На правах рукописи

НЕНАЕЗДНИКОВ Александр Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С БАРБОТАЖНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2014

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

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

Официальные оппоненты:
Лаптев Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Шатова Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, муниципальное предприятие «Ивгортеплоэнерго», начальник службы контроля и диагностики тепловых энергоустановок

Ведущая организация:
ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Защита состоится «11» апреля 2014 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, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.
Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya__Posl._var__22.01.2014.-.pdf.
Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___»_____2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Барботажные устройства имеют ряд преимуществ и особенностей эксплуатации в технологических условиях. К преимуществам этих устройств относятся возможность формирования и регулирования в широком диапазоне межфазной поверхности, которая во многом определяет кинетику процессов переноса энергии и массы. Ограничения, связанные с эксплуатацией барботажных устройств, обусловлены их неустойчивой работой при частичных нагрузках и возможностью появления гидравлических ударов при определенных сочетаниях режимных параметров. В энергетике барботажные устройства часто используются в термических деаэраторах, в частности, атмосферного давления. При этом существует большое число вариантов конструктивного исполнения и размещения барботажных устройств: в виде перфорированного коллектора, провального или непровального листа, центробежной ступени или конфузора, которые размещаются в деаэрационной колонке или в деаэраторном баке. На практике распространение получили барботажные устройства в виде затопленного в деаэраторном баке парового коллектора, хорошо зарекомендовавшие себя по характеристикам надежности и эффективности.

Одной из причин, ограничивающих распространение затопленных барботажных устройств деаэраторных баков, является их потребность в более высокопотенциальном паре по сравнению с основным паром деаэратора. Барботажный пар должен иметь давление, большее, чем давление основного пара, минимум на величину, равную сумме давления столба жидкости над барботажным устройством и минимального подпора давления перед его отверстиями. Общая потребность деаэратора в паре (основном и барботажном) определяется тепловым балансом установки, поэтому увеличение доли барботажного пара приводит к уменьшению доли основного пара, а использование пара большего давления, в свою очередь, приводит в условиях ТЭС к ухудшению показателей тепловой экономичности комбинированного производства тепловой и электрической энергии. Таким образом, необходимо определить такие условия работы рассматриваемого барботажного устройства, при которых заданные показатели качества деаэрированной воды обеспечиваются при минимальном расходе высокопотенциального барботажного пара и, следовательно, при минимальном ухудшении показателей тепловой экономичности ТЭС.

Исследованиям затопленных барботажных устройств деаэраторов посвящены работы ряда авторов, однако к настоящему времени остаются невыясненными подходы к разработке таких конструкций, которые бы позволяли эффективно формировать межфазную поверхность, обеспечивая требуемые показатели качества деаэрированной воды при минимальном расходе барботажного пара. Решение этой задачи экспериментальным путем сопряжено с материальными затратами, а также сложностями измерения параметров теплоносителей в условиях реальной гидродинамической обстановки в деаэраторе. В связи с этим актуальной является разработка математических моделей, позволяющих формулировать и решать задачу оптимального распределения подачи пара по рабочему объему барботажной ступени.

Традиционно задачи тепло- и массопереноса при барботаже решаются раздельно, хотя очевидна их связь: площадь межфазной поверхности, определяемая размерами и количеством пузырьков в слое барботируемой жидкости, зависит от интенсивности теплообмена, а ее величина, в свою очередь, существенно влияет на интенсивность массообмена и теплообмена. При расчете процессов теплообмена и массообмена межфазная поверхность и коэффициенты тепломассопереноса обычно не разделяются в ходе расчета и рассматривается в виде единого комплекса. Такой подход положен в основу существующих методов расчета, базирующихся на теории подобия. Преимуществом такого комплексного подхода является получение готовых расчетных зависимостей для барботажной ступени или барботажного аппарата в целом. К недостаткам подхода можно отнести применимость полученных результатов только для исследованных конструкций барботажных устройств. Независимое или раздельное определение межфазной поверхности и коэффициентов переноса для барботажной ступени открывает новые возможности управления совмещенными процессами тепло- и массо-

переноса. Особенный интерес представляет такое описание при сопоставлении вариантов конструкций для модернизации существующих или разработке новых барботажных устройств деаэраторов.

Таким образом, исследования, направленные на разработку математического описания формирования межфазной поверхности в барботажных устройствах деаэраторов, совмещенных процессов тепло- и массопереноса, выбор на основе численных экспериментов режимных и конструктивных параметров аппарата, являются актуальными для энергетики и смежных отраслей промышленности.

Целью работы является повышение эффективности атмосферных деаэрационных установок с барботажными устройствами путем перераспределения подачи барботажного пара на основе разработанных математических моделей и их программной реализации.

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

1. Разработка математической модели процессов тепломассопередачи в барботажных ступенях атмосферных деаэраторов с учетом влияния эволюции межфазной поверхности и циркуляции воды в деаэраторном баке.
2. Проведение экспериментальных исследований десорбции растворенного кислорода в барботажной ступени деаэраторного бака с коллектором для подачи пара погружного типа.
3. Разработка алгоритма решения задачи теплообмена и массообмена в барботажных ступенях атмосферных деаэраторов и программного комплекса для его компьютерной реализации, обеспечивающих расчет показателей работы барботажных ступеней при изменении значений конструктивных и режимных параметров.
4. Проведение идентификации разработанной математической модели на основе полученных экспериментальных данных и разработка на ее основе инженерного метода расчета атмосферного деаэратора с погружным коллектором для подачи барботажного пара.
5. Практическая реализация результатов работы путем совершенствования конструкций и режимов работы деаэраторов в условиях промышленной эксплуатации.

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. Разработана ячеечная математическая модель процессов тепломассообмена в барботажной ступени деаэраторного бака атмосферных деаэраторов, позволяющая учитывать влияние на процесс деаэрации площади межфазной поверхности и циркуляции теплоносителей, характеристики которой определены в ходе решения гидродинамической задачи с использованием прикладного программного пакета.
2. На базе разработанной модели сформулирована и решена задача оптимального распределения подачи барботажного пара по высоте ступени и размерам паровых пузырьков, обеспечивающего минимальный расход барботажного пара при заданном качестве деаэрированной воды по содержанию растворенного кислорода.
3. Получены новые экспериментальные данные, раздельно характеризующие эффективность работы различных деаэрационных устройств атмосферного деаэратора, на основании которых выполнена идентификация ячеечной модели деаэрации в барботажной ступени деаэраторного бака с погружным коллектором.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Разработан метод расчета барботажной ступени с погружным коллектором, в основу которого положены полученные расчетная зависимость для определения удельной площади межфазной поверхности от режимных параметров и эмпирическая зависимость для определения коэффициента массопередачи в барботируемом слое по растворенному кислороду. Разработанный метод расчета может быть использован при выполнении проектных и режимно-наладочных работ применительно к атмосферным деаэрационным установкам.

2. Разработан программный комплекс, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2013615107), по расчету многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством, реализующий разработанный алгоритм решения задачи тепломассообмена в многофазной среде.

3. Разработанная математическая модель, метод расчета и его компьютерная поддержка позволили сформулировать и решить задачу по оптимальному перераспределению пара в барботажной ступени деаэрации, что обеспечило повышение эффективности атмосферных деаэрационных установок с барботажными устройствами в условиях промышленной эксплуатации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением результатов расчета показателей работы оборудования и экспериментальных данных; сопоставлением 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:

– ячеечную математическую модель процесса тепломассообмена в барботажной ступени деаэратора, учитывающую влияние на процесс деаэрации эволюции межфазной поверхности и циркуляции потоков жидкости в деаэраторном баке;

– метод использования результатов решения гидродинамической задачи, полученного с использованием прикладного программного пакета, в ячеечной модели барботажной ступени деаэрации;

– алгоритм решения задачи тепломассообмена в барботажных ступенях деаэраторов и средства его компьютерной поддержки;

– метод расчета барботажной ступени атмосферных деаэраторов, разработанный на основе полученных зависимостей для определения удельной площади межфазной поверхности и коэффициента массопередачи по растворенному кислороду;

– результаты практического использования разработанного программного комплекса при выборе вариантов конструктивного исполнения и режимной наладке атмосферных деаэраторов с барботажными устройствами.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при выборе вариантов реконструкции деаэрационной установки питательной воды машинного зала участка вторичных энергоресурсов коксохимического производства ОАО «Северсталь» (г. Череповец), программный комплекс по расчету деаэраторов с барботажной ступенью передан ОАО «Тепломонтажналадка» (г. Кострома), где используется при проектировании деаэрационных установок, а также для предварительного определения технологических параметров режима работы деаэраторов в ходе их пуско-наладочных или режимно-наладочных испытаний. Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке математического описания эволюции межфазной поверхности в барботажной ступени с учетом конденсации пара при теплообмене, развитии полученной модели путем учета циркуляции воды в баке, разработке методики использования результатов решения гидродинамической задачи в ячеечной модели расчета собственно деаэрации в барботажной ступени, в проведении экспериментальных исследований теплопередачи в барботажной ступени атмосферного деаэра-

тора, разработке алгоритма идентификации модели по результатам экспериментальных исследований, проведении численных экспериментов, получении результатов по оптимальной организации процесса в барботажной ступени, разработке рекомендаций по повышению технологической эффективности работы деаэрационной установки при её реконструкции.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на пяти конференциях, в том числе, четырех международных: V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Иваново, 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XVIII Бенардосовские чтения (г. Иваново, 2013 г.); Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-26» (г. Нижний Новгород, 2013 г.); VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (г. Иваново, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (г. Челябинск, 2013 г.)

