

На правах рукописи



Шагиева Гузель Камилевна

**ЭНЕРГОМАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И
МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ
РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ НА ТЭС**

05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,
на кафедре «Технология воды и топлива»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лаптев Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Шарапов Владимир Иванович,**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Мадышев Ильнур Наилевич,
кандидат технических наук, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина**», г. Иваново

Защита состоится « 29 » ноября 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, аудитория Д-225).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <http://www.kgeu.ru/>.

Автореферат диссертации разослан « 04 » октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
доктор технических наук

Зверева Эльвира Рафиковна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Защита металла от коррозии на ТЭС является важной задачей. Коррозия металла приводит к снижению срока эксплуатации оборудования, преждевременному выходу из строя, а в следствии, к аварийным остановам, снижению выработки тепловой и электрической энергии, к простоям оборудования, что отрицательно сказывается на работе станции в целом и приводит к снижению ее конкурентоспособности на оптовом рынке электрической энергии и мощности.

Оборудование ТЭС в большей степени подвержено коррозии в виду присутствия в цикле вод, содержащих растворенные кислород, диоксид углерода, кислоты, щелочи, хлориды, сульфаты. Усугубляет ситуацию работа при высоких температурах и давлении.

На ТЭС аппаратами для очистки воды от коррозионно-активных газов, как правило, являются декарбонизаторы и термические деаэраторы. В настоящее время на рынке представлено большое многообразие аппаратов данного типа. Однако, данный факт и затрудняет их выбор. Поэтому исследования, с применением моделей и методов расчета эффективности работы аппаратов по очистке воды от растворенных газов, а также научно-технические решения по модернизации, являются актуальными для ТЭС.

Несмотря на большой интерес ученых к данной тематике, задачи математического моделирования и повышения эффективности работы термических деаэраторов и декарбонизаторов являются недостаточно разработанными, особенно с новыми контактными устройствами.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ в научной школе Лаптева А.Г. НШ-9771.2016.8 в области знания «Технические и инженерные науки», а также в рамках научно-го проекта РНФ 18-79-10136.

Степень научной разработанности проблемы. Разработкой математических моделей деаэрационных установок занимаются ученые не один десяток лет. Десорбцию свободного диоксида углерода и растворенного кислорода исследовали Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Исаченко В.П., Захаров А.А., Черная Р.Г., Кутепов А.М., Шаратов В.И., Пазушкина О.В., Барочкин Е.В., Галустов В.А., Ненаездников А.Ю, Горшенин С.Д., Коротков А.А., Ледуховский Г.В., в рамках научной школы профессора Лаптева А.Г. аспиранты – Долгов А.Н. и Шакирова А.Х. и др.

Приоритетным направлением развития энергетики является повышение эффективности работы оборудования ТЭС, в том числе термических деаэраторов и декарбонизаторов. За последние десятилетия созданы различные конструкции деаэраторов и декарбонизаторов и математические модели к ним. Однако методик расчета энергообменной эффективности в зависимости от конструкции термических деаэраторов и декарбонизаторов не приводится, также как и сравнительных характеристик аппаратов с разным способом организации межфазной поверхности при взаимодействии жидкости и газа (пара) представлено в работах авторов не в полном объеме, особенно для новых контактных устройств.

Цель работы - с применением методов математического моделирования получить сравнительные характеристики энергообменной эффективности очистки воды в аппаратах с разным способом организации межфазной поверхности при взаимодействии жидкости и газа

(пара), а также разработать научно-технические решения по повышению эффективности работы термических деаэраторов и декарбонизаторов на ТЭС.

Объект исследования: процессы очистки воды от растворенных газов в деаэраторах и декарбонизаторах различных конструкций, а также методы, модели, алгоритмы их расчета.

Задачи исследования:

1. Разработать метод расчета эффективности очистки воды от растворенных газов в пленочных насадочных и барботажных декарбонизаторах и термических деаэраторах;
2. Разработать метод расчета эффективности пленочных контактных устройств с шероховатыми стенками при сильном взаимодействии фаз;
3. Разработать метод расчета эффективности вихревого трубчатого контактного устройства при сильном взаимодействии фаз;
4. Разработать модернизированные конструкции термических деаэраторов и декарбонизаторов;
5. Представить сравнительные энергомассообменные характеристики аппаратов.

Соответствие паспорту специальности 05.14.14. «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» по формуле специальности: исследования по проблемам водоподготовки. По областям исследований: п.1 разработка научных основ методов расчета показателей качества и режимов работы агрегатов; п.2 исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах; п.4 разработка конструкций вспомогательного оборудования; п.5 повышение рабочего ресурса агрегатов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. На основе применения моделей пограничного слоя и моделей структуры потоков разработаны методы расчета эффективности термических деаэраторов и декарбонизаторов следующих конструкций:
 - пленочных при слабом и сильном взаимодействии пленки жидкости с газовым (паровым) потоком при движении в гладких, шероховатых каналах и с закруткой фаз;
 - насадочных с регулярными и хаотичными насадками новых конструкций при пленочном режиме.
2. На основе использования трехслойной модели турбулентного пограничного слоя получено уравнение для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при пленочном течении при различных условиях взаимодействия фаз.
3. Получено модифицированное выражение для показателя энергомассообменной эффективности декарбонизаторов и термических деаэраторов, который позволяет выполнить сравнительную оценку аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Полученные методы расчета эффективности очистки воды от растворенных газов в термических деаэраторах и декарбонизаторах разных конструкций могут быть использованы как при разработке вариантов модернизации действующих аппаратов, так и при проектировании новых конструкций. Приведенные результаты сравнения энергомассообменных характеристик могут быть использованы при обосновании научно-технических решений по конструкциям деаэрационных установок и декарбонизаторов. Запатентованные способы повышения эффективно-

