



Лаптева Елена Анатольевна

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ  
В МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ АППАРАТАХ  
ГАЗОЖИДКОСТНОГО КОНТАКТА**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

**Научный консультант:** доктор технических наук, доцент  
**Фарахов Мансур Инсафович**

**Официальные оппоненты:** **Бабак Владислав Николаевич,**  
доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, ведущий научный сотрудник группы математического моделирования физико-химических процессов;

**Голованчиков Александр Борисович,**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств;

**Попов Игорь Александрович,**  
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения.

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится 10 октября 2025 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.312.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=550925>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н., доцент

Дмитриева Оксана  
Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

В химической технологии в различных отраслях промышленности (химии, нефтехимии и нефтегазопереработке) для проведения процессов разделения гомогенных и гетерогенных жидких и газовых (паровых) смесей самое широкое применение получили аппараты газо (паро)-жидкостного контакта – это колонны: ректификации, абсорбции (десорбции), сепарации аэрозолей, охлаждения газов и жидкостей, конденсации, испарения, мокрой очистки газов от дисперсной фазы и др. В большинстве перечисленных процессов происходит одновременный переход теплоты, вещества (компонента) и дисперсных частиц из одной фазы в другую в условиях подвижной межфазной поверхности и не всегда известной площадью контакта фаз. Кроме этого такие процессы характеризуются значительными энергозатратами (особенно ректификация) и сложностью конструкций контактных устройств, неоднородностью распределения фаз при масштабном переходе, что является одной из основных причин снижения эффективности проводимых процессов. Описание явлений переноса импульса, массы и энергии в газо(паро)-жидкостных средах осуществляется с применением приближенных и численных методов на основе решения нелинейных систем дифференциальных уравнений с учетом межфазного переноса. В связи с повышением требований к качеству продукции, энергосбережению и заменой импортного оборудования на новое отечественное актуальной проблемой является развитие методов математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов, а также экспериментальные исследования новых конструкций контактных устройств с внедрением энергоэффективных научно-технических разработок на промышленных предприятиях. Принята государственная программа на период до 2024 года и стратегия развития химического и нефтехимического комплекса до 2030 года. В перечень важных направлений технологического развития РФ вошли десять «сквозных технологий», в том числе: нефтегазовое машиностроение и оборудование для переработки углеводородов, а также энергетическое машиностроение. Работа выполнена в рамках госзаказа №13.405.2014/К «Энерго- и ресурсосбережение и снижение техногенного воздействия на окружающую среду на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2014-2016 гг.), гранта Президента Российской Федерации научной школы НШ – 9771.2016.8 «Математические модели и импортозамещающие модернизации аппаратов разделения смесей и очистки газов и жидкостей в нефтехимическом комплексе и энергетике» (2016-2017 гг.), в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (№13.6384.2017/БЧ): «Теоретические основы моделирования интенсифицированных процессов разделения и очистки смесей в нефтехимии и энергетике» (2017–2019 гг.), а также в рамках научного проекта РНФ 18-79-101-36 «Теоретические методы моделирования и разработки эффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2018-2023 гг.). Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных

и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

**Степень разработанности темы:** Теоретические основы физического и математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов и модернизации аппаратов были сформулированы и развиты в многочисленных работах академиков АН СССР Жаворонкова Н.М., Кафарова В.В., Кутателадзе С.С., Нигматулина Р.И., Леонтьева А.И., Ландау Л.Д. академиками РАН Мешалкиным В.П., Алексеенко С.В., а также профессорами Левичем В.Г., Плановским А.Н., Касаткиным А.Г., Малюсовым В.А., Куловым Н.Н., Комиссаровым Ю.А., Кутеповым А.М., Дильманом В.В., Розеном А.М., Романковым П.Г., Холпановым Л.П., Дьяконовым С.Г., Голованчиковым А.Б., Лагуткиным М.Г., Систером В.Г., Саркисовым П.Д., Павленко А.Н., зарубежными учеными: Э.Ф. Тейлором, Данквертсом П.В., Р.Х. Jiang, S. Gurke, Хьюит Дж., Холландом Ч.Д. и многими другими. Достигнуты значительные результаты в создании интенсифицированных процессов в аппаратах химической технологии. Однако в связи принятой государственной программой развития химического и нефтехимического комплекса РФ требуется продолжение исследований и разработки новых высокоэффективных конструкций аппаратов и модернизации действующих.

**Цель работы:** комплексное повышение эффективности широкого класса тепломассообменных и сепарационных процессов в модернизированных аппаратах двухфазного контакта газ (пар)-жидкость на основе развития методов физического и математического моделирования.

**Задачи исследования:**

1. Получение замыкающих соотношений по кинетическим характеристикам в системах дифференциальных уравнений процессов совместного переноса импульса, массы, теплоты и аэрозольных частиц в пленочных, барботажных, насадочных и вихревых контактных устройствах с интенсификаторами для определения эффективности процессов на основе данных по гидравлическому сопротивлению локальных областей и всей рабочей зоны промышленного аппарата.

2. Разработать математическую модель и алгоритм расчета эффективности тепломассообмена и турбулентной сепарации тонкодисперсной фазы (<20 мкм) в барботажном слое при очистке газов в скрубберах.

3. Разработать математическую модель абсорбции и десорбции газов при пленочном течении в вертикальных каналах с интенсификаторами и в аппаратах с регулярными и хаотичными контактами элементами (насадками) при слабом и сильном взаимодействии пленки с газовым потоком. Получить алгоритмы расчетов эффективности разделения смесей.

4. Разработать математическую модель тепло- и массообмена в турбулентном барботажном слое и численно исследовать эффективность процессов на контактных устройствах с тонким и высоким газожидкостным слоем при десорбции коррозионно-активных газов.

5. Получить алгоритм расчета эффективности разделения смесей при ректификации и абсорбции в барботажных колонах с учетом неравномерности распределения фаз.

6. Получить и обобщить экспериментальные данные на стендах и пилотных установках по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам контактных устройств с интенсификаторами в пленочных и насадочных аппаратах.

7. Разработать математическую модель охлаждения воды и газов в пленочных градириях и скрубберах с учетом поперечной неравномерности распределения фаз. Численно исследовать влияние неравномерностей профилей скоростей фаз на эффективность тепломассообмена и сепарации аэрозолей. Сделать сравнительную оценку современных отечественных и зарубежных контактных устройств оросителей градириен и скрубберах–очистки и охлаждения газов.

8. Внедрить разработанные математические модели, алгоритмы расчетов и научно-технические решения по модернизации аппаратов в проектных и научно-исследовательских организациях, на промышленных предприятиях и в учебном процессе технических вузов.

**Объекты исследования:** контактные устройства различных конструкций в аппаратах разделения смесей с пленочным течением жидкости, с закрученным движением фаз и с барботажными слоями на предприятиях в различных отраслях промышленности.