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 14 опубликованных работах, в том числе, в 7 статьях в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК), двух статьях в сборнике научных трудов; получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 133 наименований. Текст диссертации изложен на 155 стр. машинописного текста, содержит 42 рисунка, 14 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, посвященных процессам тепло- и массообмена в аппаратах различного типа. Отмечается определяющая роль водно-химического режима и, в частности, обеспечения допустимого содержания газов в теплоносителях ТЭС, котельных и тепловых сетях для надежной и эффективной работы оборудования. Вопросам деаэрации воды в той или иной мере посвящено большое число исследований, среди которых можно выделить работы С.С. Кутателадзе, В.А. Пермякова, И.И. Оликера, В.И. Шарапова и др. Анализ опубликованных данных показал, что задача описания процессов формирования межфазной поверхности, теплопередачи и массопередачи в барботажных ступенях деаэраторов до настоящего времени не решена. В частности, не ясно влияние гидродинамической обстановки в барботажных ступенях различной конструкции на формирование площади межфазной поверхности и собственно процесс деаэрации. С учетом результатов проведенного анализа опубликованных данных сформулированы задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертации.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям процесса десорбции растворенного кислорода в барботажной ступени атмосферного деаэратора. Для этого последовательно решены следующие задачи:

- задача формирования межфазной поверхности в слое жидкости для пузырьков газа с учетом теплообмена с жидкой фазой;
- обобщение задачи формирования межфазной поверхности в слое жидкости для пузырьков газа с учетом теплообмена с жидкой фазой и массообмена при конденсации пара в пузырьках;
- обобщение задачи тепломассообмена за счет дополнительного учета массообмена при десорбции кислорода в барботажном слое;

• задача оптимального управления формированием межфазной поверхности за счет режимных и конструктивных факторов с целью минимизации потребления пара при обеспечении заданного содержания растворенного кислорода в деаэрированной воде;

• использование результатов решения гидродинамической задачи, полученного с применением прикладного программного пакета, в ячеечной модели барботажной ступени.

На первом этапе исследования рассмотрена задача описания движения и теплообмена для одиночного пузырька в слое жидкости в одномерной постановке. Выбранная система координат и направление осей представлены на рис. 1(а). На глубине h_0 от поверхности жидкости образуется пузырек радиусом r_0 с температурой газа T_0. Считается, что на пузырек при его всплытии, кроме силы Архимеда и силы тяжести, действует также сила гидродинамического сопротивления. Уравнение движения пузырька вдоль выбранной оси под действием перечисленных сил записывается в виде

$$m\ddot{x} = -mg - F_c + F_A, \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, m – масса газа в пузырьке, mg – сила тяжести, F_c – сила сопротивления, F_A – сила Архимеда. Силы сопротивления и Архимеда, отнесенные к массе пара, для пузырька сферической формы находятся из выражений:

$$\frac{F_c}{m} = -\frac{3}{8}\frac{\rho_ж}{\rho_г}\frac{c_f}{r}|v|v; \qquad \frac{F_A}{m} = \frac{V_г\rho_ж g}{V_г\rho_г} = \frac{\rho_ж}{\rho_г}g; \qquad (2)$$

где v – скорость пузырька газа радиусом r; $\rho_г$ и $\rho_ж$ – плотности газа и жидкости соответственно; $c_f = f(Re)$ – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса; $V_г$ – объем пузырька газа. Следует отметить, что радиус пузырька и плотность газа внутри пузырька меняются за счет изменения давления и температуры газа. Связь параметров пара в пузырьке на первом этапе моделирования описывается уравнением состояния идеального газа

$$V_г P/T = R_\mu m/\mu, \text{ где } \quad P = P_o + \rho_ж g(h_o - x). \qquad (3)$$

Здесь T – температура газа, μ – молярная масса газа, R_μ – универсальная газовая постоянная, P – давление газа в пузырьке, определяемое суммой давлений над поверхностью жидкости P_0 и давлением столба жидкости.

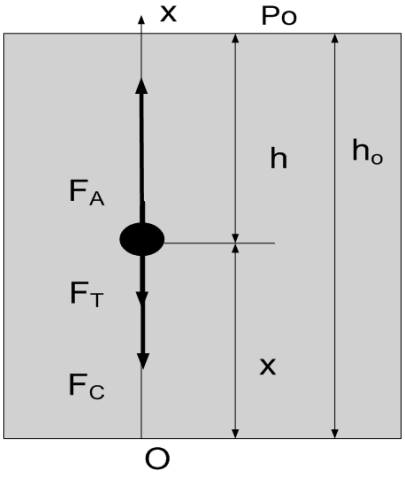


Рис. 1. **Схема сил, действующих на пузырек газа в жидкости**

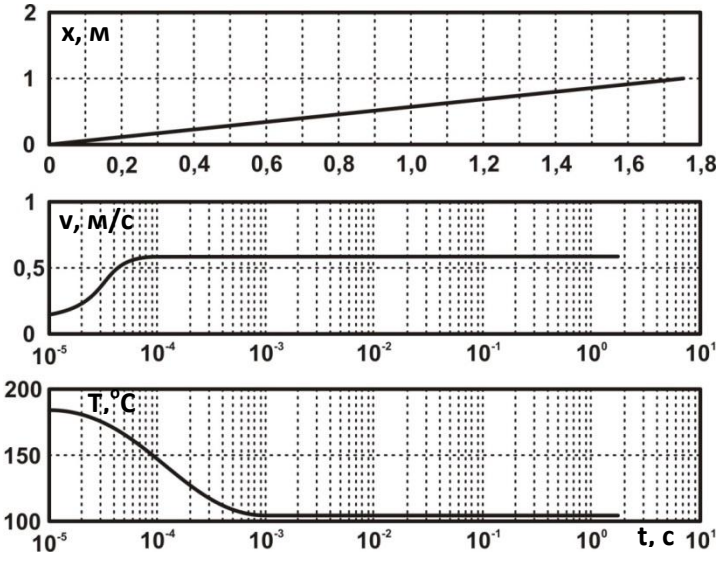


Рис. 2. **Зависимость координаты пузырька газа, скорости его движения и температуры газа от времени**

Разность температур жидкости и газа обусловливает теплообмен между ними, который описывается законом Ньютона: $dQ = \alpha(T_ж - T)Sdt = m_г c dT$, где α – коэффициент теплоотдачи, c – теплоемкость пара, dQ – количество переданной тепловой энергии за время dt через поверхность площадью S. Для пузырька сферической формы уравнение Ньютона представляется в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3\alpha}{r\rho_г c}(T_ж - T). \qquad (4)$$

Плотность газа с учетом (3) выражается как функция температуры и координаты. Размер сферического пузырька находится через его объем. Система дифференциальных уравнений (1), (4) относительно трех неизвестных функций x(t), v(t), T(t) для ее численного решения представляется в машинном виде: каждое уравнение разрешается относительно первых производных неизвестных функций, а правые части не содержат производных этих функций:

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad \frac{dv}{dt} = -g - \frac{3}{8}\frac{\rho_ж}{\rho_г(x,T)}\frac{c_f}{r(x,T)}|v|v + \frac{\rho_ж}{\rho_г(x,T)}g; \qquad \frac{dT}{dt} = \frac{3\alpha}{c_г r(x,T)\rho_г(x,T)}(T_ж - T). \quad (5)$$

Формализованная запись системы (5) позволяет получить ее численное решение стандартными методами. В нашем случае для решения системы (5) используется метод Рунге-Кутта четвертого порядка. Иллюстрируется решение системы (5) для следующих исходных данных: α = 3000 Вт/(м^{2}К), r_0 = 0,005 м; $\rho_ж$ = 1000 кг/м^3; h_0 = 1 м; P_0 = 105 кПа; c = 1918 Дж/(кг К); $T_ж$ = 373 К. Результаты решения представлены на рис. 2 в виде зависимостей искомых функций от времени процесса: x(t), v(t), T(t). Анализ полученных данных показывает, что для условий, характерных для атмосферных деаэраторов, температура пара и скорость пузырька практически мгновенно за время 10^{-3} и 10^{-4} секунды соответственно достигают установившихся значений. Температура пара внутри пузырька быстро устанавливается и достигает температуры насыщения. Полученные результаты позволили при дальнейшем исследовании пренебречь временем переходных процессов, а значения температуры пара и скорости пузырьков считать равными установившимся значениям. При этом в дальнейшем установившиеся значения скорости всплытия пузырьков в условиях атмосферной деаэрации принимались по экспериментальным данным, полученным С.С. Кутателадзе для различных размеров пузырьков. Расчетный анализ также показал, что при изменении температуры пузырька газа от 180 ^{o}C до 102 ^{o}C и подъеме его при этом на 1 м размер пузырька уменьшился на 3 %, а площадь межфазной поверхности – на 7 %.

