

На правах рукописи



БАРОЧКИН Юрий Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЭС
С ПРИМЕНЕНИЕМ КАВИТАЦИОННО-СТРУЙНОГО ДЕАЭРАТОРА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2020

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

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Лаптев Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Технология воды и топлива»;

Капанова Анна Борисовна, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск.

Защита состоится «05» июня 2020 г. в 14.30 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/Dissertation_Barochkin_Yu.E._0.pdf.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета Д 212.064.01



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность работы. На ТЭС эксплуатируются технологические системы, в которых необходимо обеспечить защиту металла от коррозии, но из-за ограничений по массогабаритным характеристикам, температурным условиям или потребности в греющем паре отсутствует возможность применения эффективных деаэраторов, например струйно-барботажного типа. Опыт эксплуатации показывает, что на многих ТЭС существуют проблемы с обеспечением требуемой концентрации растворенного кислорода и / или свободного диоксида углерода в теплоносителе таких систем. При этом в ряде случаев, например в конденсационных установках паровых турбин и системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением, химическое качество теплоносителя по содержанию коррозионно-активных газов является нормируемым. В других случаях, например в системах возврата конденсата пара внешних потребителей, соответствующие нормативные требования не предъявляются, но концентрации указанных газов также необходимо минимизировать по условиям обеспечения надежности и долговечности оборудования, а также для обеспечения нормативного химического качества теплоносителя по другим показателям, например концентрации соединений железа.

Существуют малогабаритные деаэраторы, работающие без подачи греющего пара, в которых деаэрация протекает при вскипании перегретой воды, попадающей в зону разрежения. Такие устройства, как правило, используют явление кавитации в вихревом потоке жидкости. К ним относятся, в частности, кавитационно-струйные деаэраторы. Массообменная эффективность таких устройств в сравнении со струйно-барботажными деаэраторами не велика, однако малые габариты и возможность работы в беспаровом режиме делают их потенциально полезными при повышении эффективности деаэрации теплоносителя в перечисленных технологических системах ТЭС. Расширению практического использования таких технических решений препятствует недостаточность сведений об эффективности деаэрации воды в кавитационно-струйных деаэраторах при изменении условий эксплуатации и конструктивных характеристик. Этим, в свою очередь, обусловлен ряд недостатков таких деаэраторов: сравнительно малая массообменная эффективность; нестабильность работы тракта отвода пара с периодическим захлебыванием деаэратора в некоторых режимах.

Таким образом, актуальным для теплоэнергетики является решение комплекса задач по повышению эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС с применением кавитационно-струйного деаэратора, включая разработку замкнутого математического описания процесса деаэрации воды в нем; исследование массообменной и энергетической эффективности деаэратора для выявления влияющих

¹ На этапе разработки имитационной модели кавитационно-струйного деаэратора в программном комплексе FlowVision диссертанта консультировал канд. т. наук, доцент кафедры ТЭС ИГЭУ Горшенин С.Д.

факторов; определение показателей эффективности деаэрации теплоносителя при включении рассматриваемого деаэратора в технологические системы ТЭС.

Актуальность темы диссертации подтверждается её соответствием одному из утвержденных указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г. приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» в рамках критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе». Все основные задачи диссертации решены в рамках хоздоговорных работ с предприятиями энергетической отрасли.

Степень разработанности темы диссертации. Проблемам деаэрации теплоносителей ТЭС посвящены труды исследовательских групп, работавших под руководством С.С. Кутателадзе, В.А. Пермякова, И.И. Оликера, А.П. Мамета, И.К. Гришука и др. На современном этапе значимые результаты в этой области получены коллективами под руководством В.И. Шарапова (УлГТУ); А.Г. Лаптева (КГЭУ); Г.В. Ледуховского, В.П. Жукова, В.Н. Виноградова (ИГЭУ); Ю.Г. Сухорукова (ОАО «НПО ЦКТИ») и др. Однако большинство работ посвящены деаэраторам распространенных конструкций: струйно-барботажным, капельным, насадочным. Исследования деаэраторов, работающих без подачи греющего пара при вскипании попадающей в зону разрежения перегретой воды, в частности кавитационно-струйных деаэраторов, ограничены. Здесь следует отметить труды Б.А. Зимина; В.С. Галустова (ООО «НПО Политехника»); В.И. Шарапова; А.А. Кудинова (СамГТУ); аналогичным по принципу действия деаэраторам – центробежно-вихревым – посвящена подготовленная в ИГЭУ диссертация А.Н. Рослякова. Промышленное производство кавитационно-струйных деаэраторов с наименованием «АВАКС» было налажено на Кинешемском машиностроительном заводе (г. Кинешма Ивановской обл.). Тем не менее, к настоящему времени остается не выясненным влияние режимных и конструктивных параметров кавитационно-струйного деаэратора на его массообменные и энергетические характеристики, отсутствуют методы расчета процесса деаэрации воды в рассматриваемых условиях, не раскрыты условия эффективного применения таких деаэраторов в технологических системах ТЭС.

Целью диссертации является повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет применения кавитационно-струйного деаэратора с совершенствованием схем его включения и режимов работы.

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

1) разработка в программном комплексе FlowVision имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора для определения гидродинамических характеристик потоков воды и парогазовой смеси;

2) обобщение экспериментальных данных о процессе деаэрации воды в деаэрационных устройствах, работающих при попадании перегретой воды в зону разрежения

без подачи греющего теплоносителя;

3) разработка и идентификация математической модели процесса деаэрации воды в кавитационно-струйном деаэраторе на основе термодинамического подхода с использованием результатов моделирования в программном комплексе FlowVision и экспериментальных данных;

4) разработка и исследование технических решений, обеспечивающих повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет включения в них кавитационно-струйного деаэратора.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части формулы специальности*: «совершенствовани(е) действующих ... типов и конструкций ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций»; «...поиск приемов и методов оптимизации рабочих режимов оборудования»; «вопросы ... водных режимов», «проблемы обеспечения надежности... и требуемого рабочего ресурса оборудования...», «технико-экономические ... исследования»; *в части области исследования* – пункту 1 «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров...агрегатов, систем ...»; пункту 2 «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах ...»; пункту 4 «Разработка конструкций ... вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования...»; пункту 6 «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования...».

Научная новизна работы обусловлена следующим:

1. Разработана математическая модель процесса деаэрации воды в устройствах, работающих без подачи греющего теплоносителя при вскипании попадающей в зону разрежения перегретой воды. Единственный параметр идентификации модели определен по экспериментальным данным. Доказана адекватность предложенной модели применительно к центробежно-вихревым, кавитационно-струйным, капельным деаэрационным устройствам.

2. В программном комплексе FlowVision разработана имитационная модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять влияющие на эффективность деаэрации воды характеристики потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода выпара.

