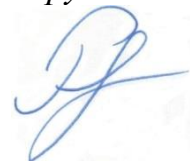


На правах рукописи



РОСЛЯКОВ Антон Николаевич

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДЕСОРБЦИИ РАСТВОРЁННОГО КИСЛОРОДА
В ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИХРЕВОМ ДЕАЭРАТОРЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2015

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Барочкин Евгений Витальевич**

Официальные оппоненты:

Лаптев Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива»

Пазушкина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Ульяновский государственный технический университет, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар.

Защита состоится « 26 » февраля 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya-Roslyakov_A.N..pdf

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Деаэрационные установки на тепловых электрических станциях (ТЭС) и в котельных используются для предотвращения коррозии энергетического оборудования путём удаления из воды коррозионно-активных газов. К неоспоримым преимуществам традиционных струйных, барботажных, плёночных, форсуночных деаэрационных установок можно отнести накопленный практический опыт их проектирования, наладки и эксплуатации. Недостатками таких деаэраторов являются сравнительно большая металлоёмкость, неустойчивость гидравлических процессов и вероятность возникновения гидравлических ударов, ухудшение деаэрации при малых и больших гидравлических нагрузках.

Наряду с традиционными конструкциями деаэрационных установок в настоящее время все большую популярность приобретает центробежно-вихревой деаэратор (ДЦВ) конструкции Б.А. Зимина, в котором удалось существенно интенсифицировать процесс массообмена за счёт вихревой организации потока в рабочей зоне. За последние 40 лет на ТЭС и в котельных России введены в эксплуатацию более 100 таких деаэрационных установок, конструкции которых защищены более чем 10 патентами. Вихревые деаэрационные элементы вводятся и в деаэраторы с комбинированными конструктивными схемами. С учётом простоты изготовления, малой металлоёмкости деаэрационных элементов, широкого диапазона регулирования рабочих нагрузок, простоты и безопасности эксплуатации, такие деаэраторы перспективны, в том числе на электростанциях, где ДЦВ установлены в качестве первой ступени деаэрационных установок подпитки теплосети и добавочной воды цикла.

Несмотря на распространённость и использование центробежно-вихревых деаэраторов при реконструкциях систем деаэрации, проектный выбор их типоразмера производится на основе опыта эксплуатации существующих деаэраторов, а выбор технологических режимов происходит обычно на основе пусконаладочных работ с учётом опыта эксплуатации существующих деаэрационных установок. Экспериментальные исследования процессов деаэрации в центробежно-вихревых деаэрационных аппаратах, как база для уточнения их конструктивных и получения режимных тепломассообменных характеристик, связаны с существенными временными и ресурсными затратами. Теоретическим исследованиям процессов тепломассопереноса в деаэрационных устройствах посвящены работы ряда авторов, однако к настоящему времени остаются невыясненными принципы разработки таких конструкций ДЦВ, которые бы обеспечивали требуемые показатели качества деаэрированной воды в диапазоне рабочих нагрузок. При теоретических исследованиях процессов теплообмена и массообмена межфазная поверхность и коэффициенты тепломассопереноса обычно не разделяются в ходе расчёта и рассматриваются в виде единого комплекса. Такой подход положен в основу существующих методов расчёта, базирующихся на теории подобия. Преимуществом такого комплексного подхода является получение расчётных зависимостей для деаэрационной ступени или аппарата в целом. К недостаткам комплексного подхода можно отнести применимость полученных результатов только для исследованных типов деаэрационных устройств. Независимое определение межфазной поверхности и коэффициента массопереноса для центробежно-вихревой ступени открывает новые возможности моделирования, расчёта и управления совмещёнными процессами теплопередачи и массопереноса. Особенный интерес представляет такое раздельное описание при сопоставлении вариантов конструкций для модернизации существующих или разработке новых конструкций и схем включения деаэраторов.

В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования межфазной поверхности и тепломассопереноса в центробежно-вихревых деаэраторах с целью повышения их эффективности путём совершенствования технологических режимов и схем включения является актуальным. Тематика исследований, направленных на повышение энергетической эффективности деаэрационного оборудования, соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденным указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011, что дополнительно подтверждает актуальность работы.

Целью работы является обеспечение нормативной концентрации растворённого кислорода в воде за деаэрационными установками с центробежно-вихревыми деаэраторами путём выбора их эксплуатационных режимов и схем на основе разработанных математических моделей и их программной реализации.

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

1. Разработка математической модели и метода расчёта площади межфазной поверхности в вихревом потоке жидкости в центробежно-вихревой ступени деаэрационных установок, работающих в режиме перегретой воды.

2. Проведение экспериментальных исследований десорбции из воды растворённого кислорода в центробежно-вихревой ступени деаэрационной установки для идентификации математической модели деаэрации воды.

3. Разработка эмпирического обеспечения математической модели деаэрации воды и создание на её основе метода расчёта десорбции растворённого кислорода деаэраторами центробежно-вихревого типа; программная реализация метода расчёта.

4. Практическая реализация результатов работы путём совершенствования эксплуатационных режимов и технологических схем центробежно-вихревых деаэрационных установок.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности*: «проблемы совершенствования действующих и обоснования новых ... систем ... водоподготовки; ... вопросы ... водных режимов»; *в части области исследования специальности* – пункту 2: «Исследование ... процессов, протекающих в агрегатах ...»; пункту 3: «... исследование, совершенствование действующих ... технологий ... использования ... водных и химических режимов...»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования ...»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. На основе комбинаторного подхода разработана математическая модель и метод расчёта площади межфазной поверхности в вихревом потоке в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем в режиме перегретой воды.

2. Для определения времени пребывания пузырьков пара в центробежно-вихревом деаэраторе разработана с учётом теплообмена между паром и жидкостью математическая модель их движения в вихревом потоке.

3. Получены новые экспериментальные данные по десорбции растворённого кислорода в центробежно-вихревом деаэраторе, на основе которых выполнена идентификация модели деаэрации воды и разработано эмпирическое обеспечение метода расчёта десорбции растворённого кислорода центробежно-вихревыми деаэраторами.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Разработан метод расчёта десорбции растворённого кислорода деаэраторами центробежно-вихревого типа, в основу которого положены расчётная зависимость для определения площади межфазной поверхности от режимных параметров и эмпирическая зависимость для расчёта коэффициента массопереноса по растворённому кислороду. Разработанный метод расчёта может быть использован при выполнении проектных и режимно-наладочных работ применительно к центробежно-вихревым деаэрационным установкам.

2. Разработанная математическая модель, метод расчёта десорбции растворённого кислорода и средства его компьютерной поддержки позволили сформулировать и решить задачи выбора технологически эффективных режимов, а также рассчитать проектные технологические показатели двухцелевой деаэрационной установки, предназначенной для деаэрации воды и получения при этом дистиллята. Результаты математического моделирования приняты к использованию при оперативной диагностике деаэрационной установки на базе центробежно-вихревого деаэрата ДЦВ-200 в ОмПО «Иртыш» (г. Омск).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением в пределах погрешности результатов расчёта показателей работы деаэраторов и экспериментальных данных; согласованностью полученных результатов с опубликованными результатами исследований других авторов; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации с использованием стандартизованных методов и средств измерения параметров.

Автор защищает:

- математическую модель и метод расчёта площади межфазной поверхности в вихревом потоке жидкости в центробежно-вихревой ступени деаэрационных установок, работающих в режиме перегретой воды;

- математическую модель движения пузырьков пара в вихревом потоке жидкости с учётом теплообмена между паром и жидкостью, позволяющую определить время пребывания пара в центробежно-вихревой зоне деаэрата;

- результаты экспериментальных исследований процесса деаэрации воды в деаэрационной установке с центробежно-вихревым деаэратом и разработанное на их основе критериальное уравнение для определения коэффициента массопереноса по растворённому кислороду;

- метод расчёта процесса десорбции растворённого кислорода центробежно-вихревыми деаэраторами, разработанный на основе полученных зависимостей для определения площади межфазной поверхности и коэффициента массопереноса по растворённому кислороду;

- результаты практического использования разработанных моделей и метода расчёта при режимной наладке вакуумной деаэрационной установки с деаэратом центробежно-вихревого типа, а также в ходе проектирования двухцелевой деаэрационной установки.