**Предмет исследования:** процессы совместного тепломассообмена и сепарации тонкодисперсной фазы в газах в устройствах с пленочным течением жидкостей (слабое и сильное взаимодействие с газом, в том числе и с закруткой фаз), в насадочных колоннах, а также в барботажных системах на контактных устройствах различных конструкций и масштабов.

**Основы научного подхода** заключаются в записи систем дифференциальных уравнений переноса массы и теплоты для ядра потока отдельного для газа и жидкости с межфазными объемными (локальными или осредненными) источниками и условиями равновесия. Основные характеристики источников – коэффициенты тепло- и массоотдачи вычисляются с применением модифицированной гидродинамической аналогии, где учет возмущений в пограничном слое учитывается параметрически на основе баланса импульса. Этот подход используется для хаотичных насадок в абсорбционных и ректификационных колоннах, насадочных скрубберах охлаждения и очистки газов, а также для регулярных насадок с интенсификаторами в пленочных градириях. Таким образом, основной экспериментальной информацией является гидравлическое сопротивление контактных устройств.

**Методы решения поставленных задач:**

- экспериментальные исследования процессов на макетах контактных устройств и аппаратов, а также пилотных установках; численные и приближенные методы решения систем дифференциальных уравнений переноса с применением программных пакетов, расчеты массообменных колонн AspenHysys и Chemcad, а также собственные разработанные программы для ЭВМ; методы и математические модели из теории пограничного слоя и гидродинамической структуры потоков.

**Научная новизна диссертационной работы**

Научная новизна диссертационной работы связана с определением параметров систем дифференциальных уравнений совместного переноса импульса, массы, теплоты и дисперсной фазы для систем газ (пар)-жидкость при турбулентном режиме в пленочных, вихревых, барботажных и насадочных аппаратах с интенсификаторами

явлений переноса, а также численным и аналитическим решением этих систем дифференциальных уравнений с получением расчетных зависимостей для эффективности совместных теплообменных и сепарационных процессов в модернизированных аппаратах.

1. На основе применения известного подхода, который заключается в замене интенсифицированной поверхности теплообмена на некоторую условную эффективную плоскую поверхность с осреднением явлений переноса, т.е. фактически с изменением граничных условий на поверхности, получены выражения в виде безразмерных комплексов для касательного напряжения трения на интенсифицированных поверхностях, как для однофазных сред, так и для системы газ-жидкость (пленочные и насадочные аппараты). Используются модели турбулентного пограничного слоя Дайслера и Ван-Дрифта, а также свойства консервативности законов трения к возмущениям, которые учитываются параметрически.

2. На трех опытных установках с колоннами диаметром 100, 200 и 600 мм получены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению, предельным нагрузкам и эффективности теплообмена запатентованных контактных устройств с интенсификаторами (процессы ректификации, охлаждения воды воздухом, увлажнение воздухом водой).

3. Выполнена модификация гидродинамической аналогии Чилтона-Кольборна для потоков с градиентом давления, вызванного формой интенсификаторов на поверхностях обтекаемых тел (хаотичные и регулярные насадки, шероховатость поверхности каналов и др.), где подстройка параметров выполняется на основе баланса импульса в пограничном слое при известном среднем касательном напряжении. В результате получены выражения в виде чисел Нуссельта и Шервуда для различных контактных устройств при ламинарном и турбулентном режимах с одно- и двухфазными средами.

4. На основе применения модели локальной изотропной турбулентности для газожидкостных сред получены выражения для вычисления средних коэффициентов турбулентной вязкости в жидкой фазе за пределами пограничного слоя при пузырьковом режиме барботажа, а также при стесненном движении пузырей. Показано, что при стесненном движении пузырей коэффициент турбулентной вязкости снижается. Получено выражение для расчета коэффициента обратного (продольного) перемешивания в жидкой фазе барботажного слоя на основе использования модели Тейлора.

5. Разработаны алгоритмы расчетов эффективности сепарации тонкодисперсной фазы из газов в барботажном слое (мокрая очистка), на поверхность пленки в каналах с интенсификаторами, а также в насадочных слоях. Используются модели турбулентно-инерционного осаждения частиц из газов. Получены расчетные выражения для эффективности сепарации. Численно исследовано влияние неравномерности профиля скорости газа в насадке на эффективность сепарации аэрозолей.

6. Для определения эффективности очистки жидкостей от труднорастворимых газов в насадочных десорберах и барботажных деаэраторах записаны системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с объемными межфазными источниками. Выполнено численное исследование массопереноса растворенного кислорода в деаэраторном баке с барботажным устройством. Установлена связь режимных и конструктивных характеристик барботажа с эффективностью извлечения растворенного кислорода. Для насадочных десорберов получено решение для расчета

эффективности массопередачи в явном виде, которое позволяет определять эффективность массопередачи при различных режимных и конструктивных характеристиках насадок в пленочном режиме.

7. С применением системы дифференциальных уравнений с частными производными представлена замкнутая математическая модель тепло- и массо-переноса на тарелках с барботажным слоем при турбулентном режиме. Вычислены поля скоростей и концентраций и показана возможность учета неравномерностей распределения фаз, которые снижают эффективность процессов. Разработаны технические решения для повышения эффективности разделения смесей.

8. На основе модификации энергетического коэффициента Кирпичева получено выражение для оценки массообменно-энергетической эффективности контактных устройств в десорберах, которое позволяет на этапе предпроектной разработки выбрать рациональные типы насадок и режим их работы.

9. Записана двумерная система дифференциальных уравнений в частных производных с объемными межфазными источниками теплоты и массы для пленочных блоков оросителей градирни и скурубберов охлаждения газов. Выполнено численное решение системы уравнений с учетом неравномерного профиля скорости воздуха на входе. Установлено влияние неравномерности на тепловую эффективность охлаждения воды в градирне.

10. Получено соотношение тепловых эффективностей по жидкой и газовой фазам в пленочной градирне, которое позволяет при заданной эффективности по жидкой фазе использовать тепловую эффективность по газовой. Аналогичные соотношения получены для пленочных скрубберов охлаждения газов.

11. Получен показатель теплогидравлической эффективности градирен с различными типами контактных устройств. Даны результаты расчетов для отечественных и зарубежных конструкций и сделаны выводы о рациональных конструкциях для заданных условий работы.

Отличительной способностью математических моделей, алгоритмов расчетов и полученных выражений для эффективности тепло- и массопередачи и сепарации аэрозолей в пленочных, насадочных и барботажных аппаратах является возможность вычислить эффективности процессов основываясь на результатах гидравлических испытаний контактных устройств без идентификации параметров модели по тепло- и массообмену. Полученные выражения значительно сокращают трудоемкость, затраты на экспериментальные исследования контактных устройств и время предпроектных разработок.

***Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит:*** в развитии методов математического моделирования совместных процессов межфазного переноса в системах газ(пар)-жидкость для пленочных, насадочных и барботажных систем с учетом неоднородностей распределения фаз. В результате получены замкнутые системы уравнений переноса импульса, массы, теплоты и дисперсной фазы (аэрозолей) при турбулентном режиме. Для получения замыкающих выражений рассмотрены модели турбулентного пограничного слоя и модификация гидродинамической аналогии переноса, где учет возмущений (шероховатость, кривизна поверхности, хаотичные слои, двухфазность и т. д.) выполняется параметрически на основе известного потока импульса в пограничном слое. Такой подход

значительно сокращает число этапов экспериментальных исследований явлений переноса и позволяет выполнять вычисления на основе применения полученного из экспериментов гидравлического сопротивления двухфазной среды. Разработаны математические модели и алгоритмы расчета тепло- и массообмена в барботажных пленочных, и насадочных аппаратах при разделении различных смесей при турбулентном режиме. Получены выражения и алгоритм расчета газосепараторов аэрозолей с выбором режимных и конструктивных характеристик с применением энергетического коэффициента. Получены выражения и алгоритм расчета пленочных градиен с различными типами контактных импортозамещающих устройств. Разработаны математические модели и выполнены расчеты барботажных термических деаэраторов и пленочных декарбонизаторов с новыми импортозамещающими насадками. Выполнено внедрение разработанных контактных устройств с повышением эффективности процессов в нескольких ректификационных колоннах на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки. Получены патенты.

***Результаты внедрения научно-технических разработок:***

Разработаны научно-технические решения по модернизации контактных устройств в промышленных колонных аппаратах. После внедрения снижены энергозатраты на разделение смесей от 20 % до двух раз. Результаты научных работ внедрены в промышленность: в ИВЦ «Инжехим» налажен промышленный выпуск разработанной регулярной рулонной гофрированной насадки для контакта газа (пара) и жидкости в колонных аппаратах различного масштаба. Регулярная насадка для теплообменных аппаратов (патент 54818) внедрена в нескольких колонных аппаратах на предприятиях нефтехимического комплекса – в трех ректификационных колоннах разделения этаноламинов на ОАО «Казаньоргсинтез». В результате повышено качество этаноламинов до высшего сорта и снижены энергозатраты в 2 раза на ректификацию. Эксплуатация новых насадочных колонн дает положительные результаты. Экономический эффект от внедрения составляет более 50 млн. руб. в год. В колонне разделения изопрена и изобутилена на ПАО «Нижекамскнефтехим» повышено качество продукции; в ректификационной колонне выделения товарного фенола на ПАО «Казаньоргсинтез». Повышено качество фенола и снижены энергозатраты на 30 %. Экономический эффект более 250 млн. руб. в год; В ректификационной колонне выделения гексена на ПАО «Нижекамскнефтехим»; в комбинированных сепараторах – маслоуловителях аэрозолей на линии товарного этилена в холодильных циклах на ПАО «Казаньоргсинтез». За счет исключения внеплановых основного оборудования, снижения гидравлического сопротивления и повышения качества этилена экономический эффект составляет более 500 млн. руб. в год. Все внедрения характеризуются повышением энергоэффективности проводимых теплообменных и сепарационных процессов и снижением удельных энергозатрат. Разработанные математические модели и алгоритм расчета теплообменных процессов используются при выполнении проектных работ на крупных нефтегазохимических предприятиях: ООО «Нефтегазпроект» г. Казань; АО «ТАНЕКО» г. Нижнекамск; ЗАО «Балтийская химическая компания», г. Москва; ПАО «Казаньоргсинтез» г. Казань; ПАО «Нижекамскнефтехим» г. Нижнекамск; ЗАО "Ивэнергосервис" г. Иваново; в научных и образовательных учреждениях: «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» СО РАН г. Новосибирск; НПФ «МИКСИНГ»

г. Санкт-Петербург; «МГУ им. Ломоносова» г. Москва (филиал в г. Душамбе); ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» г. Казань, в фирмах: ООО «Инженерный центр «Нефть и Газ» г. Самара; ООО «Волга НИПИТЭК» г. Самара; проектный институт «СХПП» г. Казань, ООО ИВЦ «Инжехим» г. Казань и др.

### ***Достоверность исследований***

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается применением на опытных установках сертифицированных и поверенных средств измерения и контроля гидравлических и термодинамических характеристик двухфазных сред. Удовлетворительным согласованием расчетов по разработанным математическим моделям с экспериментальными данными различных авторов для известных конструкций контактных устройств, а также с собственными экспериментами для разработанных насадок. Кроме этого успешным внедрением модернизированных промышленных аппаратов разделения смесей.

### ***Основные положения, выносимые на защиту:***

1. Полученные экспериментальные данные для разработанных контактных устройств по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам в колонных аппаратах.
2. Математические модели определения эффективности процессов разделения гомогенных и гетерогенных смесей в пленочных, насадочных, барботажных и комбинированных аппаратах.
3. Математические модели для определения чисел Шервуда и Нуссельта в аппаратах газожидкостного контакта.
4. Внедрение научно-технических разработок по модернизации промышленных аппаратов разделения смесей.

### ***Личное участие***

1. Постановка и решение задач математического моделирования и определения эффективности явлений переноса в пленочных, насадочных и барботажных аппаратах с учетом неравномерности распределения фаз.
2. Проведение экспериментальных исследований на лабораторных установках и стендах процессов ректификации, охлаждения воды воздухом, увлажнения воздуха водой с применением разработанных насадок с интенсификаторами. Обобщение экспериментальных исследований в виде расчетных выражений по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам.
3. Разработка диссипативной модели трения и тепломассоотдачи при движении одно- и двухфазных сред в аппаратах с контактными устройствами различных конструкций с поверхностными и объемными интенсификаторами. Разработка алгоритмов расчета. Выполнение расчетов и сравнение с экспериментальными данными.
4. Разработка математических моделей и алгоритмов расчета эффективности ректификационных и абсорбционных колонн, декарбонизаторов, термических деаэраторов, пленочных градирен, скрубберов-охладителей газов, а также аппаратов мокрой очистки газов от дисперсной фазы. Выполнение расчетов и сравнение с экспериментальными данными.
5. Разработка высокоэффективных контактных устройств и патентование модернизированных ректификационных колонн, мини градирни, декарбонизаторов

и газосепараторов дисперсной фазы. Разработка и регистрация программ для расчета данных аппаратов на ЭВМ.

б. Расчеты и разработка вариантов модернизации промышленных ректификационных колонн разделения этаноламинов, бензиновой колонны, колонны получения чистого гексена. Участие во внедрении модернизированных колонн на промышленных предприятиях.

***Соответствие паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий***

п. 2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов.

п. 4. Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратурного оформления.

п. 9. Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы.