На втором этапе исследования рассматривается задача описания движения и тепломассообмена между пузырьками и жидкостью с учетом фазового перехода, обусловленного конденсацией пара в пузырьке. На основании исследований, проведенных в рамках первого этапа, сделаны следующие допущения: температура пара в пузырьке равна температуре насыщения при данном давлении (T_n = const); скорость всплытия пузырька равна равновесной скорости пузырька такого же размера (v = v(r)), давление пара в пузырьке равно гидростатическому давлению жидкости в слое. В силу интенсивного перемешивания барботируемого слоя температура жидкости считается постоянной во всех точках, то есть деаэраторный бак является для жидкости реактором идеального перемешивания. Уравнение состояния газа (3) переписывается с учетом переменной массы газа. Количество теплоты, отводимого от пузырька пара при его конденсации через оболочку пузырька определяется согласно закону Ньютона (4) (r_p – удельная теплота парообразования):

$$dQ = r_p dm_г = \alpha(T_ж - T_n)Sdt, \qquad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (6) позволяет определить зависимость массы газа в пузырьке от времени

$$m(t) = \left[\sqrt[3]{m_o} + (A_2/3)\int_0^t (1/A_3(t))\,dt\right]^3, \text{ где } \begin{array}{l} A_1 = \sqrt[3]{(3/4\pi)T_n R_\mu/\mu},\ A_2 = (4\pi\alpha A_1^2/r_p)(T_n - T_ж), \\ A_3 = \left[P_o + \rho_ж g(h_o - x)\right]^{2/3} \end{array} \qquad (7)$$

Результаты расчетных исследований, выполненных согласно (7), представлены на рис. 3. При малой температуре жидкости наиболее интенсивно происходит теплообмен, конденсация и, соответственно, уменьшение массы газа пузырька. При достижении нулевой массы происходит схлопывание пузырька пара в слое жидкости. При таких режимах газ из пузырьков опять возвращается в слой жидкости, что снижает эффективность деаэрации воды.

Дальнейшее развитие модели выполнено в направлении учета десорбции растворенного кислорода из воды в барботажной ступени. Совместное рассмотрение указанных процессов обусловливается их неразрывной связью. Известно, что чем меньше размер пузырьков, тем больше их удельная межфазная поверхность на единицу массы пара, и тем интенсивней протекают тепломассообменные процессы. Однако при интенсивном теплообмене с водой мелкие паровые пузырьки могут «схлопываться», при этом газ возвращается в воду.

Для учета деаэрации расчетная область дополнена потоками кислорода в паровой и водяной фазах. Эскиз ступени с указанием основных потоков теплоносителей приведен на рис. 4(а). Пар подается в слой жидкости снизу через коллектор 1. Деаэрируемая вода 2 поступает в ступень сверху. За счет разности температур между пузырьками пара и воды происходит теплообмен, а за счет разности парциальных давлений газов – деаэрация воды. Неконденсируемые газы покидают ступень вместе с паром 3.

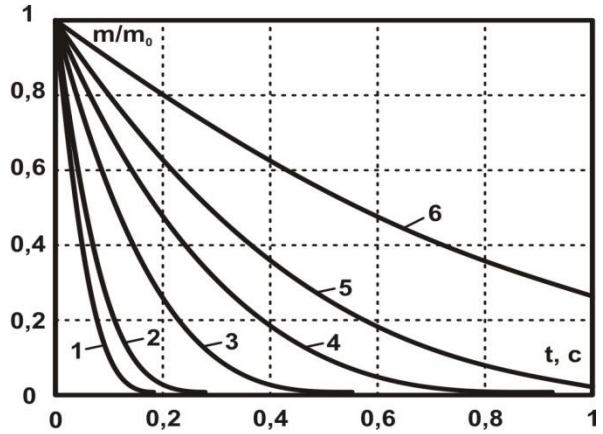


Рис. 3. **Зависимость относительной массы пара от времени движения пузырька при различной температуре жидкости в барботируемом слое (начальный диаметр пузырька 5 мм):** 1 – 85; 2 – 90; 3 – 95; 4 – 97; 5 – 98, 6 – 99 ^{o}C

Решение задачи тепломассообмена при моделировании деаэрации воды в барботажной ступени выполняется на основе ячеечного подхода, которое позволяет описывать эволюцию плотности распределения вещества по выбранным фазовым координатам при совместном протекании двух и более процессов. В предлагаемом подходе искомой функцией является плотность распределения вещества по выбранному фазовому пространству. В качестве координат фазового пространства выбраны вертикальная геометрическая координата z и размер пузырька x. В качестве третьей координаты выбрана ось Ф, вдоль которой откладываются дискретные значения, показывающие фазовое состояние и потоки теплоносителей: 1 – пар, 2 – вода, 3 – газ в паровой фазе, 4 – газ в жидкой фазе. Структура выбранного фазового пространства представлена на рис. 4(б).

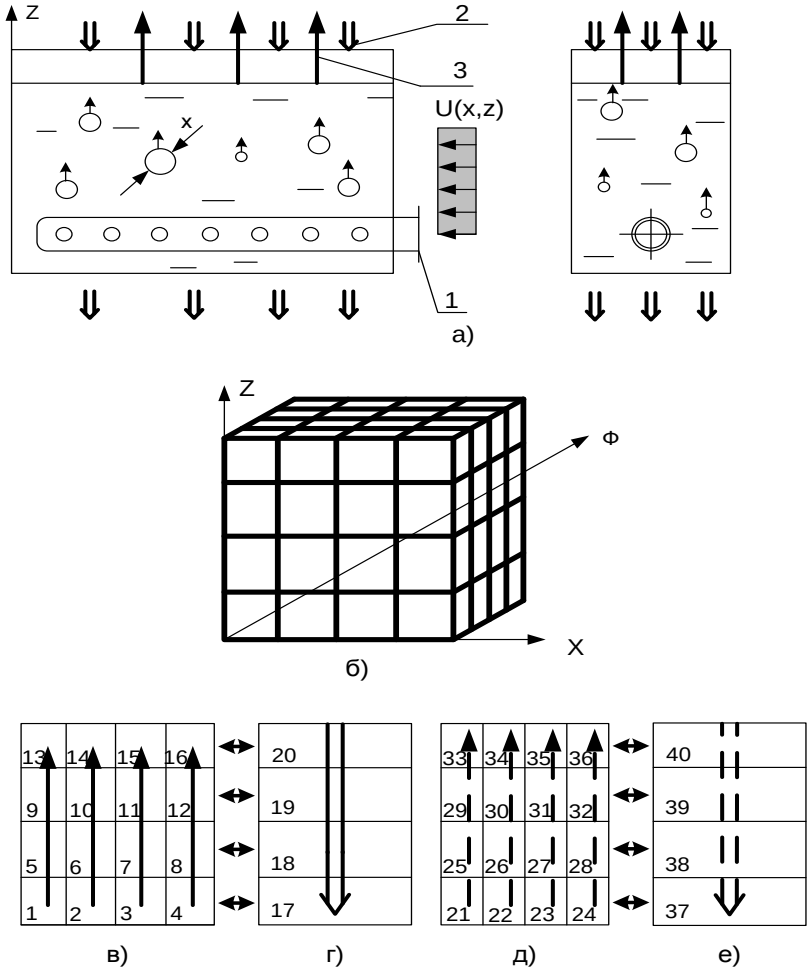


Рис. 4. **Эскиз барботажной ступени деаэрации (а), расчетное фазовое пространство (б), схемы движения пара (в), воды (г), газа в паровой фазе (д) и газа в жидкой фазе (е)**

Искомая плотность распределения вещества (массы) по ячейкам представляется при расчете одномерным вектором $S=\{S_i\}$, где ин-

декс i соответствует номеру ячейки согласно рис. 4. Алгоритм расчета искомого распределения S в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и материального балансов для определения потоков энергии или вещества между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить доли или вероятности переходов за рассматриваемый промежуток времени $\Delta\tau$. Суммирование потоков из всех ячеек в i-ю ячейку системы определяет ее состояние в следующий момент времени

$$S_i^{k+1} = \sum_j S_j^k p_{ij} \qquad (8)$$

где p_{ij} – доля перехода из j-й ячейки в i-ю, верхний индекс – номер шага по времени.

Для определения долей переходов p_{ij} применяется метод конечных объемов, который при описании системы оперирует с аналитическими решениями частных задач для отдельных подсистем. В частности, при сделанных допущениях о постоянном значении температуры пара в состоянии насыщения температура воды в слое определяется из теплового баланса согласно выражению

$$t_2 = \left(kFt_n + t_{20}c_2Q_{20}\right) / \left(kF + c_2Q_{20}\right) ,$$

где $F = \sum_i S_i^k f_i$ – площадь межфазной поверхность, f_i – удельная межфазная поверхность, приходящаяся на единицу массы i-й фракции, k – коэффициент теплопередачи; t_n – температура насыщения в ступени; Q_{20} – расход воды на входе в ступень; c – теплоемкость воды.

