На правах рукописи

КОРОТКОВ Александр Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ ТЕРМИЧЕСКИМИ ДЕАЭРАТОРАМИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2013

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

Научный руководитель:
Барочкин Евгений Витальевич, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:
Шарапов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», руководитель НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки»

Бушуев Евгений Николаевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов»

Ведущая организация:
Открытое акционерное общество «Зарубежэнергопроект», г. Иваново

Защита состоится «25» октября 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «23» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, профессор Шувалов Сергей Ильич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ[1]

Актуальность работы. Термические струйно-барботажные деаэраторы атмосферного давления применяются при подготовке добавочной воды тепловых электрических станций (ТЭС), в качестве деаэраторов питательной воды котлов низкого и среднего давлений, подпиточной воды тепловых сетей. Эффективность деаэраторов по удалению из воды коррозионно активных газов оказывает существенное влияние на надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС, котельных и трубопроводов тепловых сетей.

Теоретические данные и опыт эксплуатации указывают на то, что эффективность деаэратора по удалению из воды различных форм угольной кислоты является часто определяющей: скорость кислородной коррозии металла существенно увеличивается при наличии в воде свободного диоксида углерода. Важно, что свободный диоксид углерода, образовавшийся в процессе термического разложения гидрокарбонатов при дальнейшем (после деаэратора) нагреве воды, например, в паровых котлах, участвует в коррозионных процессах. Поэтому, наряду с эффективностью удаления из воды в деаэраторе свободного диоксида углерода, значимой является эффективность работы деаэратора по удалению химически связанных форм угольной кислоты.

Опубликованы результаты исследований отдельных струйных и барботажных элементов либо деаэраторов в целом, проведенных сотрудниками ЦКТИ, ВТИ, МЭИ, УлГТУ, ИГЭУ и других научных и производственных организаций. Большинство полученных математических моделей обеспечивают расчет характеристик процессов теплообмена и десорбции растворенного кислорода, но не позволяют количественно прогнозировать работу деаэратора по удалению диоксида углерода. Имеются противоречия в опубликованных данных об эффективности декарбонизации воды деаэраторами.

Значения остаточных концентраций в деаэрированной воде газов, включая диоксид углерода, а также химически связанных форм угольной кислоты определяются конструктивными и режимными параметрами. Число сочетаний их значений настолько велико, что на практике режим работы деаэратора с требуемым химическим качеством деаэрированной воды может быть установлен только в ходе натурных испытаний, сопряженных с материальными и трудовыми затратами. Экономии этих затрат при эксплуатации имеющихся установок, а также повышению обоснованности проектных решений при создании новых объектов способствует разработка моделей, обеспечивающих расчет показателей работы деаэратора с требуемой точностью.

Таким образом, актуальными для энергетики являются исследования процессов деаэрации, разработка математических моделей атмосферных струйно-барботажных деаэраторов, обеспечивающих расчет характеристик процессов десорбции диоксида углерода с учетом сопутствующих химических реакций, и совершенствования на основе численных экспериментов эксплуатационных режимов деаэрационных установок.

---

[1] По экспериментальной части работы диссертанта консультировали канд. техн. наук, доц. каф. ТЭС ИГЭУ **Г.В. Ледуховский** и канд. техн. наук, доц. каф. ХХТЭ ИГЭУ **В.Н. Виноградов**

Целью исследований является повышение эффективности работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления по удалению из воды свободного и химически связанного диоксида углерода без ухудшения качества деаэрированной воды по растворенному кислороду на основе совершенствования их эксплуатационных режимов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

– проведение экспериментальных исследований процессов удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода в струйных и барботажных элементах атмосферных деаэраторов различных конструкций;

– уточнение существующих или, при необходимости, разработки новых математических моделей, обеспечивающих расчет процессов декарбонизации в отдельных деаэрационных элементах;

– проведение исследований влияния парового барботажа в деаэраторном баке на эффективность работы деаэратора как декарбонизатора;

– разработка режимных и конструктивных мероприятий по повышению эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: ***в части формулы специальности*** – «проблемы совершенствования действующих и обоснования новых … систем … водоподготовки; … вопросы … водных режимов»; ***в части области исследования*** – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов …»; пункту 2: «Исследование … процессов, протекающих в агрегатах …»; пункту 3: «… исследование, совершенствование действующих … технологий … использования … водных и химических режимов…»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены новые экспериментальные и расчетные данные, доказывающие, что выходные по пару струйные отсеки атмосферных деаэраторов работают преимущественно в условиях физической абсорбции свободного диоксида углерода водой, что обусловливает нестабильность содержания свободного диоксида углерода в воде за струйными отсеками, а при отсутствии нижестоящей барботажной ступени – и за деаэратором.

2. Уточнены значения кинетических характеристик процессов термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака.

3. Для атмосферных деаэраторов с затопленным барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного коллектора в деаэраторном баке предложена регрессионная зависимость степени термического разложения гидрокарбонатов от времени пребывания воды в деаэраторном баке и удельного расхода пара на барботаж.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение по расчету показателей работы атмосферных струйно-барботажных деаэраторов в части характеристик процессов декарбонизации.

2. Сформулированы рекомендации по ведению эксплуатационных режимов атмосферных струйно-барботажных деаэраторов, обеспечивающие повышение эффективности декарбонизации воды без ухудшения эффективности её обескислороживания.

3. Разработан проект модернизации серийно выпускаемых атмосферных деаэраторов моделей ДА с организацией парового барботажа в деаэраторном баке для увеличения степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе и стабилизации химических показателей качества деаэрированной воды.