***Научные публикации.*** По теме диссертации опубликовано **126** научных работ: статьи, монографии, и материалы конференций, из них **30** статей из перечня ВАК, **37** в изданиях, входящих в базы SCOPUS и WoS (ТОХТ, ИФЖ, ХиТТМ, JET, ЖТФ, Т и А, Теплоэнергетика и др.). Получено **3** патента и зарегистрировано **2** программы для ЭВМ, опубликовано **8** монографий.

***Апробация работы и публикации***

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (г. Казань, 2015); XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (г. Санкт-Петербург, 2019); II International scientific and practical conference (London, 2020); Национальной научно-практической конференции (г. Тюмень, 19–20 ноября 2020 года); Международный симпозиум "Устойчивая энергетика и энергомашиностроение - 2021: SUSE-2021" Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире (г. Казань, 2021); X International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2022; X национальной научно-практической конференции с международным участием Моделирование энергоинформационных процессов (г. Воронеж, 2022); VI Всероссийской научно-практической конференции памяти доктора технических наук, профессора В.Г. Каширских в рамках проведения года науки и технологий в Российской Федерации и празднования 300-летия Кузбасса. Энергетика и энерго-сбережение: теория и практика; Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ» (2013-2020); Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета (г. Иваново, 2023) и другие.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из восьми глав, введения, заключения, списка литературы из 286 источников. Диссертационная работа изложена на 520 страницах, содержит 5 приложений, 158 рисунков и 43 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы актуальность, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы и достоверность исследований, личное участие автора.

**В первой главе** дана постановка проблемы и сформулированы методы ее решения для аппаратов газожидкостного контакта. Записаны системы дифференциальных уравнений в частных производных для пленочных, насадочных и барботажных контактных устройств при проведении процессов тепломассообмена и сепарации дисперсной фазы из газов (мокрая очистка).

Рассмотрены и обсуждены проблемы, возникающие на этапах проектирования или модернизации крупномасштабных аппаратов химической технологии. В первую очередь, это колонные аппараты разделения гомогенных смесей ректификацией и абсорбцией, скрубберы-охладители технологических и дымовых газов, а также градирни охлаждения воды воздухом и аппараты «мокрой» очистки газов от различного вида дисперсной фазы. Отмечено, что очистка газов от дисперсной фазы жидкостью при непосредственном контакте фаз часто сопровождается теплообменом. Все перечисленные выше промышленные аппараты являются пленочными, насадочными, тарельчатыми, вихревыми и комбинированными. Основной проблемой является снижение эффективности проводимых тепломассообменных и сепарационных процессов в промышленных аппаратах при увеличении их размеров, а также значительный требуемый объем экспериментальной информации, получаемой на различных этапах выполняемых предпроектных работ. Анализируются подходы к решению обозначенной проблемы, которые заключаются в численном моделировании физических полей в аппаратах, в применении моделей структуры потоков, в поэтапном экспериментальном исследовании процессов на макетах аппаратов и пилотных установках. В диссертационной работе получили дальнейшее применение и развитие численное моделирование, а также модели структуры потоков, в которых кинетические характеристики переноса импульса, массы и теплоты определяются с использованием разработанных автором математических моделей (главы 2–7), где основой экспериментальных данных является гидравлическое сопротивление контактных устройств с газо(паро)жидкостными средами, что дает возможность учесть неравномерности (неоднородности) распределения фаз в крупногабаритных аппаратах и оценить их влияние на эффективность процессов.

В первой главе записаны различные частные случаи систем уравнений совместного переноса импульса, массы, энергии и тонкодисперсной фазы для пленочных, насадочных и тарельчатых аппаратов с граничными условиями различного рода и с локальными межфазными источниками, а также системы уравнений структуры потоков жидкой и газовой фаз в виде диффузионных и ячеечных моделей.

**Во второй главе** на основе диссипативной модели получены выражения для безразмерных комплексов трения при турбулентном движении одно- и двухфазных потоков на контактных устройствах с интенсификаторами различных конструкций, необходимых для вычисления чисел Нуссельта и Шервуда с применением гидравлического сопротивления. Использован подход представления интенсифицированной поверхности в виде некоторой условной эффективной поверхности с осреднением гидромеханических (а также тепломассообменных) характеристик течения, т. е. фактически с изменением граничных условий на плоской стенке. О применимости

такого подхода отмечали С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев и др. Еще в середине прошлого столетия были установлены консервативные свойства математического описания турбулентного пограничного слоя с возмущениями (кривизна и шероховатость поверхности и т. д.).

Связь локальной скорости диссипации кинетической энергии, представленной в монографии Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица, с касательным напряжением трения имеет вид  $\varepsilon = \tau du/du$ . Данное выражение стало широко применяться с 60-70-х гг. прошлого столетия в работах В.Н. Соколова, И.В. Доманского, Р.Н. Calderbank, М.Д. Moo-Young и др. для расчета  $\tau_{ст} = \kappa^2 \rho (\bar{\varepsilon} \nu / \rho)^{0,5}$ , где коэффициент пропорциональности для различных контактных устройств с одно- и двухфазными средами установлен в интервале  $\kappa = 1,7-2,4$ . Развитие данного подхода в 80-90-х гг. отражено в работах С.Г. Дьяконова, В.М. Барабаша, В.И. Елизарова, А.Г. Лаптева и др., а в начале этого столетия – в работах М.И. Фарахова, М.М. Башарова, О.С. Чеснокова, Т.М. Фарахова и др. В данной диссертационной работе этот подход получил дальнейшее применение и развитие для моделирования процессов в пленочных и насадочных аппаратах с интенсификаторами при тепломассообмене и сепарации дисперсной фазы.

Для определения среднего касательного напряжения по поверхности контакта используется выражение  $\tau_{ст} = \gamma(u_\infty - u_{гр})$ , в котором для определения безразмерного коэффициента импульсоотдачи применяется интеграл, где  $\gamma^+ = \gamma/u_\infty$ :

$$\gamma^+ = \left[ \int_0^1 \frac{\tau^* d(y/\delta)}{R_\delta^{-1} + R_{\delta_T(y)}^{-1}} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Данное выражение проинтегрировано с различными функциями турбулентной вязкости в пристенном слое:  $R_{\delta_T}(y) = \nu_T(y)/(u_* \delta)$ . Например, с функциями Р.Г. Дайслера и Э.Р. Ван-Дрийдта получено  $\gamma^+ = (R_1 + \chi^{-1} \ln R_\delta)^{-1}$ , откуда коэффициент трения  $C_f = 2(R_1 + \chi^{-1} \ln R_\delta)^{-2}$ , где  $\chi = 0,4$  – константа турбулентности для пластины  $R_1 = 5$ .

