На правах рукописи

ЛЕДУХОВСКИЙ Григорий Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕСОРБЦИИ КИСЛОРОДА В СТРУЙНО-БАРБОТАЖНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2008

Работа выполнена на кафедре прикладной математики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор **Жуков Владимир Павлович**

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор **Шарапов Владимир Иванович**

кандидат технических наук, доцент **Ильченко Александр Георгиевич**

Ведущая организация – **Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – Фирма «ОРГРЭС»**

Защита состоится «**27**» **июня** **2008 г.** в **11.00** часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу:
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан «26» мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы. Качественная дегазация технологических вод является одной из важнейших задач эксплуатации и проектирования объектов энергетики. Значительную долю применяемых в России дегазационных аппаратов составляют термические деаэраторы струйно-барботажного типа атмосферного давления. К настоящему времени благодаря работам сотрудников МЭИ, НПО ЦКТИ, ВТИ, лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ, ИГЭУ и других научных и производственных организаций накоплен опыт использования таких деаэраторов, обобщение которого позволяет заключить, что эффективность их работы определяется значениями многих режимных и конструктивных параметров.

В ряде опубликованных работ получила распространение разработка многофакторных моделей деаэраторов в целом на основании экспериментальных данных. Такой путь имеет существенный недостаток: при изменении конструкции деаэратора требуются повторные экспериментальные исследования и разработка новых статистических моделей. Наиболее предпочтительными являются математические модели отдельных элементов деаэраторов. При наличии вариантов конструктивного исполнения таких деаэраторов все они включают струйные отсеки, затопленные и незатопленные барботажные устройства. Существующая база методов расчета струйных и барботажных элементов деаэраторов не позволяет с заданной точностью описать протекающие в них процессы во всем диапазоне изменения режимных параметров. Методики расчета ряда применяемых в практике элементов отсутствуют, также как и опубликованные экспериментальные данные, характеризующие их работу. Указанные обстоятельства приводят к увеличению сроков проведения режимно-наладочных испытаний деаэрационных установок: из-за неясности влияния на процессы деаэрации отдельных режимных факторов они не позволяют получить развернутую информацию об эффективности деаэратора. Проектные расчеты деаэраторов ведутся с использованием недостаточно точных методик, что приводит к появлению технологических ошибок уже в начале жизненного цикла деаэрационных установок.

Таким образом, выяснение влияния на эффективность деаэрации режимных и конструктивных параметров деаэраторов струйно-барботажного типа атмосферного давления, разработка алгоритмов расчета реализуемых в струйных и барботажных элементах этих деаэраторов технологических процессов и совершенствование на их основе режимов работы таких деаэраторов являются актуальными задачами энергетики.

Цель диссертации состоит в повышении эффективности обескислороживания воды в термических деаэраторах струйно-барботажного типа атмосферного давления на основе совершенствования режимов их эксплуатации.

---

* При разработке методики экспериментальных исследований, их организации и проведении диссертанта консультировал кандидат технических наук, доцент кафедры ХХТЭ ИГЭУ В.Н. Виноградов

Здесь и далее под критерием повышения эффективности работы деаэратора или отдельных его элементов понимается уменьшение остаточной концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде C_2 при одном и том же значении концентрации кислорода в исходной воде C_1. Под эффектом десорбции кислорода (эффектом обескислороживания) понимается измеряемая в процентах величина $(C_1 - C_2)\cdot 100/C_1$.

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

– проведение в производственных условиях экспериментальных исследований работы деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м при использовании современных приборов теплотехнического и химического контроля с целью получения опытных данных, характеризующих работу отдельных элементов этих деаэраторов;

– разработка на основе полученных экспериментальных данных математических моделей процессов нагрева воды и десорбции из неё растворенного кислорода, реализуемых в отдельных струйных и барботажных элементах деаэраторов;

– проведение расчетных исследований работы деаэраторов типа ДСА и ДА при изменении параметров, характеризующих режим их эксплуатации, с выборочным проведением наблюдений для моделируемых условий с целью получения количественных характеристик влияния режимных и конструктивных параметров на эффективность деаэрации;

– разработка рекомендаций по совершенствованию работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные, характеризующие протекание процессов нагрева воды и десорбции из неё растворенного кислорода раздельно в струйных и барботажных элементах деаэраторов атмосферного давления типов ДСА и ДА.

2. Получены критериальные уравнения для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё растворенного кислорода в струйных отсеках деаэраторов атмосферного давления при струйно-капельном гидродинамическом режиме работы этих отсеков.

3. Выполнена идентификация выведенных ранее в общем виде критериальных уравнений С.С. Кутателадзе и В.А. Зысина для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода на непровальных барботажных листах в деаэраторах атмосферного типа при недогреве воды до температуры насыщения на входе в лист не более 8 ^{o}C.

4. Для затопленного барботажного устройства, представляющего собой одиночный перфорированный коллектор на дне деаэраторного бака, получены новые экспериментальные данные об эффективности обескислороживания воды при изменении удельного расхода пара на барботаж в широком диапазоне.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные, характеризующие эффективность работы струйных и барботажных элементов деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м, в том числе, барботажного устройства, представляющего собой одиночный перфорированный коллектор на дне деаэраторного бака.

2. Получены уточненные количественные характеристики влияния на эффективность обескислороживания воды в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления режимных параметров: температуры и расхода исходной воды, удельного расхода выпара, уровня воды в деаэраторном баке, удельного расхода пара на барботаж в деаэраторном баке, концентрации кислорода в исходной воде.

3. Показана возможность использования моделей технологических процессов деаэрации для расчета основных режимных характеристик деаэраторов в ходе их режимно-наладочных испытаний, а также для оперативного контроля технического состояния деаэраторов в ходе их эксплуатации.

4. Разработаны мероприятия по совершенствованию режимов работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления.

5. Обоснована целесообразность использования режимов работы деаэраторов, оборудованных барботажным устройством деаэраторного бака, при подаче в них только барботажного пара; описана технология применения таких режимов и приведены результаты их практического внедрения.

Достоверность полученных результатов обусловлена организацией экспериментальных исследований и обработкой их результатов с учетом требований отраслевых нормативных документов, государственных и международных стандартов в области метрологии, теплотехнического и химического контроля; проведением исследований в условиях промышленной эксплуатации методом активного эксперимента с выборочным дублированием опытов, сопоставлением полученных данных с результатами наблюдений других объектов и опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Автор защищает:

– методику и результаты экспериментальных исследований технологических процессов, реализуемых в струйных и барботажных элементах деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м;

– критериальные уравнения для расчета процессов нагрева воды и десорбции из нее кислорода в струйных отсеках деаэраторов атмосферного давления при струйно-капельном гидродинамическом режиме их работы;

– параметры идентификации критериальных уравнений С.С. Кутателадзе и В.А. Зысина для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода на непровальных барботажных листах в деаэраторах атмосферного типа при недогреве воды на входе в лист до температуры насыщения до 8 ^{o}C;

– характеристики эффективности обескислороживания воды в деаэраторном баке с затопленным барботажным устройством типа одиночного перфорированного коллектора на дне деаэраторного бака;

– результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния режимных параметров на эффективность десорбции из воды кислорода и разработанные на их основе рекомендации по совершенствованию режимов работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления.

Реализация результатов работы. Результаты работы (данные натурных испытаний деаэраторов, их режимные характеристики, алгоритмы и компьютерные программы по расчету деаэраторов) использованы в ходе режимно-наладочных испытаний деаэраторов ДСА-300 (4 шт.) и ДА-300м (2 шт.) участка химводоочистки теплосилового цеха, ДСА-200 (2 шт.) мартеновского цеха, ДА-100 (3 шт.) энерготехнологического участка стана «2800», ДСА-200 (4 шт.) энерготехнологического участка стана «2000», ДА-50 (2 шт.) машинного зала теплосилового цеха ОАО «Северсталь»; деаэратора ДСА-75 подпитки тепловой сети филиала ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС»; деаэратора ДСА-200 Ивановской ТЭЦ-1 ОАО «Ивановская генерирующая компания», а также переданы ОАО «Тепломонтажналадка», где используются при проектировании и наладке атмосферных деаэрационных установок. Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения. Результаты работы использованы в учебном процессе ИГЭУ при подготовке учебно-методического пособия «Выбор основного и вспомогательного оборудования ТЭС» и в читаемом диссертантом курсе лекций «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях».

