

ЛЕДУХОВСКИЙ Григорий Васильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ
И ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

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

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор **Барочкин Евгений Витальевич**.

Официальные оппоненты:

Шарапов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»;

Кудинов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»;

Зройчиков Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», заместитель генерального директора по науке.

Ведущая организация:

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

Защита состоится «01» июня 2018 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен <http://ispu.ru/files/1. Dissertation Tom 1 Leduhovsky G.V.pdf>.

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Термическая деаэрация теплоносителей (турбинного конденсата, питательной воды котлов, добавочной воды цикла, подпиточной воды тепловых сетей и др.) обеспечивает защиту конструкционных материалов теплоэнергетических установок от коррозии. Контроль эффективности деаэрации в общем случае ведут по нормируемым показателям химического качества: массовой концентрации растворенного кислорода, pH_{25} деаэрированной воды, концентрации свободной угольной кислоты. Для работающих на химически очищенной воде паровых котлов низкого и среднего давлений контролируется дополнительный ненормируемый показатель – степень термического разложения гидрокарбонатов. Эффективность деаэрации теплоносителей в отдельных подсистемах, с учетом сложного характера протекания тепломассообменных процессов при деаэрации, определяется совокупностью значений многих конструктивных и режимных параметров. Возникающие при проектировании и эксплуатации теплоэнергетических установок задачи обеспечения требуемой эффективности деаэрации теплоносителя могут быть решены в настоящее время только при существенной опоре на данные натурных испытаний, проведение которых сопряжено с затратами ресурсов, а в ряде случаев затруднено или вовсе не возможно. Дополнительные затраты связаны с устранением ошибок проектирования, которые часто удается обнаружить лишь при эксплуатации объекта.

Для научно обоснованного выбора технических и технологических решений необходимо располагать комплексом унифицированных математических моделей процессов тепломассообмена, реализуемых при деаэрации теплоносителей. Существующие модели большей частью являются узкоспециализированными статистическими (регрессионными), не предусматривают при расчетах раздельного учета площади межфазной поверхности и коэффициентов тепло- и массопередачи и поэтому могут быть использованы при решении задач структурной и режимной оптимизации установок только с существенными ограничениями.

Развитие технологий термической деаэрации сдерживается также невозможностью рассчитать с приемлемой точностью показатели работы ряда вспомогательных элементов и систем. Для решения задачи обеспечения требуемой эффективности газообмена в технологических системах ТЭС необходимо разработать подходы к их математическому описанию в условиях недостаточности исходной информации, поскольку на практике отсутствует возможность обеспечения средствами измерения каждого из потоков теплоносителей системы. Для обоснования мероприятий по уменьшению затрат электроэнергии на нужды деаэрационных установок необходимо совершенствовать методику расчета энергетических характеристик центробежных насосов при их работе с частотным регулированием производительности. На ТЭС не редки проблемы с обеспечением нормативного содержания коррозионно-активных газов в охлаждающей воде контура водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением.

Таким образом, для теплоэнергетики актуальна проблема разработки единых научных принципов унификации математических моделей процессов деаэрации теплоносителей в различающихся по структуре и условиям эксплуатации объектах, математических моде-

лей вспомогательных элементов и систем рассматриваемых установок, формулирование и решение на этой основе задач повышения эффективности деаэрации теплоносителей. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе». Большинство задач диссертации решены в рамках хоздоговорных работ и международного договора о научно-техническом сотрудничестве ИГЭУ с Ченстоховским политехническим университетом (Польша).

Степень разработанности темы работы. Значимые результаты в области процессов термической деаэрации теплоносителей обобщены в работах С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского, А.А. Захарова, Р.Г. Черной, В.А. Пермякова, И.И. Оликера, И.К. Гришука, М.П. Белоусова, А.П. Мамета, В.И. Шарапова, А.Г. Лаптева, А.А. Кудинова, В.С. Галустова, Б.А. Зимина, А.Г. Шемпелева, П.В. Егорова и др. Деаэрации посвящен ряд научных работ и диссертаций, подготовленных в ИГЭУ, в том числе при участии или под руководством автора (Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов, А.А. Коротков, А.Ю. Ненаездников, С.Д. Горшенин, А.Н. Росляков). Тем не менее, остаются неизученными важные аспекты рассматриваемого технологического процесса. В частности, по термическим деаэраторам, особенно с барботажем в баке, не выяснен механизм процесса термического разложения гидрокарбонатов в широком диапазоне изменения общей щелочности деаэрируемой воды, отсутствуют обладающие приемлемой точностью модели процессов удаления из воды растворенного кислорода и угольной кислоты в деаэрационных элементах различных типов. Не исследован процесс удаления диоксида углерода из основного конденсата в конденсаторах турбин при повышенной концентрации свободной угольной кислоты в свежем паре. Не изучены процессы газообмена в технологических системах сложной структуры с несколькими деаэрационными элементами, таких как многоступенчатые деаэрационные установки, системы регенеративного подогрева питательной воды и теплофикационные установки паровых турбин. Не изучена эффективность деаэрации воды за счет начального эффекта – при попадании перегретой жидкости в зону вакуума, в частности, в центробежно-вихревых, кавитационных деаэраторах, в вакуумном баке систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением.

Требуется выработать единые принципы моделирования процессов деаэрации в различных объектах. В ИГЭУ при участии автора разработаны научные основы метода матричной формализации моделирования и расчета процессов тепломассообмена. Математические модели в рамках этого подхода унифицированы по входным и выходным параметрам, методам синтеза модели объекта (системы) из моделей элементов (подсистем), а также методам нахождения решения. Для практического применения данного подхода необходима разработка эмпирического обеспечения математических моделей и методов расчета параметров идентификации для практически значимых случаев. Для этого требуется получить соответствующие экспериментальные данные.

Сотрудниками ИГЭУ под руководством автора проведены экспериментальные исследования процессов деаэрации воды в деаэраторах ДСА-300 и ДА-300м с отбором проб из

внутренних элементов, результаты которых отражены в кандидатских диссертациях автора, а также А.А. Короткова (подготовлена при научных консультациях автора) и С.Д. Горшенина (подготовлена под научным руководством автора). В последней предложена математическая модель, обеспечивающая при известных конструктивных и режимных характеристиках деаэратора расчет степени термического разложения гидрокарбонатов, pH_{25} деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной угольной кислоты. Однако необходимы дополнительные экспериментальные данные для идентификации модели по деаэраторам с барботажем в баке и проверки её адекватности применительно к широкому спектру объектов.

Существующие методики расчета рабочих характеристик центробежных насосов с частотным регулированием производительности при глубоком уменьшении числа оборотов ротора приводят к существенной потере точности результата. Поэтому необходимы испытания насосов при их работе с переменным числом оборотов ротора и разработка математической модели, обеспечивающей расчет показателей работы таких насосов с приемлемой точностью.

Для совершенствования систем, имеющих сложную конфигурацию потоков, по показателям эффективности деаэрации теплоносителей необходимы методы сведения материальных балансов по газам в условиях недостаточности исходной информации (при отсутствии измерений расходов части теплоносителей и концентраций газа в потоках системы). Применительно к задачам обработки результатов испытаний турбоустановок и расчета технико-экономических показателей ТЭС такой метод разработан в кандидатской диссертации А.П. Зимина (подготовлена под научным руководством автора). Данный метод требует адаптации к задаче расчета характеристик газообмена в рассматриваемых системах.

Целью диссертации является повышение эффективности оборудования и технологических систем деаэрации теплоносителей ТЭС путем разработки и научного обоснования режимных, схемных и конструктивных мероприятий.

В работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- 1) проведение экспериментальных исследований процессов деаэрации воды в деаэраторах различных конструкций и условий их эксплуатации с целью получения опытных данных, недостающих для идентификации математических моделей деаэрационных элементов;
- 2) выявление механизма и уточнение кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах различных конструкций на основе экспериментальных данных;
- 3) определение показателей точности методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов, pH_{25} деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной угольной кислоты для деаэраторов известной конструкции при заданных показателях режима работы на основе новых экспериментальных данных;
- 4) развитие теоретических основ матричной формализации расчета процессов деаэрации воды для случая удаления из воды газа, химически связанного с растворителем;
- 5) идентификация на основе экспериментальных данных и разработка эмпирического обеспечения формализованных матричных моделей тепломассообмена, десорбции рас-

творенного кислорода и удаления из воды угольной кислоты в деаэрационных элементах разных типов;

6) проведение промышленных испытаний паровых турбин с конденсацией пара для получения экспериментальных данных о деаэрационных и теплотехнических характеристиках конденсационных установок, систем регенеративного подогрева питательной воды, теплофикационных установок, систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением;

7) разработка способа идентификации математических моделей теплообмена, используемых при поверочном тепловом расчете конденсаторов паровых турбин, по малой выборке экспериментальных данных, включая результаты эксплуатационных наблюдений;

8) обобщение данных по деаэрационным характеристикам конденсаторов турбин, в том числе работающих при повышенном содержании свободной угольной кислоты в свежем паре;

9) проведение испытаний центробежных насосов при частотном регулировании производительности, разработка на их основе математической модели, обеспечивающей расчет энергетических характеристик насосов с приемлемой для решения практических задач точностью;

10) адаптация разработанного на основе регуляризации Тихонова метода сведения материальных балансов в технологических системах сложной структуры в условиях недостаточности исходной информации к задаче расчета характеристик газообмена в таких системах;

11) реализация разработанных математических моделей и методов расчета в виде программных комплексов, предназначенных для решения практических задач;

12) разработка и научное обоснование режимных, схемных и конструктивных мероприятий, направленных на повышение эффективности деаэрации теплоносителей в теплоэнергетических установках, на основе математических моделей и средств их компьютерной поддержки, применительно к конкретным промышленным объектам.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: **в части формулы специальности:** «...исследования по существенным особенностям технических и физико-химических процессов, характерных для систем, установок и агрегатов ..., включая проблемы совершенствования действующих и обоснования новых ... систем водоподготовки»; «...совершенствовани(е) действующих и обосновани(е) новых типов и конструкций ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций», «... вопросы ...водных режимов»; **в части области исследования** – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета ... показателей качества ... работы агрегатов...»; пункту 2: «Исследование ... процессов, протекающих в агрегатах ...»; пункту 3: «... исследование, совершенствование действующих ... технологий ... использования ... водных и химических режимов...»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования ...»; пункту 5: «разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан единый подход к моделированию процессов деаэрации теплоносителей в установках различной структуры, конструктивного исполнения и условий эксплуатации, предназначенный для научного обоснования технических и технологических решений по повышению эффективности термической деаэрации воды и предусматривающий:

- построение модели системы из унифицированных моделей отдельных её подсистем;
- разработку моделей отдельных подсистем путем синтеза модели движения теплоносителей, реализуемой в программном комплексе FlowVision или с привлечением других апробированных методов расчета гидродинамических процессов, и модели деаэрации воды, базирующейся на подходе матричной формализации к расчету процессов тепломассообмена, с идентификацией коэффициентов тепло- и массопередачи по экспериментальным данным.

2. Разработана математическая модель совмещенных процессов движения воды и термического разложения гидрокарбонатов в деаэрационных баках, базирующаяся на параллельном включении ячеек идеального вытеснения с различным временем пребывания среды в них, позволившая вычислить кинетические характеристики процесса термического разложения гидрокарбонатов по данным натурных испытаний деаэраторов.

3. Проведен комплекс экспериментальных исследований процессов деаэрации воды в различающихся по конструкции и условиям эксплуатации деаэрааторах, по результатам которых выполнена параметрическая идентификация математических моделей тепломассообмена и десорбции растворенного кислорода в деаэрационных элементах различных типов, доказана смена порядка химической реакции термического разложения гидрокарбонатов при выявленных граничных значениях общей щелочности деаэрируемой воды, выполнена параметрическая идентификация методики расчета показателей эффективности удаления угольной кислоты при термической деаэрации воды.

4. Развиты научные основы подхода матричной формализации к расчету процессов тепломассообмена в термических деаэрааторах за счет: разработки эмпирического обеспечения моделей деаэрации воды в отдельных деаэрационных элементах в виде критериальных зависимостей для определения коэффициентов теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду; учета влияния на эффект деаэрации величины начального перегрева воды при попадании её в зону разрежения; введения в модель внутренних источников массы газа, обусловленных химическими реакциями.

5. Разработана математическая модель процессов газообмена в технологических системах сложной структуры, позволяющая в условиях недостаточности исходной информации сводить материальные балансы по растворенным в теплоносителях газам на основе результатов измерения параметров теплоносителей.

6. Разработан способ идентификации известных математических моделей теплообмена при поверочном тепловом расчете конденсаторов паровых турбин, основанный на введении в модель дополнительного параметра идентификации с разработкой её эмпирического обеспечения статистическими методами по малой выборке экспериментальных данных.

7. Доказана применительно к конденсаторам паровых турбин с повышенным содержанием свободной угольной кислоты в свежем паре недостаточность условий, обеспечивающих достижение нормативного содержания в конденсате растворенного кислорода, для эффективного удаления из конденсата свободного диоксида углерода. Выявлена эмпирическая зависимость массовой концентрации свободного диоксида углерода в конденсате от производительности воздухоудаляющих устройств конденсационной установки, позволяющая выбирать типоразмеры воздухоудаляющих устройств с учетом требуемой эффективности удаления из теплоносителя угольной кислоты.

8. Получена в результате обобщения экспериментальных данных по энергоблокам ТЭС и АЭС статистическая зависимость скорости коррозии охлаждаемых медных проводников обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением от водородного показателя pH_{25} , удельной электрической проводимости охлаждающей воды и концентрации растворенного в ней кислорода, позволяющая оценивать эффективность мероприятий по обеспечению защиты элементов системы от внутренней коррозии.

9. Разработана математическая модель центробежных насосов с частотным регулированием производительности, позволяющая при уменьшении объема необходимых для её идентификации натурных испытаний насосов повысить точность расчета показателей их рабочих и энергетических характеристик.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. **Доказаны:** целесообразность раздельного учета площади межфазной поверхности и коэффициентов тепло- и массопередачи при моделировании процессов деаэрации теплоносителей; возможность определения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов при деаэрации воды по результатам натурных испытаний деаэраторов при использовании модели движения воды в деаэраторных баках, базирующейся на моделях параллельно включенных ячеек идеального вытеснения с различным временем пребывания среды в них. **Изложены:** результаты экспериментальных исследований деаэрационных установок, паровых турбин со вспомогательными системами, насосного оборудования ТЭС, использованные для параметрической идентификации соответствующих математических моделей; основанный на матричном описании процессов тепломассообмена единый подход к построению математических моделей процессов деаэрации теплоносителя в установках различного конструктивного исполнения и условий эксплуатации; результаты разработки моделей для конкретных объектов и их эмпирического обеспечения. **Раскрыты условия** протекания процесса термического разложения гидрокарбонатов при термической деаэрации воды, изменяющиеся в зависимости от общей щелочности деаэрируемой воды и наличия барботажа в деаэраторном баке. **Изучены:** связи показателей эффективности деаэрации теплоносителей со значениями конструктивных и режимных параметров объектов; связь деаэрирующей способности конденсаторов паровых турбин по свободному диоксиду углерода с производительностью воздухоудаляющих устройств конденсационной установки; связь эффекта деаэрации перегретой воды при попадании её в зону разрежения с величиной начального перегрева; связь скорости коррозии медных охлаждаемых проводников обмотки статора турбогенераторов с водо-

родно-водяным охлаждением с показателями химического качества охлаждающей воды. **Проведена модернизация:** матричного описания и расчета процессов термической деаэрации путем учета внутренних источников массы газа, обусловленных химическими реакциями; математической модели центробежных насосов с частотным регулированием производительности; метода сведения материальных балансов по растворенным в теплоносителях газам в технологических системах со сложной конфигурацией потоков в условиях недостаточности исходной информации.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Новые экспериментальные данные по деаэрационным установкам, паровым турбинам и центробежным насосам позволяют повысить качество наладки и проектирования оборудования ТЭС.

