. Мошкарин // Сб. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и

аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика». Смоленск, 2010 г. В 3 т. Т.1. – филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Смоленске, 2010. – 170 с. С. 115-119

105. **Коротков, А.А.** Исследование работы атмосферного деаэратора с барботажным коллектором деаэраторного бака / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский // Тез. докл. XV Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., 26-27 февраля 2009 г. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2009. Т.3. – 420 с. С. 163-164.

106. **Коротков, А.А.** Исследование процессов декарбонизации воды в баках атмосферных деаэраторов / А.А. Коротков, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // Сб. науч. тр. Шестой Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 21-22 апреля 2013 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 428 с. С. 162-165.

107. **Барочкин, Ю.Е.** Компьютерный тренажер по эксплуатации атмосферной деаэрационной установки / Ю.Е. Барочкин, А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский // Тез. докл. XVI Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 3-х т. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. Т.3. – 538 с. С. 222-223.

108. **Барочкин, Е.В.** Особенности декарбонизации воды термическими струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления / Е.В. Барочкин, А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7, С. 40-44.

109. **Барочкин, Е.В.** Исследование эффективности деаэрации воды в баках атмосферных деаэраторов, оборудованных барботажным устройством / Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, А.А. Коротков, А.Ю. Ненаездников // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2009. – вып. 2. – С. 32-36.

110. **Барочкин, Е.В.** Статика и кинетика декарбонизации воды деаэраторами атмосферного давления / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования»: 6-8 дек. 2011 г. Материалы конференции / Под ред. А.В. Мошкарина. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государ. энергетический университет, 2011 – 530 с, С. 43-48.

111. **Коротков, А.А.** Декарбонизация воды термическими деаэраторами атмосферного давления / А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Тез. докл. XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 4-х т. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. Т.4. – 334 с. С. 104.

112. **Виноградов, В.Н.** Режимные характеристики затопленного барботажного коллектора деаэрационного бака атмосферного деаэрата / В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, А.Ю. Ненаездников // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарин. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 99-107.

113. **Магдиев, Е.В.** Исследование переходных процессов в струйных деаэраторах с использованием теории цепей Маркова / Е.В. Магдиев, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, В.Е. Мизонов // Изв. ВУЗов, «Химия и химическая технология». – 2008. – Т. 51. – № 7.

114. **Барочкин, Е.В.** О Моделировании газообмена в пароводяном тракте ТЭС / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2006. – вып. 2.

115. **Магдиев, Е.В.** Структурно-параметрический синтез модели и системный анализ многоступенчатых деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, Е.В. Магдиев // «Химическая промышленность сегодня». – 2005. – Вып. 3.

116. **Барочкин, Е.В.** Моделирование процесса деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаездников и др. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2012. – вып. 6.

117. **Лапотышкина, Н.П.** Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей / Н.П. Лапотышкина, Р.П. Сазонов – М.: Энергоиздат, 1982 – 200 с.

118. **Оликер, И.И.** Работа термического деаэрата атмосферного давления с барботажным устройством ЦКТИ / И.И. Оликер, В.А. Пермяков, Н.М. Бранч // Теплоэнергетика, 1965. – № 9.

119. **Пермяков, В.А.** Исследование эффективности применения парового барботажа в термических деаэраторах электростанций : дис. ... канд. техн. наук :

0305 / Пермяков Владимир Андреевич. – Москва, 1954. – 209 с. – Библиогр.: с. 198 – 209.

120. **Гришук, И.К.** Об условиях отсутствия в питательной воде свободной углекислоты / И.К. Гришук // Электрические станции, 1954. – № 5.

121. **Шарапов, В.И.** Влияние переменных режимов на эффективность деаэрации воды / В.И. Шарапов, Е.В. Макарова, Ю.Г. Макарова, И.П. Рахманова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 4 (32).

122. **Феткулов, М.Р.** Совершенствование технологий термической деаэрации воды тепловых электрических станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Феткулов Марат Рифатович. – Казань, 2005. – 20 с. – Библиогр.: с. 19–20.

123. **Мошкарин, А.В.** Электронное учебное пособие «Атмосферные деаэрационные установки» / А.В. Мошкарин, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, Барочкин Ю.Е. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2010. – вып. 3. – С. 27-29.