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики, организации, проведении и обработке результатов экспериментальных исследований деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м; проведении расчетного анализа применимости существующих моделей тепломассообмена в отношении отдельных элементов струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления; получении критериальных уравнений для расчета процессов нагрева воды и десорбции кислорода в струйных отсеках атмосферных деаэраторов при струйно-капельном гидродинамическом режиме их работы; идентификации критериальных уравнений С.С. Кутателадзе и В.А. Зысина для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода на непровальных барботажных листах в деаэраторах атмосферного типа; проведении анализа показателей обескислороживания воды при изменении параметров работы деаэраторов типов ДСА и ДА; разработке рекомендаций по совершенствованию режимов работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 14-и конференциях, в том числе девяти международных: Международной научной конференции «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные производства» (Иваново, 2004 г.); Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» XII, XIII и XIV Бенардосовские чтения (Иваново, 2005, 2006 и 2007 г.); XI и XII Международных научно–технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энер-

гетика» (Москва, 2005 и 2006 г.); XVIII и XX Международных конференциях «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-18, ММТТ-20» (Казань, 2005; Ярославль, 2007); III Молодежной международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2008); V Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2006 г.); IV Межрегиональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика», (Смоленск, 2007); Региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» (Иваново, 2006, 2007 и 2008).

Список публикаций. Основные положения диссертации опубликованы в 28 работах, в том числе в 7 статьях по списку ВАК, 14 полных текстах докладов, 6 тезисах докладов, а также одном учебно-методическом пособии.

Содержание и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 142 наименований и трех приложений. Диссертация включает 48 рисунков, 13 таблиц (в основном тексте диссертации). Общий объем работы составляет 226 стр. машинописного текста, в том числе 35 стр. – приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу опубликованных результатов исследований процессов десорбции кислорода из воды в термических струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления. Наиболее значимые из них получены специалистами МЭИ, НПО ЦКТИ, ВТИ, лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ и других научных и производственных организаций – С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанским, И.И. Оликером, В.А. Пермяковым, В.И. Шараповым, В.А. Зысиным, А.А. Захаровым, Р.Г. Черной, М.П. Белоусовым, И.К. Гришуком, В.С. Галустовым и другими исследователями. В последнее время работы по исследованию и моделированию процессов деаэрации ведутся в ИГЭУ (В.П. Жуков, Е.В. Барочкин. В.Н. Виноградов, И.А. Шатова).

Изложены физико-химические основы деаэрации, указаны проблемы математического описания статики и кинетики рассматриваемых процессов. Показаны, в частности, различия в приводимых авторами значениях коэффициентов Генри, обоснована необходимость учета поправки к значению коэффициента Генри на присутствие в воде примесей (расчетная оценка для Na-катионированной воды, полученной из воды р. Шексна в районе г. Череповец показала, что эта поправка составляет более 5 %). Описаны основные положения существующих моделей массообмена: пленочной модели, пенетрационных моделей Хигби, Данквертса, Кишеневского. Показано, что для

использования этих моделей необходимо знание значений коэффициента молекулярной диффузии кислорода в воде. Поскольку опубликованные значения этого коэффициента ограничены диапазоном температур до 30 ^{o}C, выполнен анализ уравнений для его экстраполяции в область рабочих температур атмосферной термической деаэрации. Выявлено, что наиболее адекватной из рассмотренных формул (формулы Отмера и Тейкара, Шейбеля, Арнольда и др.), исходя из имеющихся экспериментальных данных, является формула Шейбеля.

Выполнен анализ различных конструктивных вариантов струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления. Показано, что в целом можно выделить несколько элементов, по конструкции аналогичных для всех деаэраторов рассматриваемого типа: струйные отсеки; барботажные листы; барботажные колодцы деаэрационной колонки, оборудованные перфорированным коллектором; барботажные устройства деаэраторного бака системы ЦКТИ; барботажные устройства деаэраторного бака в виде одиночного перфорированного коллектора, уложенного на дне бака вдоль его образующих.

Рассмотрены существующие модели и методы расчета технологических процессов, реализуемых в струйных и барботажных элементах деаэраторов. По результатам сравнительных расчетов выявлено, что альтернативные зависимости, в частности, для струйных отсеков приводят в одних и тех же условиях к существенно различающимся результатам – значениям температуры воды и концентрации кислорода в ней на выходе струйного отсека. Показано, что отсутствуют экспериментально обоснованные уравнения, описывающие протекание технологических процессов в условиях струйно-капельного гидродинамического режима работы струйных отсеков.

На основании поставленной цели и проведенного анализа опубликованных данных сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе описана методика и приведены результаты экспериментальных исследований технологических процессов, реализуемых в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления. Объектами исследования являлись деаэраторы типовых конструкций ДСА-300 и ДА-300м, входящие в состав центральной водоподготовительной установки ОАО «Северсталь» (см. рис. 1). Деаэраторы оборудованы устройствами для отбора проб воды и пара, включая пробы воды с промежуточных элементов. Места установки пробоотборных устройств указаны на рис. 1. При изготовлении и монтаже пробоотбрных устройств и вспомогательного оборудования учтены требования отраслевых нормативных документов и государственных стандартов в области теплотехнического и химического контроля.

Перечень измеряемых теплотехнических параметров включал расходы, температуры и давления теплоносителей на входе и выходе ряда элементов деаэраторов, уровень воды в деаэраторных баках, а также атмосферное давление.

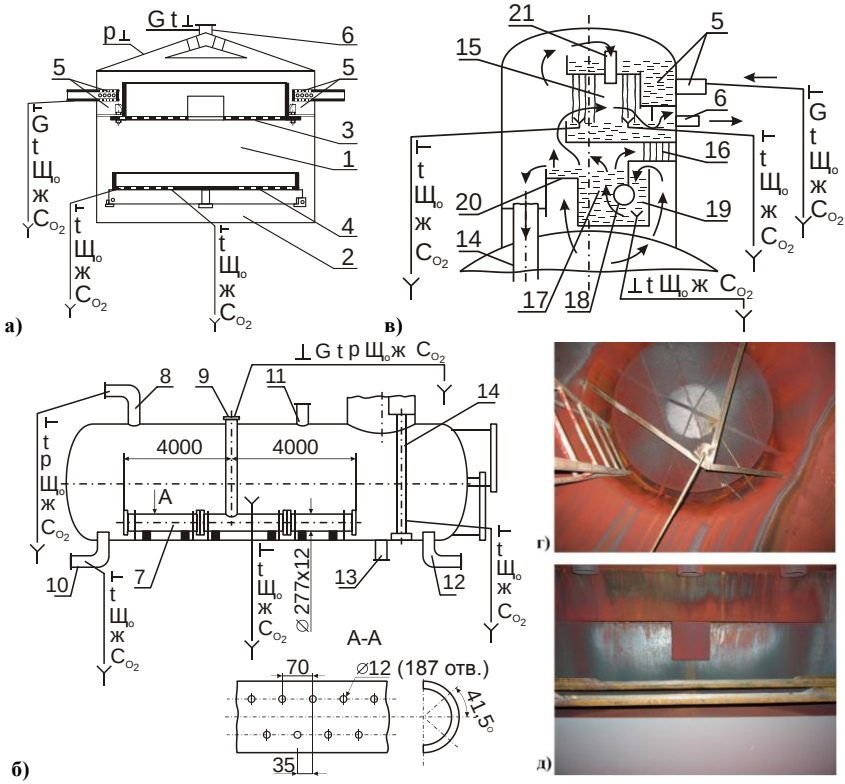

Рис. 1 **Конструктивные схемы объектов экспериментальных исследований:** а – деаэрационная колонка ДСА-300; б – бак деаэратора ДА-300м; в – деаэрационная колонка ДА-300м; г – вид пробоотборных устройств деаэрационной колонки ДСА-300 после монтажа; д – вид пробоотборных устройств деаэрационной колонки ДА-300м после монтажа; 1 и 15 – верхний струйный отсек; 2 и 16 – нижний струйный отсек; 3 – верхняя струеобразующая тарелка; 4 – нижняя струеобразующая тарелка; 5 – система водораспределения; 6 – штуцер отвода выпара; 7 – барботажный коллектор деаэраторного бака; 8 и 9 – штуцеры ввода соответственно основного и барботажного пара; 10 – штуцер отвода деаэрированной воды; 11 и 12 – штуцеры подключения деаэратора соответственно к паровому и водяному уравнительным трубопроводам; 13 – дренажный штуцер; 14 - опускные трубы деаэрационной колонки ДА-300м; 17 – барботажный колодец; 18 – барботажный коллектор деаэрационной колонки; 19 – гидрозатвор пароперепускного устройства; 20 – барботажный лист; 21 – пароперепускные трубы; Y – отбор пробы воды для лабораторного контроля; ⊥ – точка контроля теплотехнических и химических параметров: G – расхода (объемного, массового), t – температуры, p – давления, $Щ_о$ – щелочности общей, æ – удельной электропроводности, C_{O_2} – концентрации растворенного кислорода