Доли перехода массы вдоль оси Ф в единицу времени при конденсации пара для пузырьков i-й крупности, скорость дрейфа вдоль оси x, доли перехода пара по оси z в единицу времени находятся из выражений

$$p'_{\Phi i} = \frac{k(t_n - t_2)f_i}{r} \; ; \quad p'_{xi} = \frac{1-(1-p'_{\Phi i})^{1/3}}{\Delta x_i / x_i} \; ; \quad p'_{zi} = \frac{v_i}{\Delta z} \; ; \qquad (9)$$

где r – удельная теплота парообразования; Δx_i – размер ячейки вдоль оси x; v – скорость пузырька; Δz – размер ячейки вдоль оси z. Считая значения долей переходов для ячейки за малое время $\Delta\tau$ постоянными, составляется балансовое дифференциальное уравнение, описывающее изменение содержания ячейки, в виде

$$\frac{dS}{Sd\tau} = -(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}) . \qquad (10)$$

Решение полученного дифференциального уравнения позволяет определить долю вещества, оставшегося в рассматриваемой ячейке, следующим образом

$$p_{oi} = S_i / S_{oi} = \exp(-(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi})\Delta\tau) . \qquad (11)$$

Считая, что доли перехода за время $\Delta\tau$ пропорциональны скоростям изменения со временем этих долей, получим расчетные зависимости для долей переходов для пара вдоль координат Ф, x, z соответственно,

$$p_{\Phi i} = (1-p_{oi})\frac{p'_{\Phi i}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}}; \; p_{xi} = (1-p_{oi})\frac{p'_{xi}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}}; \; p_{zi} = (1-p_{oi})\frac{p'_{zi}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}} . \qquad (12)$$

Для самых мелких пузырьков принято, что их переход в более мелкий класс соответствует «схлопыванию» пузырьков и переходу их массы в жидкую фазу

$$\tilde{p}_{\Phi 1} = p_{\Phi 1} + p_{x1}; \; p_{x1} = 0 . \qquad (13)$$

Вычисленные доли переходов по воде, пару позволяют определить массовые концентрации газа в воде и паре. Разность концентраций газа в воде и паре обусловливает процесс деаэрации

$$\Delta G_g = k_m f(k_g S_{igп} / S_{iп} - S_{igв} / S_{iв})\Delta\tau , \qquad (14)$$

где ΔG_g – массовый поток газов от воды к пару, $i_в$, $i_п$, $i_{гв}$, $i_{гп}$ – индексы относятся к ячейкам воды, пара, газа в воде и газа в паре соответственно (см. рис. 4), k_m – коэффициент массопереноса, k_g – константа фазового равновесия.

Численный пример решения задачи выполнен для следующих исходных данных: Q_{20} = 100 кг/с; t_{20} = 95 °С; c_2 = 4180 Дж/(кг К); r = 2452840 Дж/кг; t_n = 100 °С. Рабочее пространство разделено на ячейки со следующими векторами значений фазовых координат: x = [0,1 1 5 10], мм; z = [0,25 0,5 0,75 1], м; Ф = [1(пар) 2(вода) 3(газ в паре) 4(газ в воде)]. Рабочий объем ступени разбит на 40 ячеек, порядок нумерации которых показан на рис. 4: номера ячеек с 1 по 16 относятся к пару; с 17 по 20 – к воде; с 21 по 36 – к газу в паровой фазе; с 37 по 40 – к газу в жидкой фазе. Подача пара в ячейку с заданным номером одновременно показывает размер подаваемых пузырьков и геометрическую координату точки подачи, воздух в деаэратор поступает с водой в верхние ячейки аппарата (i = 39, 40).

Результаты расчета согласно модели (8)-(14) представлены на рис. 5 в виде установившегося распределения пузырьков по высоте слое и по крупности. Представленные распределения позволяют в каждой точке фазового пространства определить площадь межфазной поверхности, что, в свою очередь, позволяет рассчитать кинетику тепломассообменных процессов.

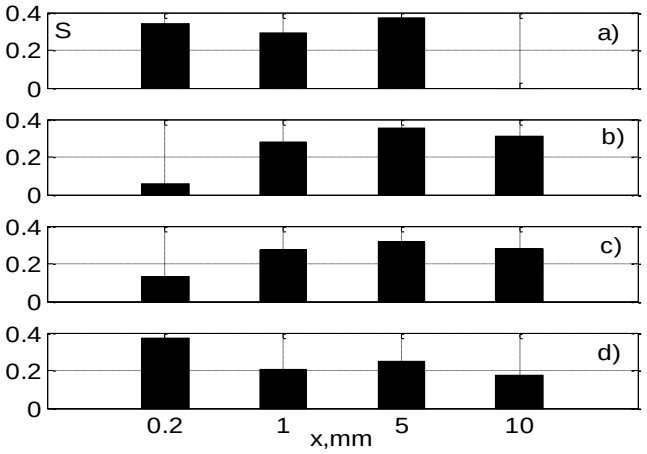


Рис. 5. **Распределение пузырьков пара по размерам x и по высоте слоя z:** a) z=1, b) 0,75; c) 0,5; d) 0,25 м

На следующем этапе исследования рассматривается задача оптимального формирования межфазной поверхности в барботажной ступени, которая формулируется в следующем виде: определить оптимальное распределение подачи пара в ступень по высоте слоя z и по размеру пузырьков x U(x,z), которое наилучшим образом обеспечивает протекание процесса деаэрации в барботажной ступени. В качестве критерия наилучшего протекания процесса выбирается минимальный расход пара на деаэрацию, при котором обеспечивается заданное качество деаэрированной воды. Математическая формулировка задачи записывается следующим образом

$$Q_{10}(Y, U, \alpha) \Rightarrow \min_{U(x,z)} \qquad (15)$$

где Q_{10} – расход подаваемого в ступень пара, Y – вектор исходных данных, U(x,z) – искомое оптимальное управление процессом, α – заданные ограничения, которые в нашем случае определяются требованиями к качеству воды по содержанию растворенного кислорода. Целевая функция или критерий оптимизации определяется, как показано выше, минимальным расходом барботажного пара.

Данная задача относится к классу вариационных задач, в ходе решения которой определяется вид двухмерного оптимального управления U(x, z). В рассматриваемом тестовом примере решение задачи сводится к многомерной оптимизационной задаче, которая решается методом статистического программирования. Решение задачи приведено на рис. 6 в виде зависимости массовой концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде от общего расхода пара, подаваемого в ступень. Каждая точка на графике соответствует известному варианту управления U(x, z). Оптимальное решение, которому соответствует минимальный расход пара (Q_{10} = 2 кг/с) при обеспечении заданного качества деаэрированной воды (c_2 = 10 мкг/дм^3) выделено на рисунке кружком. Этой точке соответствует подача всего пара

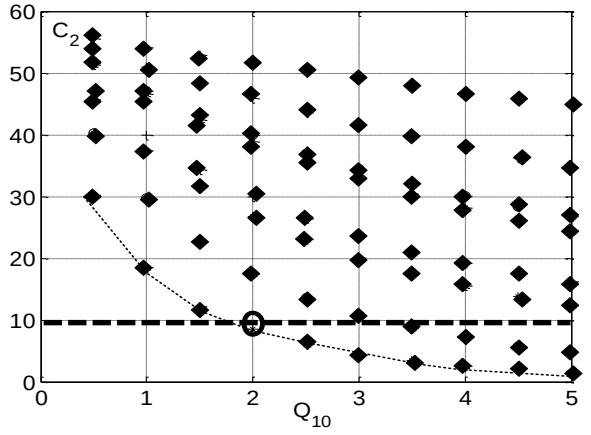


Рис. 6. **Решение задачи оптимального управления формированием межфазной поверхности в виде зависимости массовой концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде C_2, мкг/дм^3, от расхода пара на барботаж Q_{10}, кг/с, при различных условиях подачи пара:** штриховой линией показано ограничение по качеству деаэрированной воды, оптимальное решение показано кружком (подача пара вниз слоя пузырьками размером 1 мм)

в ячейку фазового пространства с номером 2 (i=2) (см рис. 4(в)). Подача более мелких пузырьков вниз слоя (i=1) приводит к схлопыванию пузырьков. Полученное значение удельного расхода пара на барботаж (20 кг/т – килограмм пара на тонну деаэрированной воды) соответствует экспериментально обоснованным рекомендациям других авторов (Ледуховский Г.В., Коротков А.А.) для барботажного устройства рассматриваемого типа.

В рассмотренной ранее ячеечной модели деаэрации в барботажной ступени движение жидкости вдоль вертикальной оси представлено одномерной моделью. Однако известные экспериментальные и расчетные исследования показали, что при барботаже жидкость в слое начинает циркулировать. Очевидно, что такой характер движения приводит к изменению времени пребывания теплоносителей в слое и, следовательно, к изменению условий протекания тепломассообменных процессов. Для оценки влияния циркуляции жидкости на процесс деаэрации были проведены дополнительные исследования. Целью этих исследований являлась разработка математического описания процесса деаэрации воды в барботажной ступени с учетом циркуляции воды в слое. Для достижения цели последовательно решены следующие задачи: разработка математической модели движения, учитывающей циркуляцию жидкости в барботажной ступени, интеграция модели движения в ячеечную модель деаэрации, оценка влияния циркуляции жидкости на тепломассообмен в деаэраторе.