3. На основе предложенной математической модели процесса деаэрации попадающей в зону разрежения перегретой воды с использованием результатов моделирования в программном комплексе FlowVision, а также известных методов расчета гидродинамических режимов технических систем разработана математическая модель кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять эффект деаэрации для заданного теплогидравлического режима с учетом показателей работы тракта отсоса выпара.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. *Доказано* определяющие влияние на эффективность деаэрации воды в устройствах, работающих при попа-

дании перегретой воды в зону разрежения без подачи греющего теплоносителя, начального перегрева воды и параметров работы тракта отсоса пара. **Изложены:** результаты обобщения экспериментальных данных об эффективности массообменных процессов в деаэрационных устройствах, работающих при вскипании перегретой воды; основные положения разработанных имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора и математической модели процесса деаэрации воды в нем. **Раскрыты** схемные и режимные аспекты технических решений, обеспечивающих эффективное применение кавитационно-струйного деаэратора в технологических системах ТЭС; способы повышения массообменной и энергетической эффективности кавитационно-струйного деаэратора. **Изучены:** влияние режимных параметров кавитационно-струйного деаэратора на эффективность деаэрации воды; эффективность деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС при включении в них кавитационно-струйного деаэратора. **Проведена модернизация** математической модели процесса деаэрации при попадании перегретой воды в зону разрежения путем введения дополнительного параметра идентификации, определенного по экспериментальным данным.

Практическая значимость результатов заключается в том, что в диссертации проведена модернизация известных и разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС (возврата конденсата пара внешних потребителей; конденсационных установках паровых турбин; водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением) с применением кавитационно-струйного деаэратора.

Методы исследований. В работе использованы методы: имитационного моделирования гидродинамических процессов в специализированном программном комплексе для расчета течений жидкости; математического и физико-математического моделирования теплоэнергетического оборудования; теории абсорбции; гидродинамических расчетов технических систем; балансовых расчетов энергетических установок.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования теплоэнергетического оборудования; идентификацией математических моделей по экспериментальным данным, полученным в условиях промышленной эксплуатации энергообъектов; сопоставимостью результатов, полученных на разных объектах; согласованностью результатов исследования с результатами, полученными другими авторами.

Автор защищает:

1) разработанную в программном комплексе FlowVision имитационную модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратора и результаты её использования при численном моделировании;

2) результаты обобщения экспериментальных данных о процессе деаэрации воды в деаэрационных устройствах, работающих при попадании перегретой воды в зону раз-

режения без подачи греющего теплоносителя;

3) математическую модель процесса деаэрации воды в кавитационно-струйном деаэраторе и результаты её идентификации на основе экспериментальных данных;

4) технические решения по повышению эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет включения в них кавитационно-струйного деаэратора.

Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения и проведена по следующим направлениям:

1) техническое решение с установкой кавитационно-струйного деаэратора в схему основного конденсата конденсационных установок теплофикационных паровых турбин принято ЗАО «Управляющая компания объединенного петербургского энергостроительного консорциума» (г. Санкт-Петербург) в качестве типовой технологической схемы реконструкции; экономический эффект, обусловленный уменьшением затрат на ремонты элементов тракта основного конденсата и трубных систем ПНД из-за уменьшения концентрации в турбинном конденсате растворенного кислорода, для турбоагрегатов типа ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ оценен предприятием на уровне 1,2 млн. руб/год на один турбоагрегат, срок окупаемости инвестиций – 1,6 года;

2) техническое решение с установкой кавитационно-струйного деаэратора в схему возврата конденсата пара отдаленных внешних потребителей принято к использованию на ТЭЦ Индустриального парка «Родники» (ЗАО «Родниковская энергетическая компания», г. Родники Ивановской обл.); запланировано проведение испытаний системы с целью сбора данных, необходимых для разработки технико-экономического обоснования;

3) результаты работы внедрены в виде электронного учебного пособия «Атмосферные деаэрационные установки» в учебный процесс ИГЭУ по кафедре тепловых электрических станций.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке в программном комплексе FlowVision имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, проведении численных экспериментов при использовании этой модели и анализе полученных результатов; в обобщении экспериментальных данных о процессе деаэрации при попадании перегретой воды в зону разрежения; в модернизации математической модели процесса деаэрации воды в кавитационно-струйном деаэраторе путем введения дополнительного параметра идентификации, определенного по экспериментальным данным; в проведении исследований эффективности деаэрации теплоносителя при включении в них кавитационно-струйного деаэратора в технологические системы основного конденсата конденсационных установок паровых турбин и водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением; в разработке и исследовании технических решений по повышению эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах

возврата конденсата пара внешних потребителей; в вовлеченном участии при выполнении работ по всем направлениям практической реализации результатов; в подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы и обсуждались на десяти конференциях: XVI и XXV международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2010 и 2019 гг.); V региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (Иваново, 2010 г.); XII, XIII и XIV международных научно-технических конференций студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2017, 2018 и 2019 гг.); VII международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2017); XIX и XX международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2017 и 2019 гг.); XL научном семинаре по тематике «Диагностика энергооборудования» (Новочеркасск, 2018).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 20 работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК (включая 1 статью, переводная версия которой опубликована в журнале, индексируемом в международной базе SCOPUS); 12 тезисах и полных текстах докладов конференций.

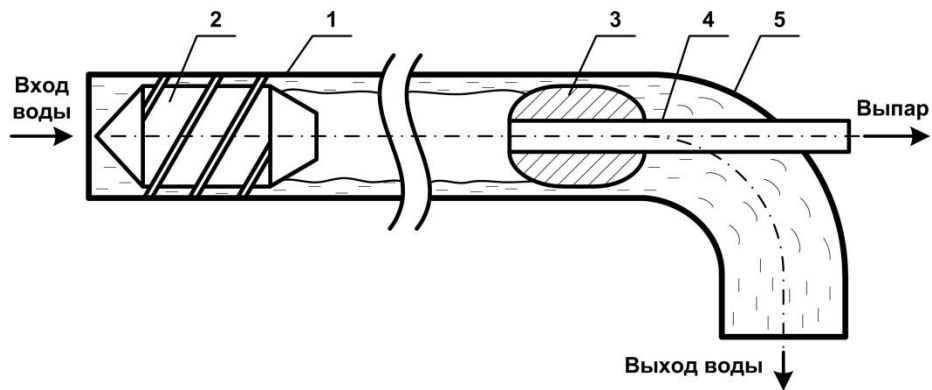
Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 178 наименований. Текст диссертации изложен на 165 стр. машинописного текста, содержит 66 рисунков, 11 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ опубликованных данных по тематике исследования. Отмечена роль термической деаэрации в системах обеспечения водно-химического режима теплоэнергетических установок, особенности деаэрации теплоносителя и коррозии материалов технологических систем ТЭС. Систематизированы опубликованные результаты исследований деаэрационных устройств, работающих без подачи греющего пара при попадании перегретой воды в зону разрежения. Показаны проблемы математического моделирования таких устройств, сдерживающие расширение сферы их практического применения. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора (рисунок 1). Деаэратор использует центробежный эффект закрученного потока воды в горизонтальной трубе. Закрутка потока обеспечивается завихрителем 2 со спирально навитыми ребрами. В центре корпуса 1 образуется газовая полость под разрежением, куда вытесняется выпар, удаляемый эжектором (4). Обтекатель 3 и корпус 1 образуют канал, расширяющийся в выходной части для восстановления статического давления потока воды практически до атмосферного.