сти и модернизации термических деаэраторов и декарбонизаторов могут применяться на ТЭС и приняты к внедрению.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования, согласованием результатов расчетов по разработанным математическим моделям с известными экспериментальными данными, а также с результатами расчетов других авторов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методы и результаты расчета энергомассообменной эффективности очистки воды и научно-технические решения по модернизации термических деаэраторов и декарбонизаторов, полученные на основе применения моделей пограничного слоя и моделей структуры потоков, следующих конструкций:
 - пленочных при слабом и сильном взаимодействии пленки жидкости с газовым (паровым) потоком при движении в гладких, шероховатых каналах и с закруткой фаз;
 - насадочных с регулярными и хаотичными насадками новых конструкций при пленочном режиме.
2. Результаты расчета среднего коэффициента теплоотдачи при турбулентном пленочном течении при различных условиях взаимодействия с газом, полученного на основе использования трехслойной модели турбулентного пограничного слоя.
3. Модернизированные схемы и аппараты деаэрации и декарбонизации воды. Сравнительные энергомассообменные характеристики аппаратов.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются ЗАО «Ивэнергосервис» при проектировании систем очистки воды от растворенных газов на ТЭС, в частности, при обосновании технических решений по реконструкции деаэрационных установок ПАО «Северсталь», а также Омской ТЭЦ-5 Омского филиала АО «ТГК-11». Полученный показатель энергоэффективности используется в ООО «Волга НИПИТЭК» (г. Самара) для научно-обоснованного выбора контактных устройств промышленных массообменных аппаратов. Результаты расчета термического деаэратора низкого давления приняты филиалом АО «Татэнерго»-«Казанская ТЭЦ-2» в качестве возможного варианта для замены пришедшего в негодность деаэратора ДА-200 ст. №7, согласно проведенного технического диагностирования.

Личное участие автора состоит в разработке методов расчета эффективности очистки воды от растворенных газов в пленочных насадочных и барботажных декарбонизаторах и термических деаэраторах, эффективности разделения смеси в деаэраторном баке, эффективности пленочных контактных устройств с шероховатыми стенками, а также с вихревыми трубчатыми контактными устройствами при сильном взаимодействии фаз, в получении сравнительных характеристик энергомассообменной эффективности очистки воды в аппаратах с разным способом организации межфазной поверхности при течении жидкости и газа (пара).

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 14 конференциях: Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2012 и 2013г.); Международной школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» в рамках Всероссийской научной

конференции «XXX Сибирский теплофизический семинар»(г. Новосибирск, 2012г.); XVI и XIX аспирантско - магистерских научных семинарах, посвященный Дню энергетика (г. Казань, 2012 и 2015г.); VIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова. «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (г. Казань, 2012г.); XII Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий»(г. Тула, 2012г.); VII ежегодной Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012»(г. Санкт-Петербург, 2012г.); VI международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2012г.); Международной конференции: «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике»(г. Казань, 2015г.); LXVI международной научно-практической конференции № 1 «Технические науки - от теории к практике»(г. Новосибирск, 2017г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований: от теории к практике»(г. Чебоксары, 2016г.); XXXIII Международной научно-практической конференции « Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты»(г. Новосибирск, 2017г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 23 опубликованных работах, в том числе, в 7 статьях в ведущих рецензируемых журналах (из списка ВАК), из них в 2 статьях в базе SCOPUS (Теплоэнергетика); получено 3 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 203 наименований и приложений. Работа изложена на 164 стр., из них 148 стр. машинописного текста, 49 рисунков и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая и теоретическая значимости полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обосновано соответствие диссертации научной специальности, достоверность и обоснованность полученных результатов, даны сведения по реализации результатов работы.

В первой главе представлен обзор опубликованных работ, посвященных процессам очистки воды от коррозионно-активных газов в термических деаэраторах и декарбонизаторах. Дана информация по причинам образования коррозии на ТЭС, по видам коррозии, которым подвергается оборудование, трубопроводы и арматура на ТЭС, описывается сущность термической деаэрации, приводятся нормы качества воды, приводится классификация термических деаэраторов, декарбонизаторов. Представлены работы, посвященные математическому описанию процессов, происходящих в термических деаэраторах и декарбонизаторах, сведения об ученых занимавшихся и занимающихся этими вопросами. Рассмотрены режимы течения жидкости в декарбонизаторах и термических деаэраторах и способы взаимодействия жидкости с паром (воздухом).

Во второй главе разработаны методы и алгоритмы расчета эффективности очистки воды от растворенных газов в пленочных насадочных и барботажных декарбонизаторах и термических деаэраторах. Рассмотрены различные условия взаимодействия воздуха и водяного пара с очищаемой водой. Разработан способ стабилизации температурного режима декарбонизатора.

Представлены теоретические основы моделирования тепломассопереноса в газожидкостных средах. Записана система уравнений движения, массо- и теплопереноса в векторной форме. Рассмотрен частный вид записи уравнения массопереноса с применением моделей структуры потоков с объемными источниками массы.

На основе ячеечной модели структуры потоков выполнен расчет и выбор наиболее эффективных конструкций регулярных и нерегулярных насадок.

Рассмотрен режим стационарного противотока при пленочном течении жидкости по насадке. Записаны допущения к модели.

Применена ячеечная модель с условным делением контактных устройств в колонне от входа воды к выходу в виде условных ячеек полного перемешивания.