Достоверность полученных результатов обусловлена проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации с использованием стандартизованных методов и средств измерения параметров; выбором в качестве объектов экспериментальных исследований нескольких различающихся по конструкции деаэраторов; использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением в пределах достигнутых характеристик точности результатов расчета и фактических показателей работы оборудования; сопоставлением полученных результатов с опубликованными результатами исследований других авторов.

Автор защищает:

– экспериментальные данные, характеризующие процессы удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода раздельно в струйных и барботажных элементах деаэраторов ДА-300м и ДСА-300, а также в деаэраторах ДА-50;

– результаты расчетно-экспериментальных исследований статических условий работы струйных отсеков атмосферных деаэраторов по удалению свободного диоксида углерода и влияния этих условий на стабильность содержания диоксида углерода в деаэрированной воде;

– экспериментальные значения кинетических характеристик процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака;

– результаты анализа влияния парового барботажа в деаэраторном баке на эффективность декарбонизации воды атмосферными деаэраторами;

– разработанные алгоритмы, обеспечивающие расчет показателей работы деаэраторов атмосферного давления как декарбонизаторов, и их программную реализацию;

– рекомендации по ведению эксплуатационных режимов и конструктивному исполнению термических деаэраторов атмосферного давления с целью повышения эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода без ухудшения качества деаэрированной воды по содержанию растворенного кислорода.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы в ходе режимно-наладочных испытаний деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м теплосилового цеха ОАО «Северсталь» (г. Череповец Вологодской обл.), деаэраторов ДА-50 парогазовой ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания» (г. Родники Ивановской обл.), переданы в ЗАО «Регион-Бизнес» (г. Москва), где используются при проведении испытаний и в ходе предпроектных проработок вариантов реконструкции деаэрационных установок. Результаты работы внедрены также в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета по кафедре «Тепловые электрические станции» в виде электронного учебного пособия и расчетной компьютерной программы. Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения, включая акт о проведенной модернизации действующих деаэраторов.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке метрологического обеспечения, обработке и анализе результатов испытаний деаэраторов ДСА-300, ДА-300м, ДА-50 в части характеристик процессов десорбции диоксида углерода с сопутствующими химическими реакциями; в обработке и анализе экспериментальных данных и проведении расчетных исследований, касающихся определения кинетических характеристик процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах; в разработке алгоритмов программных модулей по расчету деаэраторов; в проведении численных исследований и разработке рекомендаций по ведению режимов работы деаэраторов атмосферного давления.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 10 международных конференциях: IV Молодежной международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2009 г.); Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» – XV, XVI Бенардосовские чтения (Иваново, 2009, 2011 г.); XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22» (Псков, 2009); XV, XVI и XIX Международных научно–технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2009, 2010, 2013 г.); VII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика», (Смоленск, 2010); V Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2011 г.); VI Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2013 г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 21 опубликованной работе, в том числе в семи статьях в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК), двух статьях в сборнике научных трудов; получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка использованных источников из 153 наименований и приложения. Работа изложена на 156 стр. машинописного текста, кроме того, приложение на 5 стр., включает 49 рисунков и 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ опубликованных данных о процессах тепломассообмена в условиях струйно-барботажной деаэрации воды при атмосферном давлении. Наиболее значимые результаты в рассматриваемой предметной области обобщены в работах И.К. Гришука, В.А. Пермякова, И.И. Оликера, С.С. Кутателадзе, В.И. Шарапова и др. Исследованию технологических процессов термической деаэрации воды посвящены также работы сотрудников ИГЭУ – В.Н. Виноградова, Г.В. Ледуховского, Е.В. Барочкина, В.П. Жукова. Выявлено, что большинство исследований посвящено процессам теплообмена и десорбции растворенного кислорода; сведения о процессах удаления свободного и химически связанного диоксида углерода в деаэраторах не систематизированы и отчасти противоречивы.

Проведенный анализ эксплуатационных данных и опубликованных результатов исследований показал, что эффективность работы деаэратора как декарбонизатора является во многих случаях критичной по условиям обеспечения защиты оборудования и трубопроводов от коррозии. При этом данные режимно-наладочных испытаний доказывают, что удалить из воды в процессе термической деаэрации растворенный кислород, используя режимные мероприятия, проще, чем добиться нормативного качества деаэрированной воды по содержанию соединений угольной кислоты: механизм физической десорбции растворенного кислорода существенно отличается от механизма хемосорбции-десорбции диоксида углерода – это необходимо учитывать при выборе конструктивного исполнения и наладке режима работы деаэраторов.

Учитывая большое число параметров, влияющих на показатели работы деаэратора, необходимо выяснить, какие из этих параметров являются определяющими с точки зрения процессов декарбонизации. Анализ показал, что опубликованных данных для этого недостаточно; это потребовало в рамках настоящей работы запланировать этап экспериментальных исследований, в том числе, позволяющих определить показатели эффективности работы отдельных струйных и барботажных деаэрационных устройств.

Экспериментальные данные необходимы также для идентификации существующих либо разработки новых математических моделей для расчета процессов декарбонизации в отдельных деаэрационных элементах, на основе которых возможен синтез модели деаэратора в целом. Адекватная математическая модель деаэратора как декарбонизатора может использоваться для проведения численных экспериментов при анализе эффективности тех или иных конструктивных или режимных мероприятий.

По результатам работы должны быть сформулированы рекомендации по конструктивному исполнению и ведению эксплуатационных режимов деаэраторов атмосферного давления, включая важные для эксплуатации реко-

мендации по использованию парового барботажа в деаэраторном баке, обеспечивающие повышение эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода.