Эскиз ступени с указанием основных потоков теплоносителей приведен на рис. 7(а). Следует отметить особенность использования ячеечного подхода для моделирования барботажной ступени деаэратора с циркуляцией жидкости. Наличие в слое затопленного парового коллектора приводит к изменению гидродинамической обстановки в слое: подача пара через коллектор в слой жидкости обусловливает появление циркуляционных течений, характер которых существенно зависит от условий подачи пара. Разработка модели деаэрации в ступени с учетом циркуляции воды выполняется в два этапа. На первом этапе моделируется движение теплоносителей, на втором этапе совместно с движением рассматривается тепломассоперенос. Последовательное рассмотрение процессов возможно в том случае, если тепломассообмен не оказывает существенного влияния на характер движения теплоносителей. Расчетный анализ показал, что такое последовательное представление процессов с приемлемой для инженерных расчетов точностью возможно при незначительном недогреве (до температуры насыщения) подаваемой в барботажное устройство воды, величина которого для рассматриваемых условий подачи пара не должна превы-

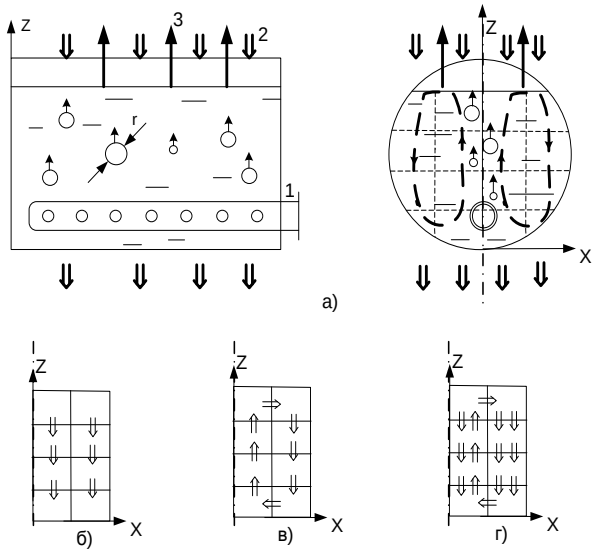


Рис. 7. **Эскиз барботажной ступени деаэратора (а) и расчетные схемы расходных (б), циркуляционных (в) и суммарных (г) потоков воды в ступени**

шать 8 °С. Модель деаэрации воды в барботажной ступени аппарата с учетом циркуляции жидкости описывается согласно (8)-(14). В качестве искомой функции также рассматривается плотность распределения вещества по фазовому пространству.

При описании движения жидкости рассматривается плоская задача, то есть выбираются две геометрические координаты (x, z), направление которых показано на рис. 7. Для оценки влияния циркуляции жидкости на процесс деаэрации движение воды в каждой ячейке модельно представлено суперпозицией (или суммой) двух скоростей: расходной и циркуляционной. Расходная скорость обеспечивает равенство в каждом горизонтальном сечении расхода жидкости через аппарат и направлена согласно рис. 7(б) вертикально вниз. Направление циркуляционной составляющей скорости схематично представлено на рис. 7(в). Суммарный расход жидкости через произвольное горизонтальное сечение, обусловленный циркуляционными составляющими скорости, равен нулю. Построенное на основании приведенных допущений поле скоростей жидкости (рис. 6(г)), с одной стороны, обеспечивает выполнение материальных балансов в каждом горизонтальном сечении, и, с другой стороны, позволяет оценить влияние циркуляции жидкости на тепломассообмен в слое. В предельных случаях предложенная модель движения жидкости переходит в более простые: при отсутствии циркуляции – в модель идеального вытеснения, а при отсутствии подачи жидкости в слой описывает работу аппарата периодического действия с циркулирующей загрузкой. Для учета влияния циркуляции на процесс движения в модель вводится параметр K, равный отношению скорости циркулирующего потока к скорости расходного потока: $K = v_x/v_z$. При равенстве нулю этого параметра поток двигается в соответствии с моделью идеального вытеснения, а равенство бесконечности соответствует нулевой расходной скорости через аппарат. Расходная составляющая скорости определяется величиной расхода воды через ступень, а параметр отношения скоростей K в дальнейшем рассматривается как параметр идентификации модели.

Для определения параметра идентификации модели K могут быть использованы два подхода: экспериментальный и расчетный. Прямые экспериментальные исследования полей скоростей в барботируемом слое связаны со значительными ресурсными и временными затратами и в промышленных условиях практически невыполнимы. Наиболее перспективным является расчетный подход, позволяющий без привлечения экспериментальных данных моделировать движение жидкости, что особенно актуально при разработке новых конструкций аппаратов. Построение модели движения и определение циркулирующих в слое потоков по известным полям скоростей является отдельной задачей, решение которой приводится ниже.

Предложенное описание движения теплоносителей и принятые допущения позволяют представить структуру фазового пространства в виде, показанном на рис. 8. В качестве геометрических координат рассматриваются ширина x и высота z барботируемого слоя, в качестве третьей координаты – вертикальная скорость или размер пузырьков пара r, который в соответствии со сделанными допущениями однозначно связан со скоростью. Четвертая координата Ф, принимающая дискретные значения, характеризует тип теплоносителя и его фазовое состояние: Ф=[1(пар) 2(вода) 3(газ в паре) 4(газ в воде)]. Для пара (Ф=1) фазовое подпространство представляется набором областей, каждая из которых относится к пузырькам определенного размера согласно рис. 8 (а). Для воды (Ф=2) структура фазового подпространства представлена на рис.8 (б). На рис. 8 (в)-(г) показаны структуры фазовых подпространств для газа в паровой фазе (Ф=3) и газа в жидкой фазе (Ф=4). Перечисленные области могут быть наглядно представлены в виде трехмерного фазового пространства, изображенного на рис. 8 (ж).

Численный пример решения задачи выполнен при тех же условиях, что указаны ранее для рис. 7, за исключением следующих: рабочий объем ступени разбит на 80 ячеек, порядок нумерации которых показан на рис. 8: номера ячеек с 1 по 32 относятся к пару; с 33 по 40 – к воде; с 41 по 72 – к газу в паровой фазе; с 73 по 80 – к газу в жидкой фазе. Подача пара в ячейку с заданным номером одновременно показывает размер подаваемых пузырьков и геометрическую координату точки подачи, газ в деаэратор поступает с водой в верхние ячейки

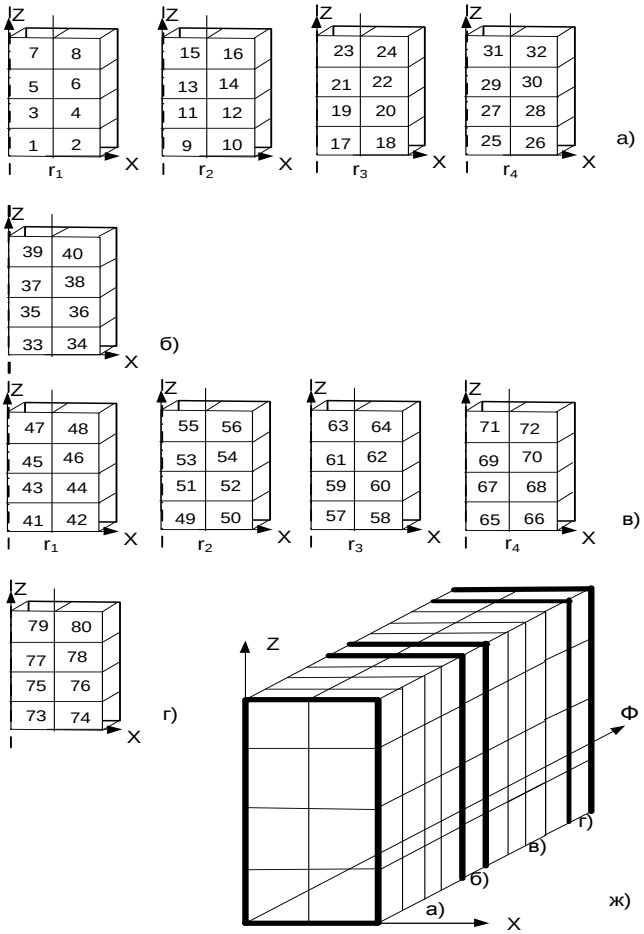


Рис. 8. **Порядок нумерации ячеек для пара (а), воды (б), газа в паровой фазе (в), газа в жидкой фазе. (г) и расчетное представление структуры фазового пространства барботажной ступени деаэратора (ж)**

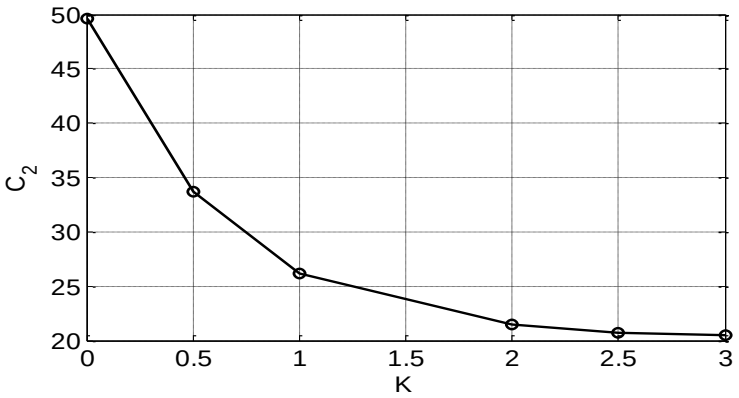


Рис. 9. **Расчетная зависимость остаточного содержания газа в воде (c_2, мкг/дм^3) от параметра модели К**

аппарата (i=79, 80). Результаты предварительных расчетных исследований по расчетной стабилизации материальных потоков на выходе из ступени для воды и пара показывают, что стабилизация потоков пара происходит через 10, воды через 300 итераций (временных шагов), что связано с более медленным по сравнению с паром движением воды в аппарате.