Рисунок 1. Конструктивная схема кавитационно-струйного деаэрата: 1 – цилиндрический корпус; 2 – завихритель; 3 – обтекатель; 4 – патрубок отвода выпара; 5 – патрубок отвода деаэрированной воды



Моделирование гидродинамической обстановки в активной зоне кавитационно-струйного деаэрата основано на численном решении уравнений Навье-Стокса и неразрывности с использованием стандартной $k-\varepsilon$ -модели турбулентности для получения предварительного решения с последующим его уточнением при переходе на SST-модель. Модель реализована средствами программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision. В качестве объекта исследований выбран кавитационно-струйный деаэрат номинальной производительностью 20 т/ч, по которому опубликованы экспериментальные данные. Разработана упрощенная геометрическая модель рабочей зоны этого деаэрата (рисунок 2), представляющая собой цилиндрический участок, ограниченный на входе обтекателем, формирующим поток воды с требуемой степенью крутки. В выходном сечении установлен второй обтекатель, из центра которого предусмотрен отсос паровоздушной смеси (выпара) эжектором.

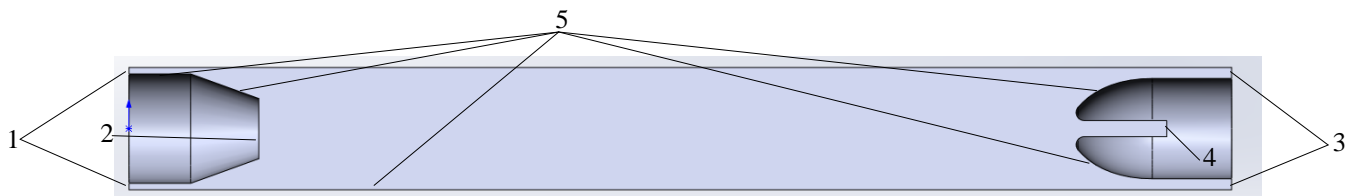


Рисунок 2. Геометрическая модель активной зоны кавитационно-струйного деаэрата: 1 – входное сечение (граничное условие «Вход вода»); 2 – входное сечение (граничное условие «Вход пар»); 3 – выходное сечение (граничное условие «Выход вода»); 4 – выходное сечение (граничное условие «Выход пар»); 5 – стенка (граничное условие «Стенка»)

Ввиду ограничения вычислительных возможностей задача решалась в упрощенной постановке – моделировалось двухфазное потенциальное течение двух не перемешивающихся несжимаемых жидкостей. Выбор граничных условий осуществлялся в соответствии с экспериментальными значениями параметров деаэрата. Принятые граничные условия (ГУ) отражены в таблице. Расчеты на разработанной модели выполнялись для двух случаев: при отсутствии и при наличии отсоса выпара из активной зоны при прочих равных условиях. Сходимость расчета оценивалась по величинам невязок скорости среды в выходном сечении и давления во входном сечении модели.

После получения решения по длине модели (по оси Z) был выделен ряд поперечных сечений (рисунок 3), для каждого из которых выполнялось построение эпюр статических и полных давлений вдоль радиуса в горизонтальном (по оси X) и вертикальном

(по оси Y) направлениях. На рисунке 4 показан пример эволюции эпюр избыточных статических давлений по ходу течения воды в активной зоне деаэратора для задачи при наличии отсоса выпара. Соответственно, таких рисунков для каждого режима работы деаэратора (при наличии и при отсутствии выпара) получали два – для избыточного статического и полного давления жидкой фазы. Далее по полученным эпюрам вычислялось среднее статическое и полное давление в потоке воды в данном сечении модели. Результаты такого осреднения отражены на рисунке 5.

Таблица. Принятые граничные условия

№ ГУ	Тип ГУ	Параметр	Значение
1	Вход / Выход	Закрутка скорости	В соответствии с результатами экспериментальных исследований
2	Вход / Выход	Нормальная массовая скорость	
3	Вход / Выход	Свободный выход	
4	Вход / Выход	Свободный выход (задача без отсоса выпара) Разрежение (задача с отсосом выпара)	
5	Стенка	–	Прилипание

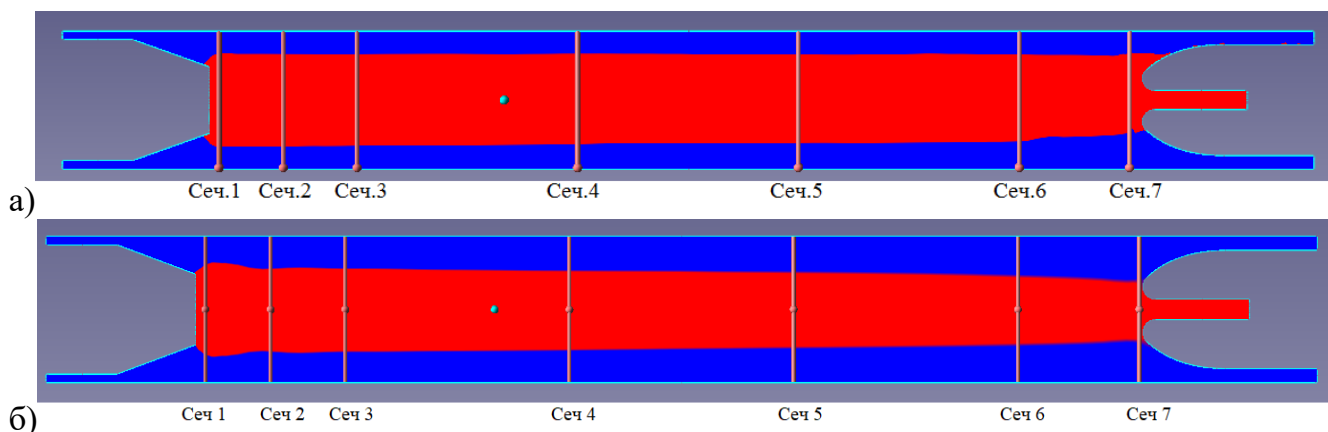


Рисунок 3. Профили фаз и выбранные поперечные сечения (сеч.) по длине модели при отсутствии (а) и наличии (б) отсоса выпара