124. **Постановление** Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 апреля 2009 г. №20 от «Об утверждении СанПиН 2.1.4.2496-09» : зарег. в Минюсте РФ 5 мая 2009 г., рег. №13891.

125. **Коротков А.А.** Повышение эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2013.

126. **Правила технической эксплуатации** тепловых электрических станций и сетей Российской Федерации : офиц. текст : утв. Приказом Минэнерго России №229 от 19.06.03: ввод. в действие с 30.06.03 : зарег. в Минюсте России 20.06.03 №4799. – М.: Омега-Л, 2006. – 256 с.

127. **Правила устройства и безопасной эксплуатации** паровых и водогрейных котлов (ПБ 10-574-03). Серия 10. Выпуск 24 (Колл. авт. – М.: ГУП “НТЦ по безопасности в промышленности ГТН России”, 2003).

128. **ГОСТ 20995-75.** Котлы паровые стационарные давлением до 3,9 МПа. Показатели качества питательной воды и пара.

129. **РД-10-165-97.** Методические указания по надзору за водно-химическим режимом паровых и водогрейных котлов.

130. **РД 24.031.120-91.** Методические указания. Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов, организация водно-химического режима и химического контроля.

131. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен: Учеб. Пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

132. **Сборник** научных трудов Инженерно – внедренческого центра «Инже-хим». Под ред. А.Г. Лаптева – Казань: Вестфалика, 2012. – 409 с.

133. **Лаптева, Е.А.** Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен) / Е.А. Лаптева, А.Г. Лаптев. – Казань: Издательство «Печать-Сервис XXI век», 2015. – 236 с.

134. **Лаптев, А.Г.** Математическая модель очистки воды от растворенных газов в насадочных аппаратах / А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов // Вода: химия и экология. – 2011. – № 12, С. 98-104.

134. **Лаптев, А.Г.** Модели тепломассопереноса в насадочных аппаратах / А.Г. Лаптев, М.М. Фарахов, Т.М. Башаров // Труды Академэнерго. – 2012. – № 1, С. 57-70.

135. **Лаптев, А.Г.** Модернизация термических деаэраторов на ТЭЦ / А.Г. Лаптев, М.М. Фарахов, А.Н. Долгов, И.Ю. Силов // Теплоэнергетика. – 2013. – № 2, С. 12-14.

136. **Лаптев, А.Г.** Модель турбулентности в жидкой фазе барботажного слоя / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 12, С. 18-22.

137. **Лаптев, А.Г.** Сравнительная энергомассообменная эффективность барботажных такрелок / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Л.М. Ишмуратова // Актуальные вопросы науки. – 2015. – № XX, С. 25-29.

138. **Лаптев, А.Г.** Численное моделирование массопереноса в жидкой фазе барботажного слоя термического деаэратора / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Р.Ш. Мисбахов // Теплоэнергетика. – 2015. – № 12, С. 76-80.

139. **Ледуховский, Г.В.** Исследование процессов тепломассообмена в стационарных режимах работы деаэратора ДА-300м / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков,

В.Н. Виноградов // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов IV Межрег. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов. В 3 т. Т1. – филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Смоленске, 2007. – 176 с. С. 91-93.

140. **Гиммельберг, А.С.** Деаэраторы атмосферного давления для системы теплоснабжения Юго-Западной ТЭЦ / А.С. Гиммельберг, В.Е. Михайлов, В.Г. Михайлов, А.Н. Баева, П.В. Егоров и др. // Электрические станции. – 2013, С. 36 – 40.

141. **Гиммельберг, А.С.** Деаэраторы атмосферного давления новой конструкции для крупных систем теплоснабжения /А.С. Гиммельберг, В.Г. Михайлов, А.Н. Баева, Д.М. Дондер//Тяжелое машиностроение. -2002. -№ 10. -С. 40 -41

142. **Ларин, Б.М.** Оценка эффективности декарбонизации добавочной воды атмосферными деаэраторами / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2, С. 77-80.

143. **Ларин, Б.М.** Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, А.В. Колегов. – Ивановский гос. энергетич. ун-т, 2014. – 332 с.