С учетом результатов проведенного анализа опубликованных данных сформулированы задачи работы.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям процессов декарбонизации воды струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления типовых конструкций. Исследования проводились в условиях промышленной эксплуатации деаэраторов по двум направлениям: 1 – испытания методом активного эксперимента для получения данных о показателях эффективности работы отдельных струйных отсеков и барботажных устройств; 2 – сбор эксплуатационных данных, получаемых в режиме пассивного наблюдения, об эффективности декарбонизации воды в деаэраторах в целом.

Первый экспериментальный этап работы выполнен в условиях ОАО «Северсталь» (г. Череповец) на деаэраторах моделей ДСА-300 и ДА-300м (рис. 1[2]). Деаэраторы работают на Na-катионированной воде. Объекты исследований оборудованы системами отбора проб, разработанными таким образом, чтобы обеспечить получение теплофизических и химических характеристик потоков воды за каждым отдельным элементом: струйным отсеком, барботажным листом, затопленным барботажным устройством и т.п.

Точки отбора проб воды с типовым объемом контроля показаны на рис. 1. В типовой объем контроля входили измерения температуры неохлажденной пробы и химических показателей качества: концентрации растворенного кислорода, щелочности общей и по фенолфталеину, удельной электропроводности, водородного показателя pH, массовой концентрации свободного диоксида углерода. Кроме того, для входных потоков воды, пара, а также выпара деаэратора ДСА-300 измерялся расход и давление, контролировался уровень воды в деаэраторном баке; параметры выпара деаэратора ДА-300м определялись по балансу охладителя выпара. Метрологическое обеспечение испытаний составляли преимущественно образцовые средства измерения, прошедшие поверку в соответствии с требованиями нормативных документов.

Методика проведения и результаты испытаний рассматриваемых деаэраторов в части характеристик тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и массообмена в системе «растворенный кислород – вода – водяной пар» защищены Г.В. Ледуховским в рамках кандидатской диссертации. Личное участие автора настоящей работы в проведении данного этапа исследований состояло в разработке методики, метрологического обеспечения, а также реализации обработки результатов испытаний в части характеристик процессов массообмена в системе «Свободный диоксид углерода – химически связанные формы угольной кислоты – вода – водяной пар».

В общей сложности реализован 31 опыт при изменении параметров в регулировочных диапазонах. Каждый опыт длился не менее полутора часов с

[2] На рис. 1 внизу показан деаэраторный бак деаэратора ДА-300м; отличия бака деаэратора ДСА-300 заключаются в отсутствии элементов 18, 19 и 22

предварительным контролем стабилизации теплохимического состояния деаэратора; в ходе опыта теплофизические характеристики потоков, а также химические параметры, определяемые приборами химического контроля (массовая концентрация растворенного кислорода, удельная электропроводность, pH), измерялись от 9 до 15 раз, а химические параметры, определяемые титрометрическими методами (щелочность общая и по фенолфталеину, массовая концентрация свободного диоксида углерода), – не менее 3 раз.

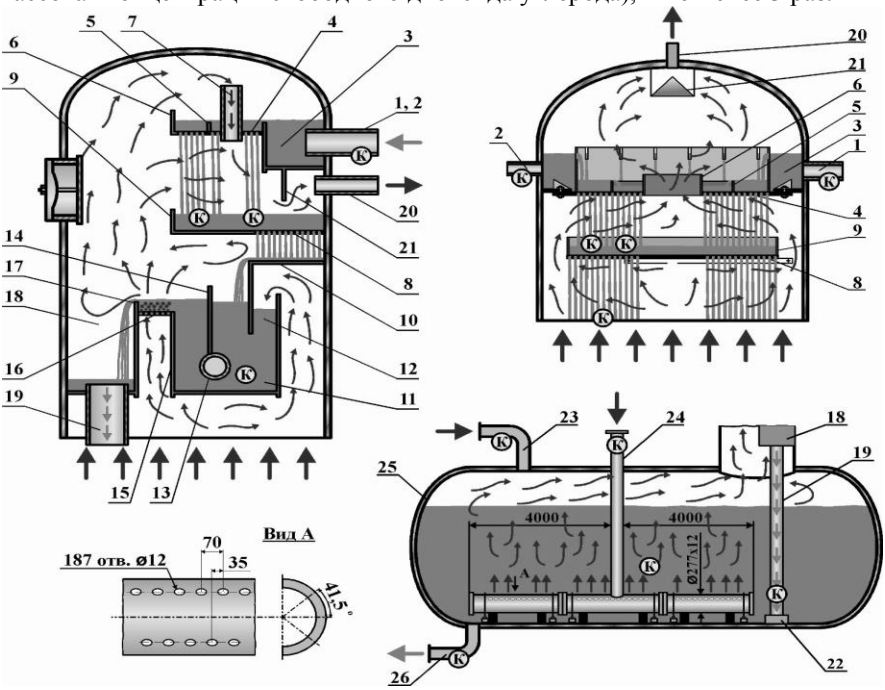


Рис. 1. **Конструктивные схемы деаэрационных колонок деаэраторов ДА-300м (слева вверху) и ДСА-300 (справа вверху), деаэраторных баков вместимостью 75 м^3 (внизу):** 1, 2 – штуцеры подвода основного потока воды и воды из охладителя выпара; 3 – смесительный колодец; 4 – тарелка струеобразующая; 5 – секционирующий порог; 6, 9, 17 – ограничительный порог; 7 – пароперепускная труба; 8 – перепускная тарелка; 10 – переливная полка; 11 – барботажный колодец; 12 – пароперепускное устройство; 13 – барботажный коллектор деаэрационной колонки (не используется, отглушен); 14 и 15 – перегородки канала подъемного движения; 16 – барботажный лист; 18 – сливной колодец; 19 – опускной трубопровод; 20 – штуцер отвода выпара; 21 – брызгоотражатель; 22 – стакан; 23 и 24 – штуцеры подвода соответственно основного и барботажного пара; 25 – барботажный коллектор бака; 26 – штуцер отвода деаэрированной воды; литерой «К» обозначены точки отбора проб воды с типовым объемом контроля