Уравнение баланса массы в ячейке

$$K_{ож} F_i (C_i - C_i^*)_{ж} = V_{ж} (C_{i-1} - C_i)_{ж}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $K_{ож}$ - средний коэффициент массопередачи, отнесенный к концентрации компонента в жидкости, м/с; F_i - поверхность контакта фаз в i -й ячейке, m^2 ; C_i - концентрация растворенного газа в i -й ячейке, $кг/м^3$; C_i^* - равновесная концентрация растворенного газа в i -й ячейке, $кг/м^3$; $V_{ж}$ - расход жидкости в i -й ячейке, $м^3/с$; n - число ячеек.

Из выражения (1) концентрация в i -й ячейке

$$C_{i,ж} = \frac{C_{i-1,ж} + C_{i,ж}^* N_{ож,i}}{1 + N_{ож,i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где $N_{ож,i} = \frac{K_{ож} F_i}{V_{ж}}$ - общее массообменное число единиц переноса для ячейки.

Выражение (2) решается с граничными условиями: на входе $C_{0,ж} = C_{н,ж}$; на выходе $C_{п,ж} = C_{к,ж}$, при известном числе ячеек n .

Общее число единиц переноса вычислялось по уравнению аддитивности

$$\frac{1}{N_{ож,i}} = \frac{1}{N_{ж,i}} + \frac{L/G}{N_{г,i} m}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где $N_{ж,i}, N_{г,i}$ - частные числа единиц переноса для ячеек по жидкой и газовой фазам; L, G - массовые расходы жидкости и газа, $кг/с$; m - коэффициент равновесия (распределения).

Частные числа единиц переноса для ячейки имеют вид

$$N_{ж,i} = \frac{\beta_{ж} F_i}{V_{ж}}, \quad N_{г,i} = \frac{\beta_{г} F_i}{V_{г}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где $\beta_{ж}, \beta_{г}$ - средние коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах, м/с.

Известно, что при удалении труднорастворимых газов основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе, тогда $K_{ож} = \beta_{ж}$.

Эффективность извлечения компонента в i -й ячейке

$$E_{ж,i} = \frac{C_{i-1,ж} - C_{i,ж}}{C_{i-1,ж} - C_{i,ж}^*}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

По известному правилу общая эффективность разделения в аппарате

$$E_{ж} = 1 - (1 - E_{ж,1})(1 - E_{ж,2}) \dots (1 - E_{ж,n}). \quad (6)$$

Из выражений (2), (5) и (6) записано в общем виде для контактных устройств

$$E_{ж} = 1 - (1 + N_{ж} / n)^{-n}. \quad (7)$$

С числом единиц переноса для насадки выражение (7) получило вид

$$E_{ж} = 1 - \left(1 + \frac{\beta_{ж} a_v H \psi_w}{n u_{ж}} \right)^{-n}, \quad (8)$$

где a_v - удельная поверхность насадки, m^2/m^3 ; H - высота слоя насадки, м; ψ_w - коэффициент смачиваемости поверхности; $u_{ж} = V_{ж} / S$ - средняя скорость жидкости на полное сечение аппарата, S , m^2 (без насадки). Коэффициент $\beta_{ж}$ вычислялся по известным выражениям. Число ячеек n определяли по известному соотношению с модифицированным числом Пекле (критерием Боденштейна).

Из (8), при заданной эффективности очистки воды, высота слоя насадки (при $E_{ж} < 1$)

$$H = \frac{u_{ж} n}{\beta_{ж} a_v \psi_w} \left[(1 - E_{ж})^{-\frac{1}{n}} - 1 \right]. \quad (9)$$

По представленным выражениям произведен расчет нескольких современных регулярных и нерегулярных насадок. На рис. 1 даны результаты расчетов в виде гистограммы высоты слоя насадок рассмотренных конструкций, необходимой для очистки воды от диоксида углерода с заданной эффективностью 98,5% (расчет по выражению (9)). На рис. 2 гистограмма затрачиваемой мощности на подачу газа на очистку 60 тонн воды в час от CO_2 .

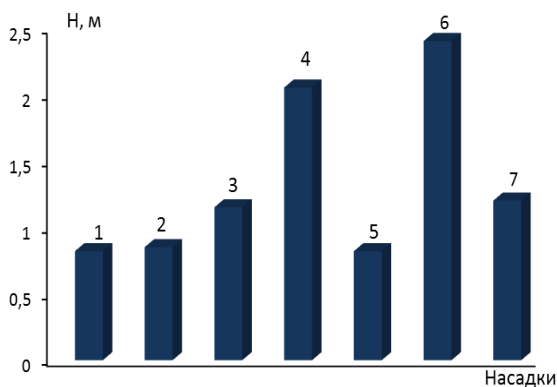


Рис.1 Гистограмма требуемой высоты слоя насадки для очистки воды от CO_2 с эффективностью 98,5% (удельный расход воды $60 m^3/(m^2 \cdot ч)$; скорость воздуха $0,7 m/c$):

1 – сегментно-регулярная насадка «Инжехим» ($a_v=280 m^2/m^3$); 2 – рулонная гофрированная насадка «Инжехим» (с шероховатой поверхностью) ($a_v=300 m^2/m^3$); 3 – рулонная гофрированная насадка «Инжехим» (с просечками) ($a_v=300 m^2/m^3$); 4 – нерегулярная насадка «Инжехим-2000» ($a_v=165,8 m^2/m^3$); 5 – нерегулярная насадка «Инжехим-2002» ($a_v=200 m^2/m^3$); 6 – металлические кольца Рашига ($a_v=220 m^2/m^3$); 7 – регулярная металлическая насадка ВАКУ-ПАК ($a_v=115 m^2/m^3$)