2. Разработано шесть программных комплексов, реализующих предложенные математические модели.

3. Предложены и научно обоснованы следующие конструктивные, схемные и режимные мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности деаэрации воды в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: установка затопленных барботажных устройств деаэрационных баков с выявлением эффективных режимов их работы; использование деаэрационных баков увеличенного рабочего объема для обеспечения требуемого располагаемого времени процесса термического разложения гидрокарбонатов; использование дополнительных предвключенных деаэрационных устройств к деаэраторам струйного типа с выбором рациональной технологической схемы; применение варьируемой в процессе эксплуатации точки ввода конденсата в деаэрационную колонку при изменении его температуры.

4. В качестве типового технического решения при реконструкции существующих или при проектировании новых установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ разработан технологический блок двухцелевой деаэрационной установки, предназначенной для деаэрации подпиточной воды тепловой сети и получения при этом дистиллята в качестве добавочной воды паровых котлов.

5. Разработана новая структура технологической инструкции по эксплуатации деаэрационных установок, внедрение которой позволило уменьшить число отказов оборудования по вине персонала в процессе эксплуатации.

6. Обосновано техническое решение, обеспечивающее повышение эффективности защиты от коррозии элементов систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением.

7. Разработан универсальный алгоритм оценки эффективности установки частотно-регулируемого электропривода, гидромuft или приводных турбин на питательные насосы барабанных паровых котлов.

8. Обоснованы схемные и режимные мероприятия по повышению эффективности деаэрации турбинного конденсата в конденсаторах паровых турбин, в том числе работающих при повышенной концентрации свободной угольной кислоты в свежем паре.

9. Для турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп ТМЗ по результатам тепловых испытаний разработан комплект энергетических характеристик в составе нормативно-технической документации по топливоиспользованию Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, отдельные зависимости из которого используются также при эксплуатации аналогичной турбоустановки на Ярославской ТЭЦ-2.

Методология и методы исследований. Для получения результатов работы использованы методы экспериментальных исследований, математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, химической статики и кинетики, теории подобия процессов тепломассообмена, балансовых расчетов технологических схем энергоустановок, регуляризации Тихонова при решении некорректных задач.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования теплоэнергетических процессов; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации теплоэнергетических объектов с использованием стандартизованных методов и средств измерения параметров; совпадением в пределах погрешности экспериментальных данных и результатов расчёта показателей работы исследуемых объектов; согласованностью результатов диссертационной работы с опубликованными данными других авторов; проверкой в условиях промышленной эксплуатации предложенных технических решений.

Положения, выносимые на защиту:

- методики и результаты экспериментальных исследований процессов деаэрации воды в деаэраторах различных конструкций и условий эксплуатации; результаты промышленных испытаний центробежных насосов при частотном регулировании их производительности, паровых турбин с конденсацией пара и их отдельных технологических систем;
- результаты статистического анализа экспериментальных данных, характеризующих процесс деаэрации, с целью выявления условий протекания и определения кинетических характеристик термического разложения гидрокарбонатов;
- результаты статистического анализа экспериментальных данных по скорости коррозии охлаждаемых медных проводников обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением;
- результаты параметрической идентификации и проверки точности методики расчета степени термического разложения гидрокарбонатов, pH_{25} деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной угольной кислоты для деаэраторов известной конструкции при заданных показателях режима работы;
- модернизированная путем учета внутренних источников массы газа, обусловленных химическими реакциями, матричная модель процесса деаэрации;
- результаты разработки эмпирического обеспечения математических моделей тепло-массообмена в системе «вода – водяной пар», десорбции растворенного кислорода и удаления из воды угольной кислоты в деаэрационных устройствах разных типов;

– способ идентификации математических моделей теплообмена при поверочном тепловом расчете конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных;

– математическая модель центробежных насосов при частотном регулировании их производительности;

– математическая модель процессов газообмена в технологических системах сложной структуры, позволяющая в условиях недостаточности исходной информации сводить материальные балансы по растворенным в теплоносителях газам на основе измерения параметров теплоносителей;

– результаты реализации разработанных математических моделей и методов расчета в виде программных комплексов, предназначенных для решения практических задач;

– режимные, схемные и конструктивные технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности деаэрации теплоносителей в теплоэнергетических установках и системах применительно к конкретным промышленным объектам.

Реализация результатов работы. Программный комплекс «ТЭС-Эксперт. Пароводяной баланс» внедрен на Владимирской ТЭЦ-2 и Омской ТЭЦ-5, программный комплекс «Баланс» – на ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго» (г. Москва), программные комплексы «Расчет многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством», «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» и «Декарбонизация» – в ОАО «Тепломонтажладка» (г. Кострома), АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново) и ЗАО «Регион-Бизнес» (г. Москва), программный комплекс «Поверочный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин» – в ООО «Газэнергопроминжиниринг» (г. Комсомольск Ивановской обл.) и в учебный процесс ИГЭУ. Работы по режимной наладке деаэрационных установок с разработкой мероприятий по повышению их эффективности реализованы в ОАО «Северсталь» (г. Череповец), ОАО «Омское производственное объединение «Иртыш» (г. Омск), на ПГУ-ТЭС ЗАО «Родниковская энергетическая компания» (г. Родники Ивановской обл.). Рекомендации по повышению эффективности деаэрации конденсата в конденсаторе турбины ПТ-12-35/10М приняты к реализации в ОАО «Северсталь». Метод контроля герметичности вакуумных систем турбоустановок принят к использованию на Владимирской ТЭЦ-2. Результаты тепловых испытаний турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп использованы при разработке нормативно-технической документации по топливоиспользованию Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, а также приняты для организации эксплуатации турбинного оборудования на Ярославской ТЭЦ-2. Эскизный проект деаэрационной установки двойного назначения принят к реализации на Омской ТЭЦ-5, а также рекомендован ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново) в качестве типового технического решения при реконструкции существующих или проектировании новых деаэрационных установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ. Для ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль) разработана конструкция нетипового деаэратора ДА-30. Техническое решение по обеспечению нормативной эффективности деаэрации основного конденсата в конденсационных установках теплофикационных паровых турбин принято

ЗАО «УК ОПЭК» (г. Санкт-Петербург). Результаты исследований процессов термической деаэрации воды используются в промышленных и научно-исследовательских проектах, реализуемых Ченстоховским технологическим университетом (Польша, Ченстохова) и международной компанией «GTI Solutions» (США, Даллас). Составлены нормативные энергетические характеристики работающих при частотном регулировании производительности насосов ОАО «Северсталь». Универсальный алгоритм оценки экономической эффективности установки частотно-регулируемого привода на питательные насосы паровых котлов использован при разработке соответствующих технико-экономических обоснований для Печорской ГРЭС и Сакмарской ТЭЦ (г. Оренбург). Реализация результатов работы подтверждена двадцатью четырьмя актами внедрения и одним рекомендательным письмом. Суммарный экономический эффект от внедрения предложенных технических решений на энергообъектах России, подтвержденный актами внедрения, в ценах 2017 года составляет 125,49 млн. руб/год.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики, организации, руководстве и непосредственном участии при проведении и обработке результатов испытаний деаэраторов, турбоагрегатов со вспомогательным оборудованием, насосов, анализе полученных данных; в выработке и обосновании гипотезы о механизме процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах; в определении параметров идентификации и проверке характеристик точности методики расчета показателей эффективности удаления угольной кислоты при деаэрации с учетом новых экспериментальных данных; в модернизации, идентификации и разработке эмпирического обеспечения матричных моделей тепломассообмена в системе «вода – водяной пар», десорбции растворенного кислорода и удаления из воды угольной кислоты в деаэрационных элементах различных типов; в анализе факторов, влияющих на эффективность деаэрации теплоносителей, в разработке и обосновании мероприятий по повышению этой эффективности применительно к деаэраторам, конденсационным установкам паровых турбин, системам водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов; в разработке и апробации способа идентификации математических моделей тепломассообмена при поверочном тепловом расчете конденсаторов паровых турбин; в разработке математической модели центробежных насосов с частотным регулированием производительности; в разработке метода сведения материальных балансов в технологических системах со сложной конфигурацией потоков в условиях недостаточности исходной информации и адаптации его применительно к задаче расчета характеристик газообмена в таких системах; в разработке идеологии, расчетных алгоритмов и руководстве программной реализацией при создании прикладных программных комплексов; в непосредственном участии и руководстве работами по всем направлениям практической реализации результатов диссертации; в подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертации опубликованы и обсуждались на двадцати девяти конференциях: IV молодежной международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2009 г.); XV, XVI, XVII, XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2009, 2011, 2013, 2015,

2017 гг.); XXII, XXIV, XXVI, XXVII Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Псков, 2009 г.; Саратов, 2011 г.; Нижний Новгород, 2013 г.; Тамбов, 2014 г.); V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2010 г.); VI Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2011 г.); Отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации – 2012» (Иваново, 2012 г.); VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012» (Иваново, 2012 г.); VIII, IX, X, XI, XII Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); VI и VII Международных научно-технических конференциях «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2013, 2017 гг.); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (Челябинск, 2013 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.); V Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов» (Волжский, 2014 г.); XII Konferencja «Problemy badawcze energetyki cieplnej» (Польша, Варшава, 2015 г.); XIII Международной научно-технической конференции «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, 2016 г.).

Публикации. Материалы диссертации отражены в 116 опубликованных работах, в том числе, в 1 монографии, 41 статье в рецензируемых журналах по списку ВАК (включая 6 статей в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus); 2 статьях в прочих журналах; 5 статьях в сборниках научных трудов; 6 учебных и учебно-методических пособиях; 55 тезисах и полных текстах докладов конференций; получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения по работе, списка использованных источников из 502 наименований и 12 приложений. Общий объём диссертации составляет 572 страницы, из них основной текст 408 страниц, содержащий 152 рисунка и 28 таблиц, список литературы 38 страниц, и приложения на 164 страницах, выделенные в отдельный том (Том 2 диссертации).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы; научная новизна; теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов; основные положения, выносимые на защиту; обоснована принадлежность диссертации заявленной научной специальности, достоверность результатов; приведены сведения об апробации и реализации результатов работы.

В первой главе выполнен анализ опубликованных данных по тематике исследования. Показано, что в большинстве случаев при математическом моделировании процессов де-

аэрации воды площадь поверхности контакта фаз и коэффициенты тепло- или массопередачи рассматривается в виде единого комплекса. На этом принципе основаны модели, базирующиеся на теории подобия, которые описаны, например, в работах В.А. Пермякова, И.И. Оликера, В.М. Боришанского, А.А. Захарова, Р.Г. Черной, И.К. Гришука, М.П. Белоусова и др., частично – в работах С.С. Кутателадзе, а также в ранних работах автора, результаты которых вошли в его кандидатскую диссертацию, и других сотрудников ИГЭУ (В.Н. Виноградов, А.А. Коротков). Опубликованы статистические (регрессионные) модели – например, в работах В.И. Шарапова, В.С. Галустова, – полученные по результатам полного или дробного факторного эксперимента. В основном, точность указанных моделей характеризуются значениями среднего квадратического отклонения результатов расчета от экспериментальных данных в диапазоне от 20 до 35 %. В отдельных случаях удалось добиться лучших показателей (4–14 %), но отдельные модели приводят к ошибкам на уровне от 50 до 60 %. Такой подход к моделированию позволяет получить относительно простое математическое описание процесса, которое оказывается тем точнее, чем уже круг охватываемых объектов реализации этого процесса. Очевидный недостаток – применимость полученных результатов лишь для заданных (или подобных) конструкций.

Другой класс моделей – это модели, построенные на базе систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы гидродинамики и тепломассообмена, изложенные, например, в работах С.С. Кутателадзе, А.Г. Лаптева и др. Такие модели, как правило, разрабатываются при существенных допущениях и упрощениях, обусловленных сложностью описываемого процесса. Проблемы реализации подхода связаны с отсутствием значений важнейших параметров (например, коэффициентов молекулярной диффузии газов в воде, констант скорости химических реакций) для температурных условий термической деаэрации воды.

Таким образом, в настоящее время имеются математические модели процессов деаэрации воды в отдельных деаэрационных элементах или деаэраторах в целом, построенные на разных принципах и характеризующиеся существенно различающимися показателями точности. Недостатки этих моделей обуславливают существенные ограничения при решении задач повышения эффективности деаэрационной техники. Ранее в ИГЭУ (Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаездников, А.Н. Росляков и др.) при участии автора разработан метод матричной формализации моделирования и расчета процессов тепломассообмена, позволяющий преодолеть указанные недостатки. Предложенные модели унифицированы по входным и выходным параметрам, методам синтеза модели объекта (системы) из моделей элементов (подсистем) и методам нахождения решения. Подход представляется перспективным для создания единой методологической основы расчета процессов термической деаэрации воды. При этом для различных практически значимых случаев необходимо: разработать метод расчета площади межфазной поверхности; определить по экспериментальным данным параметры идентификации моделей в виде коэффициентов тепло- и массопередачи по рассматриваемым газам; разработать эмпирическое обеспечение моделей для расчета значений указанных коэффициентов при заданных кон-

структивных и режимных характеристиках объектов. Дополнительно необходимо обобщить модель на случай удаления из воды газа, химически связанного с растворителем.

В отношении процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах отметим кандидатские диссертации А.А. Короткова (подготовлена при научных консультациях автора) и С.Д. Горшенина (подготовлена под научным руководством автора). Было доказано, что в силу ряда причин основная нагрузка деаэратора по удалению свободного и особенно химически связанного диоксида углерода приходится на деаэраторный бак. Предпринятые попытки разработать математическую модель для расчета степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах оказались успешными только для конкретного объекта. Поэтому в указанных диссертациях была проработана идея автора по переходу от расчета непосредственно степени термического разложения гидрокарбонатов (σ) к моделированию процесса термического разложения гидрокарбонатов как химического процесса, описываемого кинетическим уравнением в виде

$$dC / d\tau = -KC^n, \quad (1)$$

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

Константа K является зависимой от гидродинамических условий реализации процесса, потому не может быть определена лабораторным путем. Согласно данным В.А. Пермякова, рассматриваемый процесс, вероятно, протекает как реакция второго порядка ($n = 2$), однако при малой общей щелочности воды можно ожидать изменение порядка реакции на $n = 1$. Зависимость K от температуры среды при этом не рассматривается, поскольку температура воды во всех точках деаэраторного бака близка к температуре насыщения при рабочем давлении в атмосферном деаэраторе. Для вычисления K по экспериментальным данным после интегрирования (1) требуется знать располагаемое время процесса. Первоначально в качестве этого параметра было использовано время полного вытеснения, но при этом экспериментальные значения K в условиях разных опытов оказались существенно отличными друг от друга, что не позволило обеспечить требуемую точность модели.