Для поверхностей с выступами, волнами и т. д. записываем интеграл для средней скорости диссипации энергии  $\bar{\varepsilon}$  в пристенном слое и в результате интегрирования получаем  $\bar{\varepsilon} = [\tau_{ст}^2 (R_1 + 2,5 \ln R_\delta)] / (\rho \nu R_\delta)$ , откуда среднее касательное напряжение  $\tau_{ст} = [\bar{\varepsilon} \rho \nu R_\delta / (R_1 + 2,5 \ln R_\delta)]^{0,5}$ .

Из выражения для  $\tau_{ст}$  следует среднее значение динамической скорости:

$$u_* = \left[ \bar{\varepsilon} \delta / (\rho (R_1 + \chi^{-1} \ln R_\delta)) \right]^{1/3}. \quad (2)$$

В результате получен безразмерный комплекс трения, где скорость диссипации энергии записана через гидравлическое сопротивление контактных устройств:

$$Re_* = \left[ \frac{\xi Re^3 R_\delta d_*}{2(R_1 + \chi^{-1} \ln R_\delta)} \right]^{1/4}, \quad (3)$$

где  $d_* = \left[ 1 - (1 - R_\delta/R^+)^2 \right]^{-1}$  – безразмерный геометрический комплекс; выражение (3) решается при начальном приближении  $Re_* = Re \sqrt{\xi/8}$ ;  $R_\delta = 0,15 Re_*$ .

Для проверки адекватности математической модели трения по выражению (3) выполнены расчеты и сделано сравнение с известными выражениями для динамической скорости в трубе  $u_* = u_{cp} (\xi/8)^{0,5}$ . Получено согласование в пределах  $\pm 4\%$ .

Для поверхностей с возмущениями в пограничном слое безразмерные параметры корректируются по отношениям  $R_{1ш} = 5 Re_* / Re_{*ш}$ ;  $R_{\delta ш} \approx 0,125 Re_{*ш}$ , где  $Re_{*ш}$  определяется по формуле (3) с данными параметрами и коэффициентом гидравлического сопротивления  $\xi_{ш}$  контактных устройств с интенсификаторами.

Далее во второй главе показаны примеры применения выражения (3) для пленочных и насадочных аппаратов.

**В третьей главе** представлены полученные приближенные математические модели тепломассообмена для контактных устройств газ–жидкость в колонных аппаратах. Использована гидродинамическая аналогия Чилтона – Кольборна, числа Нуссельта и Шервуда записаны в виде  $Nu = Sh_\gamma Pr^{1/m}$ ,  $Sh = Sh_\gamma Sc^{1/m}$ , где показатели степени при числах Прандтля и Шмидта зависят от гидродинамических условий движения сред и установлены экспериментально различными авторами. По аналогии Чилтона – Кольборна  $m = 3$ . Для системы газ–жидкость  $m = 2$  (без ПАВ).

Для пленочных аппаратов получено число Шервуда ( $Re_\gamma > 500$ ):

$$Sh_\Gamma = \frac{Re_\gamma \sqrt{\xi_{op}/8} Sc_\Gamma^{0,33}}{R_1 (\xi/\xi_{op})^{0,5} + \chi^{-1} \ln(0,044 Re_\gamma \sqrt{\xi_{op}})}. \quad (4)$$

Показано согласование с экспериментальными данными В.В. Елизарова ( $\pm 5-7\%$ ) для рулонной насадки при  $w_\Gamma = 1-2$  м/с ( $Re_\Gamma = 527-1054$ ) и плотности орошения  $q_{ж} = 5-20$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч);  $Re_\gamma = w_\Gamma d_\gamma / \nu_\Gamma$  – число Рейнольдса.

Для хаотичных насадок получено ( $Re_\gamma > 40$ )

$$Sh_\Gamma = \frac{Re_* Sc_\Gamma^{0,33}}{R_1 Re_{*o} / Re_* + \chi^{-1} \ln(3 Re_* / (\pi/2 Re_\gamma)^{0,5})}. \quad (5)$$

в котором безразмерный параметр трения

$$Re_* = Re_\gamma \left[ \xi / (8\psi (R_1 Re_{*o} / Re_* + \chi^{-1} \ln R_\delta)) \right]^{1/3}, \quad (6)$$

где  $Re_* = u_* d_\gamma / \nu_\Gamma$ ;  $R_{*o} = u_o d_\gamma \sqrt{\xi_{o0}/8} / \nu_\Gamma$ ;  $\xi_{o0} = 0,316 Re_\gamma^{-0,25}$ ;  $\psi \approx 0,7$ . В первом приближении  $Re_* = 1,55 Re_\gamma^{0,75} \xi^{0,25}$ .

Выражение, аналогичное (5), записывается и для числа Нуссельта. Дано сравнение результатов расчета чисел  $Sh_\Gamma$  и  $Nu_\Gamma$  для различных хаотичных насадок (более 5 типов) с обобщенными экспериментальными данными, приведенными в монографиях В.М. Рамма, М.Э. Аэрова, О.М. Тодеса, Д.Л. Наринского, а также в диссертационной работе Т.М. Фарахова, в интервале чисел Рейнольдса  $100 < Re_\gamma < 10^5$ .

Далее в третьей главе выполнена модификация гидродинамической аналогии Чилтона – Кольборна на возмущенные потоки с различной формой регулярных и хаотичных интенсификаторов при противотоке газа и жидкости в колоннах. Используются свойства консервативности законов трения к различным возмущениям

в пограничном слое. Возмущения учитываются параметрически с применением среднего потока импульса. В результате получено число Шервуда для регулярных насадок в виде ( $Re_3 > 3000$ )

$$Sh_{\Gamma} = 0,158 Re_3^{6/7} Sc_{\Gamma}^{0,33} (\xi_{op}/8)^{3/7}. \quad (7)$$

Аналогичное выражение получено для  $Nu_{\Gamma}$ . Показано сравнение результатов расчета по (7) для регулярной сетчатой насадки в градирне, а также при ректификации различных смесей в орошаемых каналах, обобщенных в монографии В.М. Олевского.

Для определения чисел  $Sh_{\Gamma}$  и  $Nu_{\Gamma}$  в каналах с осевыми и закрученными (вихревыми) дисперсно-кольцевыми потоками при сильном взаимодействии фаз (восходящий прямоток) применена трехслойная модель турбулентного пограничного слоя с учетом затухания турбулентных пульсаций в вязком подслое в виде функции Дайслера. В результате получено:

$$Sh_{\Gamma} = \frac{Re_{\Gamma} Sc_{\Gamma}^{1-m} \sqrt{\xi_3/(8 \cos \theta)}}{1,54 R_1 \left( Re^{0,125} \xi_3^{0,5} \right)^{-1} + 2,5 \ln \left( R_8 / \left( 30 \sqrt{\xi/\xi_3} \right) \right)}, \quad (8)$$

где  $\theta$  – угол закрутки потока. Показано согласование с экспериментальными данными Н.А. Войнова и др. при осевом движении  $\theta = 0^\circ$  ( $10^4 < Re_{\Gamma} < 50 \cdot 10^4$ ) для процесса испарения воды в воздух, а также при закрученном движении фаз в процессе абсорбции аммиака из воздуха водой (экспериментальные данные Н.А. Николаева) при скорости газа от 15 до 30 м/с и плотности орошения  $0,48 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Угол закрутки  $\theta = 30^\circ$ . Согласование с экспериментальными данными  $\pm 7-12 \%$ .