Для деаэратора ДА-300м, оборудованного охладителем выпара типа ОВА-24, измерялись также температуры охлаждающей воды на входе и выходе охладителя и расход конденсата выпара (для деаэратора ДСА-300 измерялся непосредственно расход выпара с использованием ультразвукового расходомера насыщенного пара).

Выполнены химические анализы качества воды и пара с определением массовых концентраций растворенного кислорода, удельной электропроводности, щелочности общей. Последние использованы для контроля представительности отбора проб (для уверенности в отсутствии подсоса парогазовой смеси из парового пространства деаэратора в пробу воды). Удельная электропроводность пара (конденсата пара) в сотни раз меньше удельной электропроводности воды в любой точке деаэратора, что позволяет оперативно фиксировать попадание даже незначительных количеств пара в пробу воды. Значения щелочности общей воды использованы для анализа представительности отбора пробы уже при обработке результатов эксперимента, поскольку её величина определяется разбавлением воды по ходу её нагрева конденсатом пара, щелочность которого пренебрежимо мала. Точки контроля каждого из параметров указаны на рис. 1. Использовались современные высокоточные, в том числе, образцовые приборы теплотехнического и химического контроля, поверенные перед началом исследований.

Работа включала проведение предварительных, основных и контрольных опытов. Предварительные опыты проводились по методу пассивного эксперимента, их цель – проверка работоспособности приборов контроля и пробоотборных линий. Условия основных опытов охватывают широкие диапазоны изменения регулируемых параметров: температуры воды на входе в деаэратор, объемного расхода этой воды, избыточного давления в верхней части деаэрационной колонки, уровня воды в деаэраторном баке, расхода барботажного пара. Контрольные (дублирующие) опыты проводились в количестве от одного до трех при испытаниях каждого деаэратора и имели целью оценить воспроизводимость получаемых результатов.

Длительность каждого опыта составляла не менее 1,5 ч. Продолжительность опыта увеличена на 1 ч при каждой регулировке выпара. Время выдержки после достижения требуемых условий опыта перед началом измерений превышало в три раза расчетное время обмена воды в деаэраторном баке. Для обеспечения представительности результатов в ходе опытов достигалась высокая степень стабилизации параметров воды и пара. Каждый теплотехнический параметр в рамках одного опыта измерялся не менее 9 раз, каждый химический параметр – не менее 3 раз. Всего на деаэраторе ДСА-300 проведено 13 опытов (6 опытов – при работе деаэратора только на основном паре и 7 опытов при подаче в деаэратор и основного и барботажного пара), деаэраторе ДА-300м – 18 опытов (из них 4 опыта – на основном паре и 14 опытов – на основном и барботажном паре).

Результаты измерений контролируемых в ходе экспериментальных исследований параметров обработаны в соответствии с требованиями нормативных документов, государственных и международных стандартов в области метрологии, теплотехнического и химического контроля, в том числе, государственного стандарта ГОСТ Р ИСО 5725-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» (в шести частях).

Составлен алгоритм обработки, предусматривающий выполнение следующих операций:

1) идентификацию и отсев выбросов. Использовано тестирование выборок по критерию Кохрена с исключением на первом этапе выбросов и квазивыбросов, а при повторном тестировании – только выбросов;

2) оценку правильности результатов измерений и исключение известных систематических погрешностей;

3) проверку гипотезы о принадлежности результатов измерений нормальному распределению. Стандартизированные методики могут применяться только в том случае, если заранее известно, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению. С целью проверки этой гипотезы проведен специальный опыт, в ходе которого каждый из используемых методов измерения параметров применялся не менее 20 раз на идентичных образцах (в условиях повторяемости). Использована стандартизированная методика обработки результатов этого опыта с расчетом составного d-m-критерия. Выявлено, что результаты измерений всех контролируемых в ходе испытаний параметров принадлежат нормальному распределению;

4) проверку приемлемости и установление окончательных результатов измерений. Процедура основана на сопоставлении максимальной разности из массива результатов измерения параметра в опыте с некоторым критическим диапазоном. Критический диапазон должен рассчитываться с использованием значения стандартного отклонения повторяемости для соответствующего метода измерения, которое для большинства методов измерений не известно. В таких случаях вычислены оценки стандартных отклонений повторяемости. При этом полагалось, что эти оценки относятся только к условиям проведенных опытов и не рассматриваются как показатели прецизионности методов измерений. Прецизионность результатов измерений некоторого параметра в каждом отдельном опыте должна быть сопоставима с прецизионностью его измерений во всем комплексе опытов. Это условие принято для дополнительной проверки всего комплекса опытов на сходность условий их проведения, для чего выполнено тестирование массива полученных значений оценок стандартных отклонений повторяемости измерений параметра в каждом опыте на наличие выбросов с целью исключения данных, обладающих худшей прецизионностью. При этом в расчете критического диапазона использованы средние для каждого параметра по всем опытам значения оценки стандартного отклонения повторяемости;

5) вычисление оценок стандартных отклонений результатов измерений и окончательных результатов измерений;

6) определение доверительных границ погрешности окончательных результатов измерений. Эти границы определялись путем построения композиции распределений случайных и неисключенных систематических составляющих погрешностей. Доверительные границы случайной составляющей погрешности окончательных результатов измерений определялись через значение коэффициента Стьюдента. В качестве доверительных границ неисклю-

ченной систематической составляющей погрешности приняты известные пределы основных и дополнительных погрешностей средств измерений.

7) оценку прецизионности результатов измерений теплотехнических параметров. Для этого необходима организация сбалансированного эксперимента с однородными условиями, что является весьма сложной задачей и требует вовлечения целого ряда лабораторий. В данном случае определены промежуточные показателей прецизионности, назначение которых состоит в оценке способности метода измерений к повторению результатов измерений в точно определенных условиях. В частности, рассчитаны стандартные отклонения промежуточной прецизионности при изменении интервалов времени между измерениями и смене операторов, выполняющих измерения;

8) оценку точности, правильности и прецизионности результатов измерений химических параметров. Использованы известные показатели качества методик количественного химического анализа, а именно приписанная характеристика погрешности методики анализа.

В третьей главе выполнен анализ существующих методик расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода в струйных и барботажных элементах деаэраторов, а также разработан ряд математических моделей этих процессов.

Предварительно выполнены расчеты, целью которых являлось получение достаточной для дальнейшего анализа информации о параметрах теплоносителей на входе и выходе каждого из элементов деаэраторов, поскольку в ходе экспериментальных исследований получены значения лишь части этих параметров. Для этого составлены расчетные схемы деаэраторов с выделением отдельных их элементов и указанием связей между ними по потокам воды и пара (пример такой схемы для деаэратора ДА-300м представлен на рис. 2). Основу математического аппарата на данном этапе работы составляли системы уравнений материального и теплового баланса отдельных элементов (выделенных на расчетных схемах) и их комплексов.