Позднее показано, что разброс относительно среднего экспериментальных значений K можно статистически значимо уменьшить, если расчет вести не по времени полного вытеснения, а с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. Автором был предложен подход, предусматривающий расчет поля течения воды в баке в программном комплексе FlowVision. При обработке экспериментальных данных с использованием этого подхода (результаты, полученные при этом С.Д. Горшениным отражены на рисунке 1) удалось уменьшить разброс относительно среднего экспериментальных значений K до минимально возможных величин, обусловленных нормативными метрологическими характеристиками методов и средств измерения параметров теплоносителей в опытах. Анализ полученных данных по деаэраторам без барботажа в баке позволил статистически доказать гипотезу об изменении механизма процесса, выражаемую изменением значения n в математической модели, при общей щелочности воды около 2,3 мг-экв/кг. Но полученные комплексы экспериментальных значений K , с точки зрения обоснованности их применения в расчетах, имеют ряд недостатков. По деаэраторам без барботажа в баке: 1) при об-

щей щелочности воды менее 2,3 мг-экв/кг наблюдается увеличение разброса экспериментальных значений K относительно среднего только по одному из объектов, что не позволяет надежно обосновать выбор значения порядка реакции n при этих условиях; 2) большинство данных получено по деаэратору одного типа, что не отвечает требованиям обеспечения повторяемости результатов. По деаэраторам с барботажом в баке экспериментальные данные охватывают узкий диапазон изменения общей щелочности, что не позволяет судить о вероятном изменении n при изменении щелочности деаэрируемой воды. Для преодоления указанных недостатков требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

На основе разработанной Б.М. Лариным, А.Б. Лариным методики оценки эффективности декарбонизации воды и описанного подхода к моделированию процесса термического разложения гидрокарбонатов была разработана методика расчета показателей эффективности удаления из воды угольной кислоты, предусматривающая расчет степени термического разложения гидрокарбонатов σ , $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной угольной кислоты $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ при известных конструктивных и режимных параметрах деаэраторов:

1) определяется степень термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе

$$\sigma = 1 - C / (\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} \cdot 10^3), \quad (2)$$

где $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$, мг-экв/дм³ – общая щелочность воды на входе в деаэратор; C , мкг-экв/дм³ – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде на выходе из деаэратора – определяется на основе описанного подхода, предусматривающего решение уравнения (1) с учетом гидродинамической обстановки в деаэраторном баке при использовании средних значений K по рисунку 1 в соответствующем значению $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$ диапазоне изменения общей щелочности;

2) рассчитываются $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ и $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$, мг/дм³:

$$\begin{aligned} \text{pH}_{25}^{\text{д}} &= \lg \left[\left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / (2a) \right]; \quad a = C \cdot 10^{-6} + \frac{1}{11,24} \frac{f_{\text{II}}}{f_{\text{I}}} \cdot 10^{-3}; \quad c = -\frac{1}{11,24} \frac{f_{\text{II}}}{f_{\text{I}}} \cdot 10^{11}; \\ b &= \frac{1}{11,24} \frac{f_{\text{II}}}{f_{\text{I}}} \cdot 10^{11} \left(C \cdot 10^{-6} - \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} 10^{-3} + 10^{-\text{pH}_{25}^{\text{ХОВ}}} \right); \quad C_{\text{CO}_2}^{\text{д}} = 96,8 \cdot C \cdot 10^{3-\text{pH}_{25}^{\text{д}}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\text{pH}_{25}^{\text{ХОВ}}$ – pH_{25} химически очищенной воды; f_{II} , f_{I} – коэффициенты активности, принимаемые для химически очищенной воды равными 0,95 и 0,85 соответственно.

При апробации рассмотренной методики выявлена удовлетворительная сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Однако методика базируется на экспериментальных значениях K , поэтому все недостатки, указанные для эмпирического обеспечения модели, распространяются и на результаты проверки точности методики (2), (3).

При моделировании деаэрации в конденсаторах турбин важно с приемлемой точностью рассчитывать показатели энергетических характеристик конденсационных установок. Такие характеристики могут быть построены по результатам всережимных тепловых

испытаний, однако их проведение сопряжено с рядом объективных затруднений и потому не всегда возможно. Поэтому энергетические характеристики конденсаторов определяют по результатам их поверочных тепловых расчетов. Наилучшие результаты для конденсаторов разных типов позволяют получить различные методики поверочного теплового расчета: Всероссийского теплотехнического института (ВТИ); Калужского турбинного завода (КТЗ), Уральского политехнического института (УГТУ-УПИ). Отметим также усовершенствованную в Вятском государственной университете методику ВТИ, позволяющую учитывать влияние режима работы основного эжектора на характеристики конденсатора. Тем не менее, на практике требуется идентификация математической модели, используемой в выбранной базовой методике поверочного теплового расчета, для условий работы и технического состояния конкретного конденсатора. Эта задача должна решаться с опорой на малую выборку экспериментальных данных – результаты экспресс-испытаний или эксплуатационных наблюдений.

Проблемы десорбции растворенного кислорода из основного конденсата в конденсаторах турбин наиболее полно раскрыты в работах А.Г. Шемпелева, П.В. Иглина. К настоящему времени остаются не изученными закономерности работы конденсаторов турбин по удалению свободной угольной кислоты, что актуально для турбоагрегатов ТЭС низкого давления, работающих на химически очищенной воде.

Эффективным мероприятием по уменьшению затрат энергии при деаэрации воды является использование частотного регулирования производительности (ЧРП) насосов (частотно-регулируемого электропривода, гидромурфт или приводных турбин). Анализ опубликованных данных показал, что для учета влияния частоты вращения ротора на показатели работы насосов используют, в основном, формулы пропорциональности из теории подобия гидравлических машин:

$$Q / Q_n = (\omega / \omega_n) \cdot (\eta_{об} / \eta_{об,н}); H / H_n = (\omega / \omega_n)^2 \cdot (\eta_r / \eta_{r,н}); N / N_n = (\omega / \omega_n)^3 \cdot (\eta_n / \eta), \quad (4)$$

где Q – объемная подача насоса, м³/ч; H – напор насоса, м вод. ст.; N – мощность на валу насоса, кВт; ω – число оборотов ротора насоса, об/мин; $\eta_{об}$, η_r , η – соответственно объемный, гидравлический и полный КПД насоса, ед.; индекс «н» указывает на значение параметра при номинальном числе оборотов ротора.

Поскольку зависимости $\eta_{об}$ и η_r от ω обычно не известны, используют упрощенные формулы пропорциональности, полученные в предположении, что $\eta_{об}$, η_r , η остаются неизменными при любом ω . Погрешность, вносимая в расчет при таком допущении, оказывается тем больше, чем больше отклонение ω от ω_n . Поэтому упрощенные формулы пропорциональности характеризуются недостаточной точностью для разработки технико-экономических обоснований использования ЧРП насосов. В ряде опубликованных работ (А.И. Колесников) предложено сохранить в (4) допущение о постоянстве $\eta_{об}$, η_r при измерении ω , но учитывать изменение полного КПД насоса в соответствии с выражением

$$\eta = \left(1 - k \left[1 - (\omega / \omega_n)^a\right]\right) \cdot F_\eta(Q), \quad (5)$$

где k и a – параметры идентификации (k – от 0,28 до 1,54 в зависимости от типа насоса; $a = 2$); $F_{\eta}(Q)$ – функция, описывающая изменение полного КПД насоса от подачи при ω_n .

Идентификация подобных моделей для конкретного объекта требует проведения испытаний насосов в широких диапазонах изменения режимных параметров. Необходимо разработать математическую модель, обеспечивающую расчет показателей работы насосов с приемлемой для решения практических задач точностью, при идентификации модели по относительно малой выборке экспериментальных данных.

Для повышения эффективности деаэрации теплоносителей в технологических системах ТЭС требуется разработать математическую модель, обеспечивающую сведение материальных балансов по газам. Перспективной основой для этого является построенный на регуляризации Тихонова метод сведения материальных балансов в энергетических системах в условиях недостаточности исходной информации, разработанный в кандидатской диссертации А.П. Зимина (подготовлена под научным руководством автора).

По результатам анализа опубликованных данных сформулированы задачи работы.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям процессов деаэрации воды в деаэраторах с целью получения недостающих для идентификации математических моделей опытных данных и обработке этих данных для определения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов и показателей точности ранее разработанной методики расчета критериев эффективности удаления из воды в деаэраторах угольной кислоты.

Объекты дополнительных исследований выбирались таким образом, чтобы полученные данные позволили преодолеть выявленные в главе 1 диссертации недостатки имеющихся комплексов экспериментальных значений констант скорости реакции K в уравнении (1). В ходе дополнительных экспериментальных исследований, реализованных в условиях промышленной эксплуатации, получены данные о работе деаэраторов шести различных моделей в 82 опытах.

При обработке результатов исследований применен подход, основанный на предложенной автором математической модели совмещенных процессов движения воды и термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторных баках, базирующейся на параллельном включении ячеек идеального вытеснения, время пребывания среды в которых определяется с использованием специализированного программного комплекса для моделирования течений жидкости (FlowVision). В рамках этого подхода после получения решения в программном комплексе FlowVision входная по воде область течения условно разбивается на m площадок, являющихся входными сечениями m ячеек. Каждая ячейка моделируется реактором идеального вытеснения, соединяющим соответствующие i -е площадки входного и выходного по воде сечений деаэраторного бака. При этом площади выделенных m площадок входного сечения выбираются так, чтобы обеспечить равные расходы внутри каждой ячейки, а длина и конфигурация i -й ячейки задается линией тока, выходящей из центра соответствующей выделенной i -й площадки входного сечения. Средствами FlowVision вычисляется время τ_i пребывания воды в каждой i -й ячейке, используемое в решении уравнения (1), определяющем концентрацию гидрокарбонатов C_i

в воде на выходе каждой i -й ячейки. Поскольку температура воды во всех точках бака практически неизменна, значение K полагается одинаковым для всех ячеек и определяется по условию совпадения экспериментального и расчетного ($C = \sum C_i/m$) значений концентрации гидрокарбонатов в выходном по воде сечении бака.

Проведен анализ полученных данных (рисунок 1), результаты которого отражены в таблице 1, в сопоставлении с ранее полученными данными.

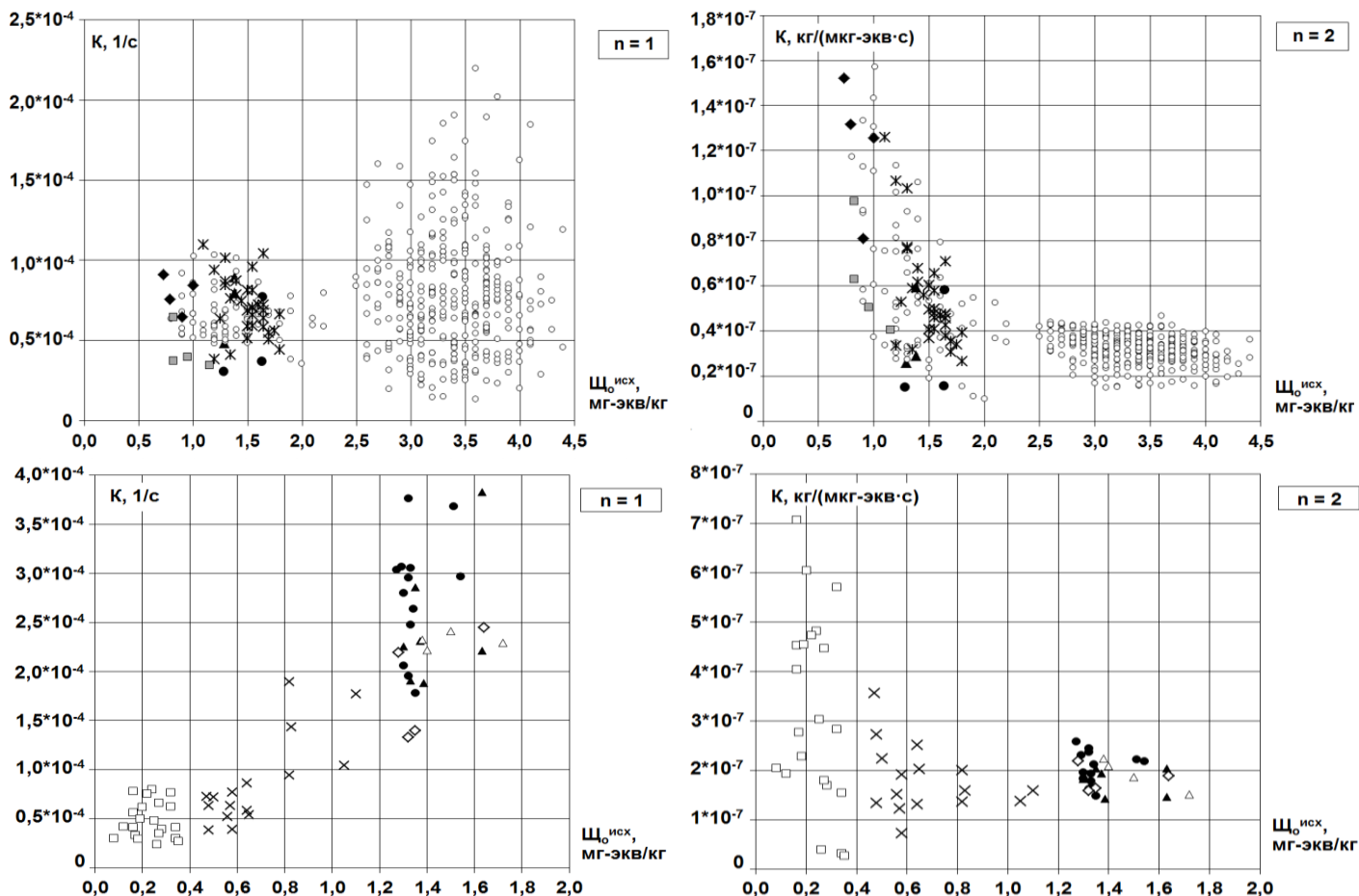


Рисунок 1. Расширенные комплексы значений констант скорости реакции, моделирующей процесс термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без барботажа в баке (вверху) и с барботажем в баке (внизу), определенных по предложенной методике на основе экспериментальных данных: n – порядок реакции; K – константа скорости реакции, $1/s$ ($n = 1$) или $kg/(mg-equiv \cdot s)$ ($n = 2$); $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ – общая щелочность воды перед деаэратором, $mg-equiv/kg$; точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей: данные из диссертации Горшенина С.Д. (● – ДА-300м, ОАО «Северсталь»; ▲ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке), ОАО «Северсталь»; △ – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке), ОАО «Северсталь»; ○ – ДА-50, Родниковская ПГУ-ТЭС); дополнительные данные автора (□ – ДСА-200, Ивановская ТЭЦ-1; ◇ – ДА-300, ОАО «Северсталь»; × – ДА-50, котельная «Южная»; ◆ – ДСА-75, Костромская ГРЭС; ж – ДА-200, ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь»; ■ – ДСА-100, ОАО «Северсталь»)

По деаэраторам без барботажа в баке: 1) дополнительные экспериментальные данные в целом не изменили выявленную ранее тенденцию – имеются статистически доказанные основания полагать изменение механизма процесса термического разложения гидрокарбонатов, выражаемое в изменении порядка реакции n , при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ около $2,3$ $mg-equiv/kg$; 2) для расчетов можно рекомендовать: $n=1$ и $K=(6,54 \pm 0,97) \cdot 10^{-5}$ $1/s$ при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2,3$ $mg-equiv/kg$; $n=2$ и $K=(3,22 \pm 0,64) \cdot 10^{-8}$ $kg/(mg-equiv \cdot s)$

при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} \geq 2,3$ мг-экв/кг. По деаэраторам с барботажем в баке: 1) дополнительные экспериментальные исследования позволили существенно расширить учтенный диапазон изменения $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$, в результате чего выявлена и статистически доказана смена механизма процесса термического разложения гидрокарбонатов при $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ около 0,7 мг-экв/кг; 2) для расчетов рекомендованы: $n=1$ и $K=(5,35 \pm 1,81) \cdot 10^{-5}$ 1/с при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} < 0,7$ мг-экв/кг; $n=2$ и $K=(1,87 \pm 0,29) \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв·с) при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} \geq 0,7$ мг-экв/кг.