По полученным таким образом первичным результатам измерения параметров, характеризующих эффективность декарбонизации воды, после исключения известных систематических погрешностей определены окончательные результаты их измерения в опытах и доверительные границы погрешности окончательных результатов измерений (использованы известные значения приписанной характеристики погрешности методик количествен-

ных химических анализов). Значения параметров в точках, не обеспеченных приборным контролем, определены в ходе балансовых расчетов. Необходимые теплотехнические характеристики потоков на входе и выходе каждого отдельного элемента приняты по данным, полученным Г.В. Ледуховским.

Таким образом, в ходе первого этапа экспериментальных исследований сформирован блок опытных данных по режимам работы струйных отсеков и барботажных устройств различного конструктивного исполнения, включающий теплофизические характеристики воды и пара на входе и выходе этих устройств, а также химические параметры качества этих потоков, необходимые для анализа эффективности удаления из воды свободного диоксида углерода и химически связанных форм угольной кислоты.

Для проведения второго экспериментального этапа работы были выбраны деаэраторы различных типовых конструкций: ДСА-300 (ОАО «Северсталь», г. Череповец), конструктивно отличающийся от испытанного на первом этапе деаэратора наличием только одного струйного отсека в деаэрационной колонке; два деаэратора ДА-50 (парогазовая ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания», г. Родники Ивановской обл.). Ценность этого объекта обусловлена тем, что деаэраторы эксплуатируются при существенном сезонном изменении общей щелочности воды – от 0,5 до 4,5 мг-экв/кг, а по некоторым опубликованным данным щелочность воды существенно влияет на эффективность процесса декарбонизации.

При проведении исследований на деаэраторах ДА-50 реализована система мониторинга теплофизических и химических характеристик потоков воды на входе и выходе аппаратов. Испытания длились около полугода, за этот период накоплена статистика по более чем 600 опытам, при этом для каждого опыта известно следующее: расход и температура воды на входе в деаэратор; давление в паровом пространстве; уровень воды в баке; температура деаэрированной воды; водородный показатель pH, массовая концентрация свободного диоксида углерода, щелочность общая и по фенолфталеину исходной и деаэрированной воды, а также общая щелочность греющего пара. В ходе испытаний использованы средства измерения лабораторного класса точности, для ряда параметров организовано дублирование измерений.

В третьей главе выполнен анализ экспериментальных данных по деаэраторам ДСА-300 и ДА-300м, характеризующих эффективность декарбонизации воды в деаэрационных колонках.

На рис. 2 представлено изменение массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок в условиях опытов[3]. Видно, что верхние струйные отсеки преимущественно работают как абсорберы, а содержание свободного диоксида углерода в воде за деаэрационной колонкой мало отличается от его содержания в исходной воде.

---

[3] Доверительные границы погрешности окончательных результатов измерения (Δ, %) описываются выражением: $\Delta = \begin{cases} 64{,}8e^{-1{,}76\cdot10^{-4}C_{CO2}} \text{ при } C_{CO2} < 10^3 \text{ мкг/кг} \\ 27{,}4e^{-5{,}50\cdot10^{-5}C_{CO2}} \text{ при } C_{CO2} \geq 10^3 \text{ мкг/кг} \end{cases}$

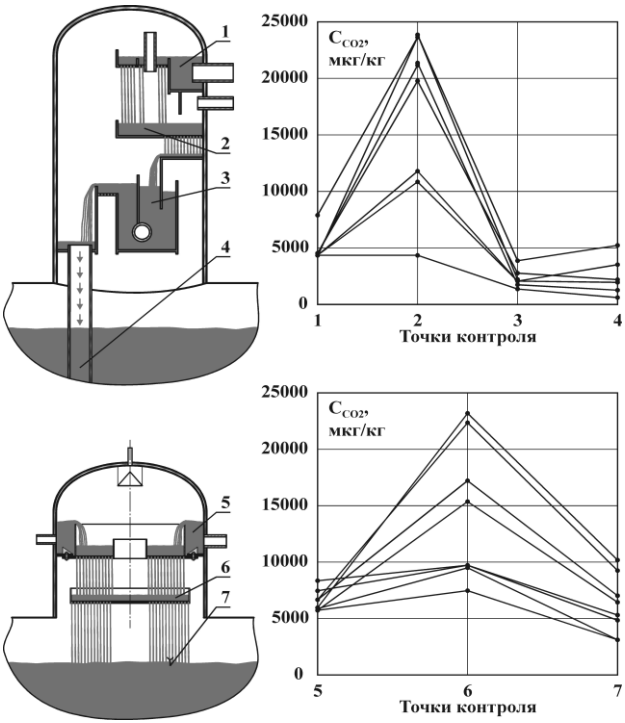


Рис. 2. **Изменение массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок деаэраторов ДА-300м (вверху) и ДСА-300 (внизу) в условиях опытов:** 1–7 – точки отбора проб воды; C_{CO2} – массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг; отельные линии соответствуют отдельным опытам

Имеются опубликованные данные, содержащие аналогичные результаты. В качестве объяснения подобной картины их авторами выдвигалась гипотеза о наличии механического захвата (дисперсного поглощения) диоксида углерода из паровой фазы турболизованным потоком воды. Такое объяснение представляется неполным: если бы причина состояла только в наличии дисперсного поглощения диоксида углерода водой в струйных отсеках, то аналогичный эффект должен наблюдается и по кислороду, однако он не отмечается. Это может быть обусловлено лишь отличием статических условий обратимых процессов абсорбции и десорбции рассматриваемых газов.