Реализация результатов работы. Результаты экспериментальных исследований деаэрационной установки на базе центробежно-вихревого деаэрата ДЦВ-200 оформлены и приняты в виде режимной карты в ОмПО «Иртыш» (г. Омск), а результаты математического моделирования приняты к использованию при оперативной диагностике указанной установки. Эскизный проект двухцелевой деаэрационной

установки на базе центробежно-вихревого деаэратора принят ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново) в качестве типового технического решения, которое может быть рекомендовано при разработке проектной документации для реконструкции существующих или проектировании новых установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ.

Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке математической модели и метода расчёта площади межфазной поверхности в вихревом потоке жидкости в центробежно-вихревой ступени деаэрационных установок, работающих в режиме перегретой воды; разработке модели движения пузырьков пара в вихревом потоке жидкости с учётом теплообмена между паром и жидкостью и проведении численных экспериментов с её использованием; в проведении экспериментальных исследований десорбции кислорода в центробежно-вихревом деаэраторе, разработке алгоритма идентификации модели по результатам экспериментальных исследований; разработке проекта уточнённой режимной карты и рекомендаций по повышению технологической эффективности работы деаэрационной установки при её режимной наладке; определении проектных технологических показателей двухцелевой деаэрационной установки, предназначенной для деаэрации воды и получения при этом дистиллята.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы и обсуждались на восьми международных конференциях: Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2011 и 2015 г.); Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ)» (Саратов, 2012 г.; Тамбов, 2014 г.; Иваново, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (Челябинск, 2013 г.); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия» (Иваново, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2015 г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 15 опубликованных работах, в том числе, в 7 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения по работе, списка использованных источников из 185 наименований. Текст диссертации изложен на 146 стр. машинописного текста, содержит 46 рисунков, 17 таблиц и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ опубликованных данных, посвящённых процессам тепло- и массообмена в деаэраторах различного типа. Отмечена существенная роль водно-химического режима и, в частности, обеспечения допустимого содержания газов в теплоносителях ТЭС, котельных и тепловых сетях для надёжной и безопасной работы оборудования. Вопросам тепломассообмена и деаэрации воды посвящено большое число исследований, среди которых можно выделить работы С.С. Кутателадзе, В.А. Пермякова, И.И. Оликера, В.И. Шарапова, А.Г. Лаптева и др. Анализ опубли-

кованных данных показал, что задача описания процессов формирования межфазной поверхности и массопереноса в вихревом потоке жидкости при деаэрации до настоящего времени не решена. В частности, не ясно влияние режимных факторов и гидродинамической обстановки в вихревой зоне центробежно-вихревого деаэратора на формирование площади межфазной поверхности и, в целом, на процесс деаэрации. С учётом результатов проведенного анализа опубликованных данных сформулированы цель и задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертации.

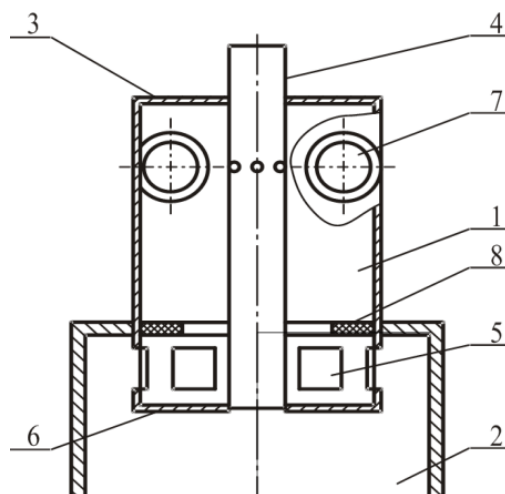
Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям процесса формирования межфазной поверхности в центробежно-вихревом деаэраторе. В ходе этих исследований последовательно решены следующие задачи:

- задача формирования площади межфазной поверхности в вихревом потоке в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем в режиме перегретой воды, позволяющая определить распределения по размерам фрагментов жидкости;
- задача движения пузырьков пара в центробежно-вихревой зоне с учётом теплообмена с жидкой фазой, позволяющая определить время пребывания пузырьков в вихревом потоке центробежно-вихревого деаэратора при различных режимах работы установки;
- разработка метода расчёта площади межфазной поверхности для центробежно-вихревых деаэраторов с учётом разного времени пребывания и разной степени перегрева воды по зонам аппарата.

Объектом исследования является центробежно-вихревой деаэратор конструкции Б.А. Зимина, в который для дегазации подаётся перегретая вода. Внешний вид и принципиальная схема центробежно-вихревого деаэратора приведена на рис. 1. Деаэратор состоит из корпуса 1, встроенного в центробежный сепаратор 2. Через центральное отверстие в верхней крышке 3 корпуса 1 проходит труба для отвода выпара 4. В части корпуса 1, встроенной в центробежный сепаратор 2, имеются окна 5, расположенные над днищем корпуса 6. Направляемая на деаэрацию вода, перегретая относительно температуры насыщения при давлении в паровом пространстве деаэратора, подаётся через тангенциальные подводящие патрубки 7. Благодаря тангенциальному подводу, поток воды приобретает вращательное движение внутри корпуса. Для организации вихревого потока воды имеется кольцевая перегородка 8, разделяющая входной и выходной отсеки корпуса 1. Из выходного отсека корпуса 1 через окна 5 вода поступает в центробежный сепаратор 2. Отвод воды из центробежного сепаратора 2 осуществляется через специальные тангенциальные патрубки.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид (а) и конструктивная схема (б) центробежно-вихревого деаэратора

На первом этапе исследования рассматривается задача формирования площади межфазной поверхности в потоке перегретой жидкости в центробежно-вихревом деаэраторе. При попадании перегретой жидкости в деаэратор с уменьшенным давлением среды происходит её мгновенное вскипание, при этом часть жидкости переходит в пар. Известно, что у воды межмолекулярные энергетические связи по сравнению с аналогичными связями между молекулами пара значительно сильнее. При построении модели формирования межфазной поверхности принято, что при переходе воды в перегретое состояние избыточная энергия расходуется на разрыв части межмолекулярных связей между молекулами воды. Доля образовавшегося пара из перегретой жидкости (степень сухости) определяется отношением энергии перегрева к теплоте парообразования: $x = c \Delta T / r = 1 / Ku$, где x – степень сухости или доля пара в смеси, c – удельная теплоёмкость воды, r – удельная теплота парообразования, Ku – критерий Кутателадзе, ΔT – перегрев воды относительно температуры насыщения при данном давлении.

Ранее в рамках комбинаторного подхода, разработанного в ИГЭУ, решена задача фракционирования: определение распределения фрагментов вещества по размерам при его разрушении за счёт внешнего подвода энергии. В тексте диссертации подробно показана аналогия между процессами фракционирования и парообразования, которая позволяет воспользоваться известным решением задачи фракционирования для описания процесса парообразования в перегретой воде. Выявленная аналогия позволяет для определения распределения фрагментов среды по размерам f'_i использовать следующую формулу

$$f'_i = \frac{(N - i - 1)!(N - K - 1)!}{(N - i - K)!N!} iK(K + 1), \quad (1)$$

где f'_i – массовая доля фрагментов i -го размера; N – число молекул в порции вещества единичной массы, i – число молекул воды во фрагменте, K – число единиц подведённой энергии. Число единиц подведённой энергии при заданном перегреве воды ΔT находится через отношение подведённой энергии к энергии, необходимой для перехода в паровую фазу одной молекулы $K = c \Delta T / e$. Энергия, необходимая для перехода одной молекулы из жидкой фазы в паровую фазу, определяется отношением удельной теплоты парообразования r к числу молекул в порции воды единичной массы: $e = r / N$. Очевидно, что при отсутствии подвода энергии ($K=0$) система остаётся в жидком состоянии, а при подводе энергии, достаточной для разрыва всех связей ($K= N-1$), все молекулы из жидкой фазы переходят в пар. Если фрагмент воды содержит только одну молекулу ($i=1$), то такое состояние соответствует его переходу в пар.