Таблица 1. Параметры, характеризующие расширенные комплексы экспериментальных значений константы скорости реакции K

Параметр, единица измерения, гипотеза	Значение для деаэраторов	
	с барботажем в баке	без барботажа в баке
Граничное значение общей щелочности воды $\text{Щ}_0^{\text{гп}}$, соответствующее изменению механизма процесса, мг-экв/кг	0,7	2,3
Количество экспериментальных значений K , шт., при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ \ при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$	32 \ 33	294 \ 358
Средние значения K при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ и $n = 1$, 1/с \ $n = 2$, кг/(мкг-экв·с)	$5,35 \cdot 10^{-5}$ \ $2,74 \cdot 10^{-7}$	$6,54 \cdot 10^{-5}$ \ $6,00 \cdot 10^{-8}$
Среднеквадратическое отклонение K , %, при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ и $n = 1$ \ $n = 2$	33,9 \ 63,8	14,9 \ 31,1
Средние значения K при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ и $n = 1$, 1/с \ $n = 2$, кг/(мкг-экв·с)	$2,34 \cdot 10^{-4}$ \ $1,87 \cdot 10^{-7}$	$7,82 \cdot 10^{-5}$ \ $3,22 \cdot 10^{-8}$
Среднеквадратическое отклонение K , %, при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ и $n = 1$ \ $n = 2$	31,0 \ 15,6	46,9 \ 19,9
Значение критерия Фишера для комплексов значений K при $n = 1$ и $n = 2$ при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ \ при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$	3,54 \ 3,95	4,34 \ 5,54
Критическое значение критерия Фишера при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ \ при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$	1,81 \ 1,79	1,21 \ 1,19
Равноточны ли комплексы значений K при $n = 1$ и $n = 2$ при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ \ при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$?	Нет \ Нет	Нет \ Нет
Погрешность расчета K , %, как погрешность косвенного измерения (по результатам измерения контролируемых в опытах параметров) при $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_0^{\text{гп}}$ \ при $\text{Щ}_0 \geq \text{Щ}_0^{\text{гп}}$	29,9 \ 12,9	15,8 \ 18,2

Определение недостающих параметров идентификации математической модели позволило выполнить проверку точности методики (2), (3) расчета показателей эффективности удаления в деаэраторах угольной кислоты (таблица 2 и рисунки 2, 3, 4).

Таблица 2. Параметры, характеризующие точность математической модели процесса удаления из воды угольной кислоты в деаэраторах

Параметр, единица измерения	Значение для деаэраторов	
	с барботажем в баке	без барботажа в баке
Среднеквадратическое отклонение расчетных значений от экспериментальных, %: σ \ $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ \ $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$	15,7 \ 1,9 \ –	13,9 \ 2,0 \ 44,3
Средняя по опытам нормативная погрешность прямого измерения показателей эффективности, %: $\text{pH}_{25}^{\text{д}}$ (потенциометрический метод) \ $C_{\text{CO}_2}^{\text{д}}$ (алкалиметрический метод)	2,3 \ –	2,4 \ 45,7

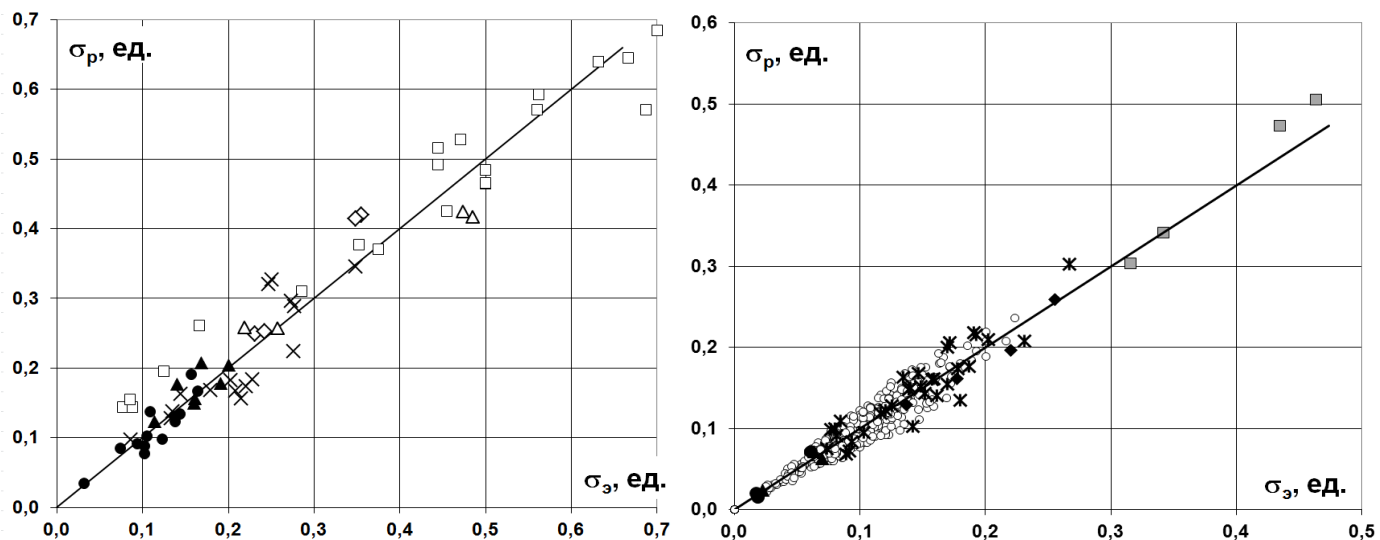


Рисунок 2. Сопоставление экспериментальных ($\sigma_{\text{э}}$) и расчетных ($\sigma_{\text{р}}$) значений степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах с паровым барботажом в баке (слева) и без него (справа): точки – результаты расчетов для условий опытов (обозначения точек соответствуют рисунку 1); линия – совпадение расчетных и экспериментальных значений

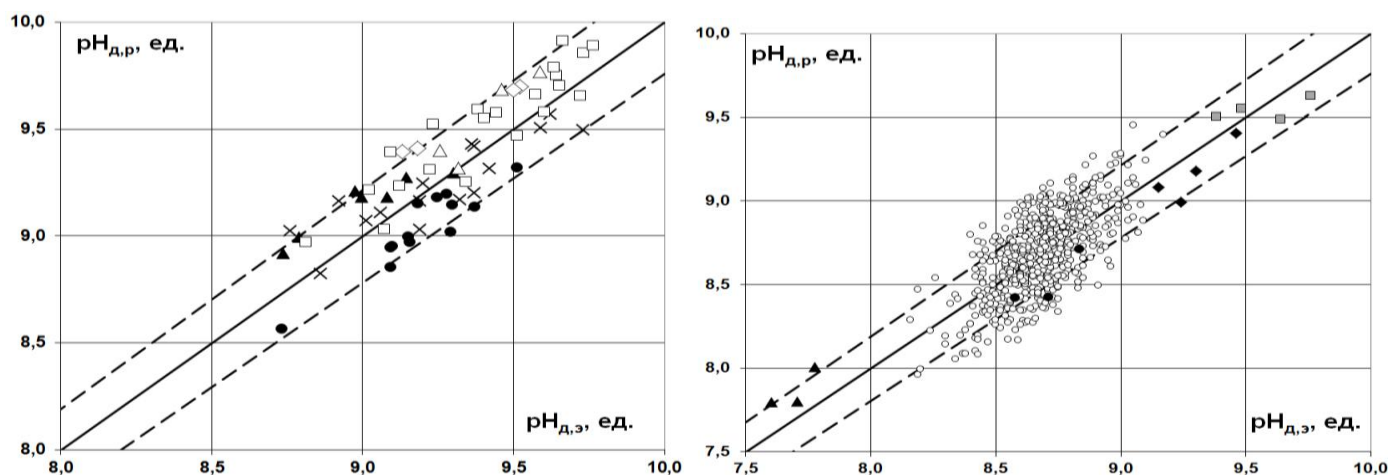
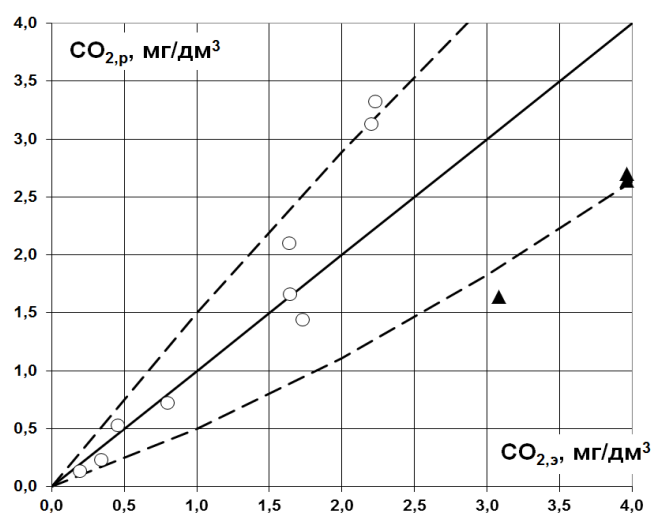


Рисунок 3. Сопоставление экспериментальных ($\text{pH}_{\text{д,э}}$) и расчетных ($\text{pH}_{\text{д,р}}$) значений pH_{25} деаэрированной воды для деаэраторов с паровым барботажом в баке (слева) и без него (справа): пунктирные линии показывают доверительный интервал, обусловленный нормативными характеристиками точности потенциометрического метода измерения pH ; прочие обозначения соответствуют рисунку 2

Рисунок 4. Сопоставление экспериментальных ($\text{CO}_{2,\text{э}}$) и расчетных ($\text{CO}_{2,\text{р}}$) значений массовой концентрации свободной углекислоты (в пересчете на CO_2) в деаэрированной воде для деаэраторов без барботажа в баке (сопоставление выполняется для опытов, в которых экспериментально зафиксировано присутствие свободной углекислоты в деаэрированной воде): пунктирные линии – границы доверительного интервала, обусловленного нормативными характеристиками точности алкаиметрического метода измерения концентрации свободной углекислоты; прочие обозначения соответствуют рисунку 2



Для решения практических задач разработан программный комплекс «Декарбонизация», реализующий предложенное математическое описание.

Третья глава посвящена развитию теоретических основ матричной формализации расчета процессов деаэрации воды путем идентификации и разработки эмпирического обеспечения моделей теплообмена и десорбции растворенного кислорода в различных деаэрационных элементах, а также разработки математической модели деаэрационного элемента для случая удаления из воды газа, химически связанного с растворителем.

При выборе объектов для разработки эмпирического обеспечения моделей учтены описанные в главах 1 и 2 данные об эффективности деаэрации воды в деаэрационных колонках и деаэраторных баках: применительно к деаэрационным колонкам (струйные отсеки, центробежно-вихревые ступени, непровальные барботажные листы) рассматриваются только процессы теплообмена между водой и паром и процессы десорбции растворенного кислорода; процессы хемосорбции-десорбции диоксида углерода рассматриваются применительно к деаэраторным бакам.

Идентификация математических моделей выполнена по результатам экспериментальных исследований, изложенных в кандидатской диссертации автора, с привлечением описанных в главе 2 данных и экспериментальных данных других авторов (А.Ю. Ненаездникова, А.Н. Рослякова). Порядок идентификации состоял в выборе существующего или разработке нового метода расчета площади поверхности контакта фаз с последующим подбором таких значений коэффициентов тепло- и массопередачи по растворенному кислороду, которые обеспечивали бы совпадение расчетных и экспериментальных значений соответственно температуры воды и массовой концентрации растворенного кислорода на выходе деаэрационного элемента в условиях каждого опыта. По результатам идентификации выполнена разработка эмпирического обеспечения моделей, состоящая в выборе типа критериальных уравнений, их спецификации, нахождении значений соответствующих коэффициентов регрессии. Далее приведены полученные в ходе работы результаты.

А. Струйные отсеки:

$$F = F_{\text{стр}} + F_{\text{кап}}; F_{\text{стр}} = \frac{2\pi n_0 d_0 W_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 g L}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right]; L = 3W_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}^{\text{вх}} d_0^3}{\sigma_{\text{ж}}}}; \quad (6)$$

$$F_{\text{кап}} = k_{\text{кап}} \frac{2\pi n_0 d_0 W_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 g (H - L)}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right]; \quad (7)$$

$$Nu = 94,51 \cdot 10^3 \cdot K_L^{-1,40} Lap^{0,06} Fr^{-0,45} Pr^{-2,16} Ku^{-0,84}; \quad (8)$$

$$Sh = 9,50 \cdot 10^{-5} K_L^{-0,19} Lap^{0,26} Fr^{0,37} Sc^{-0,65} Ku^{-1,07}; \quad (9)$$

$$Nu = \frac{k d_0}{\lambda_{\text{ж}}}; K_L = \frac{H}{L}; Lap = \frac{\rho_{\text{ж}} W_{\text{п}}^2 d_0}{\sigma_{\text{ж}}}; Fr = \frac{W_{\text{ж}}^2}{g d_0}; Pr = \frac{\nu_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}}; Ku = \frac{r}{c_{\text{ж}} (t_2 - t_1)}; Sh = \frac{k_m d_0}{D_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}; Sc = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}},$$

где F , $F_{\text{стр}}$ и $F_{\text{кап}}$, м^2 – площадь межфазной поверхности соответственно суммарная, в зоне чисто струйного течения (определяется по уравнению С.С. Кутателадзе) и в зоне капельного течения (уравнение получено автором путем введения в уравнение С.С. Кутателадзе эмпирического коэффициента $k_{\text{кап}}$, диапазон значений которого определен по результатам анализа фотографических изображений картины течения и составил от 1,4 до 1,6, в сред-

нем 1,5); n_0 , шт., и d_0 , м – соответственно количество и диаметр отверстий тарелки; $W_{ж}$, м/с – средняя скорость истечения воды из отверстий; μ – коэффициент расхода; g , м/с² – ускорение свободного падения; L , м – средняя высота зоны чисто струйного режима течения воды; $\rho_{ж}^{вх}$ и $\rho_{ж}$, кг/м³ – плотность воды соответственно на входе в струйный отсек и средняя в отсеке; $\sigma_{ж}$, Н/м, $\lambda_{ж}$, Вт/(мК), $\nu_{ж}$ и $a_{ж}$, м²/с – средние в отсеке коэффициенты соответственно поверхностного натяжения, теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности воды; H – полная высота отсека; Nu , K_L , Lap , Fr , Pr , Ku , Sh и Sc – критерии соответственно Нуссельта, геометрического подобия, Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе, Шервуда и Шмидта; k , Вт/(м²К), k_m , кг/(м²с) – средние по поверхности контакта фаз в отсеке коэффициенты соответственно теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду; $W_{п}$, м/с – средняя скорость пара в отсеке; r , кДж/кг – скрытая теплота парообразования при среднем давлении в отсеке; $c_{ж}$, кДж/(кг·К) – средняя массовая изобарная удельная теплоемкость воды в отсеке; t_1 и t_2 , °С – температура воды соответственно на входе и выходе отсека; $D_{ж}$, м²/с – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде при средней температуре воды в отсеке.

Выраженные в процентах среднеквадратические отклонения для (6)–(9) составили: для модели теплообмена 9,5 %; для модели десорбции растворенного кислорода 19,1 %. Уравнения (8), (9) справедливы при следующих значениях параметров: d – от 0,006 до 0,01 м; H – от 0,3 до 0,95 м; среднее абсолютное давление пара в отсеке – от 109 до 137 кПа; $W_{ж}$ – от 0,2 до 3,0 м/с; $W_{п}$ – от 0,8 до 48,2 м/с.

Б. Непровальные барботажные листы. Удельная площадь межфазной поверхности f , м²/м³, определялась по известным соотношениям:

$$f = \frac{6\varphi}{d_{п}}; \varphi = \frac{Fr_{бл}^{0,5}}{1 + Fr_{бл}^{0,5}}; Fr_{бл} = \frac{W_{пр}^2}{gh_{д}}; h_{д} = (0,8 - 0,117\rho_{п}W_{пр}^2) \cdot h_0; d_{п} = \frac{7,3Re_{0,п}^{-0,05}}{10^3}; Re_{0,п} = \frac{W_0 d_0 \rho_{п}}{\mu_{п}}, \quad (10)$$

где φ – паросодержание двухфазного слоя на листе; $d_{п}$, м – средний диаметр паровых пузырьков в двухфазном слое; $Fr_{бл}$ – критерий Фруда для двухфазного слоя; $W_{пр}$, м/с – приведенная скорость пара; $h_{д}$ и h_0 , м – высоты соответственно динамического слоя жидкости и слоя жидкости на листе с заданной высотой переливного порога без барботажа; $\rho_{п}$, кг/м³, и $\mu_{п}$, Па·с – соответственно плотность и коэффициент динамической вязкости пара; $Re_{0,п}$ – критерий Рейнольдса в отверстиях; W_0 , м/с – скорость пара в отверстиях; d_0 , м – диаметр отверстий.