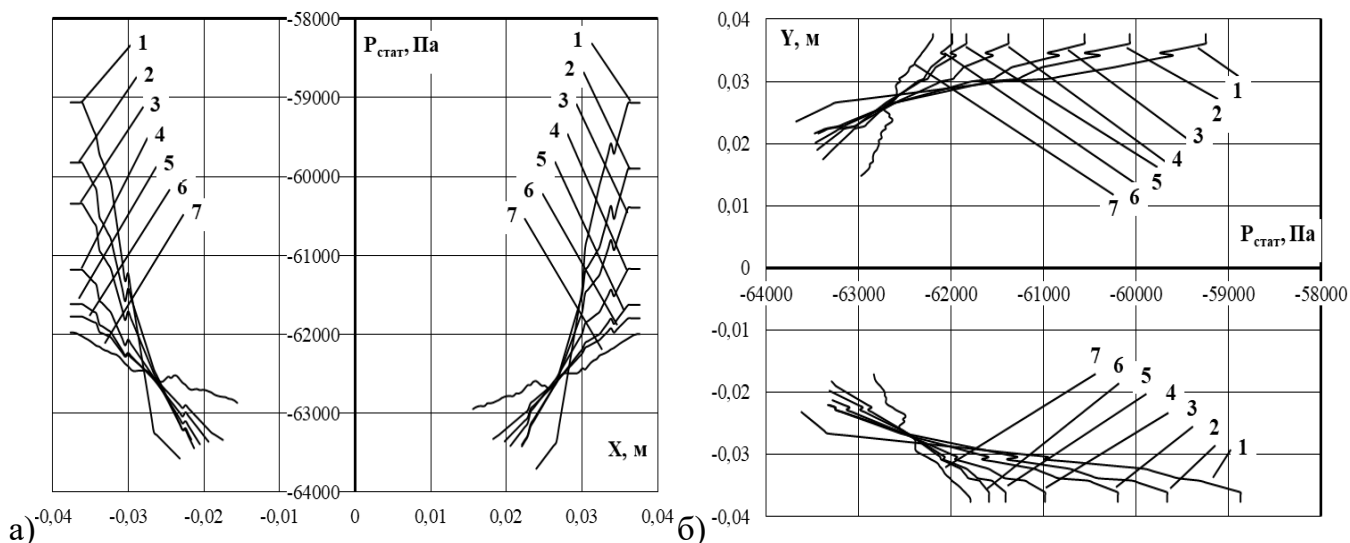
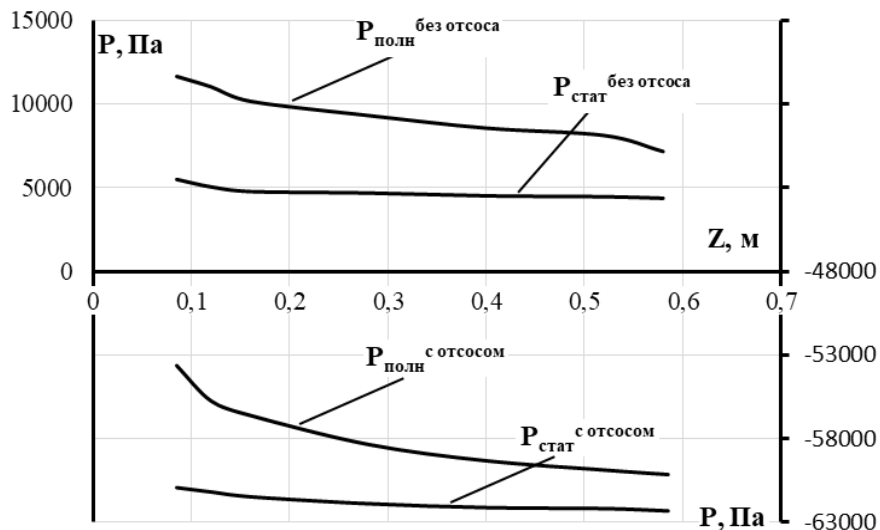


Рисунок 4. Эволюция эпюр избыточных статических давлений по осям X (а) и Y (б) от сечения к сечению модели по рисунку 3,б: $P_{стат}$ – избыточное статическое давление; цифрами обозначения номера сечений модели по рисунку 3,б

Рисунок 5. Средние по сечениям модели по рисунку 3,б избыточные статическое и полное давления потока в зависимости от координаты Z при отсутствии (верхнее поле) и наличии (нижнее поле) отсоса паровоздушной смеси



Получены искомые характеристики полей избыточных статического и полного давления фаз в активной зоне кавитационно-струйного деаэратора. Выявлено следующее:

1. Характер течения в разных поперечных сечениях модели практически совпадает. При этом наблюдается, особенно при отсутствии отсоса выпара, некоторая деформация формы поверхности раздела фаз ближе к выходному по ходу течения обтекателью, которая обусловлена действием силы тяжести, ослабляющей действие центробежной силы. Действием силы тяжести обусловлена также разница в статических давлениях на верхней и нижней образующих модели.

2. Наблюдается уменьшение статического давления жидкости по ходу её движения в активной зоне, связанное с уменьшением полного давления потока. Динамическое давление также уменьшается по ходу течения, что обусловлено наличием потерь энергии.

3. Отсос выпара способствует утолщению слоя жидкости по всей длине активной зоны деаэратора на величину от 13 до 20 % (большие значения относятся к сечениям, расположенным ближе к выходному по ходу движения воды обтекателью). На характер изменения полного и статического давлений потока по длине модели отсос паровоздушной смеси влияния практически не оказывает; несколько большие потери полного давления потока от входного до выходного участка модели для режима с отсосом паровоздушной смеси в сравнении с режимом без отсоса объясняются появлением дополнительного сопротивления при контакте жидкой и газовой фаз.

4. В задаче с отсосом выпара статическое давление на границе раздела фаз (внутренней поверхности потока воды в активной зоне) отличается от заданного граничного условия для выходного сечения 4 по рисунку 2: задано избыточное давление «минус» 68 кПа; статическое давление на поверхности воды в активной зоне в среднем составляет «минус» 63,2 кПа. Разница обусловлена потерями давления парогазовой смеси, в основном в области собственно отсоса паровоздушной смеси. Учитывая, что изменение статического давления по радиусу вихревого потока воды относительно не велико (в среднем избыточное статическое давление на периферии потока «минус» 61,18 кПа,

то есть среднее изменение вдоль радиуса от внутренней до наружной границ потока составляет лишь около 2 кПа), следует заключить, что статическое давление в потоке воды в активной зоне деаэратаora практически полностью определяется сопротивлением тракта отсоса выпара, что необходимо учитывать при разработке математической модели процесса деаэрации воды в рассматриваемых условиях.

Третья глава посвящена разработке математической модели деаэрации (десорбции растворенного кислорода) попадающей в зону разрежения воды, перегретой относительно температуры насыщения при давлении в этой зоне.