144. **Чигарев, А.В.** ANSYS для инженеров. Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – Москва: Машиностроение, 2004. – 512 с.

145. **Алямовский А.А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва: ДМК Пресс, 2010. – 464 с

146. **Быков, М.А.** Определение гидравлических характеристик ТВС-2М с использованием программных комплексов STAR-CD и ANSYS CFX / М.А. Быков, А.М. Москалев, А.В. Шишов, О.В. Белова и др. // МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007г.

147. **Аксенов, А.А.** Пакет прикладных программ Flow Vision / А.А. Аксенов, А.В. Гудзовский // М.: МФТИ., сер. Аэрофизика и прикладная математика.— 1998. — С. 45–56.

148. **FlowVision.** Руководство пользователя, версия 3.08.03. – 2012 г.

149. **Кондранин, Т.В.** Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие / Т.В. Кондранин, Б.К.Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев — М.: МФТИ, 2005. — 104 с.

150. **Авиация: Энциклопедия** / Гл. ред. Г.П. Свищев. — М.: Науч. изд-во «Большая рос. энцикл.» : Центр. аэрогидродинам. институт им. Н.Е. Жуковского, 1994. — 736 с.
151. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. — В 2 кн. Кн. 1. Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.
152. **Heinhold I.** Ingeniur statistic. — München; Wien, Springer Verlag, 1964. — 352 p.
153. **Бурдун, Г.Д.** Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков //Москва: Изд-во стандартов, 1985. — 120 с.
154. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. — В 2 кн. Кн. 2. Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 352 с.
155. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. — 9-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.
156. **Бендат, Дж.** Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол.; перевод с англ. д-ра физ.-мат. наук В.Е. Привальского, А.И. Кочубинского, под ред. акад. И.Н. Коваленко. — М.: Изд-во «Мир», 1989. — 540 с.
157. **Воды производственные** тепловых электростанций. Метод определения щелочности: РД 34.37.523.7-88. — Взамен Инструкции по эксплуатационному анализу воды и пара на тепловых электростанциях (М.: СПО Союзтехэнерго, 1979) в части определения щелочности (раздел 2): ввод. в действие с 01.10.1989. — 6 с.
158. **МИ 2083-90.** Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
159. **ТУ 4215-024-39232169-2006.** рН-метр с блоком преобразовательным щитового исполнения и блоком датчиков БД-902: рН-метр МАРК-902.
160. **Количественный химический** анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97) (М.: Мин. Охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 1997).
161. **Воды производственные** тепловых электростанций. Метод определения свободной угольной кислоты: ОСТ 34-70-953.21-91 (М., 1991).
162. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Прикладной программный комплекс «Технологический расчет атмосферных

струйно-барботажных деаэраторов воды» №2012611329 от 01 февраля 2012 года. Авторы: Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков.

163. **Ледуховский, Г.В.** Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, С.Д. Горшенин [и др.] ; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 416 с.

164. **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.

165. **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.

166. **Ледуховский, Г.В.** Влияние парового барботажа в баке атмосферных деаэраторов на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А. // Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 3. с. 5-12.

167. **Ледуховский, Г.В.** Прогнозирование показателей эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления без парового барботажа в деаэраторном баке / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Виноградов В.Н. [и др.] // Теплоэнергетика, 2015, № 7, с. 68-75.

168. **Ледуховский, Г.В.** Методика прогнозирования значений рН воды, выработанной деаэраторами атмосферного давления / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Виноградов В.Н. [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 6. с. 5-9.

169. **Ледуховский, Г.В.** Уточнение механизма процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.2. Секция 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – 164 с. С. 59-62.

170. **Ледуховский, Г.В.** Экспериментальное определение кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных

деаэраторах с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А. // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 8–12 сентября 2014 г.: в 5 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 496 с. С. 287-297.

171. **Ледуховский, Г.В.** Кинетика термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Разинков А.А. // Интеллектуальные энергосистемы: труды II Международного молодёжного форума. В 2т. Томск 6-10 октября 2014 г. Т.2. - Материалы II Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 399 с. С. 95-98.