Уравнения для безразмерных коэффициентов теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду получены путем спецификации и идентификации обобщенных уравнений С.С. Кутателадзе для барботажных устройств в виде

$$Nu = 85,38 \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{-0,45} \frac{1}{Fr_6}; Sh = 7,14 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{-2,44} Fr_6^{-0,71}; \quad (11)$$

$$Fr_6 = \frac{G_{п}}{\rho_{п} F_6 \sqrt{gh_{66}}}; h_{66} = \frac{1}{2g} \left(\frac{4G_{ж}}{\pi d_0^2 n_0 \mu \rho_{ж}} \right)^2,$$

где $\rho_{\text{ж}}$, кг/м³ – плотность жидкости; Fr_6 – критерий Фруда для условий выхода пара из отверстий; $G_{\text{ж}}$ и $G_{\text{п}}$, кг/с – массовые расходы соответственно жидкости и пара; F_6 , м² – площадь поверхности барботажного листа; h_{66} , м – уровень воды на листе при отсутствии пропуска пара через отверстия; n_0 – количество отверстий; μ – коэффициент расхода; при расчете Nu и Sh в качестве определяющего размера использовался d_0 .

Границы применимости модели: $d_0 = 0,007$ м; абсолютное давление под листом – от 114 до 150 кПа; $Re_{0,\text{п}} > 7000$. Среднеквадратическое отклонение по расчету температуры воды – 3,3 %, по расчету массовой концентрации растворенного кислорода – 2,0 %.

Б. Затопленные барботажные устройства деаэрационных баков в виде горизонтального перфорированного коллектора. Площадь межфазной поверхности F определяется по предложенной А.Ю. Ненаездниковым ячейечной модели:

$$F = f(d_6; h_0; t_1; p; \alpha_{\text{ср}}; d_0), \quad (12)$$

где d_6 , кг/т – удельный расход пара на барботаж; h_0 , м – гидростатический уровень воды в баке; t_1 , °С – температура воды на входе; p , бар – абсолютное давление в паровом пространстве бака; $\alpha_{\text{ср}}$, Вт/(м²К) – средний коэффициент теплоотдачи от пара в паровых пузырьках к окружающей жидкости; d_0 , м – диаметр отверстий барботажного устройства.

Уравнение для безразмерного коэффициента массопередачи по растворенному кислороду получено на основе известной функциональной зависимости С.С. Кутателадзе в виде

$$Sh = 6,36 \cdot 10^{-4} Fr_6^{-0,11} d_6^{-0,56}; \quad Fr_6 = \frac{G_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} F_{\text{бак}} \sqrt{gh_0}}; \quad d_6 = \frac{G_{\text{п}} 10^3}{G_{\text{ж}}}, \quad (13)$$

где $F_{\text{бак}}$, м² – площадь горизонтального сечения бака на уровне, соответствующем половине текущего уровня воды в деаэраторе; определяющим размером в Sh является d_0 ; $G_{\text{п}}$ определяется как разность расхода пара, поданного в барботажное устройство, и расхода части этого пара, сконденсировавшейся в объеме воды в баке.

Среднеквадратическое отклонение по массовой концентрации растворенного кислорода для (13) составило 5,7 %. Модель получена для условий: абсолютное давление пара над уровнем воды в баке – от 1,08 до 1,32 бар; $d_0 = 0,012$ м; d_6 от 5,0 до 37,6 кг/т; недогрев воды до температуры насыщения на входе в деаэрационный бак не более 4,3 °С; скорость пара в отверстиях барботажного устройства от 28 до 113 м/с; h_0 – от 1,4 до 2,2 м.

Г. Центробежно-вихревые ступени деаэрации, работающие в режиме с подачей на деаэрацию воды, перегретой относительно температуры насыщения в ступени (модель разработана в соавторстве с А.Н. Росляковым):

$$F = f(G_{\text{ж}}; t_1; p); \quad Sh = 2,331 \cdot 10^{-15} Fr_{\text{ц}}^{0,53} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-2,83} Ku^{0,78}; \quad Fr_{\text{ц}} = \frac{\omega^2 d}{2g} \quad (14)$$

где F , м² – площадь межфазной поверхности (определяется по методике, разработанной А.Н. Росляковым на основе комбинаторного подхода); $Fr_{\text{ц}}$ – критерий Фруда для центробежного течения; ω , 1/с – угловая скорость потока жидкости; определяющим размером d в Sh и $Fr_{\text{ц}}$ является внутренний диаметр корпуса ступени; при расчете Ku используется разность между температурой воды на входе и температурой насыщения при давлении в

ступени; при расчете $c_{ж}$, $\rho_{ж}$ и $D_{ж}$ определяющими являются средняя температура воды в ступени и давление в ней; $\rho_{п}$ соответствует параметрам сухого насыщенного пара при давлении в ступени.

Среднеквадратическое отклонение по расчету массовой концентрации растворенного кислорода для (14) составило 12,1 %. Модель справедлива при условиях: $Fr_{п}$ – от 3,5 до 25,5; абсолютное давление в ступени – от 0,43 до 0,82 бар; охлаждение воды в ступени – от 0,3 до 3,0 °C.

Д. Ступени деаэрации, работающие за счет начального эффекта – при попадании перегретой жидкости в зону вакуума. Для расчета относительного уменьшения массовой концентрации растворенного кислорода в таких ступенях получено выражение

$$\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,0}} = \left(\frac{Ar}{Ku} + 1 \right)^{-1} ; Ar = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} - 1, \quad (15)$$

где C_{O_2} и $C_{O_2,0}$ – массовая концентрация растворенного кислорода в воде соответственно на выходе и на входе ступени; Ar – критерий Архимеда; при расчете Ku используется уменьшение температуры воды в ступени Δt .

Модель (15) качественно верно описывает экспериментальные данные, но дает завышенную оценку эффекта деаэрации, поэтому для каждого конкретного случая вводится эмпирическая поправка на увеличение отношения $C_{O_2}/C_{O_2,0}$. Модель проверена при величинах Δt от 0,3 до 10 °C.

Для всех разработанных моделей определены показатели адекватности с использованием критерия Фишера; значимость факторов, включенных в критериальные уравнения, доказана с использованием частных критериев Фишера и критерия Стьюдента.

Для случая удаления из воды газа, химически связанного с растворителем, математическая модель разработана путем синтеза модели деаэрационного элемента с внутренним источником массы газа, образующегося в результате химических реакций, предложенной в докторской диссертации Е.В. Барочкина, и описанного в главе 2 диссертации подхода к расчету процесса термического разложения гидрокарбонатов с соответствующим эмпирическим обеспечением в виде рекомендуемых значений n и K в уравнении (1).

Разработанные математические модели реализованы в программных комплексах «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» и «Расчет многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством».

Четвертая глава посвящена проведению испытаний паровых турбин для получения данных о теплотехнических и деаэрационных характеристиках отдельных систем. Разработан способ идентификации математических моделей теплообмена, используемых в существующих методиках поверочного теплового расчета (МПТР) конденсаторов паровых турбин, по малой выборке экспериментальных данных; обобщены экспериментальные данные по деаэрационным характеристикам конденсаторов турбин.

Исследования проведены на турбоустановках Тп-115/125-130-1тп ТМЗ (Йошкар-Олинская ТЭЦ-2) и ПТ-12-35/10М КТЗ (ОАО «Северсталь»). Методика проведения испытаний соответствовала требованиям руководящих документов; в обоих случаях проведены ис-

пытания по первой категории сложности. Для турбоагрегатов Тп-115/125-130-1тп ТМЗ такие испытания проведены впервые; по результатам выявлены устранимые резервы тепловой экономичности в количестве 1 963 т у.т./год, разработан комплект энергетических характеристик в составе нормативно-технической документации по топливоиспользованию Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, отдельные зависимости из которого используются при эксплуатации аналогичной турбоустановки на Ярославской ТЭЦ-2.

Полученные экспериментальные данные как обладающие высокими показателями точности и прецизионности использованы при оценке эффективности разработанного способа построения энергетических характеристик конденсаторов по малой выборке экспериментальных данных, состоящего в следующем. Различные МПТР конденсаторов позволяют рассчитать значение среднего по поверхности теплообмена коэффициента теплопередачи $K_{\text{ср}}$ с той или иной степенью соответствия экспериментальным данным. Наилучшее соответствие для разных типов конденсаторов обеспечивают методики ВТИ, КТЗ и УГТУ-УПИ. Величины отклонений результатов расчета от экспериментальных данных как по абсолютному давлению в паровом пространстве p_k , так и по недогреву охлаждающей воды до температуры насыщения в конденсаторе δt оказываются зависимыми от значений режимных параметров. Это позволяет записать функциональные зависимости для параметров энергетических характеристик в виде

$$(p_k, \delta t) = f_1(t_{1в}; W; D_k; K_{\text{ср}} \cdot \Delta K); \Delta K = f_2(\Pi_j), \quad (16)$$

где под функцией f_1 подразумевается применяемая в конкретном случае МПТР; $t_{1в}$ – температура охлаждающей воды перед конденсатором; W и D_k – расходы соответственно охлаждающей воды и пара в конденсатор; ΔK – поправочный множитель к $K_{\text{ср}}$, учитывающий отклонение результатов расчета от экспериментальных данных; f_2 – регрессионная зависимость, получаемая в ходе исследования остатков при анализе разностей расчетных и экспериментальных значений p_k и δt ; Π_j – параметр или комплекс параметров, характеризующих работу конденсатора.

Поскольку одна и та же поправка ΔK влияет на рассогласование экспериментальных и расчетных значений как по p_k , так и по δt , при определении функции f_2 необходимо решать задачу двухкритериальной оптимизации, например путем замены двух критериев оптимизации одним аддитивным $F_{\Sigma a}$ или мультипликативным $F_{\Sigma m}$:

$$F_{\Sigma a} = a(p_k^p - p_k^э)^2 + b(\delta t^p - \delta t^э)^2 \rightarrow \min; F_{\Sigma m} = \left[(p_k^p - p_k^э)^2 \right]^c \left[(\delta t^p - \delta t^э)^2 \right]^d \rightarrow \min, \quad (17)$$

где a , b , c и d – весовые коэффициенты; индексы «р» и «э» указывают соответственно на расчетное и экспериментальное значения.

Таким образом, для конденсатора с заданными конструктивными и режимными характеристиками требуется рассчитать параметры энергетических характеристик, обеспечив минимальное рассогласование между результатами их расчета и экспериментальными данными. Предлагается решать задачу в следующем порядке.

1. Выбор базовой МПТР конденсатора, исходя из опыта расчетчика либо с использованием методов статистического анализа данных. В последнем случае используется выбор-

ка экспериментальных данных, представленная для каждого i -го опыта значениями $t_{1вi}^3$, W_i^3 , $D_{кi}^3$, $p_{кi}^3$, δt_i^3 . По выбранной базовой МПТР определяются расчетные значения $p_{кi}^p$ и δt_i^p , далее выполняется проверка адекватности базовой МПТР по расчету p_k и δt с использованием критерия Фишера и на основании этого обосновывается выбор базовой МПТР конденсатора.

2. Идентификация математической модели. Используется базовая МПТР с той разницей, что при условиях каждого i -го опыта к $K_{срi}$ вводится поправка ΔK_i , вычисляемая в соответствии с принятым критерием оптимизации (17).

3. Разработка эмпирического обеспечения модели, заключающаяся в нахождении регрессионной зависимости ΔK от P_j .

4. Проверка адекватности идентифицированной математической модели – базовой МПТР с введением поправки ΔK к коэффициенту теплопередачи, рассчитываемой по полученному на предыдущем этапе уравнению регрессии.

Описанный алгоритм реализован в разработанном программном комплексе «Поверочный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин».

Рассмотрим результаты использования предложенного способа для построения энергетических характеристик конденсатора турбины Тп-115/125-130-1тп ТМЗ. Выбор базовой МПТР и её идентификация выполнены по данным эксплуатационных наблюдений – выборке показателей работы установки за месяц, предшествующий проведению испытаний турбины; выборку составили данные по 32 режимам, отличающимся значениями $t_{1в}$, W и D_k . Результаты же тепловых испытаний конденсатора в 92 опытах использованы для оценки адекватности модели.

В качестве базовой МПТР была выбрана методика ВТИ. При идентификации базовой МПТР определяющим фактором, согласно опубликованным данным, выбрана удельная тепловая нагрузка конденсатора q . При вычислении значений ΔK_i , показанных на рисунке 5, использован аддитивный критерий оптимизации $F_{\Sigma a}$ (17). Эмпирическое обеспечение модели представлено полиномом, уравнение которого приведено на рисунке 5. Результаты расчета энергетических характеристик конденсатора по базовой МПТР после введения в неё зависимости $\Delta K = f(q)$ приведены на рисунке 6. Для полученной модели выполнена проверка адекватности в два этапа: а) при использовании в качестве экспериментальных данных тех же результатов эксплуатационных наблюдений в 32

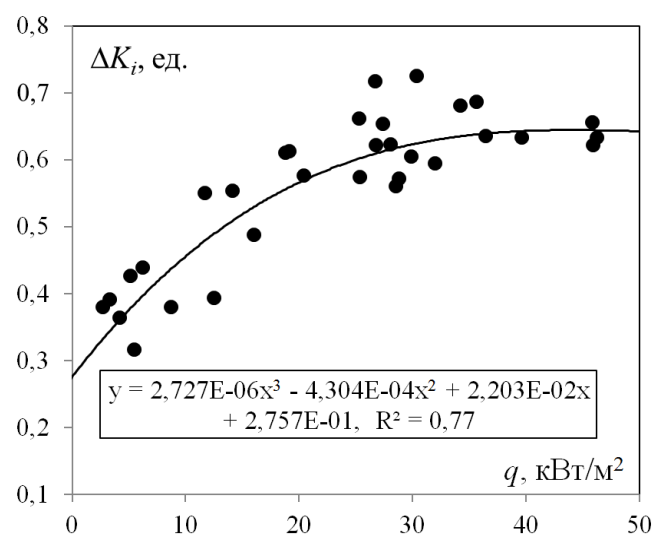


Рисунок 5. Значения поправочного множителя ΔK_i , ед., к коэффициенту теплопередачи, рассчитываемому по базовой МПТР, в зависимости от удельной тепловой нагрузки конденсатора q , кВт/м²; точки – результаты расчета при условиях разных опытов; линия – аппроксимация опытных данных (метод наименьших квадратов)

опытах; при этом модель признана адекватной по расчету p_k и δt (критерии Фишера – соответственно 42,7 и 15,1, критическое значение 1,84); б) при использовании результатов испытаний турбины в 92 опытах, не задействованных на этапе идентификации математической модели; модель также признана адекватной (критерии Фишера – соответственно 28,6 и 8,4, критическое значение 1,42). В диссертации эффективность предложенного способа построения энергетических характеристик конденсатора по малой выборке экспериментальных данных доказана также для турбин ПТ-12-35/10М КТЗ ОАО «Северсталь», К-220-44 ХТГЗ Кольской АЭС, ПТ-60-130 ЛМЗ Костромской ТЭЦ-2.