Результаты расчетного исследования деаэрации воды в слое показаны на рис. 9. В качестве исследуемого параметра выбран коэффициент К, равный отношению циркуляционной составляющей скорости к расходной. Расход пара при этом оставался постоянным для всех вариантов расчета.

Для того, чтобы связать значения К с гидродинамическими параметрами работы барботажного устройства предложен метод использования результатов решения гидродинамической задачи в ячеечной модели барботажной ступени деаэрации. В рамках этого подхода выполнена декомпозиция модели объекта на две подмодели: описание гидродинамической обстановки в баке деаэратора с паровым барботажом и описание в рамках ячеечной модели собственно процесса десорбции газа. Указанные подмодели реализованы двумя расчетными модулями. Первый модуль в качестве входных параметров использует геометрию бака и барботажного коллектора, а также расходы и условия подачи теплоносителей в ступень. На выходе модуля после выполнения расчета выдаются значения параметров движения, которые используются во втором расчетном модуле процесса деаэрации, построенном на основе ячеечной модели.

При построении первого расчетного модуля для решения гидродинамической задачи использован специализированный прикладной программный пакет FlowVision (версия 3.08.03), в котором смоделирована работа барботажного устройства. Результаты расчета представлены в виде зависимости циркуляционной составляющей скорости движения воды в деаэраторном баке от абсолютного расхода барботажного пара (рис. 10). Вторая часть задачи – описание собственно процесса десорбции растворенного газа, – решается на основе разработанной модели (8)-(14), построенной на ячеечном подходе.

На рис. 11 приведены результаты расчетов, выполненные с помощью ячеечной модели по определению площади межфазной поверхности при подаче в слой пара с различным расходом. Данные результаты могут быть использованы при разработке инженерных методов расчета, работающих без привлечения решения специализированных пакетов для решения гидродинамической задачи.

Таким образом, использование решения гидродинамической задачи в барботажном слое в ячеечной модели позволяет учитывать в модели деаэрации циркуляцию потока жидкости в деаэраторном баке, существенно уменьшая при этом объем экспериментальных исследований, необходимых для идентификации модели. При таком подходе параметром идентификации модели является только один параметр: коэффициент массопередачи. Для идентификации разработанной модели в работе предусмотрен этап экспериментальных исследований.

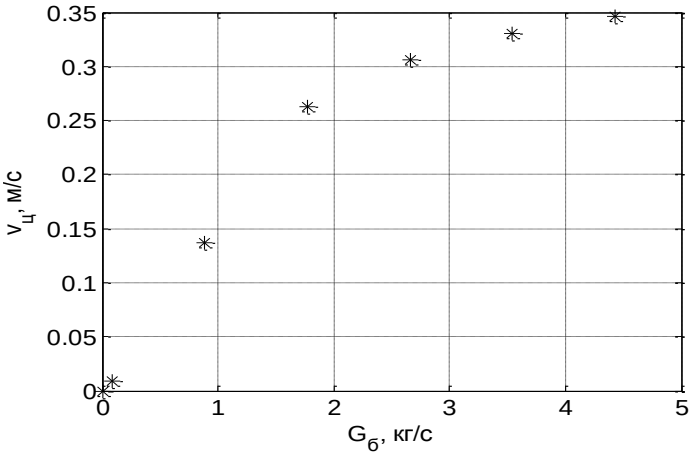


Рис. 10. **Результаты решения задачи по определению циркуляционной составляющей скорости в зависимости от расхода пара на барботаж**

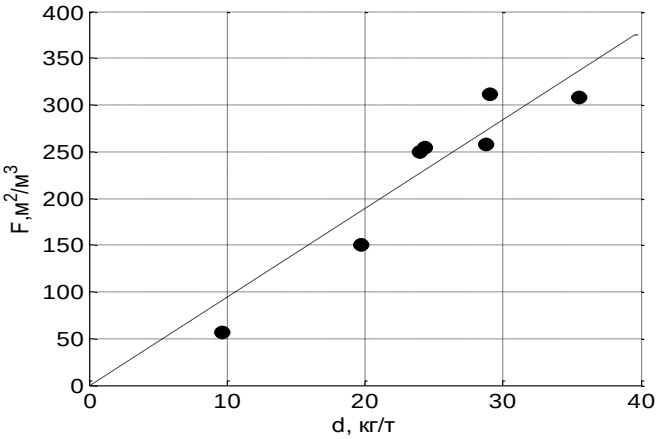


Рис. 11. **Зависимость удельной поверхности тепломассообмена в барботажной ступени деаэратора от удельного расхода пара на барботаж**

В третьей главе представлены порядок проведения и результаты экспериментальных исследований, полученных на промышленной деаэрационной установке с атмосферным деаэратором ДСА-300. Схема контроля параметров в ходе испытаний представлена на рис. 12. Для получения экспериментальных данных о показателях работы барботажного устройства деаэраторного бака организован отбор проб воды на выходе из деаэрационной колонки и воды на выходе из деаэраторного бака. Для обеспечения балансовых расчетов процессов тепломассообмена, включая газообмен по растворенному кислороду, выполнялся отбор проб греющего пара (химические показатели качества основного и барботажного пара одинаковы) и воды, поступающей в деаэратор. Пробоотборные трубопроводы разработаны в соответствии с требованиями нормативных документов. Герметичность смонтированной схемы отбора проб проверена путем гидравлических испытаний. Использованы стандартизованные методы и средства измерения параметров. В ходе исследований проведено 7 опытов при различных режимах барботажного устройства. Обработка экспериментальных данных выполнена в два этапа: первичная обработка результатов замеров контролируемых параметров для определения окончательных результатов их измерения в опытах; балансовые расчеты для определения значений теплотехнических параметров и массовой концентрации растворенного кислорода в теплоносителях на входе и выходе деаэраторного бака, не обеспеченных прямыми измерениями.

Сводные данные по результатам испытаний приведены в табл. Эти данные использованы при идентификации модели деаэрации в баке, оборудованном барботажным коллектором, в рамках которой определены коэффициенты массопередачи по условию согласования расчетных и экспериментальных данных (табл.). Сопоставление расчетных и экспериментальных значений массовой концентрации растворенного кислорода в воде на выходе из деаэраторного бака выполнено на рис. 13.

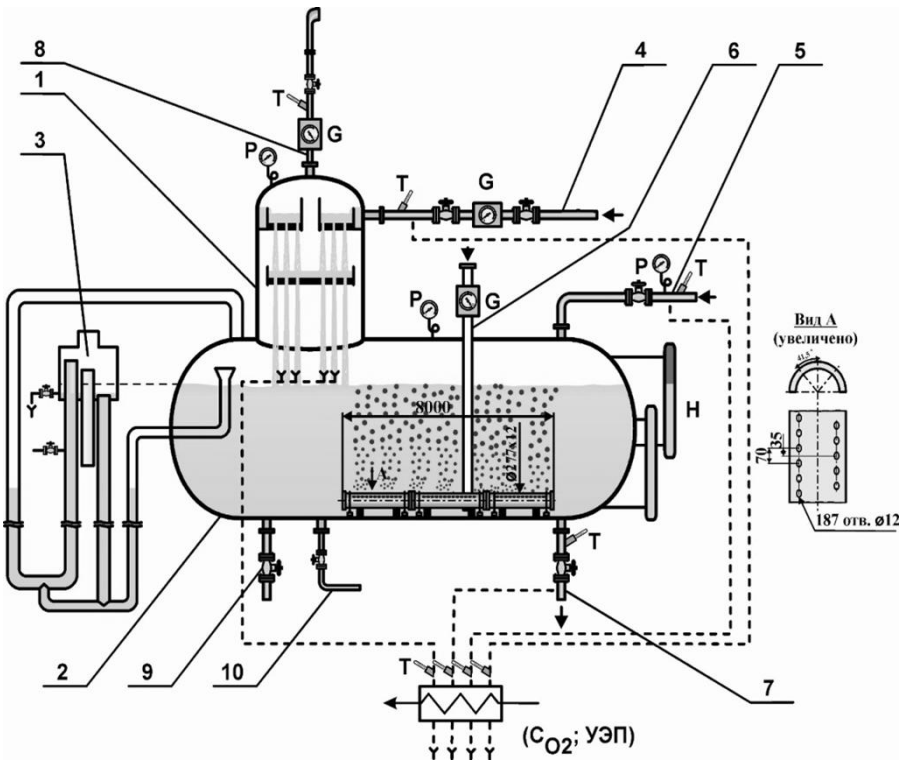


Рис. 12. **Схема объекта испытаний:** 1 – деаэрационная колонка; 2 – деаэраторный бак; 3 – предохранительно-сливное устройство; 4 – подвод исходной воды; 5 и 6 – подвод соответственно основного и барботажного пара; 7 – отвод деаэрированной воды; 8 – отвод выпара; 9 – водяной уравнительный трубопровод (закрыт); 10 – дренаж (закрыт); пунктирными линиями показан отбор проб теплоносителей; G, P, T – измерения соответственно расхода, давления, температуры среды; H – измерение уровня воды в баке; C_{O2}, УЭП – измерения соответственно массовой концентрации растворенного кислорода и удельной электропроводности проб теплоносителей