Расчеты выполнены при следующих допущениях:

– температура исходной воды от точки её контроля до объема воды на верхней струеобразующей тарелке не изменяется;

– температура воды во всех точках струеобразующей тарелки деаэратора одинакова;

– массовый расход парогазовой сдувки из охладителя выпара деаэратора ДА-300м пренебрежимо мал;

– объем воды в деаэраторном баке рассматривается как единое целое без выделения барботажных зон и зон без барботажа;

– расход пара через нижний струйный отсек деаэратора ДА-300м равен расходу, необходимому для данного нагрева воды в этом отсеке (отсек является не проточным по пару);

– уровень воды во всех зонах струеобразующей тарелки одинаков, расход воды через каждую зону пропорционален числу отверстий данной зоны;

– расчет теплотехнических параметров и расходов потоков воды и пара выполнен в предположении, что концентрации газов и прочих примесей в теплоносителях малы и не оказывают заметного влияния на значения теплофизических свойств теплоносителей.

Экспериментальная информация по деаэратору ДСА-300 позволила определить потери давления потока пара при прохождении его через один ряд струй. Эта величина составила 25,5 ± 3,7 Па и использована при выполнении расчетов по деаэратору ДА-300м.

Для реализации расчетов в среде «Borland Delphi 7» разработаны соответствующие программные комплексы. Результатами выполненных расчетов являются для каждого из опытов массовые расходы, а также необходимые теплофизические характеристики потоков теплоносителей на входе и выходе элементов исследуемых деаэраторов.

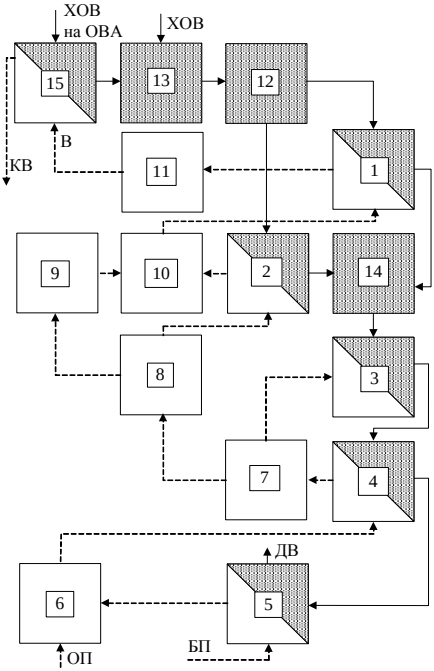

Рис. 2 **Расчетная схема деаэратора ДА-300м:** 1 и 2 – соответственно первая и вторая по ходу движения воды зоны верхнего струйного отсека; 3 – нижний струйный отсек; 4 – барботажный лист; 5 – объем воды в деаэраторном баке; 6 – надводное пространство деаэраторного бака; 7, 8 – элементы разделения парового потока; 9, 11 – элементы потерь давления пара; 10 – элемент смешения паровых потоков; 12 – элемент разделения потоков воды; 13, 14 – элементы смешения потоков воды; 15 – охладитель выпара деаэратора; ХОВ – основной поток химочищенной воды, подаваемой в деаэратор; ХОВ на ОВА – поток воды на охладитель выпара деаэратора; В – выпар деаэратора; КВ – конденсат выпара деаэратора за охладителем выпара; ОП и БП – потоки основного и барботажного пара, подаваемого в деаэратор; ДВ – отвод деаэрированной воды; сплошные линии – направление движения потоков воды; пунктирные линии – направление движения потоков пара

Полученные данные позволили выполнить анализ применимости существующих моделей струйных отсеков деаэраторов. Рассмотрены модели процесса нагрева воды (критериальное уравнение ЦКТИ для струйных отсеков регенеративных подогревателей турбоустановок; модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; модель М.П. Белоусова), а также модели десорбции из воды растворенного кислорода (модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; модель ЦКТИ; модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; критериальное уравнение ЦКТИ). Результаты представлены на рис. 3 и 4.

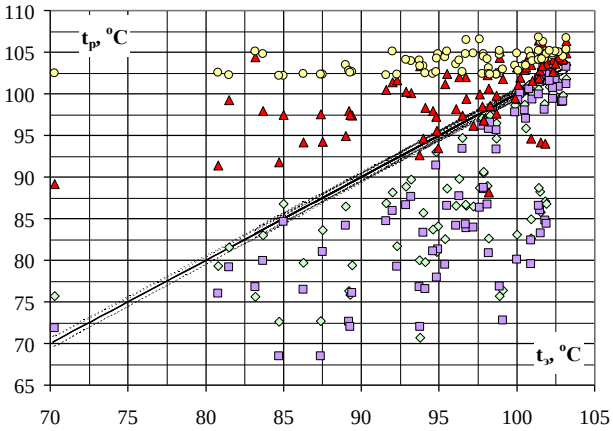

Рис. 3 **Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета температуры воды на выходе струйных отсеков деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м:** $t_э$ и t_p – соответственно экспериментальные и расчетные значения температур воды на выходе струйного отсека; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений температуры воды на выходе струйного отсека; пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % - го доверительного интервала погрешности измерения; ○ – критериальное уравнение ЦКТИ для регенеративных подогревателей турбоустановок; ◊ - модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; □ – модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; Δ – модель М.П. Белоусова. *Примечание*: при выполнении расчетов не учтены заявленные авторами ограничения применимости разработанных ими моделей

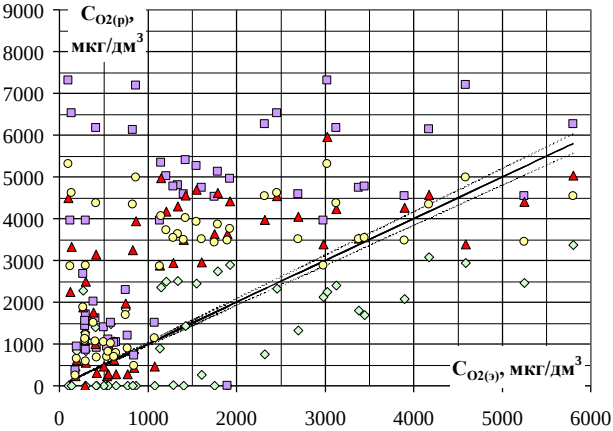

Рис. 4 **Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета остаточной концентрации растворенного в воде кислорода на выходе струйных отсеков деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м:** $C_{O2(э)}$ и $C_{O2(p)}$ – соответственно экспериментальные и расчетные значения остаточной концентрации кислорода в воде на выходе струйного отсека; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений концентрации кислорода в воде на выходе струйного отсека; пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % - го доверительного интервала погрешности измерения;○ – модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; ◊ – модель ЦКТИ; □ – модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; Δ – критериальное уравнение ЦКТИ. *Примечание*: при выполнении расчетов не учтены заявленные авторами ограничения применимости разработанных ими моделей

Из рассмотрения исключены опыты, в которых расчетным путем определен перелив воды через борт струеобразующих тарелок. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное по остаточной дисперсии в целом по всем опытам, для известных моделей теплообмена составило: 10,0 ^{o}C (критериальное уравнения ЦКТИ для регенеративных подогревателей турбоустановок); 9,5 ^{o}C (модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной); 11,3 ^{o}C (модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского); 7,1 ^{o}C (модель М.П. Белоусова). Для моделей десорбции кислорода из воды получены следующие значения среднеквадратического отклонения: 1844 мкг/дм^3 (критериальное уравнения ЦКТИ); 2999 мкг/дм^3 (модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной); 1952 мкг/дм^3 (модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского); 1163 мкг/дм^3 (модель ЦКТИ). Таким образом, ни одна из существующих моделей не дает приемлемых результатов.

Анализ полученных данных показал, что причиной расхождений является отличие гидродинамического режима работы струйных отсеков современных деаэраторов от объектов исследований авторов рассмотренных моделей. Уменьшение габаритов деаэрационных колонок и использование барботажных устройств привело к уменьшению числа струйных отсеков и шага между отверстиями в тарелках, что увеличило тепловую нагрузку каждого струйного отсека и средние скорости пара в них. В таких условиях организовать чисто струйный режим течения воды по всей высоте отсека практически не возможно, особенно при относительно больших гидравлических нагрузках.