При анализе статических условий – определении соотношения равновесного и фактического содержания газа в воде в различных точках деаэраторов – в качестве закона фазового равновесия использован закон Генри. Результаты анализа в отношении диоксида углерода для условий верхних струйных отсеков приведены на рис. 3. Полученные данные позволили заключить, что равновесная массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде сравнительно мало отличается от его фактической массовой концентрации (аналогичные концентрации растворенного кислорода отличаются друг от друга в сто и более раз). В диссертации показано также, что содержащийся в паре диоксид углерода, будучи плохо растворимым в воде в данных условиях газом, должен концентрироваться вблизи границы раздела фаз, что еще больше отклоняет систему от равновесия в зону абсорбции.

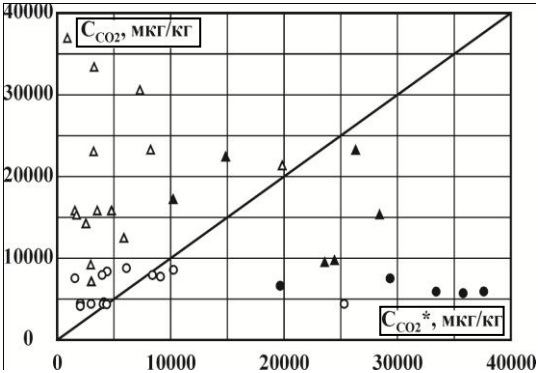


Рис. 3. **Результаты анализа статических условий абсорбции-десорбции свободного диоксида углерода в верхних струйных отсеках деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м:** C_{CO2}* и C_{CO2} – соответственно равновесная и фактическая массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг; сплошная линия – равновесные условия; точки – результаты расчета при условиях опытов; ● – ДСА-300, верхняя часть отсека; ▲ – ДСА-300, нижняя часть отсека; ○ – ДА-300м, верхняя часть отсека; Δ – ДА-300м, нижняя часть отсека

По результатам анализа сделан вывод, что система «кислород – вода» в условиях работы верхних струйных отсеков деаэраторов всегда далека от равновесия и находится в зоне десорбции, а статические условия для системы «диоксид углерода – вода», напротив, близки к равновесным с возможностью перехода из зоны десорбции в зону абсорбции. При наличии относительно малой по величине разности равновесной и фактической концентраций (движущей силы процесса декарбонизации) не следует ожидать интенсивного газообмена по растворенному диоксиду углерода, не говоря уже о его химических связанных формах, что и наблюдалось в экспериментах.

Таким образом, при работе атмосферных деаэраторов основная нагрузка по удалению свободного и особенно химически связанного диоксида углерода приходится на деаэраторный бак. В этих условиях для решения поставленных задач возникла необходимость в изучении влияния режимных параметров деаэраторных баков на эффективность удаления из воды свободного диоксида углерода и химически связанных форм угольной кислоты.

Четвертую главу составляют результаты исследований процессов декарбонизации воды в деаэраторных баках при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме.

Учитывая, что давление в паровом пространстве атмосферного деаэратора может изменяться лишь в очень узком диапазоне, а также то, что попадание в деаэраторный бак воды с большим недогревом до температуры насыщения заведомо приводит к ухудшению эффективности деаэрации, к параметрам, которыми можно реально управлять с целью повышения эффективности декарбонизации воды, следует отнести только следующие: гидравлическую нагрузку бака, расход барботажного пара через затопленное барботажное устройство (который определяет и соотношение между расходами основного и барботажного пара), уровень воды в деаэраторном баке.

Рассматриваются деаэраторы, работающие на Na-катионированной воде. Для этого случая предполагается следующий механизм необратимого процесса термического разложения гидрокарбонатов:

● в молекулярной форме:	● в ионной форме:
$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2^{aq},$	$2HCO_3^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O + CO_2^{aq},$
$NaHCO_3 + NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O,$	$HCO_3^- + OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O,$
$CO_2^{aq} \rightarrow CO_2 \uparrow,$	$CO_2^{aq} \rightarrow CO_2 \uparrow.$

(1)

Свободный диоксид углерода, образующийся в результате процессов термического разложения гидрокарбонатов, первое время присутствует в воде в растворенной форме, а после пересыщения раствора начинается его дисперсное выделение в виде газовых пузырей. Таким образом, результирующий процесс включает последовательно протекающие стадии химического превращения, молекулярной диффузии и дисперсного выделения газа, причем вторая и третья стадии являются зависимыми от гидродинамической обстановки в системе. Учитывая, что температура в водяном объеме деаэраторного бака в регулировочном диапазоне нагрузок деаэратора мало отличается от температуры насыщения при давлении в надводном пространстве бака, скорость первой стадии – процесса генерации молекулярного диоксида углерода – должна определяться только порядком химической реакции.

В общем случае будем предполагать протекание процесса по реакции первого или второго порядка. Кинетическое уравнение запишется в виде:

$$dC/dT = -KC^n, \qquad (2)$$

где С – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде, К – константа скорости реакции; Т – время; n – порядок реакции, равный 1 или 2.