На основе численного решения дифференциального уравнения массообмена в частных производных, записанного для жидкой фазы на барботажной тарелке, показана возможность расчета эффективности ректификации с учетом неравномерного профиля скорости пара и градиента уровня жидкости. Установлено, что указанные неравномерности снижают эффективность по Мерффри на 9–17 % на ситчатых и клапанных тарелках при скорости пара в колонне 0,4–1,2 м/с. Даны технические решения для повышения эффективности массопередачи за счет выравнивания профиля скорости пара.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные данные гидравлических и массообменных характеристик процессов в насадочных колоннах с интенсификаторами при пленочном режиме.

Для исследования увлажнения воздуха водой в колонне диаметром 200 мм выполнены эксперименты с регулярной насадкой из вертикальных полиэтиленовых труб с гладкой и дискретно-регулярной шероховатостью поверхности в виде прямоугольных кольцевых выступов. Диаметр труб 50 мм, удельная поверхность  $110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Высота насадки 1 м. Исследования проводились при нормальных условиях в противотоке фаз при  $w_{\Gamma} = 0,7-1,9 \text{ м/с}$  и  $q_{ж} = 4,9-14,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Целью исследований являлась как проверка математической модели (глава 3), так и разработка рекомендаций по применению данной насадки в градирнях и скрубберах. В результате экспериментов были определены гидравлическое сопротивление сухой и орошаемой насадки, объемный коэффициент массоотдачи, эффективность массообмена в газовой фазе (рисунок 1).

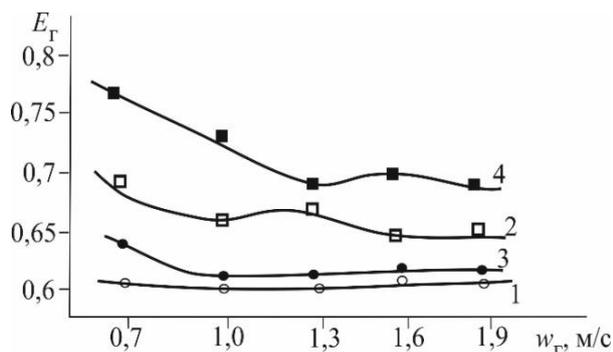


Рисунок 1 – Зависимость эффективности массообмена в газовой фазе от скорости газа при различных плотностях орошения:

- 1, 2 – гладкая насадка; 3, 4 – с дискретно-шероховатой поверхностью;  
 1, 3 – плотность орошения  $q_{ж} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  
 2, 4 –  $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Представлено графическое сравнение зависимостей по объемным коэффициентам массоотдачи для аналогичных насадок от скорости газа.

Исследованы комбинированные насадки из хаотично засыпанных колец (50×50 мм) по верху регулярной. Кольца изготовлены из этих же труб. Высота дополнительного хаотичного слоя 0,2 м с удельной поверхностью  $77 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Установлено, что объемный коэффициент повысился незначительно, а эффективность массообмена в газовой фазе повысилась на 10–13 % при  $q_{ж} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и на 5–12 % – при  $q_{ж} = 14,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и скорости газа 0,7–1,9 м/с.

Автором разработана и запатентована конструкция металлической регулярной рулонной насадки с гофрами, расположенными под углом 45–60° и с шероховатой поверхностью в виде небольших (около 1 мм) полукруглых выступов (рисунок 2а, б).

Удельная поверхность насадки 250–350  $\text{м}^2/\text{м}^3$  (из тонкой ленты до 500  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ), свободный объем 0,9–0,93. Экспериментальные исследования данной насадки выполнены на установке с колонной диаметром 600 мм, высотой около 3 м и высотой слоя 1 м. Плотность орошения от 5 до 100  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , скорость воздуха 0,6–6,0 м/с, число точек орошения около 1000 шт./ $\text{м}^2$ .

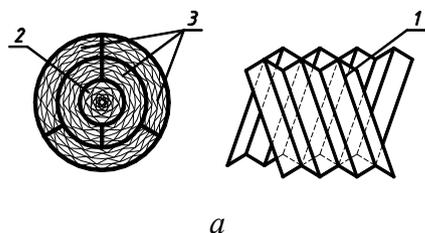


Рисунок 2 – Насадка регулярная сегментная «Инжехим»:

- а – общий вид; б – насадка КЦРФ.067355.001ТУ, изготовленная для промышленной колонны; 1 – гофры смежных листов; 2 – центральный пакет; 3 – остальные пакеты

Получены данные по предельным нагрузкам, перепаду давления, задержке жидкости. Показано применение математической модели массоотдачи (глава 3) для расчета массообменных характеристик исследованной насадки. Экспериментальные исследования бинарной и многокомпонентной ректификации смесей с новыми насадками выполнены в колонне диаметром 100 мм и высотой 3 м. Установка работала при бесконечном флегмовом числе. Исследовались смеси: этанол–вода, ацетон–вода и метанол–этанол–вода. Исследовалась разработанная автором рулонная гофрированная насадка (рисунок 2) с  $a_v = 500 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а также аналогичная по форме насадка из тонкой металлической сетки и хаотичная насадка «Инжехим-2012», разработанная М.М. Фараховым, с размером 16 мм и  $a_v = 270 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Измерялись: профиль концен-

трации в жидкой фазе по высоте колонны, температуры верха и низа, перепад давления и тепловая нагрузка куба. Вычислялись: скорость пара, плотность орошения, число теоретических тарелок, ВЭТТ. Для бинарной смеси получено: насадка «Инжехим 2012» – ВЭТТ = 0,25 м; регулярная насадка из ленты и сетки – ВЭТТ = 0,43 м.

**В пятой главе** приведены разработанные математические модели и алгоритмы расчета массообменной эффективности насадочных и барботажных абсорберов (десорберов) на основе как численного решения систем дифференциальных уравнений массопереноса, так и применения упрощенных моделей для инженерных расчетов.

Записана система дифференциальных уравнений тепло- и массообмена с частными производными в цилиндрической системе координат для колонны с хаотичными насадками при пленочном противотоке, где межфазный перенос учитывается источниками членами. Выполнено численное решение системы уравнений для процесса увлажнения воздуха водой в колонне с трубчатой насадкой с дискретно-регулярной шероховатостью (глава 4) и проведено сравнение по эффективности с экспериментальными данными, представленными на рисунке 1. Расхождение составляет не более 8–10 %. Приведены сравнительные расчетные данные по эффективности абсорбера с рулонной сегментно-регулярной насадкой и разработанной рулонной гофрированной насадкой (рисунок 2) при абсорбции аммиака водой.