172. **Горшенин, С.Д.** О влиянии гидродинамической обстановки в деаэраторном баке на кинетику термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах / Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. // Проблемы теплоэнергетики: сб. науч. трудов XII Междунар. науч.-техн. конф. Вып. 3 – Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2014. – 424 с. С. 275-277.

173. **Горшенин, С.Д.** Влияние гидродинамической обстановки в баке атмосферного деаэратора на кинетику термического разложения гидрокарбонатов / Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Двадцать первая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4 – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 303 с. С. 33.

174. **Горшенин, С.Д.** Гидродинамическая обстановка в баке деаэратора и кинетика термического разложения гидрокарбонатов / Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. // Теплоэнергетика – Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: Материалы конференции. В 7 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015, – 208 с. С 28-29.

175. **Ледуховский, Г.В.** Эмпирическое обеспечение модели процесса термического разложения гидро-карбонатов в деаэраторах без парового барботажа / Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии // Междунар. науч. - техн. конф. «XVIII Бенардосовские чтения»: 27-29 мая 2015 г. Материалы конференции. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2015. – 340 с. С. 22-25.

176. **Горшенин, С.Д.** Моделирование процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэрационных баках с паровым барботажом / Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума. В 3т. Томск 28 сентября - 2 октября 2015 г. Т.2. - Материалы III Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 291 с. С. 96-100.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**Документы, подтверждающие
практическую реализацию
результатов работы**

Акционерное общество «Ивгортеплоэнерго»
 153021, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.2/1
 ИНН 3702733438 КПП 370201001
 ОКПО 10719413
 ОКАТО 24401370000
 ОКТМО 24701000001
 тел. (4932) 41-60-03, факс (4932) 38-45-41
 e-mail: igte@igte.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

АО «ИвГТЭ»



А.И. Новичков

20 15

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

1. **Наименование научно-технической продукции:** Программа для ЭВМ «Декарбонизация»
2. **Разработчик(и):** Ледуховский Григорий Васильевич, Горшенин Сергей Дмитриевич, Коротков Александр Александрович, Виноградов Владимир Николаевич, Барочкин Евгений Витальевич (ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»).
3. **Краткая характеристика научно-технической продукции или её элементов, принятых к использованию или используемых:** программа предназначена для прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов, массовой концентрации свободной углекислоты в деаэрированной воде и pH₂₅ деаэрированной воды при известных конструктивных характеристиках деаэраторного бака, а также заданных значениях теплогидравлических и химических показателей теплоносителей деаэратора.
4. **Форма передачи:** на некоммерческой основе без передачи авторских прав.
5. **Форма использования:**
 - 5.1) предусмотренная в программе возможность расчета по упрощенной методике, не предполагающей использование специального программного обеспечения для моделирования течений жидкости, позволяет применять программу непосредственно специалистами-наладчиками котельного и водоподготовительного оборудования для оценки химического качества деаэрированной воды;
 - 5.2) для случаев, требующих большей точности прогнозирования, имеется возможность расчета по уточненной методике; при этом моделирование течения воды в деаэраторном баке по соглашению сторон выполняется авторами программы – сотрудниками ФГБОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина».
6. **Эффект от использования научно-технической продукции:** при использовании программы в рамках режимно-наладочных работ обеспечивается экономия ресурсов и затрат рабочего времени специалистов на проведение теплохимических испытаний деаэрационных установок за счет сокращения количества опытов, упрощается поиск технологически целесообразных режимов работы деаэраторов, обеспечивающих нормативное химическое качество деаэрированной воды.

Начальник службы контроля и диагностики
 тепловых энергоустановок, канд. техн. наук

И.А. Шатова



Общество с ограниченной ответственностью
«ТЕХНОЦЕНТР-НЕФТЕМАШ»

150510, Ярославская область, Ярославский р-н, д. Кузнечиха, ул. Индустриальная д. 2
 ИНН 7627032477, КПП 762701001, ОГРН 1087627000482, ОКПО 02819141, ОКВЭД 65.12

• В Северном банке Сбербанка России г. Ярославль ОСБ №6625 БИК 047888670,

к/сч. 30101810500000000670 р/сч. 40702810577120001181

Тел. (4852) 67-14-25, 67-14-26, 67-14-27, факс 67-14-27.

e-mail: info@tc-neftemash.ru; сайт: www.tc-neftemash.ru

«Утверждаю»

Генеральный директор

ООО «ТЕХНОЦЕНТР-НЕФТЕМАШ»



В.Н. Денисов

«26» октября 2015 г.