Причем порядок n = 2 считается здесь более вероятным: это подтверждается данными других авторов, например, И.Е. Орлова и В.А. Пермякова.

На практике эффективность декарбонизации воды в деаэраторах характеризуется раздельно для свободного и химически связанно диоксида углерода. В первом случае используется концентрация свободного диоксида углерода в деаэрированной воде. Эффективность удаления из воды в деаэраторе химически связанных форм углекислоты принято оценивать по значению степени разложения гидрокарбонатов σ, которая может быть подсчитана по значениям щелочности общей $Щ_o^{дв}$ и по фенолфталеину $Щ_{фф}^{дв}$ деаэрированной воды:

$$\sigma = 2Щ_{фф}^{дв} \big/ Щ_o^{дв}. \qquad (3)$$

В работе, кроме указанных традиционных характеристик эффективности декарбонизации, изучалась целесообразность использования интегрального критерия, который бы учитывал эффективность удаления из воды как свободного, там и химически связанного диоксида углерода. В качестве такого критерия введена интегральная степень удаления углекислоты в деаэраторе μ:

$$\mu = \frac{G_{CO_2}^{раст} + G_{CO_2}^{связ}}{G_{CO_2}^{раст.исх} + G_{CO_2}^{связ.исх}} = \frac{C_{CO_2}^{исх} + \dfrac{G_д}{G_{исх}} \dfrac{\rho_{исх}}{\rho_д} \left(44 \cdot 2Щ_{фф}^{д} - C_{CO_2}^{д}\right)}{\left(44Щ_o^{исх} + C_{CO_2}^{исх}\right)}, \qquad (4)$$

где $G_{CO_2}^{раст}$ и $G_{CO_2}^{связ}$, кг/ч – массовый выход диоксида углерода из воды в деаэраторе в результате соответственно десорбции газа, который находился в исходной воде в растворенном состоянии, и в результате термического разложения гидрокарбонатов; $G_{CO_2}^{раст.исх}$ и $G_{CO_2}^{связ.исх}$, кг/ч – расходы поступающего в деаэратор с водой диоксида углерода, находящегося, соответственно в растворенном состоянии и в виде гидрокарбонатов; C_{CO_2}, мкг/дм^3 – массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде; G, т/ч – расход воды; ρ, т/м^3 – плотность воды; $Щ_о$ и $Щ_{фф}$, мкг-экв/дм^3 – щелочность соответственно общая и по фенолфталеину; индексы «исх» и «дв» указывают соответственно на исходную и деаэрированную воду.

Проведенный анализ показал, что использование в качестве характеристики эффективности декарбонизации воды в деаэраторе интегральной степени удаления углекислоты μ не дает заметных преимуществ в сравнении с традиционным подходом к раздельному учету эффективности удаления свободного и химически связанного диоксида углерода. Это обусловлено тем, что процессы термического разложения гидрокарбонатов интенсифицируются только после того, как из воды удалена большая часть свободного диоксида углерода. Кроме того, показано, что одним и тем же условиям работы деаэратора могут соответствовать разные значения μ, что создает существенное неудобство при пользовании такой характеристикой эффективности.

В рамках данного этапа работы при использовании экспериментальных данных определялись значения К в уравнении (2) при n = 1 или n = 2 и σ по уравнению (3). При этом требуемое для расчетов после интегрирования уравнения (2) время пребывания воды в деаэраторном баке определялось путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак.

На рис. 4 приведены экспериментальные значения параметра σ в деаэраторах различных конструкций при наличии и отсутствии в водяном объеме деаэраторного бака затопленного барботажного устройства. Анализ полученных результатов показывает, что опубликованные данные других авторов для деаэраторов с барботажом в водяном объеме бака подтверждаются. Данные по деаэраторам без барботажа отличаются от ранее опубликованных в меньшую сторону, причем наблюдается существенный разброс экспериментальных значений σ (отметим, что опубликованные данные в этой части также существенно различаются, на рис. 4 показана максимальная оценка). Зависимости параметра σ от других режимных параметров деаэраторного бака для этого случая также не установлено. Сделано предположение, что полученные данные обусловлены следующим: большая часть газовых пузырей, образующихся в процессе термического разложения гидрокарбонатов и последующего пересыщения раствора по диоксиду углерода, оказываются ввиду малости размера неспособными к самостоятельному всплытию в потоке воды.

Данные рис. 4 доказывают эффективность использования барьерного парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака, который позволяет существенно повысить эффективность удаления химически связанного диок-

сида углерода и, тем самым, уменьшить выход свободного диоксида углерода в процессе термического разложения гидрокарбонатов в котлах, расположенных в технологической схеме за деаэратором.

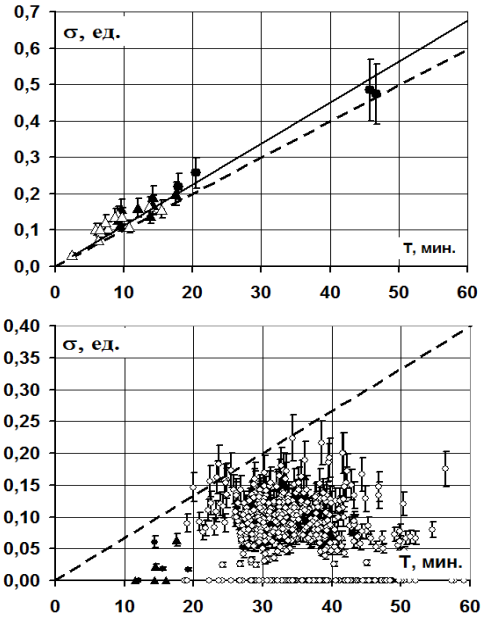


Рис. 4. **Экспериментальные значения степени разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе при наличии (вверху) и отсутствии (внизу) парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака:** σ – степень разложения гидрокарбонатов, ед.; Т, мин – время пребывания воды в деаэраторе; точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных (метод наименьших квадратов; линейная зависимость выбрана в соответствии с опубликованными данными других авторов); пунктирные линии – опубликованные данные других авторов; Δ – ДА-300м; ▲ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); ● – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке); ○ – ДА-50