Приведённый в диссертации анализ выражения (1) показал, что массовая доля f'_i фрагментов среды с числом молекул i может быть найдена из рекуррентного соотношения по известной массовой доле фрагментов с меньшим числом молекул ($i-1$) в виде

$$f'_i = f'_{i-1} \frac{i}{(i-1)} \frac{(N - K - i + 1)}{(N - i)}. \quad (2)$$

Результаты расчётного анализа, проведённого согласно зависимостям (1)-(2), представлены на рис. 2. Вдоль оси абсцисс откладывается отношение числа разорванных связей к максимальному числу связей ($K/(N-1)$), вдоль оси ординат – доля образовавшегося при этом пара (при $i=1$) и доли фрагментов среды с большим числом молекул (при $i=2, 3, 4, 10$).

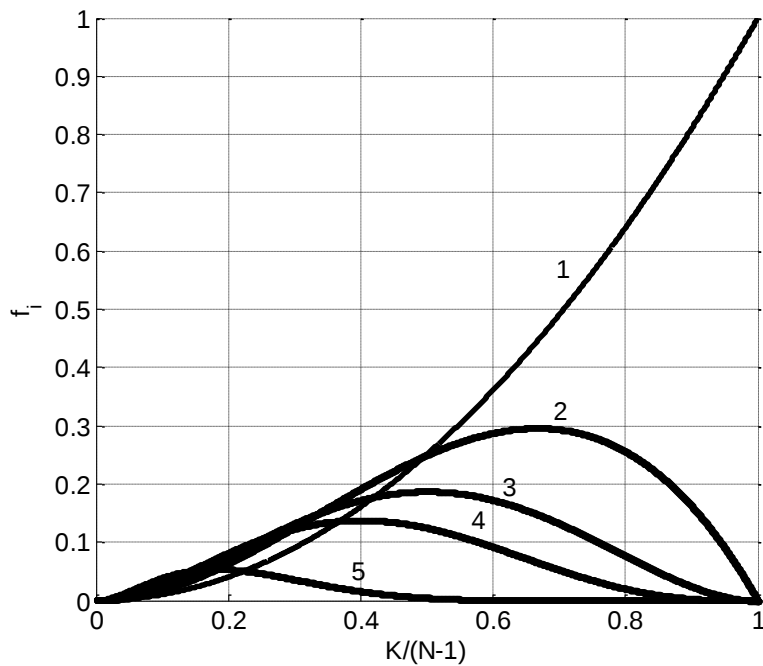


Рис. 2. Расчётные зависимости массовой доли фрагментов среды разного размера от подведённой энергии: 1–($i=1$) (пар); 2–($i=2$); 3–($i=3$); 4–($i=4$); 5–($i=10$)

Для линейной структуры межмолекулярных связей без снижения общности подхода массовая доля молекул, которые принадлежат межфазной поверхности, может быть определена через отношение массовой доли фрагментов среды данного размера к числу молекул во фрагменте. Обоснование этого положения для молекул линейной структуры подробно представлено в диссертации.

Свободная молекула с разорванными всеми межмолекулярными связями ($i=1$) принадлежит паре. Для фрагмента из двух молекул ($i=2$) обе молекулы принадлежат межфазной поверхности, а между самими этими молекулами внутрифазная связь не разорвана. Каждая из этих молекул с точки зрения энергетических затрат наполовину принадлежит паре, а наполовину – воде. На основании этого положения считается, что к паровой фазе принадлежит половина молекул, находящихся на поверхности фрагментов среды этого размера. Для фрагмента из трёх молекул ($i=3$) две молекулы, каждая из которых имеет по половине необходимой для перехода в пар энергии, находятся на границе, а их массовая доля определяется как одна треть массовой доли фрагментов этого размера. Аналогичные рассуждения определяют массовую долю молекул пара, находящихся на межфазной поверхности для фрагментов среды произвольного размера, через отношение массовой доли фрагментов среды к числу молекул в этом фрагменте f'_i/i . Общая массовая доля связанных молекул пара f_s , принадлежащих межфазной поверхности, определяется суммой массовых долей молекул, находящихся на поверхности соответствующих фрагментов $f_s = \sum_{i=2}^N f'_i/i$. Массовая доля свободных

молекул пара с полностью разорванными межмолекулярными внутрифазными связями f_v , которые не принадлежат к межфазной поверхности, определяется долей фрагментов, состоящих из одной молекулы $f_v = f'_1$. Общая массовая доля пара в смеси определяется суммой массовых долей свободных и связанных молекул пара. Эта суммарная доля пара в технической термодинамике носит название степени сухости и может быть представлена в виде: $x = f_v + f_s$.

Для тестирования предложенной модели формирования межфазной поверхности проведены специальные расчётные исследования. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 3 в виде зависимостей доли пара от подведённой энергии: кривая 1 соответствует доле свободных молекул пара; кривая 2 – доле связанных мо-

лекул пара межфазной поверхности; кривая 3 – суммарной доле свободных и связанных молекул пара. Линейная зависимость степени сухости от подведённой энергии (кривая 3) подтверждает обоснованность и достоверность полученных результатов, так как совпадает с известными термодинамическими соотношениями.

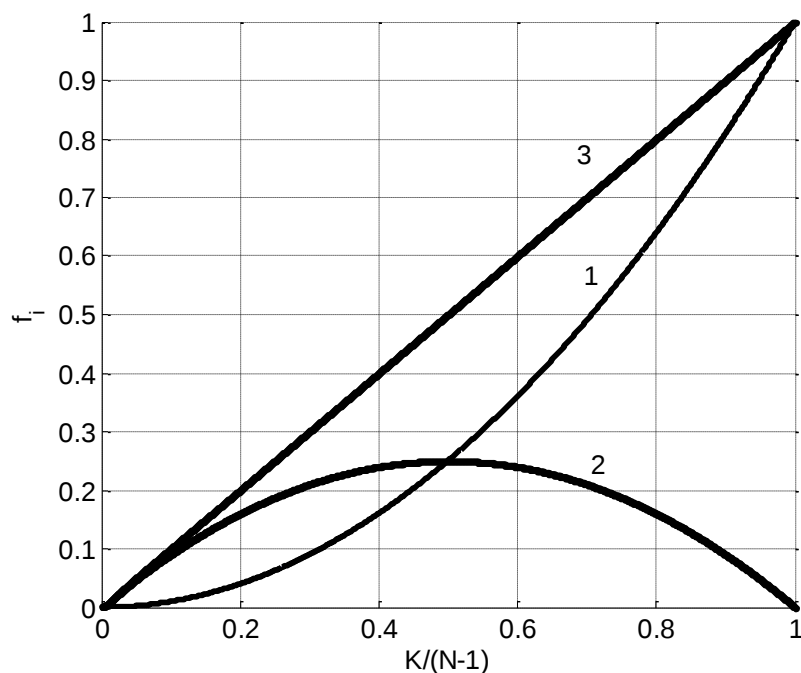


Рис. 3. Расчётные зависимости доли пара от доли подведённой энергии на парообразование: 1 – доля свободных молекул пара, 2 – доля связанных молекул пара; 3 – суммарная доля свободных и связанных молекул пара

Результаты, приведённые на рис. 2 и 3, удовлетворяют условию предельных переходов с точки зрения подведённой энергии. При отсутствии подвода энергии доля пара или степень сухости равна нулю, а при полностью разрушенных межмолекулярных связях вся жидкость переходит в пар. При этом массовая доля молекул межфазной поверхности максимальна при разрыве примерно половины всех связей между молекулами. Данный результат может рассматриваться как подтверждение обоснованности и непротиворечивости предложенного подхода к определению площади межфазной поверхности.

Суммарная площадь межфазной поверхности S определяется произведением числа молекул в порции единичной массы N , массовой доли молекул межфазной поверхности f_s и площади сечения одной молекулы S_0

$$S = N f_s S_0 \quad (3)$$

Результаты расчётного анализа площади межфазной поверхности для условий, характерных для центробежно-вихревого деаэратора, представлены на рис. 4.