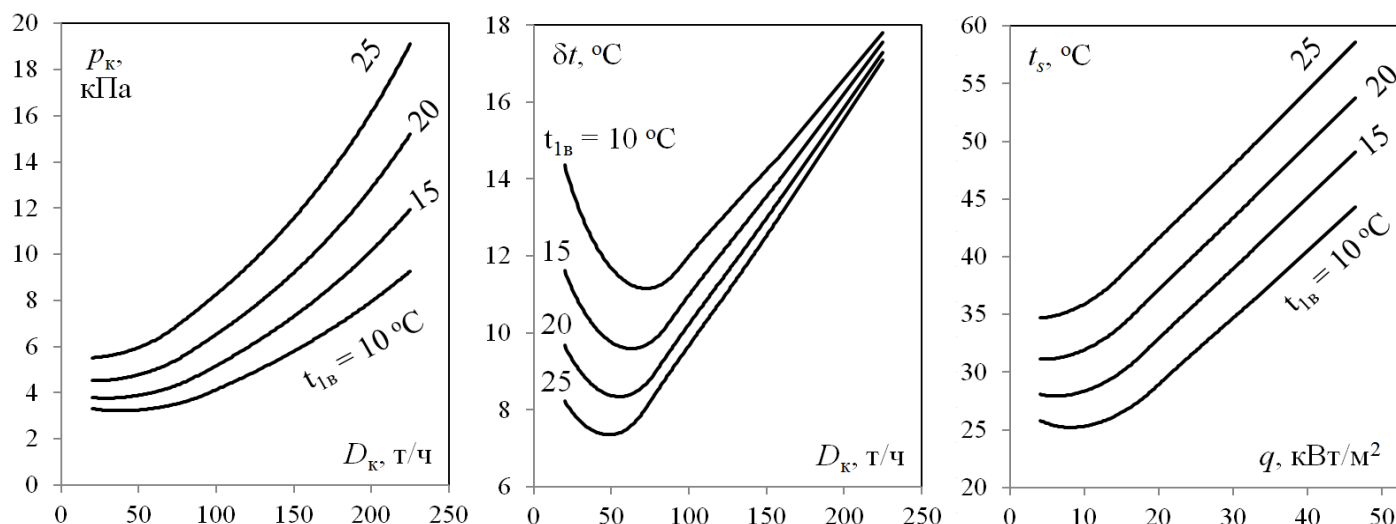


Рисунок 6. Энергетические характеристики конденсатора КГ1-3100, рассчитанные по базовой МПТР с введением поправочного множителя к коэффициенту теплопередачи $\Delta K = f(q)$ при $W = 7500 \text{ м}^3/\text{ч}$ в эксплуатационном диапазоне температуры охлаждающей воды перед конденсатором: t_s – температура насыщения при расчетном давлении в конденсаторе; прочие обозначения приведены в тексте

Испытания турбин сопровождалось определением деаэрационных характеристик конденсаторов. Полученные данные в части десорбции растворенного кислорода качественно совпадают с опубликованными результатами исследований, проведенных другими авторами.

Процессы десорбции свободного диоксида углерода изучались применительно к турбине ПТ-12-35/10М, работающей на паре с повышенным (до $40 \text{ мг}/\text{дм}^3$) содержанием свободной угольной кислоты. Соответствие фактических присосов воздуха в вакуумную систему нормативу установлено в ходе специальных исследований перед проведением испытаний. Выявлено, что массовая концентрация свободной угольной кислоты (C_{CO_2}) в турбинном конденсате не уменьшается менее $300 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ во всем диапазоне нагрузок конденсатора. Установлено увеличение C_{CO_2} при уменьшении относительной нагрузки основного эжектора; при этом массовая концентрация растворенного кислорода в турбинном конденсате (C_{O_2}) во всех режимах не превосходила $6 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ при нормативном значении $20 \text{ мкг}/\text{дм}^3$. Это означает, что ограниченные воздухоудаляющим устройством режимы работы конденсатора по десорбции свободного диоксида углерода в сравнении с десорбцией растворенного кислорода наблюдаются в существенно более широком диапазоне нагрузок конденсатора. Сформулированы и проверены в условиях эксплуатации рекомендации по увели-

чению производительности воздухоудаляющих устройств. При этом C_{CO_2} уменьшилась до значений около 50 мкг/дм^3 ; значения C_{O_2} практически не изменились.

Пятая глава посвящена разработке математической модели процессов газообмена в технологических системах сложной структуры на основе метода сведения материальных балансов по результатам измерений параметров теплоносителей в условиях недостаточности исходной информации.

При сведении материальных балансов в технологических системах основные проблемы связаны с некорректностью исходной (априорной) информации, которая обусловлена несовершенством метрологического обеспечения. Необходимо провести обоснованную корректировку (регуляризацию) значений расходов по участкам системы. Предложенный подход иллюстрируется применительно к задаче расчета массовых потоков растворенного кислорода для участка тепловой схемы турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп УТМЗ (рисунок 7).

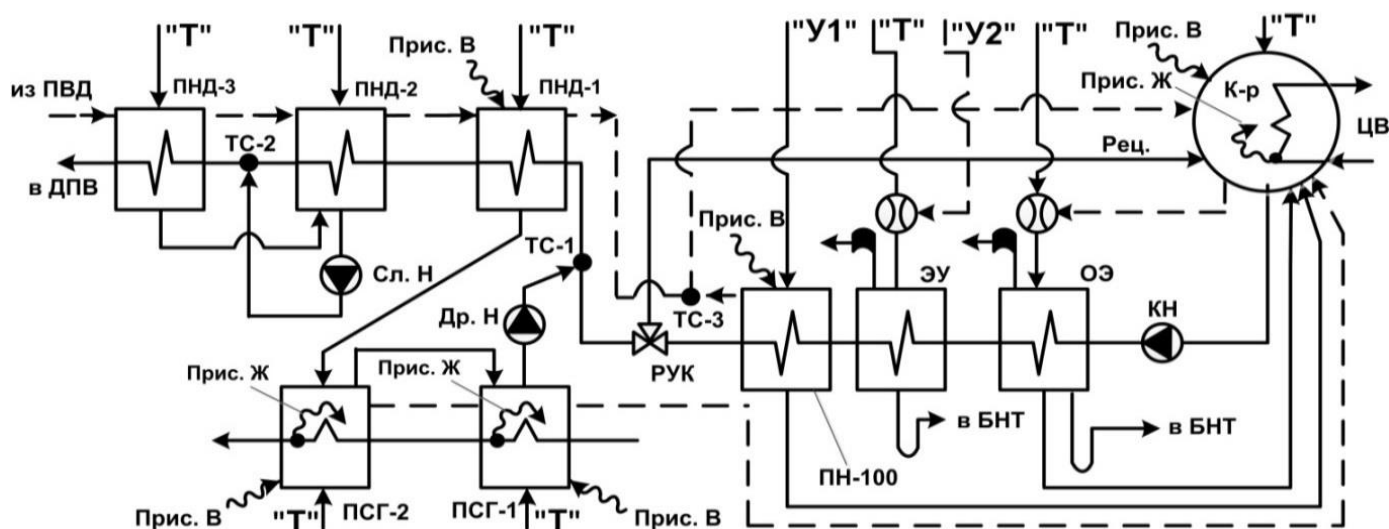


Рисунок 7. Фрагмент тепловой схемы: К-р – конденсатор; ОЭ – основной эжектор; ЭУ – эжектор уплотнений; ПН-100 – охладитель пара промежуточных камер концевых уплотнений турбины; РУК – регулятор уровня в конденсаторе; ПНД – подогреватель низкого давления; ПСГ – подогреватель сетевой горизонтальной; БНТ – бак низких точек; КН, Сл. Н, Др. Н – насосы соответственно конденсатный, сливной системы регенерации, дренажный сетевого подогревателя; ТС – точка смешения потоков; ЦВ, СВ – вода соответственно циркуляционная, сетевая; Прис. В – присос воздуха; Прис. Ж – присос жидкости; Рец. – рециркуляция; Т – турбина; ДПВ – деаэратор питательной воды; У1, У2 – соответственно промежуточные и крайние камеры концевых уплотнений турбоагрегата; сплошные линии – потоки теплоносителя; пунктирные линии – потоки воздуха или паровоздушной смеси

Моделирование материальных потоков выполняется на основе теории графов. Используется направленный граф $G = (X, V)$ (x_i – узлы смешения и распределения потоков, v_j – трубопроводы между узлами) (рисунок 8). Для описания структуры системы используется матрица инцидентности графа A , формируемая по формализованным правилам. В примере строится матрица инцидентности размером $n \times m$ ($n = 20$ – число строк или узлов графа, $m = 44$ – число столбцов или ветвей графа).

Задачи регуляризации материальных потоков теплоносителя (воды и пара) и потоков растворенного газа сводятся к задачам минимизации функций:

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + \lambda |V - V_0|^2 \Rightarrow \min; F_{c1}(V_1, \lambda_1) = |AV_1|^2 + \lambda_1 |V_1 - V_{01}|^2 \Rightarrow \min, \quad (18)$$

где $\mathbf{V}$ и $\mathbf{V}_1$ – искомые регуляризированные векторы расходов соответственно теплоносителя и газа; $\mathbf{V}_0$ и $\mathbf{V}_{01}$ – априорные оценки векторов расходов соответственно теплоносителя и газа; λ и λ_1 – параметры регуляризации.

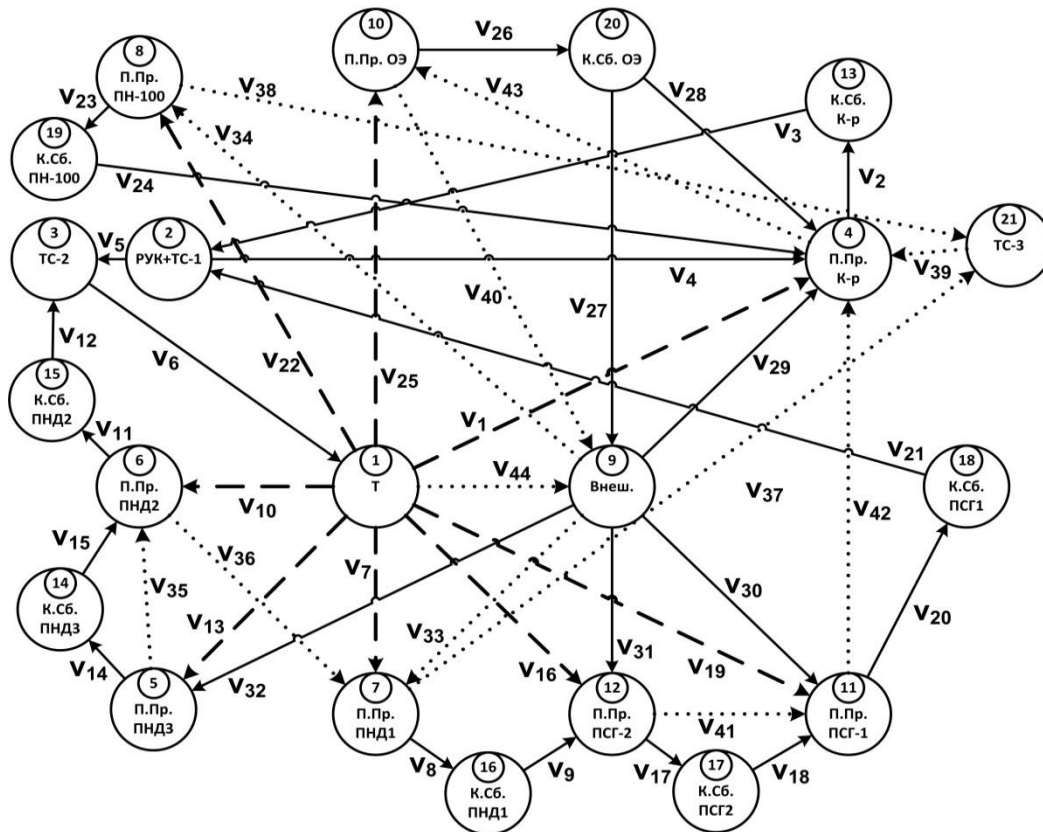


Рисунок 8. Структура графа $G = (X, V)$: К.Сб. – конденсатор-сборник; П.Пр. – паровое пространство; Внеш. – внешняя среда; цифрами в кружках обозначены номера узлов; сплошные линии – потоки воды (и газа, растворенного в воде); штриховые линии – потоки пара (и газа в паре); пунктирные линии – потоки воздуха или паровоздушной смеси; прочие обозначения соответствуют рисунку 7

Решение задачи регуляризации потоков теплоносителей можно рассматривать независимо от решения задачи регуляризации газовых потоков. Материальные потоки газа определяются в виде вектора $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V} * \mathbf{C}$ ($\mathbf{C}$ – вектор массовых концентраций газа по ветвям, « $*$ » – поэлементное умножение матриц одинакового размера). Для ряда ветвей (пунктирные линии на рисунке 8) расход теплоносителя может быть равен нулю, а априорное значение расхода газа V_{1i} задается как результат прямого измерения (показания воздухомера на патрубке отвода газов из основного эжектора в атмосферу) или как результат экспертной оценки (присосы воздуха по элементам системы).

Для скалярной постановки задачи известно ее аналитическое решение:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \lambda \mathbf{V}_0; \quad \mathbf{V}_1 = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda_1 \mathbf{E})^{-1} \lambda_1 \mathbf{V}_{01}, \quad (19)$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица; верхние индексы «Т» и «-1» – транспонирование и обращение матрицы соответственно.

Аналитическое решение не позволяет учесть, во-первых, метрологические ограничения – различную степень достоверности определения параметров априорной информации, во-вторых, технологические ограничения (допустимые диапазоны изменения расхода по каждой ветви), но имеет самостоятельную теоретическую ценность, поскольку может использоваться для проверки на тестовых примерах прочих методов решения задачи.

Преодолеть недостатки аналитического решения позволяет переход от скалярной постановки задачи (18) к её векторной постановке (используя вместо скаляров λ и λ_1 диаго-

нальные матрицы параметров регуляризации λ и λ_1) с учетом технологических ограничений и использование численного решения методом статистического программирования:

$$F_c(\mathbf{V}, \lambda) = |\mathbf{AV}|^2 + |\lambda(\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)|^2 \Rightarrow \min; V_i \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}], \quad (20)$$

$$F_{c1}(\mathbf{V}_1, \lambda_1) = |\mathbf{AV}_1|^2 + |\lambda_1(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_{01})|^2 \Rightarrow \min; V_{1i} \in [V_{1i}^{\min}; V_{1i}^{\max}], \quad (21)$$

где $V_i^{\min}$, $V_{1i}^{\min}$, $V_i^{\max}$, $V_{1i}^{\max}$ – границы доверительных интервалов, обусловленные нормируемой погрешностью средства измерения или точностью экспертной оценки (индекс «1» указывает на газовые потоки) с учетом установленных технологических ограничений.

Алгоритм численного решения задачи (20), (21) состоит в многократной генерации случайным образом вектора расходов $\mathbf{V}$ (или $\mathbf{V}_1$) вокруг априорных значений его элементов в заданном ограничением диапазоне. При этом автоматически выполняются метрологические и технологические ограничения. Сгенерированные решения сравниваются по значениям целевой функции оптимизации с выбором в качестве окончательного результата того решения, которому соответствует минимальное значение целевой функции.

Решение сформулированной задачи иллюстрируется на примере одного из режимов работы турбоустановки Тп-115/125-130-1тп. При этом априорное значение суммарного расхода кислорода с присосами воздуха в вакуумную систему турбины принято равным нормативному, а его распределение по элементам вакуумной системы выполнено пропорционально расчетным расходам воздуха с присосами, которые, в свою очередь, вычислены по известным рекомендациям в зависимости от длины сварных и фланцевых соединений и эмпирических значений удельного расхода воздуха с присосами на один метр длины этих соединений. Априорные значения C_{0i} в конденсате пара подогревателей определены по результатам расчета равновесных условий растворимости кислорода в воде по закону Генри.