На основе термодинамического подхода в предположении, что при парообразовании пузырьки пара «захватывают» число молекул (массовую долю) растворенного кислорода пропорционально мольной доле пара в смеси, которая соответствует объемной доле компонента в смеси, получена исходная математическая модель:

$$\zeta = 1 - C / C_0 = 1 - \left(1 + Ku^{-1} Ar\right)^{-1}, \quad (1)$$

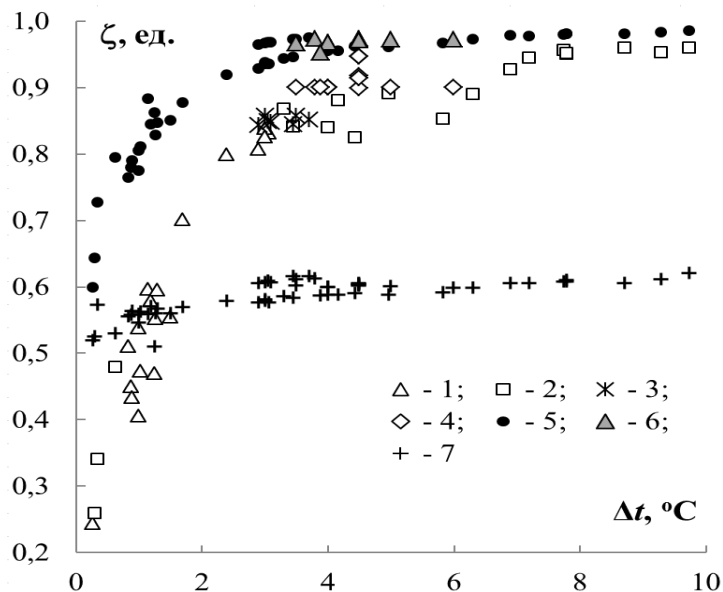
где ζ , ед. – эффект деаэрации; C_0 и C , мг/дм³ – массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе и на выходе деаэрационного элемента соответственно; $Ar = (\rho_{ж} / \rho_{п} - 1)$ – критерий Архимеда; $Ku = r / (c_p \Delta t)$ – критерий Кутателадзе; $\rho_{ж}$, кг/м³ – плотность воды; $\rho_{п}$, кг/м³ – плотность сухого насыщенного пара при давлении в деаэрационном элементе p_d , Па; r , кДж/кг – удельная теплота парообразования; c_p , кДж/(кг·град.) – удельная теплоемкость воды; Δt , °С – уменьшение температуры деаэрируемой воды в деаэрационном элементе. Значение r соответствует p_d , значения $\rho_{ж}$ и c_p – средней температуре воды в деаэрационном элементе $t_{ср}$.

Результаты расчетов по модели (1) сопоставлены с опубликованными экспериментальными данными по деаэраторам перегретой воды (рисунок б): центробежно-вихревым (ДЦВ) и капельным (КД) (А.Н. Росляков, ИГЭУ), кавитационно-струйному (ДКС) (И.А. Шатова, В.Н. Виноградов, ИГЭУ). Используются также результаты экспериментов по вакуумно-кавитационному деаэратору (ДВК) (А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, СамГТУ), однако данные по этому аппарату не применялись в дальнейших расчетах при идентификации модели, поскольку в эксперименте отсутствовало раздельное определение эффективности кавитационной ступени и расположенных за ней деаэрационных устройств; в этих условиях данные авторов по потоку воды на выходе из ДВК пересчитаны нами к потоку воды на выходе из кавитационной ступени с использованием опубликованных показателей эффективности нижестоящих ступеней деаэрации известного типа.

Выявлено, что известная модель И.И. Оликера для вакуумных деаэраторов классической конструкции практически вдвое занижает эффект деаэрации относительно экспериментальных значений и потому не применима при рассматриваемых условиях, а модель (1), при качественно верном прогнозировании экспериментальных данных,

напротив, количественно дает завышенную оценку эффекта деаэрации. Последнее объясняется тем, что термодинамический подход не учитывает время пребывания воды в аппарате, а полученный завышенный расчетный эффект деаэрации соответствует асимптотическому по времени состоянию.

Рисунок 6. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по модели (1): 1, 2 и 3 – экспериментальные данные соответственно по ДЦВ, КД и ДКС; 4 – экспериментальные данные по ДВК; 5 – результаты расчета по модели (1) при условиях опытов для деаэраторов ДЦВ, КД и ДКС; 6 – результаты расчета по модели (1) при условиях опытов для деаэратора ДВК; 7 – результаты расчета по известной модели И.И. Оликера для вакуумных деаэраторов классической конструкции



Для количественной корректировки математическое описание (1) уточнено путем введения соответствующей эмпирической поправки. При этом разработано две математических модели. Первая получена стандартными методами теории подобия процессов теплообмена. При этом исходное критериальное уравнение, записанное в мультипликативном виде, принято исходя из теоретических представлений о механизме процесса, то есть согласно (1). Искомые параметры модели вычислены методами множественной линейной регрессии и математической статистики на основе экспериментальных данных по деаэраторам ДЦВ, КД, ДКС. Модель получена в виде:

$$\zeta = 1 - \left(1 + 54,14 Ku^{-1,21} Ar^{0,47}\right)^{-1}. \quad (2)$$

Проверка адекватности и точности модели (2) выявила следующее: модель (2) адекватна (критерий Фишера составил 29,4 при критическом значении 1,7); множественное корреляционное отношение (здесь и далее – с учетом поправки на число степеней свободы) составило 0,983 и является статистически значимым (критерий Стьюдента 187,2 при критическом значении 2,0); среднеквадратическое отклонение результатов расчета по модели (2) от экспериментальных значений по концентрации C составило 18,2.

Вместе с тем, анализ полученных данных показал, что модель (2) при условиях некоторых опытов дает существенную ошибку, которая зависима от величины начального перегрева воды перед деаэрационным устройством $\Delta t_{вх} = t_{вх} - t_s$, °C ($t_{вх}$ – температура воды на входе; t_s – температура насыщения при p_d) и относительной гидравлической нагрузки $g = G/G_n$ (G и G_n – соответственно текущая и номинальная гидравлическая нагрузка деаэрационного устройства, кг/с), косвенно показывающей относительное время пребывания воды в деаэрационном устройстве. Действительно, чем больше

время пребывания воды (меньше g) и чем больше отклонение системы на входе в устройство от термодинамически равновесного состояния (больше $\Delta t_{\text{вх}}$), тем скорость процесса деаэрации должна быть больше, но модель (2) этого не учитывает. Для учета указанных факторов разработана третья модель, соответствующая исходной модели (1) с введением одного параметра идентификации b , для которого, в свою очередь, методом множественной линейной регрессии найдена зависимость вида $b = f(g; \Delta t_{\text{вх}})$:

$$\zeta = 1 - \left(1 + bKu^{-1}Ar\right)^{-1}; \quad b = 0,37 - 0,18g + 0,0070\Delta t_{\text{вх}}. \quad (3)$$

Результаты расчетов по модели (3) в сопоставлении с экспериментальными данными приведены на рисунке 7. Проверка адекватности и точности модели (3) показала следующее: модель (3) также адекватна (критерий Фишера составил 81,6 при критическом значении 1,7); множественное корреляционное отношение равно 0,994 (значимость доказана по критерию Стьюдента, равному 525,3 при критическом значении 2,0); среднеквадратическое отклонение результатов расчета по модели (3) от экспериментальных значений по концентрации C составило 11,6 %.