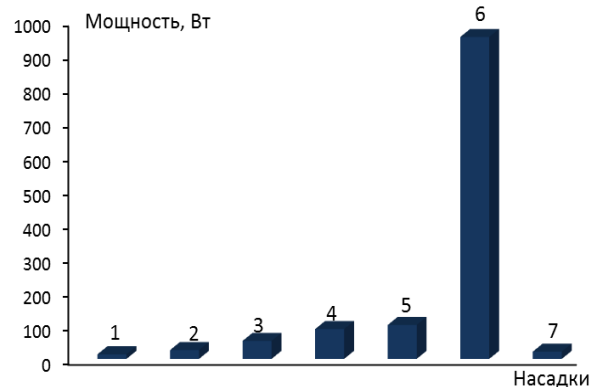


Рис. 2 Гистограмма затрачиваемой мощности на подачу газа для очистки 60 тонн воды в час от CO_2 :

Установлено, что использование насадок под номерами 1, 2 и 7 позволит снизить количество затрачиваемой мощности на подачу газа на очистку воды от диоксида углерода. Для нерегулярной насадки «Инжехим-2002» требуется мощность на подачу газа в 7 раз больше чем для сегментно-регулярной насадки «Инжехим», почти в 5 раз больше, чем для регулярной насадки ВАКУ-ПАК, в свою очередь, в 9,5 раз меньше, чем для металлических колец Рашига при требуемой эффективности очистки.

Представлены результаты расчета эффективности массообмена в барботажных аппаратах, полученные с применением диффузионных моделей структуры потоков.

Рассмотрен теоретический подход моделирования массопереноса в стационарном барботажном слое деаэрационного бака. Записаны уравнения массо- и теплопереноса в цилиндрических координатах, уравнения баланса массы и тепла между фазами, объемные источники массы и тепла межфазного переноса. Записаны допущения к математической модели. Средний коэффициент массоотдачи, отнесенный к поверхности контакта фаз, определен по выражению Лаптева А.Г., Дьяконова С.Г. (турбулентный режим).

На рис.3 представлены результаты расчета эффективности удаления из воды O_2 в деаэрационном баке, секционированном перфорированными перегородками (число секций $n=4$) и в деаэрационном баке без перегородок (число секций $n=1$) при разных расходах воды от скорости барботируемого пара.

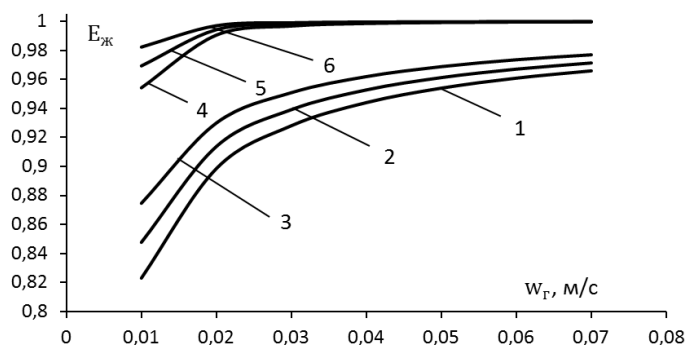


Рис.3 Зависимость эффективности удаления из воды O_2 в деаэрационном баке с перфорированными перегородками (линии 4-6) и без перегородок (линии 1-3) от скорости барботируемого пара при разных расходах воды: 1,4 – 300т/ч; 2,5 –

250 т/ч; 3,6 – 200 т/ч. Длина барботера $l=8$ м; диаметр отверстий барботера 0,012м; внутренний диаметр деаэрационного бака 3,2м; уровень воды в баке 2,0 м; температура воды $104^{\circ}C$; температура пара $160^{\circ}C$

С увеличением числа перегородок и, как следствие, числа ячеек, эффективность очистки воды в деаэрационном баке растет. Секционирование деаэрационного бака перегородками снижает обратное перемешивание и позволяет повысить эффективность очистки воды и обеспечить практически полное удаление растворенных газов (до состояния равновесия) из воды.

Далее рассмотрен пленочный трубчатый декарбонизатор. Предложен метод стабилизации температурного профиля воды в декарбонизаторе по высоте пленочных контактных трубок, который заключается в подаче в межтрубное пространство теплоагента, который должен обеспечить заданный температурный режим.

Для расчета коэффициента теплоотдачи от турбулентной пленки воды к стенке трубы (или от стенки к пленке) рассмотрена математическая модель.

Для определения среднего коэффициента переноса импульса γ и далее коэффициента теплоотдачи α записано сопротивление переносу в пограничном слое пленки

$$\frac{1}{\gamma} = \int_0^{\delta} \frac{\tau^* dy}{v + v_T(y)}, \quad (10)$$

где τ^* , – безразмерный поток импульса; δ - толщина турбулентного пограничного слоя, м; y – поперечное расстояние от поверхности стенки до рассматриваемой точки, м; v, v_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $v_T(y)$ по модели Дайслера.

В результате численного интегрирования (10), с учетом поправки Чилтона-Кольборна, получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи в турбулентной пленке ($\alpha \sim \text{Pr}^{-0,5}$)

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{ж}} c_{\text{рж}} u_*}{\text{Pr}^{0,5} (5,219 + 2,5 \ln(R_{\delta} - 0,124))}, \quad (11)$$

где u_* - динамическая скорость в жидкой фазе при пленочном течении, м/с; Pr – число Прандтля; R_{δ} - безразмерная толщина пограничного слоя; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{рж}}$ - удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

На рис. 4 показаны расчетные и опытные значения коэффициентов теплоотдачи в безразмерном виде, где $\text{Nu}_w = \frac{\alpha \delta_{\text{пл}}}{\lambda_{\text{ж}}}$, $\delta_{\text{пл}}$ - средняя толщина пленки, м; $\lambda_{\text{ж}}$ - удельная теплопроводность жидкости, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