Для определения времени пребывания теплоносителей в установке на втором этапе исследования рассмотрена задача движения одиночного пузырька пара в вихревом потоке жидкости. При разработке модели приняты следующие допущения. Вихревое движение жидкости представляется как квазитвёрдое, при котором проскальзывание между слоями вращающейся жидкости отсутствует, и вся жидкость в ступени вращается с одинаковой угловой скоростью ω . Система моделирования представлена на рис. 5,а в виде радиального элемента, вращающегося с указанной угловой скоростью. Выбранная система координат, показанная на рис. 5,б, вращается вместе с выделенным элементом с той же угловой скоростью. Для описания движения пузырька в неинерциальной системе отсчёта дополнительно учитывается центробежная сила, направленная от оси вращения. Кроме этого на пузырек в радиальном направлении действуют сила сопротивления и сила Архимеда. В уравнении движения записывается

обобщённая сила Архимеда, величина которой определяется суммированием центробежной силы и силы Архимеда, отнесённой к массе пузырька: $F_A / m = \omega^2 r (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) / \rho_{\text{г}}$, где m – масса газа в пузырьке, F_A – обобщённая сила Архимеда, ω – угловая скорость вращения жидкости. Кроме силы Архимеда на пузырёк в радиальном направлении действует сила сопротивления, которая, отнесённая к массе пузырька сферической формы, определяется следующим образом $F_c / m = -|v|v(3\rho_{\text{ж}}c_f)/(8\rho_{\text{г}}R)$, где F_c – сила сопротивления, v – скорость пузырька газа радиусом R ; $\rho_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – плотности газа и жидкости соответственно; $c_f = f(\text{Re})$ – коэффициент сопротивления в функции от числа Рейнольдса.

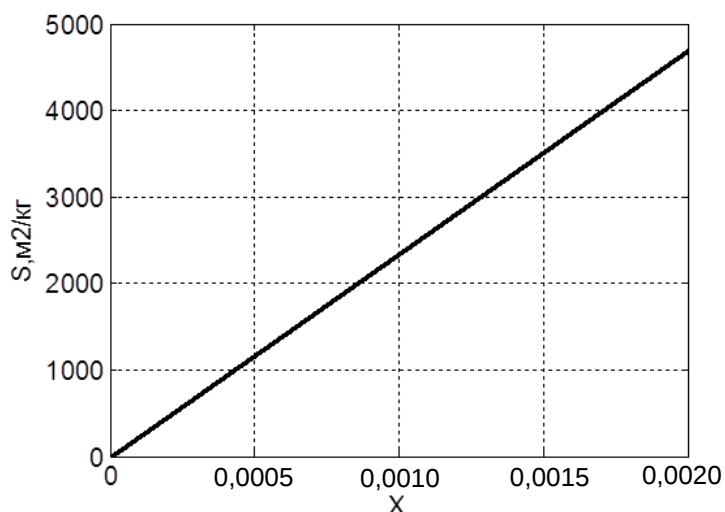


Рис. 4. Зависимость площади межфазной поверхности от величины, обратной критерию Кутателадзе, или степени сухости ($1 / Ku = x$), для условий потока в центробежно-вихревом деаэраторе

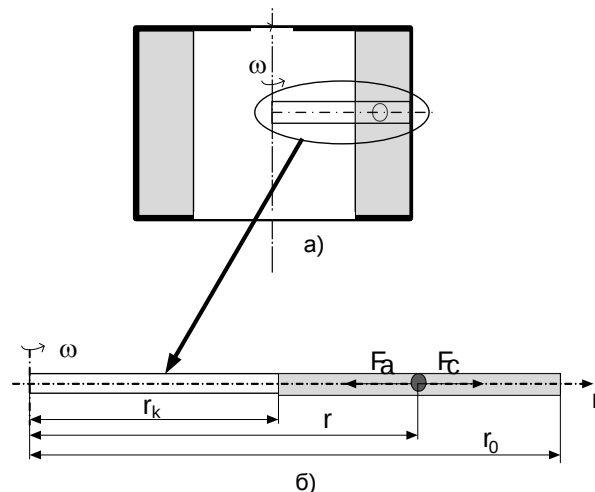


Рис. 5. Модельное представление центробежно-вихревого потока жидкости в ДЦВ (а) и схема сил, действующих на пузырёк в радиальном направлении (б)

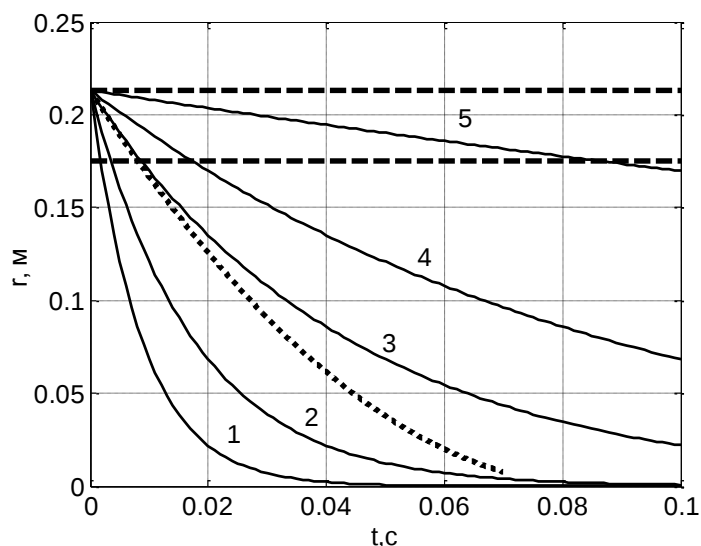
Дифференциальное уравнение движения (второй закон Ньютона) в общем случае является нелинейным дифференциальным уравнением в силу нелинейного характера зависимости коэффициента сопротивления от скорости движения. В частном случае, для которого справедлив закон сопротивления Стокса, дифференциальное уравнение становится линейным, вид которого в традиционных для теории колебания обозначениях записывается следующим образом

$$\ddot{r} + 2n\dot{r} + k^2r = 0, \quad (4)$$

где $k^2 = \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}} \omega^2$, $2n = \frac{3}{8} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{г}}} \frac{c_f}{R} |v|$. Для линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка (4) исследовано аналитическое решение, описывающее закон движения пузырька вдоль радиуса и закон изменения во времени его радиальной скорости.

При заданных геометрических размерах аппарата и радиальной координаты внутреннего слоя жидкости полученные зависимости позволяют оценить время, необходимое для выхода парогазового пузырька из слоя жидкости. В качестве примера выполнен расчёт для промышленного деаэратора ДЦВ-400, результаты которого приведены на рис. 6. Геометрические размеры внешнего и внутреннего радиусов кольцевого слоя жидкости показаны на рис. 6 горизонтальными штриховыми линиями. Сплошные линии на рис. 6 соответствуют закону движения пузырьков для закона Стокса, для которого найдено аналитическое решение уравнения (4).

Рис. 6. Зависимости радиальной координаты пузырька от времени в деаэраторе ДЦВ-400 при законе сопротивления Стокса (сплошные линии) и законе сопротивления Ньютона (пунктирная линия) при $Fr = 94,6$. Штриховые линии соответствуют координатам внешнего и внутреннего слоёв жидкости в центробежно-вихревой ступени, цифры соответствуют зависимостям при разных значениях коэффициента сопротивления: 1 – $n = 18 \cdot 10^3$; 2 – $36 \cdot 10^3$; 3 – $90 \cdot 10^3$; 4 – $180 \cdot 10^3$; 5 – $900 \cdot 10^3$



Следует отметить, что для характерных в вихревом потоке ДЦВ скоростей жидкости наиболее подходит закон сопротивления Ньютона. Для оценки погрешности, вносимой от использования закона Стокса, и уточнения значений полученных результатов дополнительно найдено решение уравнения движения для закона сопротивления Ньютона. Результаты расчёта, полученные численным решением уравнения движения для закона сопротивления Ньютона, приведены на рис. 6 пунктирной линией. Сопоставление полученных расчётных зависимостей показывает, что для условий ДЦВ относительная погрешность, вносимая использованием закона сопротивления Стокса ($n = 90 \cdot 10^3$, $Fr = 94,6$) при определении времени пребывания пузырька в вихревом потоке в условиях промышленного аппарата, не превысила 2 %, что следует признать допустимым для выполнения инженерных расчётов.