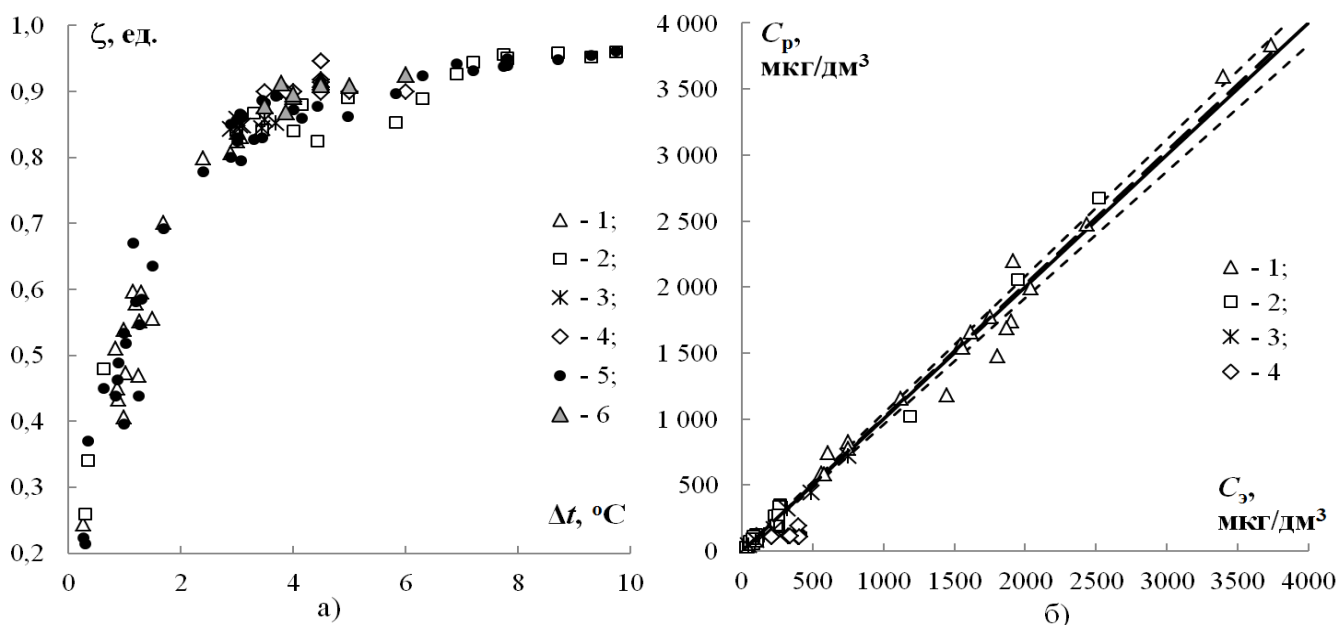


Рисунок 7. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по модели (3) (а) и корреляционная диаграмма для модели (3) (б): 5 – результаты расчета по модели (3) при условиях опытов для деаэраторов ДЦВ, КД и ДКС; 6 – результаты расчета по модели (3) при условиях опытов для деаэратора ДВК; C_s и C_p , мкг/дм³ – соответственно экспериментальные и расчетные значения массовой концентрации растворенного кислорода на выходе из устройства; сплошная линия – совпадение расчетных и экспериментальных значений; штриховая линия – линейная аппроксимация результатов расчета; пунктирные линии – границы доверительного интервала, обусловленного нормируемой неопределенностью (погрешностью) амперометрического метода измерения массовой концентрации растворенного в воде кислорода; прочие обозначения соответствуют рисунку б

Модели (2) и (3) имеют сходные характеристики адекватности и точности. Но модель (3) более полно учитывает факторы, влияющие на эффективность деаэрации воды в рассматриваемых условиях. Важно также, что модели (2) и (3) хорошо описывают и

данные по деаэратору ДВК, которые не были использованы при поиске параметров регрессии. Это дополнительно доказывает приемлемые прогностические свойства полученных моделей. Анализ показал, что точность модели (3) статистически значимо отличается от точности модели (2): критерий Фишера, определяющий отношение остаточных дисперсий для рассматриваемых моделей, равен 2,5 при критическом значении 1,7. Таким образом, модель (3) обладает приемлемой точностью и может быть рекомендована к использованию при решении практических задач.

Математические модели (1), (2), (3) имеют границы применимости: $\Delta t_{\text{вх}}$ от 0,3 до 9,7 °C; $p_{\text{д}}$ от $0,26 \cdot 10^5$ до $0,88 \cdot 10^5$ Па; g от 0,3 до 1,0; C_0 от 330 до 6405 мкг/дм³.

На основе математической модели (3), результатов моделирования в программном комплексе FlowVision и известных методов расчета гидродинамических режимов технических систем разработана математическая модель кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять эффект деаэрации с учетом показателей работы тракта отсоса выпара. При этом ввиду нестандартной формы канала для прохода выпара, образованного границей раздела фаз и поверхностью выходного обтекателя кавитационно-струйного деаэратора, коэффициент местного гидравлического сопротивления этого участка определен по результатам расчетов, проведенных на имитационной модели, реализованной в FlowVision, и вне области автомодельности обобщен регрессионной зависимостью от числа Рейнольдса для выпара: $\xi_{\text{м}} = 0,0613\text{Re}^2 \cdot 10^{-10} - 0,2090\text{Re} \cdot 10^{-5} + 0,6239$. Для полученной таким образом модели кавитационно-струйного деаэратора проведено исследование параметрической чувствительности.

В четвертой главе проведена модернизация известных и разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС с применением кавитационно-струйного деаэратора. Рассмотрены системы возврата конденсата пара внешних потребителей, основного конденсата конденсационных установок паровых турбин, водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением.

Применительно к конденсационным установкам теплофикационных паровых турбин разработано математическое описание, позволяющее определять показатели работы системы с учетом характеристик устанавливаемого деаэрационного устройства и тракта отсоса выпара из него. По результатам расчетных исследований установлено, что ранее оцененный по упрощенной модели эффект уменьшения массовой концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате при использовании рассматриваемого технического решения занижен в среднем на 6,3 % (минимально на 2,1 %, максимально на 10,6 % при разных режимах работы турбоустановки). Выявлено также, что во многих режимах работы ограничение по предельной эффективности деаэрации в деаэрационном устройстве наступает по гидравлическому сопротивлению тракта отвода выпара. В связи с этим разработаны рекомендации по проектированию системы, обес-

печивающие получение минимального гидравлического сопротивления этого тракта.

Для случая использования кавитационно-струйного деаэрата в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением разработана математическая модель, при использовании которой доказано, что ранее оцененные по упрощенной модели показатели эффективности технического решения, выраженные в уменьшении скорости коррозии медных проводников (использована модель коррозионных процессов, полученная в рамках докторской диссертации Ледуховского Г.В.), оказались занижены в среднем в 1,7 раза (от 1,3 до 2 раз в условиях разных объектов). Выявлено, что использование рассматриваемого технического решения позволит уменьшить скорость коррозии медных проводников в среднем в 3,6 раза.

Применительно к системам возврата конденсата отдаленных внешних потребителей пара обосновано техническое решение, предусматривающее установку кавитационно-струйного деаэрата по схеме рециркуляции через бак сбора конденсата (рисунок 8).