Гипотеза об отсутствии чисто струйных режимов течения воды в струйных отсеках современных деаэраторов (по всей высоте отсека) подтверждается экспериментальными данными других авторов, например, результатами исследований ВТИ и ЦКТИ при скоростях пара в струйных отсеках более 5 м/с. Наши расчеты показали, что для исследуемой деаэрационной колонки ДСА-300 при температуре исходной воды 70 ^{o}C в диапазоне гидравлических нагрузок от 60 до 360 м^3/ч средняя скорость пара в верхнем отсеке варьируется в пределах от 2 до 18 м/с, а в нижнем отсеке – от 16 до 35 м/с. Таким образом, в большинстве режимов работы должен наблюдаться струйно-капельный гидродинамический режим течения воды. В доказательство выдвинутой гипотезы проведены визуальные наблюдения картины струеобразования в деаэраторе ДА-300м (см. рис. 5). Наблюдения предусматривали фото- и видеосъемку струйного пучка через открытый смотровой лючок деаэрационной колонки и измерение расхода направляемой в неё воды. При этом подача пара не осуществлялась, а исходная вода имела температуру менее 45 ^{o}C для исключения запаривания межструйного пространства колонки.

Рис. 5 **Пример фотоснимка картины струеобразования в верхнем отсеке деаэрационной колонки ДА-300м при расходе воды 170 м^3/ч**

Анализ полученных данных и специальные расчеты показали, что чисто струйный режим течения воды в отсеках деаэрационной колонки во всем диапазоне исследованных гидравлических нагрузок имеет место лишь в пределах зоны относительно небольшой высоты непосредственно под струеобразующей тарелкой. Ниже этой зоны режим течения характеризуется образованием крупных капель в результате свободного распада струй.

По результатам исследований предложены критериальные уравнения для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода в струйных отсеках деаэраторов при струйно-капельном гидродинамическом режиме их работы (для случаев, когда высота L чисто струйного режима течения воды не превосходит 28 % от общей высоты H струйного отсека):

$$\lg\left(\frac{t_н - t_1}{t_н - t_2}\right) = 0{,}0137\left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}982} Lap^{0{,}163} Fr^{-0{,}054}\, Pr^{-0{,}832}\, K^{-0{,}290}\ ; \qquad (1)$$

$$\lg\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = 0{,}8910\left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}964} Lap^{0{,}264} Sc^{-1} K^{-0{,}882}\ ; \qquad (2)$$

$$Lap = \frac{\rho_ж W_п^2 d}{\sigma_ж}\ ;\ Fr = \frac{W_ж^2}{gd}\ ;\ Pr = \frac{\nu_ж}{a_ж}\ ;\ K = \frac{r}{c_ж(t_2 - t_1)}\ ;\ Sc = \frac{\nu_ж}{D_ж}\ ; \qquad (3)$$

$$W_п = \frac{W_п^{вх} - W_п^{вых}}{2{,}3\lg\dfrac{W_п^{вх}}{W_п^{вых}}} \quad \text{при } W_п^{вх}/W_п^{вых} \geq 1{,}7; \qquad (4)$$

$$W_п = \frac{W_п^{вх} + W_п^{вых}}{2} \quad \text{при } W_п^{вх}/W_п^{вых} < 1{,}7; \qquad (5)$$

$$W_п^{вх} = \frac{D_п^{вх}\upsilon_п^{вх}}{\Omega_{вх}}\ ;\ W_п^{вых} = \frac{D_п^{вых}\upsilon_п^{вых}}{\Omega_{вых}}\ ;\ W_ж = \frac{4G_ж^{вх}}{\pi d^2 n \rho_ж^{вх}}\ ;\ L = 3W_ж\sqrt{\frac{\rho_ж^{вх} d^3}{\sigma_ж}}\ , \qquad (6)$$

где t_1 и t_2, ^oC – температуры воды соответственно на входе и выходе струйного отсека; $t_н$, ^oC – температура насыщения пара в отсеке; C_1 и C_2, мкг/дм^3 – концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на входе и выходе струйного отсека (проба при 25 ^oC); Lap, Fr, Pr, K и Sc – критерии соответственно Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта; H, м – высота отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки; d, м – диаметр отверстий струеобразующей тарелки; $\rho_ж$, кг/м^3 – средняя плотность воды; $W_п$, м/с – средняя скорость парового потока в отсеке; $\sigma_ж$, Н/м – средний коэффициент поверхностного натяжения воды; $W_ж$, м/с – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки; g, м/с^2 – ускорение свободного падения; $\nu_ж$, м^2/с - коэффициент кинематической вязкости воды; $a_ж$, м^2/с - коэффициент температуропроводности воды; r, кДж/кг – скрытая теплота парообразования; $c_ж$, кДж/(кг·^{o}C) – истинная изобарная теплоемкость воды; $D_ж$, м^2/с – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде; $G_ж^{вх}$, кг/с – массовый расход воды на входе в отсек; n, шт. – число отверстий струеобразующей тарел-

ки; $W_п^{вх}$ и $W_п^{вых}$, м/с – скорости парового потока соответственно во входном и выходном сечениях отсека; $\upsilon_п^{вх}$ и $\upsilon_п^{вых}$, м^3/кг – удельные объемы пара соответственно во входном и выходном сечениях отсека; $\Omega_{вх}$ и $\Omega_{вых}$, м^2 – площади проходного сечения соответственно на входе и выходе пара из отсека, рассчитанные через высоту отсека H, за вычетом площади, занимаемой условными струями воды постоянного по высоте диаметра d; L, м – средняя высота зоны чисто струйного режима течения воды в отсеке.

В качестве определяющих параметров для расчета теплофизических характеристик жидкости $\rho_ж$, $\sigma_ж$, $\nu_ж$, $a_ж$, $c_ж$, r и $D_ж$ использованы среднее давление пара в отсеке $p_{ср}$ и средняя температура воды в струйном отсеке $t_{ж,ср}$.

Среднеквадратическое отклонение, характеризующее точность уравнений (1) и (2) (см. рис. 6), составило: для модели теплообмена по расчетной температуре воды на выходе отсека ± 1,55 ^oC; для модели десорбции кислорода по расчетной концентрации кислорода на выходе отсека ± 181 мкг/дм^3.

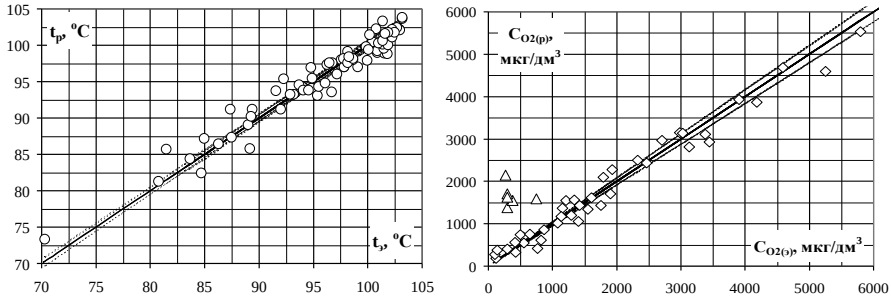

Рис. 6 **Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета температуры воды (слева) и концентрации растворенного в ней кислорода (справа) на выходе струйных отсеков деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м:** ○ – разработанное критериальное уравнение (все струйные отсеки); ◊ – разработанное критериальное уравнение (все струйные отсеки, кроме нижнего струйного отсека деаэратора ДА-300м); Δ – разработанное критериальное уравнение (нижний струйный отсек деаэратора ДА-300м); прочие обозначения приведены на рис. 3 и 4

Границы применимости моделей: максимальная длина сплошной части струй – не более 28 % от общей высоты струйного отсека; диаметр отверстий струеобразующей тарелки от 0,006 до 0,01 м; высота струйного отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки от 0,3 до 0,95 м; среднее абсолютное давление пара в отсеке от 109 до 137 кПа; средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки от 0,2 до 3,0 м/с; средняя скорость пара в отсеке от 0,8 до 48,2 м/с.

Полученное уравнение для расчета десорбции из воды кислорода адекватно описывает процесс десорбции кислорода из воды во всех исследованных струйных отсеках, кроме нижнего струйного отсека деаэратора ДА-300м. Причина этого заключается в особенностях конструктивного исполнения этого отсека – на его выходе нет водоприемного элемента, то есть вода падает непосредственно на металлическую полку. Такое падение воды вызывает

её сильное разбрызгивание, в результате чего процесс десорбции кислорода идет интенсивнее, чем прогнозируется разработанным уравнением.