При решении задачи средняя по узлам графа невязка материального баланса по теплоносителям уменьшена с 2,7 % до 0,9 %, а максимальная – с до 8,8 % до 2,3 %. Средняя по узлам графа невязка материального баланса по растворенному кислороду уменьшена с 6,1 % до 1,7 %, а максимальная – с до 19,1 % до 6,5 %. Определив V_{1i} , вычисляем расходы воздуха с присосами в элементы системы.

В целом по 92 опытам расход воздуха с присосами в вакуумную систему по показаниям воздухомера отличается от значения этого расхода, полученного при сведении материальных балансов, от 2,8 до 36,7 %, в среднем 19,8 %. Такое отклонение критично с точки зрения признания вакуумной системы турбины соответствующей или несоответствующей установленным нормам по герметичности. Отклонение от среднего по всем опытам значения присосов воздуха в вакуумную систему составило 22,0 % при использовании показаний воздухомера и 3,6 % при использовании значений присосов, полученных в ходе решения задачи сведения балансов, что доказывает эффективность применения предложенного метода для установления действительной герметичности вакуумной системы турбоустановки и локализации элементов системы с повышенными присосами.

Предложенная методика реализована в программных комплексах «ТЭС-Эксперт. Пароводяной баланс» и «Баланс».

В шестой главе предложена математическая модель центробежных насосов с ЧРП, точность которой определена в сравнении с опубликованными моделями других авторов по результатам проведенных испытаний различных насосов.

Проведены испытания насосов с ЧРП: четырех насосов 1Д-800-56, четырех насосов СЭ-800-55-11, четырех насосов Omega 200 – 520А (KSB Aktiengesellschaft) и девяти насосов СЭ-500-70-16, – в два этапа: 1) при номинальном значении ω и дроссельном регулировании производительности; 2) при работе с ЧРП при неизменном положении органов регулирования сети и нескольких значениях ω .

Рассмотрены опубликованные математические модели насосов при переменном числе оборотов ротора ω : модель 1 – упрощенные формулы пропорциональности, полученные из (4) в предположении, что $\eta_{об}$, η_r , η не зависят от ω ; модель 2 – соответствует модели 1 с той разницей, что учитывает изменение полного КПД насоса в соответствии с (5). Для примера на рисунке 9 результаты расчета рабочих характеристик по моделям 1 и 2 сопоставлены с результатами испытаний насоса 1Д-800-56. Полученные по всем насосам данные позволяют заключить, что результаты расчетов по моделям 1 и 2 отличаются от экспериментальных данных с отклонением по напору до 17 %, по мощности – до 36 %. Эти значения сопоставимы с экономией затрат мощности на привод насосов при установке ЧРП, поэтому модели 1 и 2 не могут быть рекомендованы к использованию при обосновании соответствующих энергосберегающих мероприятий.

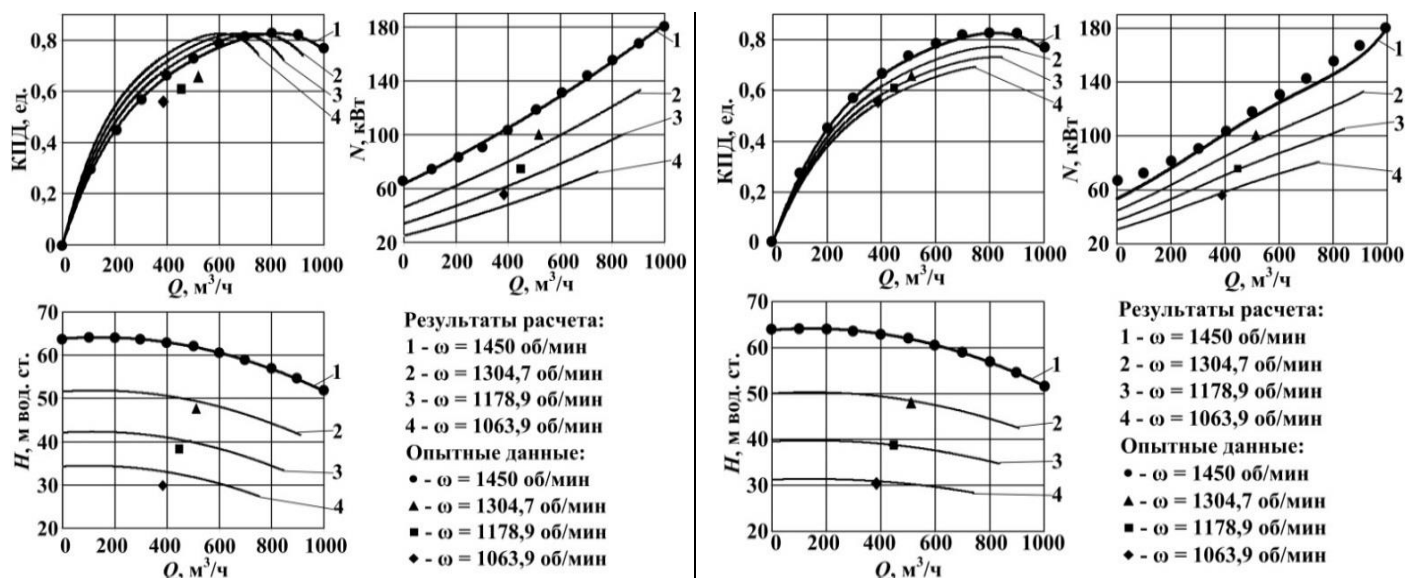


Рисунок 9. Сопоставление результатов расчета рабочих характеристик насоса 1Д-800-56 по модели 1 (слева) и модели 2 (справа) с экспериментальными данными (точки)

На основе формул пропорциональности (4) и анализа факторов, влияющих на $\eta_{об}$, η_r , а также механический КПД насоса η_m , разработана математическая модель (модель 3):

$$Q = Q_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{r+2} \cdot \left[\left(\frac{H_H}{AQ_H^2} \right) / \left(\frac{H_H}{AQ_H^2} - 1 \right) \right]^{0,5}; H = H_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2; N = \frac{\rho g H_H Q_H}{1000 \cdot 3600 \eta_H} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^3; \quad (22)$$

$$\eta = \eta_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{r+1} \cdot \left[\left(\frac{H_H}{AQ_H^2} \right) / \left(\frac{H_H}{AQ_H^2} - 1 \right) \right]^{0,5}; A = \frac{1}{1620000 g \pi^2} \cdot \left(\frac{1}{d_H^4} - \frac{1}{d_{BC}^4} \right), \quad (23)$$

где r – параметр идентификации; A – вспомогательный комплекс; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ – средняя плотность воды, кг/м^3 ; d_n и $d_{вс}$, м , – эквивалентные диаметры поперечных сечений гидравлической части насоса соответственно на напоре и всасе.

Зная характеристики насоса при номинальном значении ω_n (Q_n , H_n , η_n) и задав параметр идентификации r , можно рассчитать рабочие характеристики при отклонении ω от ω_n . Значение r определяется по результатам испытаний. По опыту использования модели это значение близко к 0,5 (для всех испытанных насосов значение r варьируется от 0,40 до 0,56, в среднем – 0,49). При этом модель 3 позволяет значительно сократить количество режимов при испытаниях (для каждого насоса выполнено от 3 до 9 опытов при отклонении ω от ω_n).

На рисунке 10 представлены результаты расчетов по модели 3 для рассмотренного примера с насосом 1Д-800-56. Среднее отклонение расчетных значений параметров от экспериментальных для всех испытанных насосов составило 2,6 %.

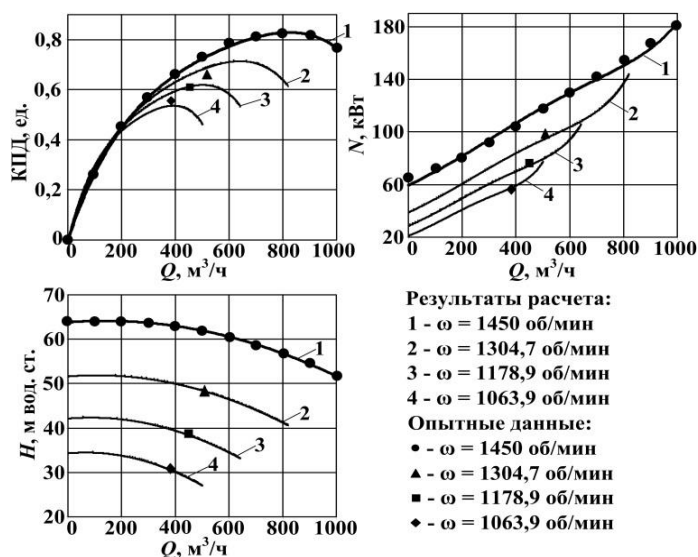


Рисунок 10. Сопоставление результатов расчета рабочих характеристик насоса 1Д-800-56 по модели 3 с экспериментальными данными (точки)

Седьмая глава посвящена научному обоснованию мероприятий по повышению эффективности деаэрационных установок и технологических систем ТЭС.

Математические модели и программные комплексы по расчету деаэраторов использованы при режимно-наладочных испытаниях, проектировании и обосновании технических решений по реконструкции деаэрационных установок: 1) для ООО «Техноцентр-Нефтемаш» разработана конструкция деаэратора ДА-30, предназначенного для получения воды с ужесточенными относительно нормативных химических показателями качества; 2) обоснована эффективность применения затопленных барботажных устройств деаэраторных баков при реконструкции деаэраторов ДА-100 ОАО «Северсталь», ДА-50 ЗАО «Родниковская энергетическая компания»; 3) расчетным путем (с соответствующим уменьшением затрат ресурсов на проведение испытаний) выявлены значения режимных параметров, обеспечивающие получение воды требуемого химического качества для указанных деаэраторов, а также деаэраторов ДСА-300, ДА-300м ОАО «Северсталь» и ДЦВ-200 ОАО «ОмПО «Иртыш».

Для Омской ТЭЦ-5 разработана двухцелевая деаэрационная установка, состоящая из четырех технологических блоков. Каждый блок включает центробежно-вихревой деаэратор ДЦВ и капельные деаэрационные устройства. Выпар блока направляется в специальный конденсатор. При деаэрации 800 т/ч подпиточной воды теплосети каждый блок обеспечивает получение дистиллята в качестве добавочной воды цикла ТЭЦ с расходом до 12,5 т/ч. Предложенное решение обобщено на типовый проект реконструкции деаэрационных установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ.

При реконструкции струйных деаэраторов ДСА-100 ОАО «Северсталь» обоснована технологическая и экономическая эффективность их надстройки кавитационными деаэрационными устройствами «АВАКС», работающими в режиме перегретой воды с выбором рациональной технологической схемы.

Разработано и обосновано с использованием экспериментальных данных по турбине Тп-115/125-130-1тп техническое решение по модернизации конденсационной установки теплофикационной паровой турбины с включением кавитационного деаэрационного устройства в трубопровод рециркуляции конденсата от регулятора уровня в конденсатор с отводом выпара в паровое пространство конденсатора.

Аналогичное техническое решение разработано для технологических систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением. С использованием экспериментальных данных по энергоблокам ГРЭС и АЭС получена зависимость скорости коррозии медных проводников в системе $K_{\text{кор}}$, мг/(м²·сутки):

$$K_{\text{кор}} = 3,98 M_{\text{O}_2}^{0,38} (10^{9-\text{pH}_{25}})^{0,33} \chi_{25}^{0,80}, \quad (24)$$

где M_{O_2} , pH_{25} и χ_{25} – соответственно концентрация растворенного кислорода в охлаждающей воде, мкмоль/дм³, её водородный показатель и удельная электрическая проводимость, мкСм/см. Реализация технического решения позволит уменьшить $K_{\text{кор}}$ в среднем в 2,1 раза.

Зависимость (24) справедлива при изменении факторов в следующих диапазонах: M_{O_2} – от 0,66 до 196,25 мкмоль/дм³; pH_{25} – от 6,18 до 8,36; χ_{25} – от 0,5 до 2,5 мкСм/см.

Рекомендации по выбору производительности воздухоудаляющих устройств конденсационных установок турбин, работающих при повышенном содержании в свежем паре свободной угольной кислоты, и рекомендации по совершенствованию режима работы конденсационной установки разработаны для турбины ПТ-12-35/10М ОАО «Северсталь».

На основе предложенной математической модели центробежных насосов с ЧРП разработан универсальный алгоритм оценки эффективности мероприятий по уменьшению затрат электроэнергии на деаэрационно-питательные установки барабанных паровых котлов с установкой частотно-регулируемого электропривода, гидромурфт или приводных турбин, апробация которого выполнена при разработке технико-экономических обоснований рассматриваемого мероприятия для Печорской ГРЭС и Сакмарской ТЭЦ.

Метод и программные комплексы по сведению материальных балансов по данным измерений параметров теплоносителей в технологических системах со сложной конфигурацией потоков в условиях недостаточности исходной информации использованы при разработке программного комплекса «ТЭС-Эксперт» для ряда электростанций, внедрение которого обеспечило получение существенного экономического эффекта за счет обоснованного выявления резервов тепловой экономичности и оптимизации режима работы оборудования на Владимирской ТЭЦ-2, Омской ТЭЦ-5 и ПГУ-ТЭС «Международная».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс экспериментальных и расчетных исследований, по результатам которых предложены и научно обоснованы режимные, схемные и конструктивные меро-

приятия, обеспечивающие повышение эффективности оборудования и технологических схем деаэрации теплоносителей теплоэнергетических объектов.

2. Разработан единый подход к моделированию процессов деаэрации теплоносителей в установках различной структуры, конструктивного исполнения и условий эксплуатации, предназначенный для научного обоснования технических и технологических решений по повышению эффективности термической деаэрации воды и предусматривающий: 1) построение модели системы из унифицированных моделей отдельных её подсистем; 2) разработку моделей отдельных подсистем путем синтеза модели движения теплоносителей, реализуемой в программном комплексе FlowVision или с привлечением других апробированных методов расчета гидродинамических процессов, и модели деаэрации воды, базирующейся на подходе матричной формализации к расчету процессов тепломассообмена, с идентификацией коэффициентов тепло- и массопередачи по экспериментальным данным.

В соответствии с предложенным подходом при использовании результатов проведенных экспериментальных исследований процессов деаэрации воды в деаэраторах ДА-300м, ДСА-300, ДЦВ-200, КД-100 разработано замкнутое математическое описание процессов тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода в деаэрационных элементах различных типов.

3. Разработана математическая модель совмещенных процессов движения воды и термического разложения гидрокарбонатов в деаэрационных баках, базирующаяся на параллельном включении ячеек идеального вытеснения с различным временем пребывания среды в них. Предложенная математическая модель использована для обработки данных натурных испытаний деаэраторов ДА-300м, ДСА-300, ДА-300, ДА-200, ДСА-200, ДСА-100, ДСА-75, ДА-50, в результате: 1) определены кинетические характеристики процесса термического разложения гидрокарбонатов при деаэрации воды; 2) доказана смена порядка химической реакции термического разложения гидрокарбонатов при выявленных граничных значениях общей щелочности деаэрируемой воды; 3) выполнена параметрическая идентификация методики расчета показателей эффективности удаления угольной кислоты при термической деаэрации в широком диапазоне изменения общей щелочности деаэрируемой воды: степени термического разложения гидрокарбонатов, pH_{25} деаэрированной воды и массовой концентрации в ней свободной угольной кислоты; 4) разработано эмпирическое обеспечение математической модели процесса удаления из воды диоксида углерода при термической деаэрации с учетом внутренних источников массы газа, обусловленных химическими реакциями.