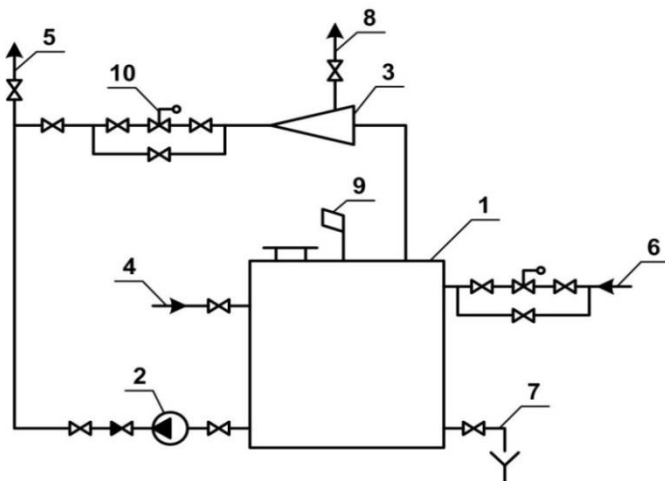


Рисунок 8. Фрагмент технологической схемы возврата конденсата пара системы пароснабжения внешних потребителей промышленной ТЭЦ: 1 – бак сбора конденсата; 2 – насос возвратного конденсата; 3 – ДКС; 4 – ввод конденсата от паропотребляющих установок; 5 – в трубопровод возврата конденсата на ТЭЦ; 6 – подвод пара на паровую подушку бака; 7 – дренаж; 8 – отвод выпара; 9 – вестовая труба бака; 10 – узел ввода воды в ДКС

Разработано математическое описание, позволяющее определять требуемую производительность и количество устанавливаемых деаэраторов, а также кратность рециркуляции воды через них, необходимую в каждом режиме:

$$C_{O_2, ДКС} = C_{O_2, ф} (1 + K_{реци} \zeta)^{-1}; \quad (4)$$

$$G_{ДКС, тр} = \zeta^{-1} [G_0 C_{O_2, 0} / C_{O_2, тр} - G_k]; \quad K_{реци, тр} = \zeta^{-1} [G_0 C_{O_2, 0} / (G_k C_{O_2, тр}) - 1], \quad (5)$$

где $C_{O_2, ДКС}$ и $C_{O_2, ф}$, мг/дм³ – массовая концентрация растворенного кислорода в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата, соответственно после установки ДКС по предлагаемой схеме и без ДКС (фактическая концентрация); $K_{реци}$ – кратность рециркуляции – отношение расхода конденсата $G_{ДКС}$, т/ч, на рециркуляцию через ДКС к расходу конденсата G_k , т/ч, закачиваемому в трубопровод возвратного конденсата на ТЭЦ; ζ , ед. – эффект деаэрации в ДКС по (3) с учетом температуры конденсата, поступающего в деаэратор t_k , °С; $G_{ДКС, тр}$, т/ч – требуемая производительность ДКС; $K_{реци, тр}$, ед. – требуемая кратность рециркуляции; G_0 , т/ч, и $C_{O_2, 0}$, мг/дм³ – соответственно суммарный расход конденсата, поступающего от потребителей в бак сбора конденсата и средневзвешенное значение массовой концентрации растворенно-

го кислорода в этом конденсате; $C_{O_2, \text{тр}}$, мкг/дм^3 – требуемое значение массовой концентрации растворенного кислорода в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата (определяется по методике Авана В.К., Виноградова В.Н., ИГЭУ, в зависимости от конструктивных параметров конденсатопровода по условию обеспечения нормативных значений по массовой концентрации продуктов коррозии в пересчете на Fe в воде на выходе из конденсатопровода).

При равенстве расходов G_0 и G_k (что характерно при проведении расчетов за длительный интервал времени), выражения (5) принимают вид:

$$G_{\text{ДКС, тр}} = G_k \zeta^{-1} \left[C_{O_2, 0} / C_{O_2, \text{тр}} - 1 \right]; K_{\text{реч, тр}} = \zeta^{-1} \left[C_{O_2, 0} / C_{O_2, \text{тр}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Проведены исследования эффективности разработанного технического решения на основе опубликованных данных о показателях работы системы возврата конденсата внешних потребителей Ивановской ТЭЦ-1. По результатам исследований установлено, что расчетная скорость коррозии трубопровода возвратного конденсата при реализации мероприятия уменьшится в среднем на 43 % (при разных режимах от 31 до 49 %). Доказано, что выбор номинальной производительности ДКС для рассматриваемой схемы применения следует проводить не по среднесуточным значениям показателей работы схемы в предположении равенства расходов конденсата, поступающего от пароиспользующих установок и возвращаемого на ТЭЦ (то есть не по (6)), а обязательно с учетом суточных графиков изменения расхода поступающего конденсата и концентрации растворенного кислорода в нем (по (5)). Для выбранного варианта установки ДКС выполнено расчетное исследование режимных параметров работы системы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс исследований процессов термической деаэрации перегретой воды при её попадании в зону разрежения, на основе которых решены задачи повышения эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет применения кавитационно-струйного деаэратора с совершенствованием схем его включения и режимов работы.

2. В программном комплексе FlowVision разработана имитационная модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять влияющие на эффективность деаэрации воды характеристики потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода выпара. С использованием разработанной имитационной модели выявлены условия протекания процессов в активной зоне деаэратора и установлена их существенная зависимость от показателей работы тракта отсоса выпара.

3. Выполнено обобщение опубликованных экспериментальных данных о деаэрации воды различными деаэрационными устройствами, работающими при попадании перегретой воды в зону разрежения без подачи греющего теплоносителя, по результатам ко-

торого на основе термодинамического подхода разработана математическая модель процесса деаэрации воды в рассматриваемых условиях. Показано, что ввиду отсутствия в модели учета фактора времени пребывания воды в аппарате, при качественно верном прогнозировании экспериментальных данных она приводит к завышенным результатам расчета эффекта деаэрации. Для преодоления этого недостатка в математическую модель введен параметр идентификации, после чего разработано эмпирическое обеспечение модели на основе экспериментальных данных. Точность полученной модели характеризуется среднеквадратическим отклонением результатов расчета от экспериментальных значений концентрации растворенного кислорода на выходе из деаэрационных устройств трех различных типов 11,6 %.

4. На основе разработанной математической модели процесса деаэрации воды, результатов моделирования в программном комплексе FlowVision и известных методов расчета гидродинамических режимов технических систем разработана математическая модель кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять эффект деаэрации с учетом показателей работы тракта отсоса выпара. Проведено исследование параметрической чувствительности полученной модели.