Расчётное время, необходимое для удаления газа из вихревого потока, равняется в рассматриваемом примере 0,086 с, а время пребывания жидкости в ступени при различных значениях производительности аппарата в диапазоне значений от 200 до 400 т/ч изменяется от 0,037 до 0,019 с.

Проведённые численные эксперименты показали, что, с одной стороны, время выхода отдельных пузырьков пара из воды и время пребывания воды в ступени деаэрации сопоставимы, а, с другой стороны, в условиях ДЦВ объёмная доля пара может превосходить объёмную долю жидкости. В таких условиях необходимо учитывать взаимодействие отдельных паровых пузырьков, что существенно осложняет расчёт кинетики процесса деаэрации и обуславливает целесообразность применения при моделировании термодинамического интегрального подхода (1)–(3).

Для определения межфазной поверхности согласно формуле (1) в качестве исходных данных используется значение перегрева воды, которое однозначно определяется давлением среды в вихревом потоке. В свою очередь, статическое давление в аппарате существенно меняется в силу изменения проходного сечения канала и скорости движения потока. Для каждой зоны (см. рис. 7) с учётом гидродинамической обстановки и режима работы характерны своё статическое давление и соответствующее значение температуры насыщения. Как показали результаты предварительных исследований, приведённые на рис. 6, времена пребывания пара и воды существенно зависят от геометрических размеров аппарата и режима его работы. С учётом сложной гидродинамической обстановки в каналах деаэратора и малого времени пребывания среды в нём предлагается проводить усреднение перегрева среды в аппарате с учётом температуры насыщения в каждой ступени и времени пребывания среды в ней следующим образом.

Общий для ДЦВ перегрев жидкости, значение которого однозначно определяется статическим давлением, предлагается определять по специальной методике усреднения перегрева воды, которая основана на учёте распределения времени пребывания среды в ступенях аппарата

$$\langle \Delta T \rangle = \sum_i \Delta T_i t_i / \sum_i t_i, \quad (5)$$

где индекс i соответствует номеру характерной зоны процесса согласно рис.7,б: 1 – зона вскипания перегретой жидкости, 2 – зона транспорта пароводяной смеси; 3 – зона центробежной сепарации.

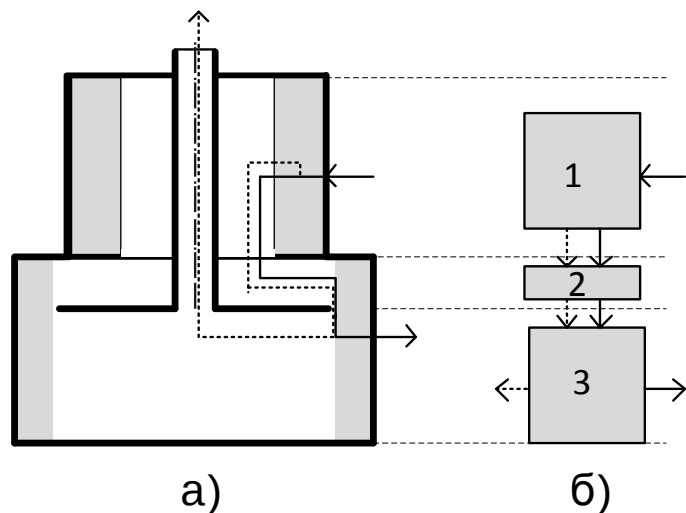


Рис. 7. Схема потоков (а) и структура модели центробежно-вихревого деаэратора (б). Цифры на рисунках под буквами (а) и (б) соответствуют: 1 – зона вскипания перегретой воды, 2 – зона транспорта пароводяной смеси; 3 – зона центробежной сепарации. Потоки пара показаны пунктирной линией, воды – сплошной линией

Представленная методика при расчёте межфазной поверхности позволяет учитывать время пребывания среды, производительность аппарата и ряд других режимных параметров, что существенно расширяет прогностические возможности модели.

В третьей главе представлен порядок проведения и обработки результатов экспериментальных исследований, реализованных на деаэрационной установке ДЦВ-200.

В рамках экспериментальных исследований решены следующие задачи:

1 – проведены экспериментальные исследования процесса деаэрации воды в деаэраторе центробежно-вихревого типа;

2 – для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели десорбции растворённого кислорода;

3 – на основе экспериментальных данных и результатов идентификации модели составлено критериальное уравнение, обеспечивающее расчёт значений коэффициента массопереноса по растворённому кислороду.

Экспериментальные исследования проведены в условиях промышленной эксплуатации деаэрационной установки ДЦВ-200 в котельной производственного объединения «Иртыш» (г. Омск). Объектом исследований являлся центробежно-вихревой деаэратор номинальной производительностью 200 т/ч, работающий под вакуумом в режиме перегретой воды (без подачи греющего пара) в составе двухступенчатой установки (ДЦВ – первая ступень, капельные деаэрационные устройства (КД) в деаэрационном баке – вторая ступень). Разрежение в трубопроводе отсоса выпара создаётся водоструйным эжектором; имеется смешивающий охладитель выпара.

Испытания проведены методом активного эксперимента. В каждом из 19 опытов, реализованных при различных значениях гидравлической нагрузки деаэратора, температуры воды перед ним, давлении в трубопроводе отсоса выпара и массовой концентрации растворённого кислорода перед деаэратором, выполнено от пяти до семи заме-

ров контролируемых параметров. В объём теплотехнического контроля включены измерения расхода воды в деаэратор, температуры и давления воды до и после деаэрата, давления в паровом пространстве деаэрата и в трубопроводе отсоса выпара, а также атмосферное давление. Используются преимущественно образцовые и лабораторные средства измерения. Массовая концентрация растворённого кислорода в потоках воды до и после деаэрата измерялась амперометрическим методом. Полученные результаты замеров контролируемых параметров подвергнуты первичной обработке, включающей отсев выбегов, учёт известных систематических погрешностей, а также расчёт окончательных результатов измерения контролируемых параметров.

При использовании полученных таким образом экспериментальных данных для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели деаэрации воды, в ходе которой площадь межфазной поверхности рассчитана предложенным ранее методом, а значения единственного параметра идентификации модели – коэффициента массопереноса по растворённому кислороду – определены по условию минимального рассогласования результатов расчёта и результатов измерения массовой концентрации растворённого кислорода в воде после деаэрата. Сводные данные по основным параметрам потоков теплоносителей в опытах и найденным значениям параметра идентификации модели приведены в табл. 1.

Результаты идентификации модели обобщены в виде критериального уравнения для определения критерия Шервуда (безразмерного коэффициента массопереноса по растворённому кислороду) в виде:

$$Sh = 2,331 \times 10^{-15} Fr^{0,526} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-2,832} Ku^{0,783}, \quad (6)$$

где $Sh = \frac{k_m d}{D_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}$ – критерий Шервуда по растворённому кислороду; k_m – средний по по-

верхности контакта фаз коэффициент массопереноса по растворённому кислороду, кг/(м²с); d – определяющий размер – диаметр корпуса центробежно-вихревой зоны деаэрата, м; $D_{\text{ж}}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде, м²/с;

$Fr = \frac{\omega^2 d}{2g}$ – критерий Фруда для центробежного течения, где ω – угловая скорость

потока жидкости, 1/с; $Ku = \frac{\tau}{c \Delta T}$ – критерий Кутателадзе.