На рис. 5 приведены результаты расчета константы К скорости результирующего процесса в уравнении (2) при порядке реакции n = 2 для условий опытов в зависимости от щелочности общей исходной воды. В расчетах учтено как поступление свободного и химически связанного диоксида углерода в деаэратор, так и его отвод с выпаром и деаэрированной водой. При порядке реакции n = 1 разброс значений К оказывается заметно больше.

Разброс полученных значений К может быть обусловлен не только метрологическими характеристиками методов количественного химического анализа и измерения влияющих на расходы воды и пара теплотехнических параметров, но и неполнотой принятой ранее гипотезы о механизме процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе. Тем не менее, полученные кинетические характеристики процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака обеспечивают возможность проведения количественной оценки показателей эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода.

Представленные в работе данные по деаэраторам с барботажным устройством в виде перфорированного коллектора на дне деаэраторного бака позволили составить уравнение двухпараметрической регрессионной зависимости степени термического разложения гидрокарбонатов σ, ед., от удельного расхода пара на барботаж $d_{БП}$, кг/т, и времени пребывания воды в баке Т, нормi-

рованного по отношению к номинальному значению $T_н$ для данного деаэраторного бака ($T_н$ определяется как отношение номинальной полезной вместимости бака к номинальной гидравлической нагрузке деаэратора):

$$\sigma = 0{,}0657\left(T/T_н\right)^{0{,}571} d_{БП}^{\;0{,}318}. \qquad (5)$$

Среднеквадратическое отклонение по прогнозированию значений σ с использованием выражения (5) по совокупности экспериментальных данных составило 4,8 %. Для сравнения, для однопараметрической зависимости, показанной на рис. 4 (вверху), этот показатель составляет 18,0 %. Значения коэффициентов парной корреляции: $r(\sigma;T/T_н)$ = 0,97; $r(\sigma;d_{БП})$ = 0,92; $r(T/T_н;d_{БП})$ = 0,42. Множественное корреляционное отношение при этом составило R = 0,99. Значимость коэффициентов парной корреляции и множественного корреляционного отношения доказана по критерию Стьюдента.

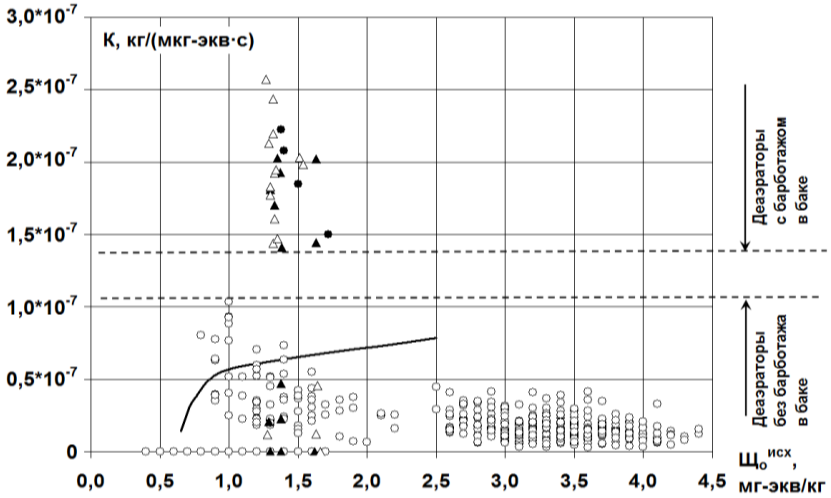


Рис. 5. **Экспериментальные значения константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от щелочности общей исходной воды при отсутствии и наличии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака:** К – константа скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, кг/(мкг-экв·с) (порядок реакции n = 2); $Щ_о^{исх}$ – щелочность общая воды перед деаэратором, мг-экв/кг; прочие обозначения те же, что на рис. 4; линией показаны данные из диссертации В.А. Пермякова

Выявлено, что минимально необходимое по технологическим условиям декарбонизации воды значение удельного расхода пара на барботаж при использовании рассматриваемого барботажного устройства составляет от 15 до 20 кг/т; при значениях удельного расхода пара на барботаж менее 15 кг/т эффективность декарбонизации заметно ухудшается, а увеличение удельного расхода пара на барботаж более 20 кг/т не приводит к существенному повышению эффективности. Эти данные согласуются с данными других авторов в части целесообразного удельного расхода пара на барботаж для рассматриваемого устройства по условию обескислороживания воды (15 кг/т).

Таким образом, на данном этапе получены зависимости показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторных баках от времени пребывания воды в баке (т.е. от гидравлической нагрузки и уровня воды в баке), удельного расхода пара на барботаж (т.е. от гидравлической нагрузки и расхода барботажного пара через затопленное барботажное устройство).