Значительная часть главы посвящена разработке алгоритмов расчета насадочных декарбонизаторов по упрощенным математическим моделям. Получено выражение для определения эффективности десорбции труднорастворимых газов из воды ( $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ ) при заданной высоте слоя насадки и высоты слоя при заданной эффективности извлечения. Представлены параметры данного выражения для насадок различных конструкций, в том числе и с шероховатой поверхностью. Даны результаты расчетов требуемой высоты насадки для очистки воды от растворенного  $\text{CO}_2$  с эффективностью  $E_{\text{ж}} = 0,985$  (98,5 %) и мощности на подачу воздуха.

Исходя из расчетов следует вывод, что при ограниченности пространства помещений химцехов водоочистки следует использовать декарбонизаторы с нерегулярными насадками («Инжехим-2012»), а в остальных случаях – декарбонизаторы с регулярными насадками с шероховатой поверхностью (с сегментно-регулярной насадкой «Инжехим» или рулонной гофрированной насадкой «Инжехим» с шероховатой поверхностью, исследованной автором диссертации при больших нагрузках по воде и воздуху).

Кроме рассмотренных насадок, также выполнены расчеты хаотичной насадки ГИАП-НЗ диаметром 25 мм ( $a_v = 170 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) и колец Палля 25×25 мм ( $a_v = 220 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ). В связи с тем, что данные насадки не изготавливаются с шероховатой поверхностью (микрорельефом), то по своим массообменным характеристикам они уступают по эффективности (на 20–25 %) насадкам «Инжехим» с шероховатыми поверхностями.

В следующих параграфах представлены результаты численного моделирования барботажных десорберов – декарбонизаторов с тарелками, и термического процесса в деаэраторе с барботажным баком-аккумулятором воды (удаление  $\text{O}_2$ ).

Численное моделирование базируется на решении систем уравнений массопереноса в жидкой фазе, где межфазный перенос компонентов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ ) учитывается объемными источниками массы. Представлены результаты расчетов профилей

концентрации  $\text{CO}_2$  в воде по длине клапанной тарелки при различном гидродинамическом режиме барботажа. Установлен режим, обеспечивающий требуемую эффективность разделения. Дано сравнение расчетов с известными данными по эффективности декарбонизации на ситчатой тарелке. Расхождение – не более 8 %.

Для барботажного бака-аккумулятора термического деаэрата диаметром 3 м и длиной около 6 м представлены расчетные и экспериментальные данные по концентрации растворенного  $\text{O}_2$  на выходе аппарата при различных режимах барботажа водяного пара в воде. Расхождение в пределах погрешности эксперимента. Выполнены численные исследования эффективности деаэрации от режимных и конструктивных характеристик аппарата. Даны графические зависимости и технические решения по повышению степени извлечения  $\text{O}_2$  из воды с  $E_{\text{ж}} = 0,90\text{--}0,95$  до  $E_{\text{ж}} = 0,995$ , т. е. до нормы для цеха водоподготовки. Техническое решение заключается в установке поперек барботажного слоя в баке перфорированных перегородок, которые снижают обратное перемешивание водной фазы, в результате увеличиваются движущая сила массопередачи и эффективность процесса.

В заключительном параграфе пятой главы рассмотрен турбулентный прямоток воды и воздуха в вертикальном канале (трубе) с хаотичной насадкой. В хаотичном слое происходит интенсивное дробление пузырей, что обеспечивает высокую эффективность удаления растворенных газов из воды. Предложено такой канал с насадкой устанавливать на входных линиях декарбонизаторов и деаэраторов, что обеспечивает повышение общей эффективности массопередачи при высоких концентрациях  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в исходной воде. Записана численная модель массообмена турбулентного прямотока газа и жидкости, даны результаты расчетов профиля концентрации  $\text{CO}_2$  по длине канала и эффективности десорбции от числа Рейнольдса.

**В шестой главе** представлены математические модели и экспериментальные результаты по эффективности охлаждения воды в пленочных градирнях при противотоке. Записана система дифференциальных уравнений тепломассообмена с частными производными, где межфазный перенос теплоты и влаги учитывается источниками членами в блоках регулярных и хаотичных насадок. На основе результатов, полученных в третьей главе, даны выражения для чисел Нуссельта и Шервуда в регулярных и хаотичных насадках с поверхностными интенсификаторами. Основными экспериментальными параметрами в данных выражениях являются гидравлические сопротивления контактных устройств. Дано сравнение с экспериментальными результатами различных авторов. Показано преимущество регулярной рулонной гофрированной насадки и металлической пакетной насадки «Инжехим» из гофрированных листов (IRG) с шероховатыми поверхностями.

Записана тепловая эффективность градирни по охлаждению воды  $E_{\text{ж}}$  и нагрева воздуха  $E_{\text{г}}$  в виде

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}}{T_{\text{жн}} - T^*}, \quad E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}^* - I_{\text{н}}}. \quad (9)$$

С применением уравнения теплового баланса и выражений (9) получено отношение

$$\frac{E_{\Gamma}}{E_{\text{ж}}} = \frac{Lc_{\text{рж}}(T_{\text{жн}} - T^*) + Q_u}{G(I_{\text{к}}^* - I_{\text{н}})}, \quad (10)$$

где  $Q_u = Gc_{\text{рж}}T_{\text{жн}}E_x(C_{\text{к}}^* - C_{\text{н}})$  – поток теплоты с испарившейся водой, Вт;  
 $E_x = (C_{\text{к}} - C_{\text{н}})/(C_{\text{к}}^* - C_{\text{н}})$  – эффективность испарения воды.