4. Предложенные математические модели деаэрационных элементов используются в промышленных и научно-исследовательских проектах Ченстоховского технологического университета (Польша, Ченстохова), международной компании «GTI Solutions» (США, Даллас), применены при разработке прикладных программных комплексов «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды», «Расчет многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством», «Декарбонизация». Программные комплексы используются АО «Ивгортеплоэнерго» (г. Иваново), ОАО «Тепломонтажладка» (г. Кострома) и ЗАО «Регион-Бизнес» (г. Москва) при проектировании,

режимной наладке и техническом аудите деаэрационных установок. С применением разработанных математических моделей и программных комплексов решены задачи:

- обоснованы мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности работы струйно-барботажных деаэраторов; предложенные мероприятия реализованы на объектах ОАО «Северсталь» (г. Череповец), ОАО «Омское производственное объединение «Иртыш» (г. Омск), ПГУ-ТЭС ЗАО «Родниковская энергетическая компания» (г. Родники Ивановской обл.), использованы при проектировании нетипового деаэратора ДА-30 в ООО «Техноцентр-Нефтемаш» (г. Ярославль);

- для установок подпитки теплосети с вакуумными деаэраторами разработана технологическая схема, обоснован выбор оборудования и определены проектные показатели работы двухцелевой деаэрационной установки на базе центробежно-вихревых деаэраторов, предназначенной для деаэрации подпиточной воды теплосети и получения при этом дистиллята в качестве добавочной воды паровых котлов; предложенное техническое решение принято к реализации на Омской ТЭЦ-5 (экономия топлива 18 250 т у.т./год) и рекомендовано ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново) в качестве типового решения при реконструкции существующих или проектировании новых установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ;

- предложена и обоснована технологическая схема включения дополнительного кавитационного деаэрационного устройства в технологическую схему конденсационной установки теплофикационных турбин; предложенное техническое решение, эффективность которого подтверждена результатами исследований на Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, принято ЗАО «УК ОПЭК» (г. Санкт-Петербург) в качестве типовой технологической схемы реконструкции конденсационных установок теплофикационных турбин (экономический эффект для турбоагрегатов ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ составляет 1,2 млн. руб/год);

- техническое решение по установке дополнительного кавитационного деаэрационного устройства предложено для систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением; эффективность данного технического решения подтверждена результатами исследований на Костромской, Печорской и Конаковской ГРЭС и Ростовской АЭС и обоснована расчетами при помощи разработанной математической модели, обеспечивающей определение скорости коррозии охлаждаемых медных проводников в зависимости от водородного показателя pH_{25} , удельной электрической проводимости охлаждающей воды и концентрации растворенного в ней кислорода.

5. Доказана применительно к конденсаторам паровых турбин с повышенным содержанием свободной угольной кислоты в свежем паре недостаточность условий, обеспечивающих достижение нормативного содержания в конденсате растворенного кислорода, для эффективного удаления из конденсата свободного диоксида углерода. Выявлена эмпирическая зависимость массовой концентрации свободного диоксида углерода в конденсате от производительности воздухоудаляющих устройств конденсационной установки, позволяющая выбирать типоразмеры воздухоудаляющих устройств с учетом требуемой эффективности удаления из теплоносителя угольной кислоты. Рекомендации по повышению эффектив-

ности деаэрации конденсата в конденсаторе турбины ПТ-12-35/10М КТЗ приняты к реализации в ОАО «Северсталь» (экономический эффект 0,6 млн. руб/год).

6. Проведены тепловые испытания турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп ТМЗ Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, позволившие получить следующие результаты:

- выявить устранимые резервы тепловой экономичности в количестве 1 963 т у.т./год и разработать комплект энергетических характеристик в составе нормативно-технической документации по топливоиспользованию Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, используемых также при организации эксплуатации аналогичной турбины на Ярославской ТЭЦ-2;

- разработать и обосновать способ идентификации известных математических моделей теплообмена при поверочном тепловом расчете конденсаторов паровых турбин, основанный на введении в модель дополнительного параметра идентификации с разработкой её эмпирического обеспечения статистическими методами по малой выборке экспериментальных данных; предложенный способ реализован в программном комплексе «Поверочный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин»; эффективность данного подхода доказана также для турбин ПТ-12/35-10М КТЗ, К-220-44 ХТГЗ, ПТ-60-130 ЛМЗ и обоснована результатами внедрения разработанного программного комплекса в ООО «Газэнергопроминжиниринг» при пуско-наладочных работах с получением экономии в размере от 2,8 до 4,0 млн. руб. при проведении работ на турбоагрегатах мощностью соответственно от 50 до 100 МВт.

7. Разработана математическая модель центробежных насосов с частотным регулированием производительности, позволяющая при уменьшении объема необходимых натурных испытаний насосов повысить точность расчета показателей их рабочих и энергетических характеристик. Эффективность предложенной модели доказана в ходе обработки результатов испытаний насосов различных типоразмеров. На основе разработанной модели составлен универсальный алгоритм оценки эффективности мероприятий по уменьшению затрат электроэнергии на деаэрационно-питательные установки барабанных паровых котлов с установкой частотно-регулируемого электропривода, гидромuft или приводных турбин, позволивший, в сравнении с традиционными методами оценки эффективности, существенно уточнить значения ожидаемого эффекта при разработке технико-экономических обоснований рассматриваемого мероприятия для Печорской ГРЭС (экономия топлива 2 486,8 т у.т./год) и Сакмарской ТЭЦ (экономия топлива от 2 185 до 3 370 т у.т./год при различных вариантах реализации).

8. На основе метода сведения материальных балансов по результатам измерений параметров теплоносителей в технологических системах сложной структуры, базирующегося на подходе регуляризации Тихонова при решении некорректных задач, разработана математическая модель процессов газообмена в таких системах, которая позволяет в условиях недостаточности исходной информации сводить материальные балансы по растворенным в теплоносителях газам. Разработанный подход реализован:

- в программных комплексах «ТЭС-Эксперт. Пароводяной баланс» и «Баланс», внедренных на Владимирской ТЭЦ-2 (экономия тепловой энергии 16 282 ГДж/год), Омской

ТЭЦ-5 и ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго», г. Москва (экономия топлива соответственно 7000 и 1308 т у.т./год);

– при разработке метода контроля герметичности вакуумной системы турбоустановок на основе сведения материального баланса по растворенному кислороду, принятого к использованию на Владимирской ТЭЦ-2.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. **Ледуховский, Г.В.** Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / **Г.В. Ледуховский**, В.Н. Виноградов, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков / под общ. ред. **Г.В. Ледуховского**; ФГБОУВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 420 с. ISBN 978-5-00062-172-1.

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

2. **Ледуховский, Г.В.** Прикладной программный комплекс для проектирования, организации эксплуатационного контроля и наладки атмосферных деаэраторов / **Г.В. Ледуховский**, А.А. Коротков, А.Ю. Ненаездников // Вестник ИГЭУ, 2008, вып. 4. с. 20-23.
3. Барочкин, Е.В. Исследование эффективности деаэрации воды в баках атмосферных деаэраторов, оборудованных барботажным коллектором / Е.В. Барочкин, **Г.В. Ледуховский**, В.Н. Виноградов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2009, вып. 2. с. 32-36.
4. Виноградов, В.Н. Деаэрационные испытания конденсатора турбины при повышенном содержании свободной углекислоты в остром паре / В.Н. Виноградов, **Г.В. Ледуховский**, А.Е. Барочкин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2009, вып. 2. с. 37-39.
5. Мошкарин, А.В. Деаэрационная установка двойного назначения на основе центробежно-вихревых деаэраторов / А.В. Мошкарин, **Г.В. Ледуховский**, В.Н. Виноградов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2009, вып. 4. с. 8-11.
6. Мошкарин, А.В. Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Теплоэнергетика, 2010, № 8. с. 21-25.
7. Мошкарин, А.В. Проблемы моделирования процессов хемосорбции-десорбции углекислоты в тепломассообменных аппаратах энергетических установок / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2010, вып. 2. с. 15-18.
8. Мошкарин, А.В. Электронное учебное пособие «Атмосферные деаэрационные установки» / А.В. Мошкарин, **Г.В. Ледуховский**, А.А. Коротков [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2010, вып. 3. с. 27-29.
9. **Ледуховский, Г.В.** Экспериментальное определение сетки поправок к мощности турбины Тп-115/125-130-1тп УТМЗ на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе / **Г.В. Ледуховский**, А.А. Поспелов, М.Ю. Зорин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2010, вып. 4. с. 4-9.
10. **Ледуховский, Г.В.** Испытания турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды / **Г.В. Ледуховский**, А.А. Поспелов, Н.С. Асташов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2011, вып. 2. с. 3-10.
11. **Ледуховский, Г.В.** Разработка диаграммы режимов турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в теплофикационном режиме с одноступенчатым подогревом сетевой воды по результатам тепловых испытаний / **Г.В. Ледуховский**, А.А. Поспелов, М.Ю. Зорин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2011, вып. 3. с. 3-7.
12. Жуков, В.П. Оптимальная выработка и передача энергии в тепловых и электрических сетях / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Д.А. Уланов, **Г.В. Ледуховский**, А.А. Зубанов // Теплоэнергетика, 2011, № 8. с. 8-12.
13. **Ледуховский, Г.В.** Результаты тепловых испытаний турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в конденсационном режиме / **Г.В. Ледуховский**, А.А. Поспелов, Н.С. Асташов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2011, вып. 4. с. 3-5.
14. **Барочкин, А.Е.** Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, **Г.В. Ледуховский** // Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 1. с. 52-56.
15. 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 // Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 2. с. 8-11.

16. 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.
17. Виноградов, В.Н. Совершенствование водно-химического режима ТЭЦ среднего давления / В.Н. Виноградов, И.А. Шатова, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 3. с. 5-10.
18. Барочкин, Е.В. Повышение эффективности работы ТЭЦ на основе оптимизации распределения сетевой воды между теплофикационными установками турбоагрегатов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.А. Борисов, **Г.В. Ледуховский** // Энергетик, 2012, вып. 10. с. 13-15.
19. Барочкин, Е.В. Моделирование процесса деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаездников, А.Н. Беляков, **Г.В. Ледуховский**, А.П. Зимин // Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 6. с. 9-13.
20. **Ледуховский, Г.В.** Решение задачи регуляризации материальных потоков в сложных энергетических системах / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 2. с. 5-9.
21. **Ледуховский, Г.В.** Векторная регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 4. с. 5-11.
22. Ненаездников, А.Ю. Инкорпорация решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэрации / А.Ю. Ненаездников, **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 4. с. 12-16.
23. Горшенин, С.Д. Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках с затопленным барботажным устройством / С.Д. Горшенин, А.Ю. Ненаездников, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 5. с. 9-13.
24. **Ледуховский, Г.В.** Задача многокритериальной регуляризации потоков энергии и теплоносителя в энергетических системах сложной структуры / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 6. с. 5-10.
25. **Ледуховский, Г.В.** Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке / **Г.В. Ледуховский**, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 3. с. 9-15.
26. Росляков, А.Н. Анализ процесса дегазации в центробежно-вихревых деаэраторах / А.Н. Росляков, **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 4. с. 11-16.
27. Беляков, А.Н. Термодинамический подход к моделированию и управлению совмещенными процессами теплообмена в центробежных деаэраторах / А.Н. Беляков, А.Н. Росляков, В.П. Жуков, **Г.В. Ледуховский**, Е.В. Барочкин // Известия ВУЗов. Серия «Экономика, финансы и управление производством», 2014, № 03(21). с. 103-109.
28. **Ледуховский, Г.В.** Реконструкция атмосферных струйных деаэраторов с применением кавитационных деаэрационных устройств «АВАКС» / **Г.В. Ледуховский**, В.Н. Виноградов, И.А. Шатова [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 6. с. 5-10.
29. **Беляков, А.Н.** Моделирование совмещенных теплообменных процессов в барботажной ступени центробежно-вихревых деаэраторов / А.Н. Беляков, А.Н. Росляков, В.П. Жуков, **Г.В. Ледуховский**, Е.В. Барочкин // Химическая промышленность сегодня, 2015, вып. 6. с. 32-41.
30. **Ледуховский, Г.В.** Влияние парового барботажа в баке атмосферных деаэраторов на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов / **Г.В. Ледуховский**, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 3. с. 5-12.
31. **Ледуховский, Г.В.** Прогнозирование показателей эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления без парового барботажа в деаэраторном баке / **Г.В. Ледуховский**, С.Д. Горшенин, В.Н. Виноградов [и др.] // Теплоэнергетика, 2015, № 7. с. 68-75.
32. **Ледуховский, Г.В.** Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин [и др.] // Теплоэнергетика, 2015, № 8. с. 72-80.
33. **Ледуховский, Г.В.** Эмпирическое обеспечение математической модели деаэрации воды в центробежно-вихревых деаэраторах / **Г.В. Ледуховский**, А.Н. Росляков, В.Н. Виноградов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 5. с. 5-10.

34. Росляков, А.Н. Комбинаторный подход к моделированию формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах / А.Н. Росляков, В.П. Жуков, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 5. с. 64-69.
35. **Ледуховский, Г.В.** Экспериментальные исследования и моделирование процессов удаления из воды углекислоты в деаэраторах атмосферного давления / **Г.В. Ледуховский** // Вестник ИГЭУ, 2016, вып. 3. с. 5-13.
36. **Барочкин, Ю.Е.** Исследование начального эффекта при десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды / Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков, **Г.В. Ледуховский** [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2016, вып. 5. с. 5-10.
37. **Ледуховский, Г.В.** Регуляризация материальных газовых потоков в энергетических системах сложной структуры / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ, 2016, вып. 6. с. 5-14.
38. **Ледуховский, Г.В.** Разработка и апробация метода идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных / **Г.В. Ледуховский** // Вестник ИГЭУ, 2017, вып. 1. с. 5-10.
39. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование процессов удаления из воды угольной кислоты в деаэраторах атмосферного давления / **Г.В. Ледуховский** // Теплоэнергетика, 2017, № 2. с. 55-62.
40. Зимин, А.П. Разработка методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в системе расчета показателей тепловой экономичности оборудования ПГУ-ТЭС / А.П. Зимин, **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2017, вып. 2. с. 5-12.
41. **Ледуховский, Г.В.** Эмпирическое обеспечение ячеечных моделей тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода в элементах атмосферных деаэраторов / **Г.В. Ледуховский**, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ, 2017, вып. 3. с. 5-13.
42. **Ледуховский, Г.В.** Повышение эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств / **Г.В. Ледуховский**, Ю.Е. Барочкин, В.Н. Виноградов [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2018, вып. 1. с. 5-13.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

43. Барочкин, Е.В. Программа для ЭВМ: «ТЭС-Эксперт». Пароводяной баланс / Е.В. Барочкин, А.А. Борисов, **Г.В. Ледуховский**, А.А. Поспелов // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2011611931 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 02.03.11.
44. **Ледуховский, Г.В.** Программа для ЭВМ: Прикладной программный комплекс «Поверочный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин» / **Г.В. Ледуховский**, А.Е. Барочкин, В.Ю. Трифонов // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2012611328 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 01.02.12.
45. Барочкин, Е.В. Программа для ЭВМ: Прикладной программный комплекс «Технологический расчет атмосферных струйно-барботажных деаэраторов воды» / Е.В. Барочкин, **Г.В. Ледуховский**, А.А. Коротков // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2012611329 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 01.02.12.
46. Жуков, В.П. Программа для ЭВМ: «Расчет многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством» / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **Г.В. Ледуховский**, А.Ю. Ненаездников // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2013615107 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 28.05.13.
47. Барочкин, Е.В. Программа для ЭВМ: Программный комплекс «Декарбонизация» / Е.В. Барочкин, **Г.В. Ледуховский**, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков, В.Н. Виноградов // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2016615216 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 18.05.16.
48. Барочкин, Е.В. Программа для ЭВМ: «Баланс» / Е.В. Барочкин, **Г.В. Ледуховский**, А.П. Зимин, А.А. Борисов, С.Д. Горшенин, В.П. Жуков // Свид. о госу-дарств. регистр. программы для ЭВМ 2017617102 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 23.06.17.

Ледуховский Григорий Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ И ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Подписано в печать 21.02.2018 г. Формат 60х84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 2,33. Тираж 100 экз. Заказ № 19

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