Таблица. **Основные условия опытов и результаты идентификации модели**

Показатель, единица измерения	**Значение показателя**						
Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
Удельный расход пара на барботаж, кг/т	9,61	23,99	24,33	28,73	29,04	35,5	19,75
Уровень воды в баке, мм	2199	1800	1820	2173	2182	1997	1972
Температура воды на входе, ^{o}C	102,9	101,4	103,2	100,5	103,0	101,8	102,7
Температура воды на выходе, ^{o}C	103,1	105,7	105,8	102,4	104,3	103,8	104,8
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе, мкг/дм^3	1119	541	555	501	769	423	1078
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на выходе, мкг/дм^3	91	12	0	9	12	2	23
Коэффициент массопередачи по результатам идентификации модели, мкг/(м^2 с)	261	145	145	116	116	116	174

Для того чтобы сделать возможным использование предложенной модели при расчете деаэраторного бака с затопленным барботажным устройством в условиях, отличных от опытных, разработано эмпирическое обеспечение модели в виде критериального уравнения для расчета коэффициента массопередачи по растворенному кислороду. Искомое уравнение регрессии, полученное в соавторстве с С.Д. Горшениным (ИГЭУ), записывается в виде

$$\mathrm{Sh} = 7{,}448 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-0{,}401} d_{\text{б}}^{\,-0{,}642}, \qquad (20)$$

где $\mathrm{Sh} = \left(k_m d\right) / \left(D_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}\right)$ – безразмерная характеристика интенсивности процесса газообмена – критерий Шервуда; $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{ж}}$, кг/м^3 – плотности соответственно пара и воды; $d_{\text{б}}$, кг/т – удельный расход пара на барботаж; k_m, кг/(м^{2}с) – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду; d, м – диаметр отверстий барботажного устройства; $D_{\text{ж}}$, м^2/с – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде.

Множественное корреляционное отношение для уравнения регрессии составляет 0,991, а его скорректированное значение (с учетом поправки на число степеней свободы) – 0,987. Статистическая значимость уравнения (20) доказана по критерию Фишера, который составил 37,9 при критическом его значении 6,2 (уровень значимости 0,95). Влияние на функцию отклика обоих факторов – отношения плотностей теплоносителей и удельного расхода пара на барботаж, – также статистически значимо, что доказано по критерию Стьюдента.

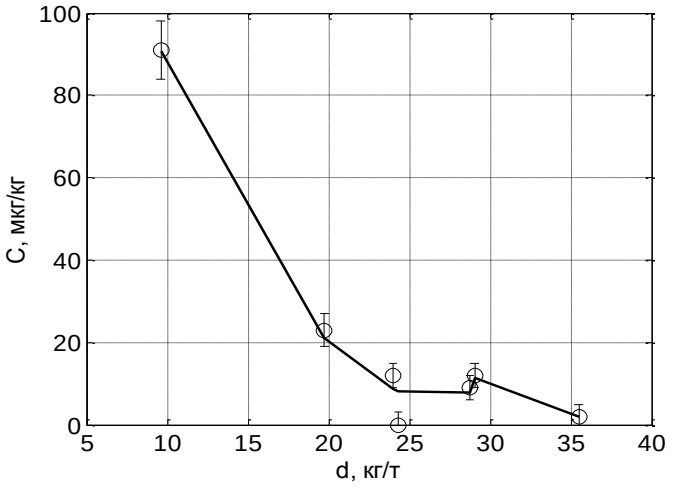


Рис. 13. **Сопоставление расчетных (линия) и экспериментальных (точки) значений массовой концентрации растворенного кислорода в воде после деаэраторного бака С, мкг/кг, в зависимости от удельного расхода пара на барботаж d, кг/т**

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

- разработка компьютерного модуля для расчета барботажной ступени атмосферного деаэратора с затопленным в баке перфорированным коллектором;
- внедрение модуля расчета барботажных ступеней в пакет программ для расчета атмосферных деаэраторов с заданной структурой потоков, разработанный в рамках матричной формализации;
- проведение расчетных исследований по выбору конструктивных и режимных характеристик барботажной ступени атмосферного деаэратора в рамках его реконструкции;
- использование разработанного программного модуля при установлении требуемых режимов работы деаэраторов в рамках их режимно-наладочных испытаний.

Разработанная во второй главе математическая модель деаэрации в барботажной ступени легла в основу алгоритма расчета и его программной реализации. Алгоритм расчета включает следующие блоки: 1 – ввод исходных данных; 2 – нахождение по графическим зависимостям (рис. 11) площади поверхности раздела фаз в барботажной ступени; 3 – расчет согласно (20) коэффициента массопередачи; 4 – расчет процесса деаэрации согласно разработанной ячеечной модели; 5 – вывод результатов расчета (расходов воды и пара и концентраций растворенного в них кислорода). На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Для расчета деаэрационной установки, включающей несколько струйных и барботажных ступеней, предложено обобщение существующего подхода матричной формализации, разработанного в ИГЭУ (Барочкин Е.В., Жуков В.П.), позволяющее дополнительно рассчитывать в рамках этого подхода и барботажную ступень с затопленным в деаэраторном баке коллектором. При этом для расчета прочих элементов (струйных отсеков, непровального барботажного листа деаэрационной колонки) используются опубликованные ранее матричные модели (С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский; ИГЭУ).

Разработанный метод расчета использован при выборе вариантов реконструкции деаэрационной установки питательной воды машинного зала участка вторичных энергоресурсов коксохимического производства ОАО «Северсталь» (г. Череповец). Требовалось разработать проект реконструкции двух деаэраторов ДА-100 таким образом, чтобы обеспечить ужесточенные относительно гарантий завода-изготовителя нормы качества деаэрированной воды по содержанию растворенного кислорода (не более 10 мкг/дм^3) в регулировочном диапазоне гидравлических нагрузок деаэраторов. Деаэраторы работают в двух режимах: режиме основной деаэрации, при котором в деаэратор подается недеаэрированная вода (массовая концентрация растворенного кислорода около 6000 мкг/дм^3), и в режиме барьерной деаэрации, особенностью которого является подача в деаэратор воды из сети комбината, уже предварительно деаэрированной (массовая концентрация растворенного кислорода около 50 мкг/дм^3).

Поставленную задачу предполагалось решить путем установки в деаэратор заводской комплектности дополнительного барботажного устройства деаэраторного бака. При этом решалась оптимизационная задача распределения барботажного пара по высоте ступени и размерам пузырьков, сформулированная в главе 2 диссертации, с тем технологическим ограничением, что размер всех пузырьков, вводимых на одной высоте, одинаков (горизонтальный

паровой коллектор с отверстиями постоянного диаметра). В расчетах принято упрощение, что интенсивность массоотдачи внутри паровых пузырьков (лимитирующая стадия процесса массопередачи) не зависит от диаметра пузырьков, что, согласно опубликованным данным С.С. Кутателадзе, А.В. Нестеренко и др., допустимо при рассматриваемых размерах пузырьков. Это упрощение позволяет использовать полученное в главе 3 критериальное уравнение (20) для расчета коэффициента массопередачи по растворенному кислороду. Связь между диаметром формируемых паровых пузырьков и диаметром отверстий барботажного устройства принята по опубликованным зависимостям.

Порядок решения оптимизационной задачи применительно к барботажной ступени изложен в пояснениях к рис. 6 автореферата. Полученное оптимальное решение (рис. 14) соответствует подаче всего расхода барботажного пара в нижнюю часть ступени через коллектор с отверстиями диаметром 5 мм. Однако, учитывая вероятность загрязнения отверстий в процессе эксплуатации продуктами коррозии, а также рекомендации заказчика, в качестве окончательного варианта рассматривался коллектор с диаметром отверстий 12 мм (рис. 15).

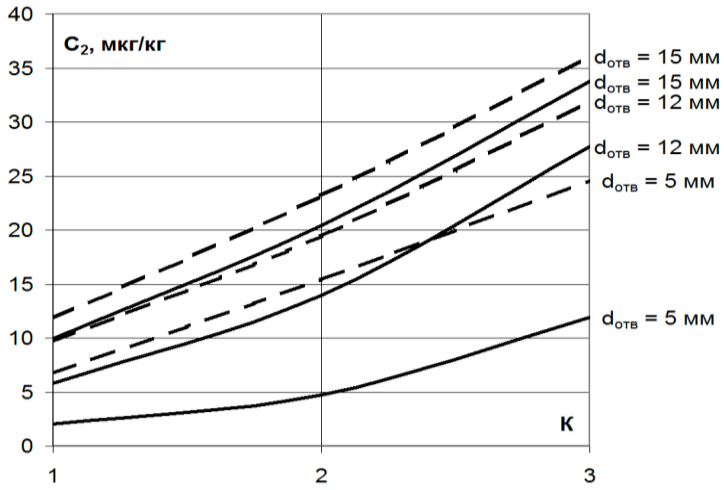


Рис. 14. **Зависимость содержания растворенного в воде кислорода на выходе ступени c_2, мкг/кг, от высоты подачи барботажного пара при различных температуре воды на входе в ступень и диаметрах отверстий горизонтального барботажного коллектора (удельный расход пара на барботаж d = 15 кг/т):** К – номер ячейки по высоте бака (К = 1, 2 и 3 – соответственно, подача пара в нижнюю, среднюю и верхнюю ячейки); сплошные линии – вода подается в бак с температурой насыщения; штриховые линии – недогрев поступающей воды до температуры насыщения 5 °С