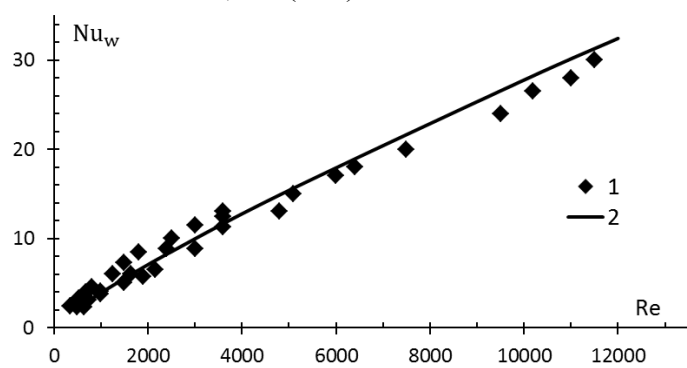


Рис. 4 Корреляция данных по теплоотдаче при пленочном течении: 1 – опытные результаты различных авторов, обобщенные Р.И. Нигматулиным; 2 – расчет по уравнению (11). $\text{Re} = 4q / v_{\text{ж}}$ - число Рейнольдса; q – плотность орошения к периметру пленочного течения, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$; $v_{\text{ж}}$ - ко-

эффициент вязкости жидкости кинематический, $\text{м}^2/\text{с}$

Из рис. 4 следует удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными различных авторов при гравитационном течении пленки жидкости.

Выражение (11) может быть использовано в расчетах аппаратов, в которых осуществляется как слабое взаимодействие пленки жидкости с газовым потоком, так и сильное взаимодействие фаз. При сильном взаимодействии пленки жидкости с газом (восходящий или нисходящий прямоток) теплоотдача значительно интенсифицируется. Это учитывается за счет динамической скорости и безразмерной толщины пограничного слоя в уравнении (11).

В 3 главе на основе применения ячеечной модели произведен расчет эффективности пленочных контактных устройств с шероховатыми стенками при сильном взаимодействии фаз (газ транспортирует пленку жидкости), а также определена эффективность вихревого трубчатого контактного устройства. Получен частный случай записи показателя энергоэффективности при заданной эффективности массопередачи очистки воды от диоксида углерода и кислорода в аппаратах водоподготовки ТЭС.

Предложена методика расчета эффективности пленочных контактных устройств с шероховатыми стенками при сильном взаимодействии фаз, полученная с применением ячеечной модели структуры потоков. Результаты расчета согласуются (рис.5) с экспериментальными данными Николаева Н.А, Харина В.Ф., полученными при десорбции CO_2 из воды при температуре 20°C в восходящем осевом потоке в канале: диаметр трубки $d=0,0168\text{м}$ и высота трубки $H=0,15\text{ м}$.

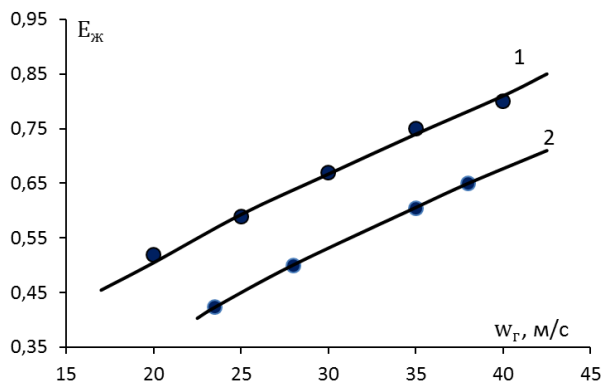


Рис.5 Зависимость эффективности разделения (7) от скорости газа в трубке при десорбции CO_2 из воды воздухом. Точки – экспериментальные данные Николаева Н.А., Харина В.Ф.; сплошная линия – расчет по формуле (7). Приведенный расход воды $2,116\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; высота выступа шероховатости $h=0,43\text{мм}$; шаг между выступами – 2мм ;

1 – трубки с шероховатой и 2 – с гладкой поверхностью

Данная методика расчета может быть использована при расчете декарбонизаторов с пленочными контактными устройствами с шероховатыми стенками.

Далее разработан метод определения эффективности вихревого контактного устройства с ленточным завихрителем, полученный с использованием ячеечной модели структуры потоков и модели диффузионного пограничного слоя. Произведен расчет эффективности десорбции O_2 из воды от скорости воздуха. Произведено сравнение результатов расчета эффективности с экспериментальными данными Сергеева А.Д. при десорбции O_2 из воды от скорости воздуха при восходящем осевом и закрученном движении в трубе диаметром $d=0,0168\text{м}$ и высотой $H=0,2\text{м}$ (рис. 6).

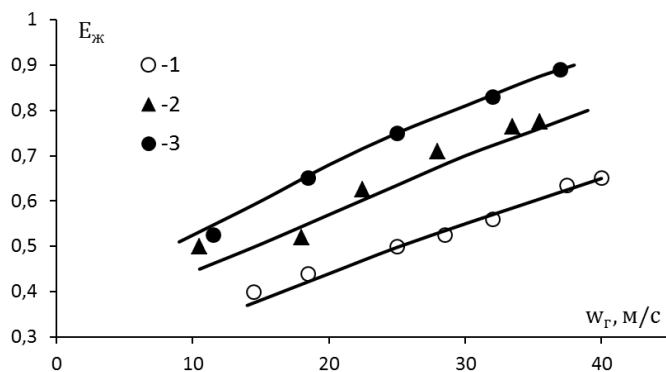


Рис. 6 Зависимость эффективности десорбции O_2 из воды от скорости воздуха при восходящем осевом и закрученном движении в трубе; $d=0,0168\text{м}$; $H=0,2\text{м}$. Температура воздуха и воды 20°C . 1 – осевое движение потока ($q=2,4\text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$); 2, 3 – закрученный поток (2- $q=2,4\text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$; 3- $q=1,134\text{м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$) при шаге закрутки

$S_{лз}=0,062\text{ м}$. Точки - экспериментальные данные Сергеева А.Д., линии - расчет по формуле (7) при различных режимах

На основании приведенных результатов расчетов эффективности десорбции труднорастворимых газов из воды, сделан вывод о высокой разделительной способности вихревых контактных устройств.