5. На основе разработанной математической модели кавитационно-струйного деаэратора проведена модернизация известных и разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах и установках ТЭС: системах возврата конденсата пара внешних потребителей; конденсационных установках паровых турбин; системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением. В частности, получены следующие результаты:

- по конденсационным установкам и системам охлаждения турбогенераторов получены новые количественные данные относительно эффективности ранее предложенных технических решений;

- для систем возврата конденсата внешних потребителей разработано и обосновано техническое решение, предусматривающее установку кавитационно-струйного деаэратора по схеме рециркуляции через бак сбора конденсата; разработано математическое описание, позволяющее определять требуемую производительность и количество устанавливаемых деаэраторов, а также кратность рециркуляции воды через них, необходимую в каждом режиме; проведены исследования эффективности разработанного технического решения применительно к условиям Ивановской ТЭЦ-1, по результатам которых разработаны рекомендации для эффективного применения его на практике.

6. Практическая реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения и проведена по следующим направлениям:

- техническое решение по конденсационным установкам теплофикационных паровых турбин принято ЗАО «Управляющая компания объединенного петербургского

энергостроительного консорциума» (г. Санкт-Петербург) в качестве типовой технологической схемы реконструкции; экономический эффект для турбоагрегатов типа ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ оценен предприятием на уровне 1,2 млн. руб/год на один турбоагрегат, срок окупаемости инвестиций – 1,6 года;

– техническое решение по схеме возврата конденсата пара отдаленных внешних потребителей принято к использованию на ТЭЦ Индустриального парка «Родники» (ЗАО «Родниковская энергетическая компания», г. Родники Ивановской обл.);

– результаты работы внедрены в виде электронного учебного пособия «Атмосферные деаэрационные установки» в учебный процесс ИГЭУ по кафедре тепловых электрических станций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Барочкин, Ю.Е.** Оценка эффективности применения кавитационно-струйного деаэрата в системах возврата конденсата отдаленных внешних потребителей ТЭС / Барочкин Ю.Е., Копсов А.Я., Ледуховский Г.В. [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2019, вып. 6. с. 5-13.

2. **Барочкин, Ю.Е.** Расчет поля статического давления жид-кой фазы в активной зоне кавитационно-струйного деаэрата / Барочкин Ю.Е., Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2019, вып. 6. с. 13-21.

3. **Ледуховский, Г.В.** Деаэрация воды в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенератора с водородно-водяным охлаждением / Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков [и др.] // Теплоэнергетика, 2018, № 10. с. 89-95.

Water Deaeration in Water-Cooling Systems of the Stator Winding in a Turbogenerator with Hydrogen-Water Cooling / Leducovsky G.V., Barochkin Y.E., Zhukov V.P., Vinogradov V.N., Shatova I.A. // Thermal Engineering, 2018, T. 65, № 10, pp. 751-755 (переводная версия, опубликованная в журнале, индексируемом в SCOPUS).

4. **Барочкин, Ю.Е.** Разработка математической модели процесса деаэрации перегретой воды при её попадании в зону разрежения / Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2018, вып. 5. с. 5-11.

5. **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.

6. **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.

7. **Виноградов, В.Н.** Совершенствование водно-химического режима ТЭЦ среднего давления / В.Н. Виноградов, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин [и др.] // Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 3. с. 5-10.

8. **Мошкарин, А.В.** Электронное учебное пособие «Атмосферные деаэрационные установки» / А.В. Мошкарин, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, Ю.Е. Барочкин // Вестник ИГЭУ, 2010, вып. 3. с. 27-29.

Тезисы и полные тексты докладов конференций

9. **Барочкин, Ю.Е.** Моделирование процесса десорбции растворенного кислорода при попадании перегретой воды в зону разрежения / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков** // Междунар. (XX Всеросс.) науч.-техн. конф. «Бенардосовские чтения»: 29-31 мая 2019 г. Материалы конф. В 3 т. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2017. – 388 с. С. 60-62.

10. **Барочкин, Ю.Е.** Математическая модель деаэрации воды за счет начального эффекта / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский** // Теплоэнергетика // Четырнадцатая междунар. науч.-технич. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2019»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2019. – 142 с. С 15.

11. **Барочкин, Ю.Е.** Моделирование процесса деаэрации перегретой воды при попадании в зону разрежения / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Двадцать пятая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2019. – 1060 с. С. 853.
12. **Барочкин, Ю.Е.** Обобщение экспериментальных данных об эффективности деаэрации перегретой воды при её попадании в зону разрежения / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков** // Кибернетика энергетических систем: Сб. матер. XI науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», г. Новочеркасск, 25-26 сентября 2018 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2018. – 591 с. С. 459-464.
13. **Барочкин, Ю.Е.** О скорости коррозии медных проводников в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский** // Теплоэнергетика // Тринадцатая междунар. науч.-технич. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2018»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2018. – 176 с. С 10.
14. **Барочкин, Ю.Е.** Применение малогабаритных деаэрационных устройств для повышения эффективности технологических систем ТЭС / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский** // Теплоэнергетика // Тринадцатая междунар. науч.-технич. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2018»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2018. – 176 с. С 11.
15. **Барочкин, Ю.Е.** Десорбция растворенного кислорода на основе начального эффекта: экспериментальные данные и подход к моделированию / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков** [и др.] // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : сб. науч. тр. Седьмой Междунар. науч.-технич. конф., г. Ульяновск, 21-22 апреля 2017 г. В 2 т. Т.2. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 296 с. С. 151-155.
16. **Барочкин, Ю.Е.** Идентификация модели термического разложения гидрокарбонатов и гидролиза карбонатов в паровых котлах ТЭС среднего давления / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов** // Теплоэнергетика // Двенадцатая междунар. науч.-технич. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2017»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2017. – 260 с. С 36-37.
17. **Барочкин, Ю.Е.** Термодинамический подход к моделированию деаэрации перегретой жидкости / **Ю.Е. Барочкин, А.М. Потапов, Г.В. Ледуховский** [и др.] // Теплоэнергетика // Двенадцатая междунар. науч.-технич. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2017»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2017. – 260 с. С 34-35.
18. **Барочкин, Ю.Е.** Термодинамический подход к моделированию десорбции растворенного кислорода при попадании перегретой воды в зону пониженного давления / **Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков** [и др.] // Междунар. науч.-техн. конф. «XIX Бенардосовские чтения»: 31 мая-2 июня 2017 г. Материалы конф. В 3 т. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2017. – 388 с. С. 47-50.
19. **Барочкин, Ю.Е.** Компьютерный тренажер по эксплуатации атмосферной деаэрационной установки / **Ю.Е. Барочкин, А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Шестнадцатая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т. 3 – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 538 с. С. 222-223.
20. **Барочкин, Ю.Е.** Разработка автоматизированной обучающей системы по эксплуатации атмосферной деаэрационной установки / **Ю.Е. Барочкин, А.А. Коротков, Г.В. Ледуховский** // Теплоэнергетика // Пятая региональная науч.-технич. конф. студ. и асп. «Энергия-2010»: Материалы конф. В 6 т. Т.1. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина», 2010. – 156 с. С 37-38.

Барочкин Юрий Евгеньевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ КАВИТАЦИОННО-СТРУЙНОГО ДЕАЭРАТОРА

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.03.2020 г. Формат 60x84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 27

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

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