Таблица 1. Основные условия опытов и результаты идентификации математической модели деаэрации воды

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя									
Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход воды на входе, т/ч	120,1	160,1	121,3	119,2	62,1	61,4	120,1	120,2	82,1	81,3
Температура воды на входе, °С	88,8	91,0	91,7	65,9	65,1	71,6	89,6	88,5	89,1	90,5
Температура воды на выходе, °С	87,9	90,0	90,6	64,1	64,8	70,5	89,0	87,4	87,9	88,4
Абсолютное давление в деаэраторе, бар	0,740	0,822	0,791	0,579	0,518	0,434	0,774	0,707	0,617	0,657
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе, мкг/дм ³	3710	4100	3920	6405	4940	4475	3915	3608	3730	3890
Массовая концентрация растворённого кислорода в воде на выходе из центробежно-вихревой ступени деаэрата, мкг/дм ³	2040	2435	1755	4610	3130	4015	1915	1900	750	750
Коэффициент массопереноса по результатам идентификации модели, мкг/(м ² с)	60,3	60,3	50,2	45,2	150,6	5,0	75,3	50,2	50,2	30,1

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя								
Номер опыта	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Расход воды на входе, т/ч	82,2	124,1	63,1	63,3	63,1	59,4	118,1	128,2	122,3
Температура воды на входе, °C	87,8	88,3	87,3	88,1	89,7	91,7	88,9	88,0	89,1
Температура воды на выходе, °C	86,8	86,0	84,3	85,1	89,0	90,2	87,8	86,6	87,8
Абсолютное давление в деаэраторе, бар	0,716	0,618	0,578	0,602	0,704	0,789	0,706	0,643	0,692
Массовая концентрация растворённого кислорода в воде на входе, мкг/дм ³	3350	3630	3480	3320	3760	3250	3300	3690	3995
Массовая концентрация растворённого кислорода в воде на выходе из центробежно-вихревой ступени деаэратора, мкг/дм ³	1545	610	563	580	1125	1848	1870	1555	1615
Коэффициент массопереноса по результатам иден- тификации модели, мкг/(м ² с)	40,2	45,2	22,6	22,6	70,3	15,1	50,2	62,8	55,2

Множественное корреляционное отношение для уравнения регрессии (6) составляет $R = 0,996$, а скорректированное значение этого показателя (с учётом поправки на число степеней свободы) равно $\bar{R} = 0,995$. Показатели значимости уравнения (6): доказательство с использованием критерия Фишера: значение критерия Фишера составило 107,2; критическое значение 2,4 (уровень значимости здесь и далее равен 0,95); доказательство с использованием критерия Стьюдента: значение критерия Стьюдента получено на уровне 496,1 при критическом значении 2,1.

Статистическая значимость каждого из включённых в уравнение факторов доказана с использованием критерия Стьюдента и частных критериев Фишера. Результаты проверки приведены в диссертации. Результаты доказывают, что влияние на функцию отклика каждого из рассматриваемых факторов является статистически значимым. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений критерия Шервуда представлено на рис. 8.

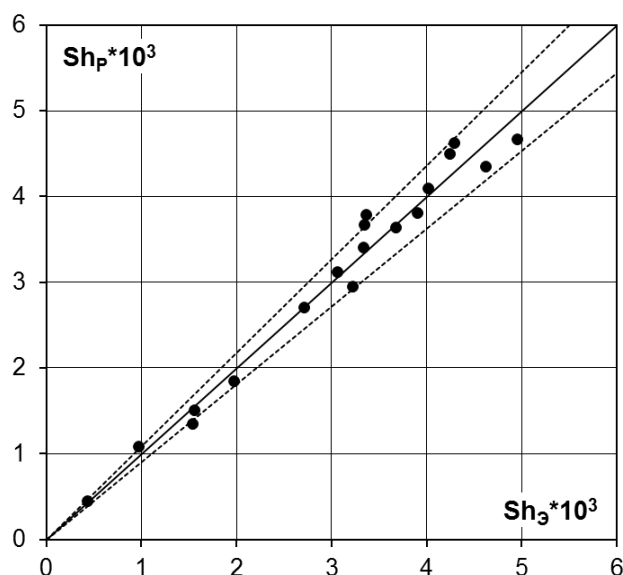


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных и расчётных значений критерия Шервуда: $Sh_э$ и Sh_p – соответственно экспериментальные и расчётные значения критерия Шервуда; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчётных значений; пунктирные линии – границы 95 % - го доверительного интервала, обусловленного погрешностью измерения параметров в условиях опытов; точки – результаты расчёта по уравнению регрессии (6)

Полученное критериальное уравнение (6) обеспечивает расчёт коэффициента массопереноса по растворённому кислороду в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем под вакуумом в режиме перегретой воды. Относительная погрешность расчётного определения коэффициента массопереноса при этом составила 6,5 %. Предложенное уравнение справедливо при изменении факторов в следующих диапазонах: критерия Фруда от 3,5 до 25,5; критерия Кутателадзе от 180 до 2075; отношения плот-

ности сухого насыщенного пара при давлении в деаэраторе к плотности воды при том же давлении и средней температуре воды в деаэраторе от $2,7 \cdot 10^4$ до $5,1 \cdot 10^4$.

В четвертой главе рассматриваются вопросы практического использования результатов работы. Практическая реализация проводилась по следующим направлениям:

- разработка на базе результатов экспериментальных исследований режимной карты по эксплуатации деаэрационной установки;
- разработка компьютерного модуля для расчёта процесса десорбции растворённого кислорода в центробежно-вихревой ступени деаэрации;
- определение проектных показателей двухцелевой деаэрационной установки.

Промышленные испытания легли в основу режимной карты по эксплуатации деаэрационной установки с деаэратором ДЦВ-200 ОмПО «Иртыш» (г. Омск). При этом выявлены границы регулировочных диапазонов изменения теплогидравлических параметров, в которых обеспечивается получение деаэрированной воды требуемого химического качества. Результаты математического моделирования приняты к использованию при оперативной диагностике указанной установки.

Разработанная во второй главе математическая модель деаэрации в центробежно-вихревой ступени легла в основу метода расчёта процесса десорбции растворённого кислорода и его программной реализации. Алгоритм расчёта включает следующие блоки: 1 – ввод исходных данных; 2 – нахождение согласно (3) площади поверхности раздела фаз в центробежно-вихревой ступени; 3 – расчёт согласно (6) коэффициента массопереноса по растворённому кислороду; 4 – расчёт характеристик процесса десорбции растворённого кислорода согласно разработанной модели; 5 – вывод результатов расчёта (расходов выпара и концентраций растворённого кислорода). На основе вычислительного алгоритма разработана программа для его реализации. Программа предназначена для исследовательского и учебного моделирования и расчёта процессов массообмена в центробежно-вихревом деаэраторе. При разработке программного обеспечения метода расчёта использован пакет MATLAB.

Разработанный метод расчёта и компьютерный модуль использованы при определении проектных показателей двухцелевой деаэрационной установки, предназначенной для деаэрации воды и получения при этом дистиллята. Первоначально эскизный проект такой установки разработан для Омской ТЭЦ-5, где четыре деаэрационных блока на базе деаэратора ДЦВ-670 рекомендованы к установке в схеме деаэрации подпиточной воды тепловой сети. Технологическая схема каждого деаэрационного блока (рис. 9) включает двухступенчатую деаэрационную установку (ДЦВ – первая ступень; КД в деаэрационном баке – вторая ступень), кожухотрубный конденсатор выпара (для получения дистиллята), охлаждаемый идущей на деаэрацию водой, пароводяной подогреватель – вторую ступень регулируемого подогрева исходной воды, а также оборудование системы отсоса выпара и вспомогательные элементы. Основной проблемой, решаемой в ходе проектирования установки, являлось определение её проектных технологических показателей в различных режимах работы: производительность установки по дистилляту определяется её производительностью по деаэрированной воде на подпитку теплосети и температурой исходной воды; массовая концентрация растворённого кислорода в деаэрированной воде также заранее не определена. Для решения задачи составлена методика расчёта, обеспечивающая: расчёт давлений по паровой части установки; поверочные тепловые расчёты конденсатора выпара и подогревателя второй ступени; расчёт десорбции растворённого кислорода в ДЦВ (здесь использован разработанный на предшествующем этапе компьютерный модуль) и расчёт

десорбции растворённого кислорода во второй ступени деаэрации. Результаты расчёта представлены в виде графиков зависимостей основных параметров работы установки от расхода воды на подпитку теплосети, основные зависимости показаны на рис. 10–12. В частности, показана возможность получения дистиллята в качестве добавочной воды паровых котлов с расходом до 13,5 т/ч от одного деаэрационного блока (рис. 10). Расчётом показано, что массовая концентрация растворённого кислорода в деаэрированной воде практически во всём диапазоне нагрузок и температуры исходной воды не превосходит нормативного значения (50 мкг/кг) (рис. 12).