Рассмотрен частный случай записи критерия (показателя) энергоэффективности при заданной эффективности массопередачи очистки воды от диоксида углерода на ТЭС, получен-

ный на основе критерия эффективности, предложенного Соколовым В.Н. и Доманским И.В. для приближенной оценке себестоимости продукции в газожидкостных реакторах, который представляет собой отношение массы вещества M , получаемого за единицу времени в объеме аппарата $V_{\text{ап}}$, к затраченной на это мощности N . Модифицированный показатель энерго-массообменной эффективности, связанный с эффективностью массопередачи $E_{\text{ж}}$, объемом аппарата SH (м^3) и перепадом давления в аппарате ΔP (Па) получил вид

$$K'_{\text{эф}} = \frac{L \cdot E_{\text{ж}} (C_{\text{нж}} - C_{\text{ж}}^*) \rho_{\text{г}}}{G \cdot S \cdot H \cdot \Delta P}, \quad (12)$$

где S – площадь поперечного сечения аппарата, м^2 ; H – высота аппарата, м ; ΔP – гидравлическое сопротивление, Па; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; G – массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$; L – массовый расход воды, $\text{кг}/\text{с}$.

Рассмотрен пример расчета процесса десорбции CO_2 из воды воздухом при декарбонизации в пленочных аппаратах на ТЭС.

Требуемая длина контактной трубки определялась по выражению (идеальное вытеснение)

$$H = \frac{L}{\beta_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \pi (d - 2\delta_{\text{ж}})} \ln \left(\frac{1}{1 - E_{\text{ж}}} \right), (E_{\text{ж}} < 1). \quad (13)$$

где $\delta_{\text{ж}}$ – средняя толщина пленки жидкости, м .

С полученным значением H вычислялся перепад давления в трубке и далее $K'_{\text{эф}}$ (12).

Представлена зависимость показателя энергоэффективности от скорости воздуха в трубе с гладкими и шероховатыми стенками, в трубе с ленточным завихрителем (рис. 7).

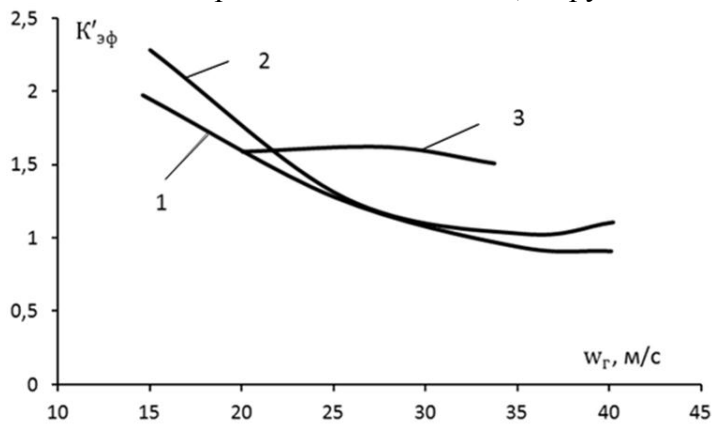


Рис. 7 Значение показателя энергоэффективности от скорости воздуха: 1 – осевое восходящее движение пленки жидкости и газа в трубе; 2 – восходящее закрученное движение пленки жидкости и газа в трубе (шаг ленточного завихрителя $S_{\text{лз}}=0,118\text{м}$); 3 – восходящее движение потоков по шероховатой поверхности трубы (высота $h=0,3\text{мм}$; шаг 1мм).

Приведенный расход воды $q = 2,4\text{м}^3 / (\text{м} \cdot \text{ч})$, диаметр трубки $d = 0,0168\text{м}$

Из рис. 7 следует, что при увеличении скорости воздуха для осевого и для закрученного движения газожидкостного потока, значение показателя энергоэффективности снижается, однако при скорости выше 35 м/с при осевом движении потока снижение значения показателя энергоэффективности замедляется, а при закрученном движении начинает расти. При восходящем движении пленки жидкости и газа по шероховатой поверхности трубы показатель энергоэффективности растет при увеличении скорости до 28 м/с, далее начинает снижаться.

В следующем разделе третьей главы представлен расчет и выполнен анализ гидравлического сопротивления, эффективности, показателя энергоэффективности, высоты разных видов аппаратов по способу организации межфазной поверхности.

На основании выполненных расчетов получена гистограмма мощности, затрачиваемой на подачу воздуха на очистку 80 тонн воды в час от CO_2 при $E_{\text{ж}}=0,98$ (рис.8) и гистограмма показателя энергоэффективности для аппаратов с разным способом организации межфазной поверхности при очистке 80 т/ч воды от CO_2 (рис. 9)

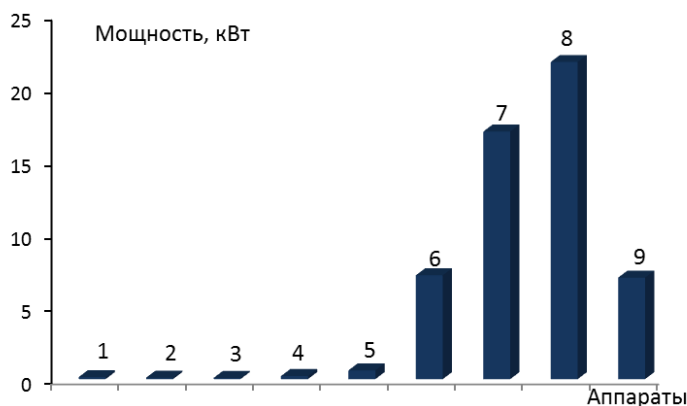


Рис. 8 Гистограмма мощности, затрачиваемой на подачу воздуха на очистку 80 тонн воды в час от CO_2 на 98%:

1 – гравитационное течение пленки жидкости в трубах (слабое взаимодействие фаз); 2 – течение пленки жидкости по шероховатой поверхности труб (слабое взаимодействие фаз); 3 – течение пленки жидкости по слою насадки (сегментно-регулярная насадка «Инжехим» ($a_v = 280\text{ м}^2 / \text{ м}^3$)); 4 – течение пленки жидкости по слою насадки (рулонная гофрированная насадка «Инжехим» с шероховатой поверхностью ($a_v = 300\text{ м}^2 / \text{ м}^3$)); 5 - течение пленки жидкости по слою насадки (нерегулярная насадка «Инжехим-2002» ($a_v = 200\text{ м}^2 / \text{ м}^3$)); 6 - течение пленки жидкости по слою насадки (металлические кольца Рашига ($a_v = 220\text{ м}^2 / \text{ м}^3$)); 7 – восходящее течение пленки жидкости в трубах (сильное взаимодействие фаз– осевой поток); 8 – восходящее течение пленки жидкости по шероховатой поверхности в трубах (сильное взаимодействие фаз); 9 – закрученное восходящее течение пленки жидкости в трубах с ленточными завихрителями (сильное взаимодействие фаз)

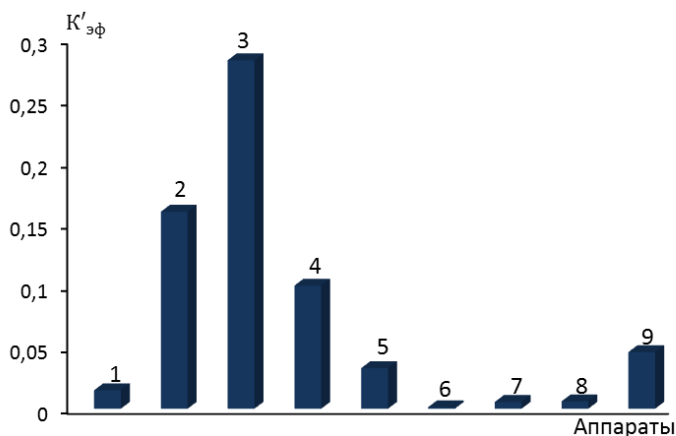


Рис. 9 Гистограмма показателя энергоэффективности для аппаратов с разным способом организации межфазной поверхности при очистке 80 т/ч воды от CO_2 (остальные обозначения на рис. 8)

На основании произведенных расчетов сделан вывод о том, что при одинаковом расходе воды для получения требуемой эффективности очистки от CO_2 целесообразно использовать противоточные аппараты с современными насадками с шероховатой поверхностью с пленочным течением жидкости. Однако, стоит отметить, что при условии ограниченности пространства помещений водоочистки на ТЭС, следует отдать предпочтение аппаратам с закруткой потока с сильным взаимодействием фаз, ввиду их малых габаритов.

В 4 главе показаны запатентованные технические решения для повышения эффективности деаэраторов и декарбонизаторов на ТЭС.

Запатентована схема модернизации установки для деаэрации воды с дополнительным прямоточным насадочным турбулентным устройством. Повышение эффективности очистки достигается за счёт установки во входном трубопроводе подачи воды массообменного турбулентного устройства с интенсификатором (мелкой насадкой). Перед входом в слой насадки в воду подается воздух (декарбонизация) или водяной пар (деаэрация). Хаотичная насадка обеспечивает интенсивный турбулентный режим взаимодействия воздуха (пара) с водой и дробление на мелкие пузырьки. За счет этого значительно повышается удельная поверхность контакта фаз и обеспечивается высокая эффективность массопередачи (извлечения растворенных газов).

На основании диффузионной модели структуры потоков получена методика расчета массообменного турбулентного прямоточного устройства для определения целесообразности его использования. Проведен расчет декарбонизатора с турбулентным насадочным прямоточным устройством. Расчет показал снижение общего гидравлического сопротивления основного аппарата, за счёт снижения необходимого слоя насадки, и повышение эффективности очистки от растворенных газов до требуемой нормы при больших концентрациях в воде на линии подачи. При малых концентрациях на входе прямоточное насадочное устройство можно исключить из работы путем байпаса воды и производить очистку только в основном аппарате. Аналогично можно использовать прямоточное массообменное устройство и для повышения эффективности термического деаэратора.

Запатентовано техническое решение для повышения эффективности очистки воды от растворенных газов в деаэраторах и декарбонизаторах, которое заключается в создании двух зон очистки исходной воды, при этом десорбцию диоксида углерода (кислорода) из исходной воды осуществляют при контакте обрабатываемой воды с воздухом (паром) в прямотоке и противотоке или только в противотоке. Использование предлагаемого аппарата позволит обеспечить очистку исходной воды при колебаниях нагрузки по воде.

Предложен и запатентован способ повышения эффективности за счет секционирования деаэраторного бака перфорированными перегородками. Это позволяет повысить эффективность очистки воды за счет секционирования деаэраторного бака и обеспечить практически полное удаление растворенных газов (до состояния равновесия) из воды при числе секций от 4 до 8 (рис. 3).