Найденные значения параметров идентификации моделей сопоставлены с их значениями в моделях других авторов, в результате чего уточнены условия протекания процессов в струйных отсеках деаэраторов.

Экспериментальные данные позволили также выполнить идентификацию выведенных ранее С.С. Кутателадзе и В.А. Зысиным в общем виде моделей нагрева воды и десорбции из неё кислорода на непровальном барботажном листе. Полученная модель записана в виде:

$$\ln\left(\frac{t_н - t_1}{t_н - t_2}\right) = 0{,}975\left(\frac{\rho_п}{\rho_ж}\right)^{-0{,}315}\frac{1}{Fr_б}; \qquad \frac{C_2}{C_1} = 0{,}465\left(\frac{\rho_п}{\rho_ж}\right)^{-0{,}324}\frac{1}{Fr_б}; \tag{7}$$

$$Fr_б = \frac{G_п}{\rho_п F_б \sqrt{gh_0}}; \qquad h_0 = \frac{1}{2g}\left(\frac{4G_в \upsilon_ж}{\pi d^2 n \mu}\right)^2, \tag{8}$$

где $\rho_п$ и $\rho_ж$, кг/м^3 – плотности соответственно пара и воды; t_1, t_2 и $t_н$ – температуры соответственно воды на входе и выходе барботажного листа и насыщения при давлении пара под листом; C_2 и C_1 – концентрации растворенного кислорода соответственно на выходе и входе барботажного листа; $Fr_б$ – критерий Фруда для барботажного листа; $G_п$ – массовый расход пара на входе в барботажный лист, $F_б$ – полное сечение барботажного устройства, то есть площадь перфорированной части листа без вычета площадь отверстий; h_0 – уровень воды на листе, который установился бы при отсутствии пропуска пара; g, м/с^2 – ускорение свободного падения; $G_в$, кг/с − расход деаэрируемой воды на входе в лист, $\upsilon_ж$, м^3/кг − удельный объем воды, d, м − диаметр отверстий в листе, n, шт. − число отверстий в листе, μ − коэффициент расхода (при диаметре отверстий от 5 до 8 мм и ее толщине от 4 до 6 мм может приниматься равным 0,75).

Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное по остаточной дисперсии, для модели теплообмена составило 0,54 ^{o}C, для модели десорбции кислорода – 38 мкг/дм^3 (см. рис. 7). Адекватность всех разработанных моделей оценена по критерию Фишера.

Впервые получены экспериментальные данные, характеризующие эффективность работы затопленного барботажного устройства деаэраторного бака, представляющего собой одиночный перфорированный коллектор, уложенный на дне бака вдоль его образующих.

Выявлено следующее:

– эффект десорбции кислорода зависит от длины данного устройства и может устойчиво поддерживаться на уровне не менее 98 %;

– минимально необходимое для обескислороживания воды значение удельного расхода пара на барботаж для рассматриваемого устройства составляет 15 кг пара на 1 тонну воды;

– при значениях удельного расхода пара на барботаж более 15 кг/т эффект десорбции кислорода в баке-аккумуляторе практически не зависит от прочих теплогидравлических параметров работы деаэратора;

– при недогреве воды на входе в бак до температуры насыщения более 25 ^{o}C происходят гидроудары в деаэраторном баке.

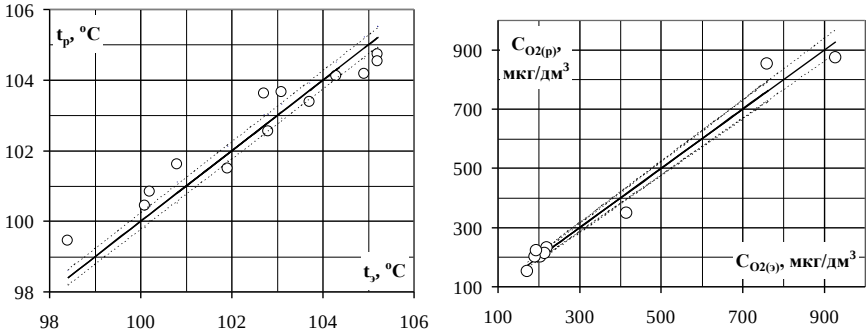

Рис. 7 **Сопоставление экспериментальных данных о температуре воды (слева) и концентрации кислорода в ней (справа) на выходе барботажного листа деаэрационной колонки ДА-300м с результатами идентификации модели С.С. Кутателадзе и В.А. Зысина:** $t_э$ и t_p – соответственно экспериментальные и расчетные значения температур воды на выходе барботажного листа; $C_{O2(э)}$ и $C_{O2(p)}$ – соответственно экспериментальные и расчетные значения остаточных концентраций кислорода в воде на выходе барботажного листа; сплошные линии – совпадение экспериментальных и расчетных значений температуры воды (слева) и концентрации кислорода в ней (справа) на выходе барботажного листа; пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % - го доверительного интервала погрешности измерения; ○ – критериальное уравнение С.С. Кутателадзе, В.А. Зысина (параметры идентификации определены по опытным данным)

В четвертой главе с использованием разработанных моделей и моделей других авторов проведены вариантные расчеты с целью выявления влияния режимных параметров на эффективность обескислороживания воды в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления. Результаты расчетов сопоставлены с данными других авторов и результатами экспериментальных исследований деаэраторов на других объектах (в частности, деаэратора ДСА-75 подпитки теплосети филиала ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС»). Рассмотрено влияние следующих параметров работы деаэраторов: температуры исходной воды; гидравлической нагрузки; удельного расхода выпара; уровня воды в деаэраторном баке; удельного расхода пара на барботаж в водяном объеме деаэраторного бака; массовой концентрации кислорода в исходной воде. Получены следующие основные результаты:

1) уровень воды в деаэраторном баке, оборудованном затопленным барботажным устройством, практически не влияет на эффективность дегазации воды по кислороду. Для баков, не оборудованных такими устройствами, напротив, увеличение уровня воды в баке приводит к заметному уменьшению эффективности обескислороживания воды; при этом на основании имеющих-

ся экспериментальных данных показано, что эта зависимость может быть признана линейной;

2) совместное влияние температуры исходной воды и гидравлической нагрузки неодинаково для деаэраторов различных конструкций. Для деаэраторов с чисто струйными колонками меньшие значения остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воды обеспечиваются при уменьшенных температурах исходной воды и относительно больших гидравлических нагрузках либо при увеличенных температурах этой воды и относительно малых гидравлических нагрузках. Для деаэраторов, колонки которых оборудованы барботажными листами, получена однозначная зависимость: с увеличением температуры исходной воды степень обескислороживания уменьшается, причем её зависимость от гидравлической нагрузки в регулировочном диапазоне нагрузок деаэратора незначительна;

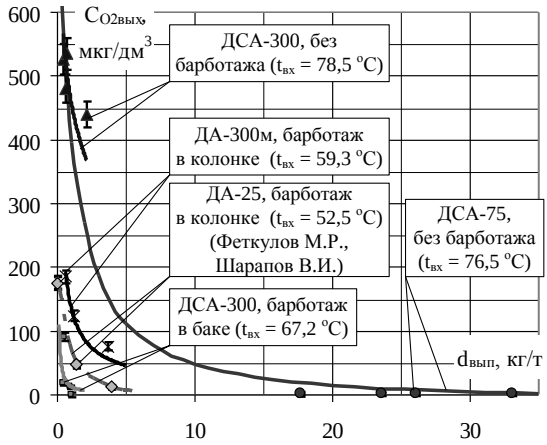

Рис. 8 **Сопоставление расчетных и экспериментальных значений остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде деаэраторов различных конструкций в зависимости от удельного расхода выпара:** $d_{вып}$, кг/т – удельный расход выпара деаэратора; $C_{O2вых}$, мкг/дм^3 – концентрация растворенного кислорода в воде на выходе деаэратора; линии – расчет с использованием разработанных моделей и моделей других авторов; точки – экспериментальные данные

3) деаэраторы с числом струйных отсеков менее трех, не оборудованные барботажными устройствами, обеспечивают получение деаэрированной воды с нормативным содержанием растворенного кислорода при удельных расходах выпара от 10 кг/т деаэрированной воды и более. При использовании барботажных устройств в деаэрационных колонках и (или) деаэраторных баках деаэраторов требуемое для нормативного обескислороживания воды значение удельного расхода выпара существенно уменьшается и может составлять менее 1 кг/т деаэрированной воды (см. рис. 8);

4) в диапазоне концентраций, имевших место при проведении экспериментальных исследований, концентрация кислорода в исходной воде не оказывает заметного влияния на эффект десорбции кислорода (с увеличением этой концентрации остаточная концентрация кислорода при прочих равных условиях возрастает линейно).