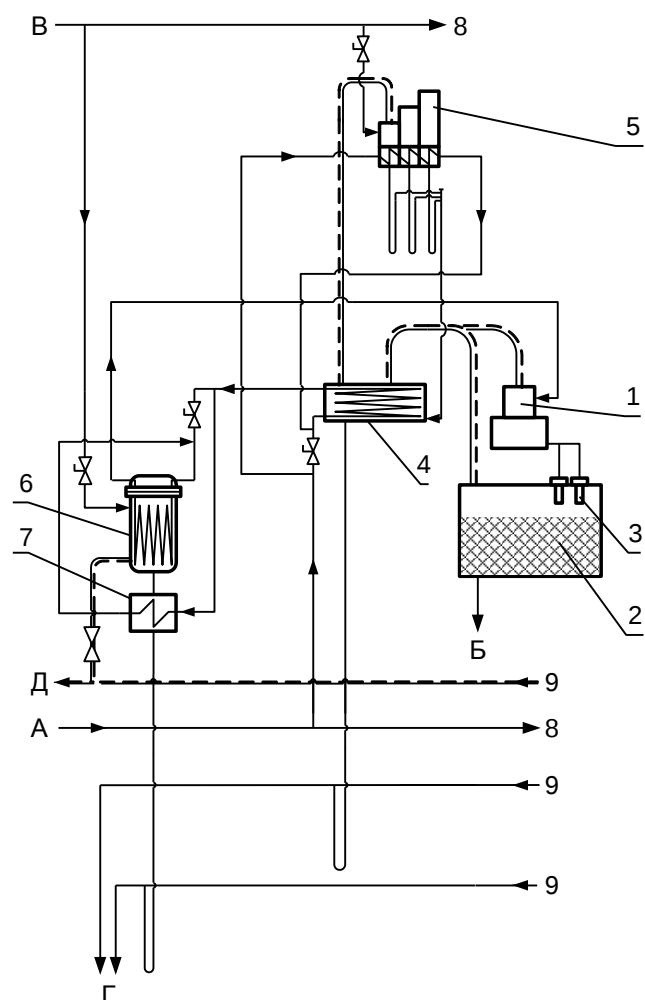


Рис. 9. Схема двухцелевого деаэрационного блока: 1 – ДЦВ; 2 – деаэрационный бак (корпус деаэратора ДСВ-800); 3 – капельное деаэрационное устройство; 4 – конденсатор выпара; 5 – пароструйный трехступенчатый эжектор; 6 – подогреватель второй ступени; 7 – охладитель дренажа подогревателя второй ступени; 8 – к другим блокам; 9 – от других блоков; А – подвод исходной воды; Б – отвод деаэрированной воды на подпитку теплосети; В – подвод пара; Г – отвод конденсата на подпитку основного цикла электростанции; Д – отсос паровоздушной смеси

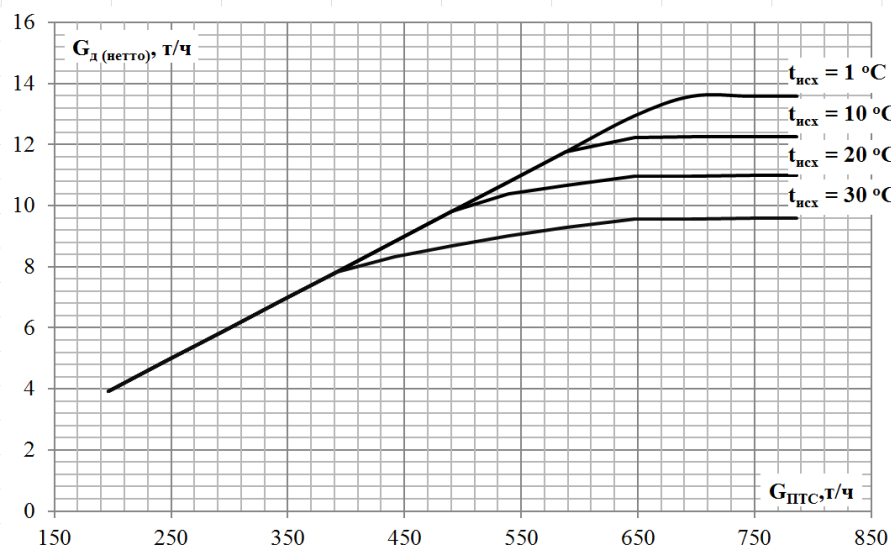


Рис. 10. Производительность нетто по дистилляту $G_{д(нетто)}$ в зависимости от расхода воды на подпитку тепловой сети $G_{ПТС}$ и температуры исходной воды $t_{исх}$

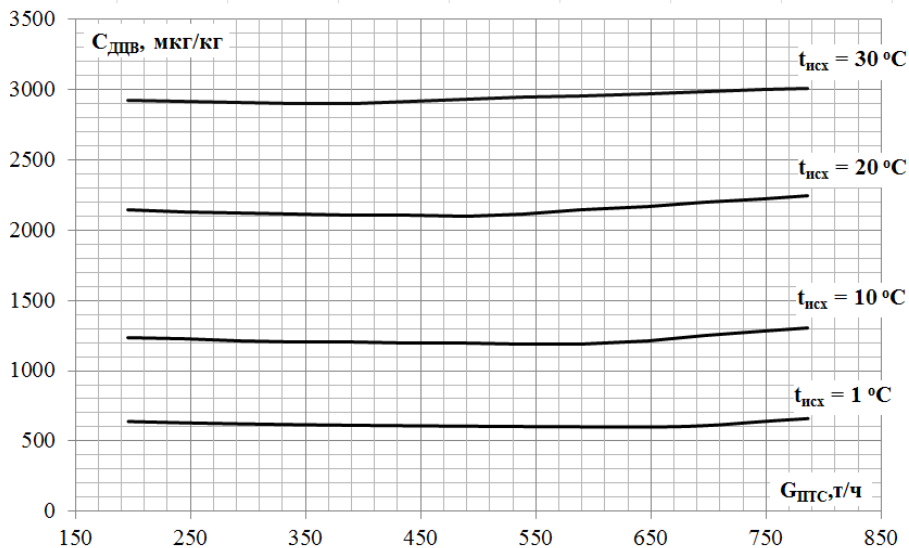


Рис. 11. Массовая концентрация растворённого кислорода в воде на выходе ДЦВ $C_{ДЦВ}$ в зависимости от расхода воды на подпитку тепловой сети $G_{ПТС}$ и температуры исходной воды $t_{исх}$

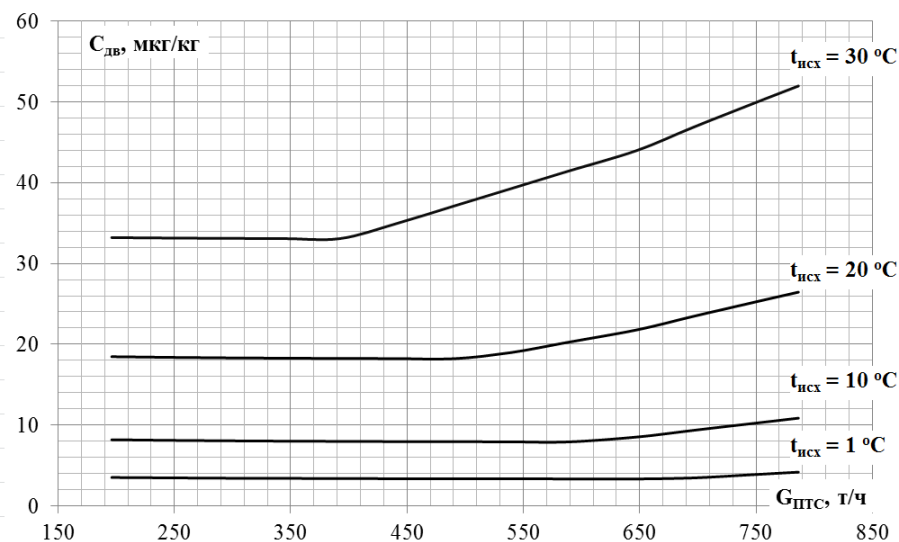


Рис. 12. Массовая концентрация растворённого кислорода в деаэрированной воде (подпиточной воде теплосети) $C_{ДВ}$ в зависимости от расхода воды на подпитку тепловой сети $G_{ПТС}$ и температуры исходной воды $t_{исх}$

Эскизный проект двухцелевой установки передан ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново), рекомендовавшему его в качестве типового технического решения при разработке проектной документации для реконструкции существующих или проектировании новых установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ.