Предложен способ модернизации установки для деаэрации воды на Казанской ТЭЦ-2 за счет установки деаэратора пленочного типа с регулярной рулонной гофрированной насадкой «Инжехим» с шероховатой поверхностью с небольшим гидравлическим сопротивлением, взамен пришедшего в негодность деаэратора ДА-200 ст. №7.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе применения моделей пограничного слоя и моделей структуры потоков получены уравнения и методы расчета эффективности термических деаэраторов и декарбонизаторов следующих конструкций:

- пленочных при слабом и сильном взаимодействии пленки жидкости с газовым (паровым) потоком при движении в гладких, шероховатых каналах и с закруткой фаз;

- насадочных с регулярными и хаотичными насадками новых конструкций при пленочном режиме;

- барботажного деаэрационного бака с перегородками.

2. Сравнение полученных результатов расчета эффективности очистки воды от CO_2 и O_2 с известными экспериментальными данными дало удовлетворительное согласование. Полученные методики расчета могут быть рекомендованы для расчета эффективности термических деаэраторов и декарбонизаторов рассмотренных конструкций на ТЭС.

3. На основе использования трехслойной модели турбулентного пограничного слоя получено уравнение для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при пленочном течении в аппаратах при сильном и слабом взаимодействии фаз. Сравнение результатов расчета по полученному выражению с экспериментальными данными показало удовлетворительное согласование и может быть рекомендовано для расчета теплообменных процессов.

4. Получено модифицированное выражение для показателя энергомассообменной эффективности декарбонизаторов и термических деаэраторов, который позволяет выполнить сравнительную оценку аппаратов. Представлены результаты расчетов энергомассообменных характеристик декарбонизаторов различных конструкций. В условиях ограниченности пространства помещений, в которых устанавливаются аппараты водоочистки на ТЭС, рекомендуется использовать пленочные аппараты с вихревыми трубчатыми устройствами с сильным взаимодействием фаз, а также пленочные противоточные аппараты с нерегулярными насадками (при использовании насадки «Инжехим-2002» для обеспечения требуемой эффективности очистки необходимая высота насадки в 2,4 раза меньше, чем при использовании металлических колец Рашига). В других случаях, пленочные аппараты с регулярными современными насадками с шероховатой поверхностью, например сегментно-регулярной насадкой «Инжехим» и рулонной гофрированной насадкой «Инжехим» с шероховатой поверхностью, как наиболее эффективной и исследованной в широком интервале нагрузок по воде и газу.

5. Разработаны научно-технические решения модернизации аппаратов для повышения эффективности работы термических деаэраторов и декарбонизаторов (подтверждается патентами на полезные модели).

6. Результаты работы используются ЗАО «Ивэнергосервис» при проектировании систем очистки воды от растворенных газов на ТЭС, в частности при обосновании технических решений по реконструкции деаэрационных установок ПАО «Северсталь», а также Омской ТЭЦ-5 Омского филиала АО «ТГК-11».

7. Полученный показатель энергоэффективности используется в ООО «Волга НИПИТЭК» (г. Самара) для научно-обоснованного выбора контактных устройств массообменных промышленных аппаратов на предприятиях ТЭК.

8. Результаты расчета термического деаэрата низкого давления приняты филиалом АО «Татэнерго»-«Казанская ТЭЦ-2» в качестве возможного варианта для замены пришедшего в негодность деаэрата ДА-200 ст. №7 согласно проведенного технического диагностирования.

9. Представленные математические модели и методы расчета массопереноса в газожидкостных средах могут быть обобщены на широкий класс массообменных аппаратов очистки воды от растворенных газов на ТЭС и десорберов на промышленных предприятиях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. Башаров М.М. Модель теплоотдачи при турбулентном гравитационном пленочном течении / М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Г.К. Хамидуллина (Г.К. Шагиева) // **Известия ВУЗов. Проблемы энергетики**. 2012. №9-10. С. 39-46.
2. Лаптев А.Г. Повышение эффективности очистки воды от растворенных газов на ТЭС / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева// **Теплоэнергетика**. 2017. №1. С.79-83.
3. Лаптева Е.А. Эффективность насадочных декарбонизаторов в водоподготовке ТЭС / Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева, А.Г. Лаптев// **Известия ВУЗов. Проблемы энергетики**. 2015. №11-12. С. 20-25.
4. Лаптев А.Г. Эффективность очистки воды от растворенных газов при слабом и сильном взаимодействии фаз в пленочных аппаратах / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева // **Теплоэнергетика**. 2018. №4. С.65-71.
5. Лаптева Е.А. Эффективность очистки воды от растворенных газов на тарелке с закрученным дисперсно-кольцевым потоком/Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева, А.Г. Лаптев// **Вода: химия и экология**. 2017. № 3(105). С. 27-33.
6. Лаптева Е.А. Очистка воды от растворенных газов в пленочном аппарате с дискретно-шероховатыми стенками/ Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева, А.Г. Лаптев// **Надежность и безопасность энергетики**. 2018. Т.11. №1. С.48-53.
7. Лаптева Е.А. Сравнительная характеристика контактных насадок в декарбонизаторах и термических деаэраторах ТЭС / Е.А. Лаптева, Г.К. Шагиева, А.Г. Лаптев // **Вестник Казанского государственного энергетического университета**. 2017. №2(34). С. 33-42.

Патенты на полезные модели:

8. **Пат.** 162574 Рос. Федерация: Установка для деаэрации воды/ Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. № 2015149579/06. заявл. 18.11.2015. опубл. 20.06.2016. Бюл. №17. 6 с.
 9. **Пат.** 168133 Рос. Федерация: Установка для декарбонизации воды / Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. № 2016110536. заявл. 22.03.2016. опубл. 18.01.2017. Бюл.№2. 6 с.
 10. **Пат.** 173406 Рос. Федерация: Установка для деаэрации воды/ Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. №2016149063. заявл. 13.12.2016. опубл. 31.08.2017. Бюл. №25. 6 с.
- и другие публикации.