На примере центральной деаэрационно-питательной установки теплосилового цеха ОАО «Северсталь» оценено влияние эксплуатационных колебаний режимных параметров во времени на эффективность работы деаэрато-

ров. Выявлено, что такие колебания уменьшают эффект обескислороживания воды в сравнении со стационарным режимом работы деаэраторов: фактическая концентрация кислорода в деаэрированной воде даже при малых колебаниях уровня воды в деаэраторном баке и давления пара в колонке практически во всех случаях превышает значения, рассчитанные по моделям для стационарных режимов работы. Причина этого, по-видимому, заключается в следующем: любые колебательные изменения теплогидравлических параметров работы деаэратора (в особенности, расхода выпара и давления пара) приводят к тому, струйные отсеки работают в условиях постоянного несоответствия расходов и параметров теплоносителей их оптимальным значениям. Можно ожидать, к примеру, что колебания давления пара в верхней части деаэрационной колонки вызывают непрерывные изменения его расхода через струйные отсеки; соответственно изменяются и скорости пара в струйных пучках. В свою очередь пульсирующее динамическое воздействие потока пара на поток воды оказывает негативное воздействие на развитие площади поверхности контакта фаз, в результате эффективность деаэрации ухудшается. Показано, что использование барботажного устройства деаэраторного бака в значительной степени уменьшает амплитуду колебаний концентрации кислорода в деаэрированной воде.

Предложено использование режимов работы деаэраторов, оборудованных барботажным устройством деаэраторного бака, с подачей в них только барботажного пара (см. рис. 9). Такие режимы позволяют обеспечить максимальный эффект десорбции кислорода при повышенных температурах исходной воды, когда при совместной подаче в деаэратор основного и барботажного пара не удается достичь минимально необходимого значения удельного расхода пара на барботаж в деаэраторном баке. Особое значение предложенный режим имеет для деаэраторов подпитки тепловой сети, использующих в качестве греющего пар котлов, работающих на обессоленной воде: если обеспечить увеличенный нагрев исходной воды перед деаэратором в пароводя-

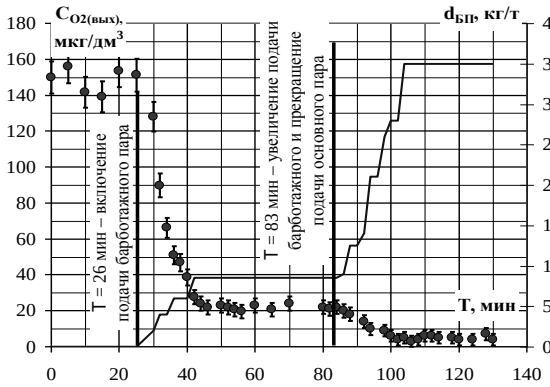

Рис. 9 **Экспериментальные данные для деаэратора ДА-300м при переводе его в режим работы с подачей только барботажного пара в барботажное устройство деаэраторного бака (расход исходной воды 217,8 м^3/ч, температура исходной воды 83,5 ºС, избыточное давление пара в верхней части колонки 11,4 кПа, удельный расход выпара средний 0,86 кг/т, концентрация кислорода в исходной воде 5518 мкг/дм^3):** $C_{O2(вых)}$, мкг/дм^3 – концентрация кислорода в воде на выходе деаэратора; $d_{БП}$, кг/т – удельный расход пара на барботаж в деаэраторном баке; T, мин – время

ных подогревателях, то ценный конденсат пара будет сохранен в цикле электростанции. В деаэраторе при этом достаточно вести минимальный нагрев воды, обеспечивающий получение деаэрированной воды нормативного качества при подаче в него только барботажного пара через барботажное устройство деаэраторного бака.

Показано, что совместное использование разработанных и существующих моделей для элементов деаэраторов позволяет существенно сократить объем режимно-наладочных испытаний. При этом экспериментальные данные удовлетворительно описываются основными режимными характеристиками деаэраторов, полученными расчетным путем. Предложено дополнение основной режимной характеристики деаэратора системой поправок на отклонение значений влияющих параметров (удельного расхода выпара, удельного расхода пара на барботаж в деаэраторном баке и др.), что существенно увеличивает прогностические возможности основной режимной характеристики.

Приведен пример использования компьютерной модели деаэратора при контроле его технического состояния, показывающий возможность оперативного выявления дефектов внутренних элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен комплекс экспериментально-расчетных исследований технологических процессов струйно-барботажной деаэрации воды при атмосферном давлении, по результатам которых даны рекомендации по совершенствованию режимов работы деаэраторов, направленные на повышение эффективности обескислороживания воды.

2. Получены новые экспериментальные данные, характеризующие протекание процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода раздельно в струйных и барботажных элементах деаэраторов атмосферного давления типов ДСА и ДА-м (модели ДСА-300 и ДА-300м).

3. Выдвинута и доказана расчетно-экспериментальным путем гипотеза об отсутствии чисто струйных режимов течения воды в струйных отсеках указанных деаэраторов при относительно больших гидравлических нагрузках, показана неприменимость для расчета технологических процессов в таких режимах моделей, разработанных при допущении неразрывности потока воды.

4. Получены критериальные уравнения, описывающие процессы нагрева воды и десорбции кислорода из неё в струйных отсеках деаэраторов атмосферного давления при струйно-капельном гидродинамическом режиме работы этих отсеков (для случаев, когда высота зоны чисто струйного режима не превышает 28 % от общей высоты струйного отсека). Погрешности расчета температуры воды на выходе струйных отсеков и концентрации кислорода в ней составили соответственно 1,55 ^{o}C и 181 мкг/дм^{3}. При анализе полученных параметров идентификации (показателей степени соответствующих критериев) уточнены условия протекания процессов нагрева воды и десорбции

из неё кислорода при струйно-капельном гидродинамическом режиме работы струйных отсеков деаэраторов.

5. Найдены параметры идентификации выведенных ранее в общем виде критериальных уравнений С.С. Кутателадзе и В.А. Зысина для расчета процессов нагрева воды и десорбции кислорода из неё на непровальных барботажных листах деаэраторов атмосферного давления при недогреве воды до температуры насыщения на входе в лист до 8 ^{o}С. Погрешности расчета температуры воды и концентрации кислорода в ней составили 0,54 ^{o}С и 38 мкг/дм^{3}.

6. Получены данные, количественно характеризующие эффективность работы барботажного устройства, представляющего собой перфорированный коллектор, уложенный на дне деаэраторного бака вдоль его образующих. Показано, что эффект десорбции кислорода зависит от длины данного устройства и может устойчиво поддерживаться на уровне не менее 98 %. Определено минимально необходимое для обескислороживания воды значение удельного расхода пара на барботаж для рассматриваемого устройства (15 кг пара на 1 тонну воды). Показано, что при значениях удельного расхода пара на барботаж более 15 кг/т эффект десорбции кислорода в деаэраторном баке практически не зависит от прочих теплогидравлических параметров работы деаэратора.

7. Получены уточненные данные о влиянии изменения режимных параметров, а также их эксплуатационных колебаний во времени на эффективность десорбции из воды кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления различных конструкций. На основании этой оценки и проведенных расчетно-экспериментальных исследований разработаны конструктивные и режимные мероприятия, направленные на повышение эффективности работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления.

8. Показана возможность использования разработанных математических моделей технологических процессов для ускорения пуско-наладочных работ и сокращения количества проводимых опытов в ходе режимно-наладочных испытаний деаэраторов. Предложено дополнение основной режимной характеристики деаэратора системой поправок на отклонение значений влияющих параметров (удельного расхода выпара, удельного расхода пара на барботаж в деаэраторном баке и др.), что существенно увеличивает прогностические возможности основной режимной характеристики.