Практическая реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведён комплекс расчётных и экспериментальных исследований деаэрации воды в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем в режиме перегретой воды, по результатам которых разработана математическая модель и метод расчёта процесса десорбции растворённого кислорода, позволяющие решать задачи повышения эффективности эксплуатации деаэраторов.

2. На основе комбинаторного подхода разработана математическая модель и метод расчёта площади межфазной поверхности в вихревом потоке в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем в режиме перегретой воды. Площадь межфазной поверхности в рамках предложенного подхода однозначно определяется перегревом воды относительно температуры насыщения в ступени деаэрации.

3. С учётом теплообмена между паром и жидкостью разработана математическая модель движения одиночных пузырьков пара в вихревом потоке в центробежно-вихревом деаэраторе, позволяющая определить время их пребывания в ступени. Проведённые численные эксперименты показали, что время выхода пузырьков пара

из воды и время пребывания воды в ступени деаэрации сопоставимы, что с учётом взаимодействия отдельных паровых пузырьков существенно осложняет расчёт кинетики процесса деаэрации и обуславливает целесообразность применения при моделировании интегрального подхода.

4. Получены новые экспериментальные данные по десорбции растворённого кислорода в центробежно-вихревом деаэраторе, на основе которых выполнена идентификация модели деаэрации воды и разработано эмпирическое обеспечение метода расчёта десорбции растворённого кислорода центробежно-вихревыми деаэраторами в виде критериального уравнения для определения коэффициента массопереноса по растворённому кислороду в ступени деаэрации. Относительная погрешность расчётного определения коэффициента массопереноса составила 6,5 %. Предложенное уравнение справедливо при изменении факторов в следующих диапазонах: критерия Фруда от 3,5 до 25,5; критерия Кутателадзе от 180 до 2075.

5. На основе полученной расчётной зависимости для определения площади межфазной поверхности от режимных параметров и критериального уравнения для расчёта коэффициента массопереноса по растворённому кислороду разработан метод расчёта десорбции растворённого кислорода деаэраторами центробежно-вихревого типа.

6. Результаты экспериментальных исследований деаэрационной установки на базе центробежно-вихревого деаэратора ДЦВ-200 оформлены в виде режимной карты и приняты к использованию в ОмПО «Иртыш» (г. Омск). Результаты математического моделирования приняты к использованию при оперативной диагностике указанной установки. Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения.

7. На основе разработанной математической модели, метода расчёта десорбции растворённого кислорода и средств его компьютерной поддержки сформулирована и решена задача расчёта проектных технологических показателей двухцелевой деаэрационной установки, предназначенной для деаэрации воды и получения при этом дистиллята. Разработанный эскизный проект двухцелевой деаэрационной установки принят ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново) в качестве типового технического решения, которое рекомендуется при реконструкции существующих или проектировании новых установок подпитки теплосети с открытым водоразбором мощных отопительных ТЭЦ, что подтверждается актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Жуков, В.П. Эволюция межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое / Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., **Росляков А.Н.** // Вестн. ИГЭУ – 2012. – вып. 4. – С. 12-16.
2. Барочкин, Е.В. Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., **Росляков А.Н.** // Вестн. ИГЭУ – 2012. – вып. 4. – С. 58-62.
3. Беляков, А.Н. Моделирование совмещенных тепломассообменных процессов в барботажной ступени центробежно-вихревых деаэраторов / Беляков А.Н., **Росляков А.Н.**, Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. // Химическая промышленность сегодня – 2015.–вып.6.– С. 32-41.
4. **Росляков, А.Н.** Анализ процесса дегазации в центробежно-вихревых деаэраторах / **Росляков А.Н.**, Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В., Зимин Б.А., Виноградов В.Н. // Вестн. ИГЭУ – 2014. – вып. 4. – С. 11-16.
5. Беляков, А.Н. Термодинамический подход к моделированию и управлению совмещенными процессами тепломассообмена в центробежных деаэраторах / Беляков А.Н., **Росляков А.Н.**, Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. // Известия ВУЗов. Экономика, финансы и управление производством – 2014. – вып. 3. – С. 103-109.

6. **Росляков, А.Н.** Комбинаторный подход к моделированию формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах / Росляков А.Н., Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. // Вестн. ИГЭУ – 2015. – вып. 5. – С. 64-69.
7. Ледуховский, Г.В. Эмпирическое обеспечение математической модели деаэрации воды в центробежно-вихревых деаэраторах / Ледуховский Г.В., **Росляков А.Н.**, Виноградов В.Н., Жуков В.П., Барочкин Е.В. // Вестн. ИГЭУ – 2015. – вып. 5. – С. 5-10.

Прочие публикации

8. Ненаездников, А.Ю. Моделирование формирования межфазной поверхности теплообмена в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Ненаездников А.Ю., **Росляков А.Н.**, Барочкин Е.В. // Материалы междунар. научно-техн. конф. «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере». – Челябинск: ЮУрГУ – 2013. – С. 233-234.
9. Барочкин, А.Е. Аналитическое решение задачи теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах / Барочкин А.Е., Жуков В.П., **Росляков А.Н.** // Материалы XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. – 2011. – Т.2. – С. 311-314.
10. Барочкин, А.Е. Моделирование совмещённых процессов в многофазной среде конденсатора турбины / Барочкин А.Е., Жуков В.П., **Росляков А.Н.**, Беляков А.Н. // Сб. трудов XXV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ25». – Саратов– 2012. – Т.7. – С. 134-135.
11. Жуков, С.В. Формирование межфазной поверхности в барботируемом слое / Жуков С.В., **Росляков А.Н.**, Жуков В.П., Барочкин Е.В. // Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: Материалы конференции. В 7 т. Т.4, – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014, – 372 с. С 236-238.
12. **Росляков, А.Н.** Оценка эффективности дегазации в центробежно-вихревом деаэраторе / Росляков А.Н., Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ледуховский Г.В. // Сб. трудов XXVII МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ27». – Тамбов – 2014. – т.8, – С. 26-28.
13. **Росляков, А.Н.** Исследование теплопереноса в центробежно-вихревых деаэраторах / Росляков А.Н., Барочкин Е.В., Жуков В.П. // Сб. трудов XXVII МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ27». – Иваново – 2014. – т.9, С. 27-29.
14. **Росляков, А.Н.** Моделирование совмещённых процессов теплообмена в центробежных деаэраторах/ Росляков А.Н., Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. // Материалы XVIII Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. – 2015. – Т.2. – С. 311-315.
15. **Росляков, А.Н.** Блочная двухцелевая деаэрационная установка на базе центробежно-вихревого деаэратора / Росляков А.Н., Петухова А.Ю., Ледуховский Г.В. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Двадцать первая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4 – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 303 с. С. 64.

Росляков Антон Николаевич

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ РАСТВОРЁННОГО КИСЛОРОДА В ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИХРЕВОМ ДЕАЭРАТОРЕ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 22.12.2015 г. Формат 60х84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №

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

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