**Акт о внедрении результатов
 научно-исследовательской работы**

Настоящий акт составлен в том, что при проектировании ООО «ТЕХНОЦЕНТР-НЕФТЕМАШ» деаэрационной установки рабочим давлением 0,15 МПа и номинальной производительностью 30 м³/ч использованы научно-технические разработки и результаты научных исследований, выполненных коллективом сотрудников ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» в составе: канд. техн. наук, доцент Ледуховский Г.В. (руководитель темы, соисполнитель), ст. преподаватель Горшенин С.Д. (соисполнитель):

1. На основе гидродинамических, тепловых и массообменных расчетов, реализованных в разработанном авторами работы программном комплексе «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» определены конструктивные характеристики деаэрационной колонки, включающей два струйных отсека и непровальный барботажный лист. Использование программного обеспечения позволило увеличить степень

обоснованности принятия технических решений при проектировании, а также рассчитать характеристики процессов тепломассообмена и десорбции растворенного кислорода в колонке при работе деаэратора в граничных режимах регулировочного диапазона нагрузок.

2. Определены конструктивные характеристики затопленного барботажного устройства деаэрационного бака, необходимость использования которого для получения деаэрированной воды с требуемой по условиям проектирования массовой концентрацией растворенного кислорода (не более 10 мг/дм^3) доказана расчетным путем. В результате расчетов установлено, что во всех режимах работы деаэратора массовая концентрация растворенного кислорода в деаэрированной воде не превосходит 7 мг/дм^3 .

3. С использованием предложенных авторами работы методик расчета и математических моделей, а также результатов моделирования течения воды в деаэрационном баке, проведенного в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики Flow Vision, определены прогнозные значения показателей эффективности удаления из воды в деаэраторе соединений угольной кислоты. Показано, что во всех режимах деаэратор обеспечивает получение деаэрированной воды при отсутствии свободного диоксида углерода с pH охлажденной воды не менее 8,68 при отключенном барботажном устройстве деаэрационного бака и не менее 9,06 при наличии парового барботажа в баке. Использование авторских моделей позволило уже на стадии проектирования установки определить необходимые значения режимных параметров работы барботажного устройства.

Главный конструктор
ООО «ТЕХНОЦЕНТР-НЕФТЕМАШ»
кандидат технических наук
Ю.А. Веткин



“ “ г. № На № от “ “ г.

15 февраля 2013 г.

А.В. Блузман

15 февраля 2013 г.

– разработана система мониторинга теплотехнических и химических характеристик потоков теплоносителей и выполнены экспериментальные исследования процессов деаэрации воды в двух деаэраторах питательной воды ДА-50, в ходе которых выявлена неэффективность работы деаэраторов по удалению соединений угольной кислоты: значения pH_{25} деаэрированной воды составляли в среднем 8,10 с эпизодическими отклонениями вплоть до значений 6,78 при диапазоне нормативных значений от 8,50 до 9,50;

- с использованием авторских методик и программных средств выполнены расчетные исследования процессов деаэрации, по результатам которых показана необходимость оборудования деаэраторов затопленным барботажным устройством деаэрационного бака;

- составлен эскизный проект модернизации деаэраторов с организацией парового барботажа в деаэрационных баках, который реализован в ходе ремонтной кампании 2011 года;

- проведены повторные теплехимические испытания деаэраторов, по результатам которых выявлено, что при использовании парового барботажа в деаэрационных баках значения pH_{25} деаэрированной воды увеличились в среднем до 9,10, а минимальные значения этого показателя составляют от 8,5 до 8,7 (в зависимости от режима);

- расчетно-экспериментальным путем определены необходимые значения удельного расхода пара на барботаж, внесены изменения в режимные карты деаэраторов.

Использование полученных научных результатов и методических рекомендаций способствовало повышению технологической и энергетической эффективности деаэрационных установок.

Директор департамента энергетического менеджмента, канд. техн. наук

В.В. Масленников