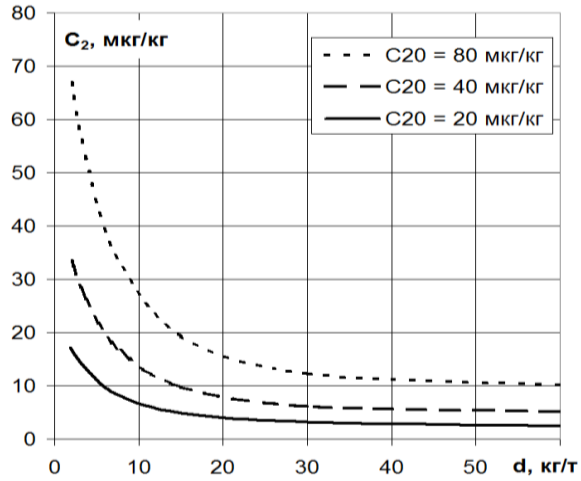


Рис. 15. **Зависимость содержания растворенного в воде кислорода на выходе ступени c_2, мкг/кг, от удельного расхода пара на барботаж d при различных значениях начального содержания растворенного кислорода в воде c_{20}, мкг/кг** (подача барботажного пара в нижнюю ячейку через коллектор с отверстиями диаметром 12 мм; недогрев поступающей воды до температуры насыщения при давлении в надводном пространстве 5 °С

Проведенные расчеты по деаэратору в целом с использованием пакета программ, разработанного в рамках матричной формализации, показали следующее:

– при работе без парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака деаэратор практически во всем регулировочном диапазоне гидравлической нагрузки обеспечивает получение деаэрированной воды с массовой концентрацией растворенного кислорода не более 20 мкг/дм^3, что соответствует гарантийным данным завод-изготовителя деаэрационной колонки КДА-100. Однако требуемый для технологических нужд основного производства ОАО «Северсталь» норматив по содержанию растворенного кислорода – 10 мкг/дм^3 – не обеспечивается в большинстве режимов;

– подключение затопленного барботажного устройства во всех режимах позволяет получать деаэрированную воду массовой концентрацией растворенного кислорода не более 10 мкг/дм^3, что и требуется обеспечить при реконструкции установки.

На основании полученных данных сформулированы рекомендации по оснащению деаэратора барботажным устройством деаэраторного бака, указаны его геометрические характери-

стики, а также составлена режимная карта по эксплуатации деаэратора с таким устройством. Разработанный программный комплекс передан также ОАО «Тепломонтажналадка» (г. Кострома), где используется при проектировании деаэрационных установок, а также для предварительного определения технологических параметров режима работы деаэраторов в ходе их пуско-наладочных или режимно-наладочных испытаний. По результатам использования программы показана эффективность применения компьютерной модели деаэратора на стадии проектирования промышленных установок для сокращения сроков проектирования и дополнительной предпроектной проработки вариантов конструктивного исполнения аппаратов, на стадии функциональных испытаний для ускорения обработки их результатов, а также на стадии технического аудита для выявления причин неэффективной работы деаэраторов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс расчетных и экспериментальных исследований процессов деаэрации при барботаже пара в воду, по результатам которых разработаны математические модели и программные модули, позволяющие решать задачи оптимизации конструктивного исполнения и эксплуатационных режимов барботажных устройств, что обеспечивает повышение эффективности их применения в термических деаэраторах атмосферного давления.

2. Разработана ячеечная математическая модель процессов тепломассообмена в барботажной ступени деаэраторного бака атмосферных деаэраторов, позволяющая учитывать влияние на процесс деаэрации площади межфазной поверхности и циркуляции теплоносителей в рабочем объеме барботажной ступени. Для определения параметров циркуляции теплоносителей использованы результаты решения гидродинамической задачи в прикладном программном пакете FlowVision (версия 3.08.03), что позволило сократить число экспериментально определяемых параметров идентификации модели до одного – коэффициента массопередачи.

3. На базе разработанной модели сформулирована и решена задача оптимального управления формированием межфазной поверхности за счет режимных и конструктивных факторов с целью минимизации потребления барботажного пара при обеспечении заданного содержания растворенного кислорода в деаэрированной воде.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса десорбции растворенного кислорода в барботажной ступени деаэраторного бака атмосферного деаэратора, на основании которых выполнена идентификация ячеечной модели деаэрации в барботажной ступени с погружным коллектором, результаты которой использованы при разработке критериального уравнения для определения коэффициентов массопередачи в ступени. Показана адекватность предложенного критериального уравнения.

5. Разработан алгоритм решения задачи тепломассообмена в барботажных ступенях деаэраторов, реализованный в виде программного модуля, на который получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль использован в прикладном программном пакете по расчету атмосферных деаэраторов с заданной структурой потоков, разработанном на основе подхода матричной формализации.

6. Результаты работы использованы при выборе вариантов реконструкции деаэрационной установки питательной воды машинного зала участка вторичных энергоресурсов коксохимического производства ОАО «Северсталь» (г. Череповец). Получены расчетные данные, доказывающие эффективность использования дополнительного барботажного устройства в деаэраторном баке деаэратора заводской комплектности по условию получения деаэрированной воды с ужесточенным относительно гарантийных заводских характеристик деаэратора нормативным содержанием растворенного кислорода.

7. Разработанный программный комплекс по расчету атмосферных деаэраторов с барботажной ступенью передан ОАО «Тепломонтажналадка» (г. Кострома), где используется при проектировании деаэрационных установок, а также для предварительного определения технологических параметров режима работы деаэраторов в ходе их пуско-наладочных или режимно-наладочных испытаний.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Ледуховский, Г.В. Прикладной программный комплекс для проектирования, организации эксплуатационного контроля и наладки атмосферных деаэраторов / Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, **А.Ю. Ненаездников** // Вестн. ИГЭУ – 2008. – вып. 4. – С. 20-23.
2. Барочкин, Е.В. Исследование эффективности деаэрации воды в баках атмосферных деаэраторов, оборудованных барботажным коллектором / Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В., Виноградов В.Н., Коротков А.А., **Ненаездников А.Ю.** // Вестн. ИГЭУ – 2009. – вып. 2. – С. 32-36.
3. Жуков, В.П. Эволюция межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.Ю. Ненаездников**, А.Н. Беляков, А.Н. Росляков // Вестн. ИГЭУ – 2012. – вып. 4. – С. 12-16.
4. Барочкин, Е.В. Моделирование деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, **А.Ю. Ненаездников**, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский, А.П. Зимин // Вестн. ИГЭУ – 2012. –вып. 6. – С. 9-13.
5. Барочкин, Е.В. Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, **А.Ю. Ненаездников**, А.Н. Беляков, А.Н. Росляков // Вестн. ИГЭУ – 2012. – вып. 4. – С. 58-62.
6. **Ненаездников, А.Ю.** Инкорпорация решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэратора / **А.Ю. Ненаездников**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, С.Д. Горшенин // Вестн. ИГЭУ – 2013. – вып. 4. – С. 12-16.
7. Горшенин, С.Д. Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках с затопленным барботажным устройством/ С.Д. Горшенин, **А.Ю. Ненаездников**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестн. ИГЭУ – 2013. – вып. 5. – С. 9-13.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и прочие публикации

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многопоточных атмосферных деаэраторов с барботажным устройством» № 2013615107 от 28 мая 2013 года. Авторы: Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ледуховский. ГВ., **Ненаездников А.Ю.**
9. Ледуховский, Г.В. Развитие модели барботажной деаэрации воды на непровальном дырчатом листе / Г.В. Ледуховский, М.Ю.Зорин, А.А. Коротков, **А.Ю. Ненаездников** // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 91-99.
10. Виноградов, В.Н. Режимные характеристики затопленного барботажного коллектора деаэраторного бака атмосферного деаэратора / В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, **А.Ю. Ненаездников** // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 99-107.
11. **Ненаездников, А.Ю.** Анализ тепломассообмена в барботажной ступени деаэратора с учетом эволюции межфазной поверхности / **А.Ю. Ненаездников**, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Сб. трудов XXIV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-26». – Н.Новгород – 2013. – Т.7. – С. 28-30.
12. **Ненаездников, А.Ю.** Моделирование тепломассообмена в барботажных устройствах атмосферных деаэраторов / **А.Ю. Ненаездников**, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский // Материалы XVII Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. – 2013. – Т.2. – С. 38-40.
13. **Ненаездников, А.Ю.** Эволюция межфазной поверхности в барботируемом слое / **А.Ю. Ненаездников**, А.И. Балакирев, В.П. Жуков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Энергия-2013». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т – 2013. – Т.4. - С. 327 – 330.
14. **Ненаездников, А.Ю.** Моделирование формирования межфазной поверхности тепломассообмена в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / А.Ю. Ненаездников, А.Н. Росляков, Е.В. Барочкин // Материалы междунар. научно-техн. конф. «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере». – Челябинск: ЮУрГУ – 2013. – С. 233-234.

Ненаездников Александр Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С БАРБОТАЖНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать Формат 60x84 1/16 Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №

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

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