В пятой главе приведено описание следующих направлений практической реализации результатов работы:

– режимной наладки двух деаэраторов ДА-300м и четырех деаэраторов ДСА-300 теплосилового цеха ОАО «Северсталь», в ходе которой с использованием полученных на предыдущих этапах работы данных разработаны рекомендации по ведению режимов работы деаэрационной установки, включая рекомендации по использованию парового барботажа в деаэраторных баках, оформленные в виде режимных карт по эксплуатации деаэраторов;

– разработки расчетных алгоритмов и реализующих их программных модулей для защищенного свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ прикладного программного комплекса (ПК) «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды». ПК обеспечивает определение теплофизических параметров потоков теплоносителей и массовых концентраций в них растворенного кислорода и свободного диоксида углерода при заданных конструктивных характеристиках внутренних деаэрационных элементов, структуре связей между ними по потокам теплоносителей и значениях регулируемых параметров. ПК обеспечивает возможность автоматизированного синтеза математической модели деаэратора из моделей отдельных струйных и барботажных деаэрационных элементов при изменении конструкции аппарата. ПК передан ЗАО «Регион-Бизнес», где используется в практической работе и обеспечивает экономию материальных и трудовых затрат при проведении испытаний и повышение обоснованности решений, принимаемых при проектировании деаэрационных установок;

– разработки рекомендаций по модернизации двух деаэраторов ДА-50 парогазовой ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания». По результатам мониторинга работы аппаратов в проектном варианте конструктивного исполнения составлен проект модернизации с установкой барботажного устройства в водяном объеме деаэраторного бака для обеспечения требуемого химического качества деаэрированной воды, в частности, по значению водородного показателя pH_{25}. Проект получил практическую реализацию, что обеспечило увеличение значений pH_{25} деаэрированной воды в среднем с 8,10 (с эпизодическими нарушениями вплоть до значений 6,78) до 9,10;

– использования результатов в учебном процессе Ивановского государственного энергетического университета по кафедре тепловых электрических станций в рамках курса «Тепломеханическое и вспомогательное оборудование ТЭС» в виде электронного учебного пособия и расчетной программы для проведения лабораторной работы.

Практическое использование результатов работы подтверждено тремя актами внедрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс экспериментальных и расчетных исследований процессов удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода в условиях атмосферной струйно-барботажной деаэрации, по результатам которых разработаны рекомендации по совершенствованию эксплуатационных режимов деаэраторов, обеспечивающие повышение эффективности декарбонизации воды.

2. Применительно к струйно-барботажным деаэраторам атмосферного давления различных конструкций получены новые экспериментальные данные, доказывающие, что выходные по пару струйные отсеки работают преимущественно в условиях физической абсорбции свободного диоксида углерода водой, что совместно с наличием дисперсного поглощения диоксида углерода струйным потоком воды обусловливает нестабильность его содержания в воде за струйными отсеками, а при отсутствии нижестоящей барботажной ступени – и за деаэратором. Показано, что основная нагрузка по удалению свободного и особенно химически связанного диоксида углерода приходится на деаэраторный бак.

3. Выполнен анализ влияния режимных параметров деаэраторных баков на эффективность декарбонизации воды, по результатам которого выявлено, что для деаэраторов без барботажной ступени в деаэраторном баке эта эффективность незначительна, а значения остаточных концентраций свободного диоксида углерода и гидрокарбонатов в деаэрированной воде мало зависят от значений режимных параметров; наличие в деаэраторном баке затопленного барботажного устройства существенно повышает эффективность декарбонизации воды, при этом наибольшее влияние оказывают время пребывания воды в деаэраторном баке и удельный расход пара на барботаж.

4. Получены новые и обобщены ранее опубликованные данные по значениям кинетических характеристик процессов термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака, позволяющие количественно оценивать эффективность удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода в различных режимах работы деаэраторов.

5. Для атмосферных деаэраторов, оборудованных затопленным барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного парового коллектора на дне деаэраторного бака, предложена регрессионная зависимость степени термического разложения гидрокарбонатов от времени пребывания воды в деаэраторном баке и удельного расхода пара на барботаж. Точность модели характеризуется значением среднеквадратического отклонения 4,8 %, что значимо меньше среднеквадратического отклонения для опубликованной ранее однопараметрической зависимости, равного 18,0 %.

6. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение по расчету показателей работы атмосферных струйно-барботажных деаэраторов в части характеристик процессов декарбонизации. Показана возможность и приведены примеры использования разработанных алгоритмов и программных модулей при моделировании существующих и проектируемых конструкций аппара-

тов. Программный комплекс передан ЗАО «Регион-Бизнес», где используется при проведении испытаний и в ходе предпроектных проработок вариантов реконструкции действующих деаэрационных установок.

7. Рекомендации по конструктивному исполнению и совершенствованию эксплуатационных режимов деаэраторов использованы в рамках режимно-наладочных испытаний деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м теплосилового цеха ОАО «Северсталь» с разработкой режимных карт по эксплуатации деаэрационной установки, реализованы при модернизации деаэраторов ДА-50 парогазовой ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания», а также внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

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

7. 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.

Публикации в других изданиях

8. 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.**

9. **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.

10. **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.

11. **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.

12. **Ледуховский, Г.В.** Исследование и моделирование процессов тепломассообмена 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.

13. Виноградов, В.Н. Режимные характеристики затопленного барботажного коллектора деаэраторного бака атмосферного деаэратора / 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. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 99-107.

14. **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.

15. **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.

16. **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.

17. **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.

18. **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.

19. **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.

20. **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.

21. **Коротков, А.А.** Экспериментальные исследования статики 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

КОРОТКОВ Александр Александрович
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ ТЕРМИЧЕСКИМИ ДЕАЭРАТОРАМИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ
АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Подписано в печать Формат $60x84^{1}/_{16}$
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