9. Показана целесообразность и приведены примеры использования компьютерных моделей для оперативного контроля технического состояния деаэраторов в ходе их эксплуатации.

10. Показана целесообразность использования для увеличения эффекта обескислороживания воды режимов работы струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления при подаче в них только барботажного пара через барботажные устройства деаэраторных баков. Описана технология и указаны условия применения таких режимов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование процессов тепломассообмена в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного типа [Текст] / Г.В. Ледуховский // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2004. – вып. 6. – С. 9-13.
2. **Ледуховский, Г.В.** Метод расчета многоступенчатых теплообменников сложной конфигурации с учетом фазового перехода теплоносителей [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2004. – вып. 3. – С. 138-139.
3. **Мошкарин, А.В.** Водно-химический режим теплосети в условиях её аварийной подпитки [Текст] / А.В. Мошкарин, Г.П. Малинов, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 4, С. 19-23.
4. **Барочкин, Е.В.** Водно-химический режим теплосети в условиях её аварийной подпитки [Текст] / Е.В. Барочкин, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2005. – вып. 1. – С. 35-40.
5. **Барочкин, Е.**В. О Моделировании газообмена в пароводяном тракте ТЭС [Текст] / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2006. – вып. 2. – С. 28-31.
6. **Виноградов, В.Н.** Особенности организации водно-химического режима тепловых сетей средствами химической обработки и деаэрации воды [Текст] / В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, И.А. Шатова // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2006. – вып. 4. – С. 19-23.
7. **Шатова, И.А.** Особенности применения стандартизованных методов статистической обработки результатов теплотехнического и теплохимического эксперимента [Текст] / И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2007. – вып. 2. – С. 14-19.

Публикации в других изданиях

8. **Мошкарин, А.В.** Выбор основного и вспомогательного оборудования ТЭС / А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин, М.Ю. Зорин, Г.В. Ледуховский: Учебно-методическое пособие. – Иваново: ИГЭУ, 2004. – 56 с.
9. **Барочкин, Е.В.** Моделирование тепло-массообмена в каскаде аппаратов сложной конфигурации [Текст] / Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Сб. трудов Междунар. науч. конф. «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные производства». Иваново, 14-17 сент. 2004 г. Т.2. Секция 1. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2004. – 122 с. С.36
10. **Барочкин, Е.В.** Опыт наладки деаэрационно-питательной установки при резко переменных нагрузках [Текст] / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 1-3 июня 2005 г. В 2 т. Т 1. Секция 5 / Под. ред. В.Н. Нуждина, Ю.Я. Щелыкалова, Ю.А. Митькина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2005. – 216 с. С. 137.
11. **Барочкин, Е.В.** Повышение эффективности атмосферной деаэрации с использованием охладителей выпара [Текст] / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 1-3 июня 2005 г. В 2 т. Т 1. Секция 5 / Под. ред. В.Н. Нуждина, Ю.Я. Щелыкалова, Ю.А. Митькина

и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2005. – 216 с. С. 138.

12. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование тепломассообмена в многоступенчатых струйных деаэраторах / Г. В. Ледуховский, В. П. Жуков, Е. В. Барочкин // Труды XVIII Междунар. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-18». – Казань. – 2005. – С. 210.

13. **Ледуховский, Г.В.** Математическое моделирование теплообмена в деаэрационных установках [Текст] / Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков // Тез. докл. XI Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., 1-2 марта 2005 г. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2005. Т.1. – 452 с. С. 311-312.

14. **Барочкин, Е.В.** Газообмен в пароводяном тракте ТЭС [Текст] / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // // Матер. Пятой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». Ульяновск, 20-21 апр. 2006 г. Том 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 412 с. С. 295-298.

15. **Ледуховский, Г.В.** К вопросу о применении стандартизованных методов статистической обработки данных теплотехнического и теплохимического эксперимента [Текст] / Г.В. Ледуховский // Матер. Междунар. науч. - техн. конф. «XIII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 18-20 окт. 2006 г. В 2 т. Т 1 / Под. ред. В.Н. Нуждина, В.П. Жукова, Ю.А. Митькина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2006. – С. 58-61

16. **Барочкин, Е.В.** Особенности обеспечения нормативного значения pH_{25} подпиточной и сетевой воды при химической обработке и деаэрации [Текст] / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский // Матер. Пятой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». Ульяновск, 20-21 апр. 2006 г. Том 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 412 с. С. 354-357.

17. **Ледуховский, Г.В.** Оценка эффективности деаэрации химочищенной воды в деаэрационной колонке ДА-300м [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Тез. докл. Двенадцатой Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., 2-3 марта 2006 г. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. Т.3. – 480 с. С. 162-163.

18. **Ледуховский, Г.В.** Расчетно-экспериментальные исследования процессов тепломассообмена в условиях струйно-барботажной деаэрации воды [Текст] / Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «XIII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 18-20 окт. 2006 г. / Под. ред. В.Н. Нуждина, В.П. Жукова, Ю.А. Митькина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2006. – С. 56-57.

19. **Ледуховский, Г.В.** Струйно-барботажная деаэрация со сложной организацией потоков [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Электромеханика». – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2006. – 60 с. С. 43-45.

20. **Ледуховский, Г.В.** Применимость новых нормативных документов в области обработки результатов эксперимента [Текст] / Г.В. Ледуховский // Матер. Междунар. науч. - техн. конф. «XIV Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 29-31 мая 2007 г. В 2 т. Т 1 / Под. ред.

С.С. Таратыкина, В.В. Тютикова, В.Н. Нуждина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2007. – 260 с. С. 187

21. **Ледуховский, Г.В.** Проблемы статистической обработки результатов теплотехнического эксперимента с применением стандартизованных методов [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов // Сб. трудов IV Межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика». В 3 т. Т1. – филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Смоленске., 2007. – 176 с. С. 93-98

22. **Ледуховский, Г.В.** Исследование процессов тепломассообмена в стационарных режимах работы деаэратора ДА-300м [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов // Сб. трудов IV Межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика». Смоленск, 2007 г. В 3 т. Т1. – филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Смоленске., 2007. – 176 с. С. 91-93.

23. **Ледуховский, Г.В.** Результаты расширенных теплохимических испытаний деаэратора ДА-300м [Текст]: / Г.В. Ледуховский, А.Н. Малышев // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Теплоэнергетика». – Иваново.: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2007. – 60 с. С 21-22.

24. **Ледуховский, Г.В.** Моделирование процессов тепломассообмена в стационарных режимах работы деаэратора ДА-300м [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов // Материалы междунар. науч. - техн. конф. «XIV Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 29-31 мая 2007 г. В 2 т. Т 1 / Под. ред. С.С. Таратыкина, В.В. Тютикова, В.Н. Нуждина и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2007. – 260 с. С. 182-184.

25. **Ледуховский, Г.В.** Расчетно-экспериментальные исследования процессов тепломассообмена в деаэраторе [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов // Сб. трудов XX Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20». Ярославль, 2007. В 10 т. Т. 5. Секция 11 / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Ярославль: Изд-во Яросл. гос. техн. ун-та, 2007. – 304 с. С. 157-158.

26. **Ледуховский, Г.В.** Сравнительный анализ моделей теплообмена струйных отсеков деаэратором атмосферного типа [Текст]: / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Теплоэнергетика». – Иваново.: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2008. – 108 с. С 14-15.

27. **Ледуховский, Г.В.** Применение теории подобия к расчету теплообмена в струйных отсеках деаэратором атмосферного типа [Текст]: / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Теплоэнергетика». – Иваново.: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2008. – 108 с. С 15-16.

28. **Ледуховский, Г.В.** Экспериментальные исследования и моделирование процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды [Текст] / Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Материалы докл. III-й молодежной междунар. научн. конф. «Тинчуринские чтения», 24 – 25 апр. 2008 г. / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т. Т 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008 – 164 с. С. 131-132.

ЛЕДУХОВСКИЙ Григорий Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕСОРБЦИИ КИСЛОРОДА В СТРУЙНО-БАРБОТАЖНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Лицензия ИД№ 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 15.05.2008. Формат 50Х84 1/16
Печать плоская. Усл. печ. Л. 1,62.
Тираж 110 экз. Заказ № 169.