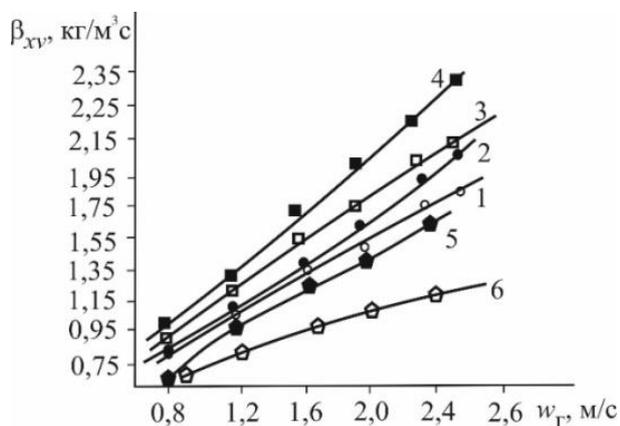


Рисунок 3 – Зависимость объемных коэффициентов массоотдачи различных насадок от скорости воздуха с кольцами (кривые 1, 2) и «Инжехим-2012» (кривые 3, 4):

$$1, 3 - q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

$$2, 4 - q_{\text{ж}} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

5 – гладкие трубы; 6 – сеччатая насадка из десяти трубок при  $q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

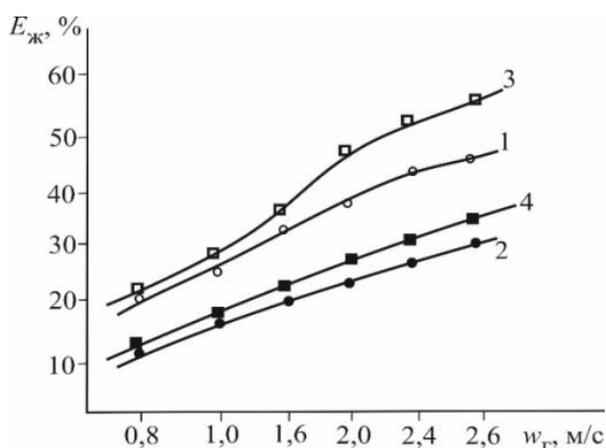


Рисунок 4 – Зависимость эффективности охлаждения воды от скорости воздуха (обозначения на рисунке 3)

из-за неравномерности скорости воздуха снижение теплового КПД может составлять 5–30 % и ниже.

Получены результаты расчетов тепловой эффективности по зонам градирни при неравномерности подачи воды и неравномерном профиле скорости воздуха  $w_{\Gamma}(r)/w_{\Gamma}$ ,

На макете градирни диаметром 200 мм и высотой 2 м с регулярной насадкой  $H = 1,0$  м, расположенной на верху слоя хаотичной насадки (описание дано в главе 3), выполнены экспериментальные исследования охлаждения воды ( $T_{\text{жн}} = 35\text{--}38$  °С) воздухом ( $T_{\text{гн}} = 25\text{--}28$  °С) при  $q_{\text{ж}} = 8,8\text{--}19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и  $w_{\Gamma} = 0,7\text{--}2,6$  м/с. Измерялись температуры потоков на входе и на выходе, влагосодержание, перепад давления  $\Delta P_{\Gamma}$ , объемные расходы фаз. С применением уравнения массоотдачи, учитывая, что основное сопротивление теплопередачи сосредоточено в газовой фазе, были определены объемный коэффициент массоотдачи (рисунок 3), а также эффективность охлаждения воды (рисунок 4) и нагрева воздуха.

В следующем параграфе шестой главы представлена численная математическая модель для вычисления температурных профилей воды, воздуха и влагосодержания по высоте насадки в промышленной градирне с учетом неравномерного профиля скорости воздуха. Даны выражения для коэффициентов тепло- и массоотдачи, а также турбулентного обмена в локальных областях градирни при различных скоростях воздуха и гидравлического сопротивления насадки. В результате расчетов промышленной градирни установлено, что при условии равномерного орошения насадки водой

где  $w_r$  – средняя скорость на все сечение градири. Наименьшее значение эффективности наблюдается при  $w_r(r)/w_r < 1$ , т. е. в зонах с пониженной скоростью воздуха. Расчеты показывают, что при равномерной подаче фаз ( $q_{ж} = 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ,  $w_r = 1,5 \text{ м/с}$ ) значение  $E_{ж} = 0,44$ . При наличии неравномерностей осредненный тепловой КПД для всей градири составляет  $E_{ж} = 0,32$ , т. е. снижается почти на 35 % (относительных).

В таблице 1 представлены данные промышленной эксплуатации градири СК-400 с полиэтиленовой сетчатой насадкой из цилиндров диаметром 50 мм и высотой блоков  $H = 1,8 \text{ м}$  (столбцы 1–6) на ПАО «Казаньоргсинтез». Плотность орошения  $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; скорость воздуха  $w_r = 2 \text{ м/с}$ . В столбцах 7 и 8 даны результаты расчетов тепловой эффективности  $E_{ж}$  при равномерной подаче воздуха (столбец 7) и с учетом неравномерного распределения профиля скорости (столбец 8) из-за различного гидравлического сопротивления от стенок градири к центру.

Таблица 1 – Промышленные и расчетные данные тепловой эффективности градири СК-400

Месяц	$T_{жн}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{жк}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{Гн}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{МТ}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$E_{ж}, \text{ пром}$	$E_{ж}, \text{ расч}$ с $w_{ср}$	$E_{ж}, \text{ расч}$ с $w(r)$
Январь	22	17	-20	–	70–75	0,23	0,36	0,25
Апрель	26	19	5	2	78–79	0,29	0,43	0,31
Июль	33	29	28	18	60–70	0,21	0,32	0,24
Сентябрь	28	22	15	7	80–85	0,29	0,42	0,3

Из расчетов следует, что неучет неравномерности профиля скорости воздуха приводит к завышенному значению  $E_{ж}$  на 25–35 % относительных по сравнению с данными работы промышленной градири. С учетом неравномерности подачи воды расхождение  $E_{ж}$  составляет не более 7–8 % относительных. Таким образом, подтверждена адекватность математической модели и необходимость в учете неоднородности скорости воздуха в блоках оросителей (насадок).

Повысить эффективность крупномасштабных градири возможно за счет организации повышенного локального гидравлического сопротивления блоков орошения у стенок градири. Например, при использовании полиэтиленовых трубчатых насадок (сетчатых или гофрированных витых) у стенок следует применять трубки с меньшим диаметром, чем в центре: у стенок на расстоянии  $r > 0,8R$  – трубки диаметром 25 мм, далее при  $0,6R < r < 0,8R$  – диаметром 32 мм, и при  $r < 0,6R$ , т. е. к центру, – 50 мм ( $R$  – радиус градири, м). В результате происходит выравнивание профиля скорости воздуха и тепловая эффективность повышается.

Для инженерных расчетов градири получил развитие метод S. Hartland и J. Mecklenburgh, применяемый для насадочных абсорберов, с учетом обратного перемешивания фаз. В результате для определения высоты насадки записано выражение

$$H = \left[ \frac{G}{\beta_x a_v S_k \Psi_w} + d_{\text{э}} \left( b_{\Gamma} \text{Pe}_{\text{эГ}}^{-1} + b_{\text{ж}} \text{Pe}_{\text{эЖ}}^{-1} \right) \right] \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{ср}}}, \quad (11)$$

где  $Re_{\text{ЭГ}} = w_{\text{Г}} d_{\text{Э}} / D_{\text{ПГ}}$ ,  $Re_{\text{ЭЖ}} = u_{\text{Ж}} d_{\text{Э}} / D_{\text{ПЖ}}$  – числа Пекле обратного перемешивания потоков;  $d_{\text{Э}} = 4\epsilon_{\text{СВ}} / a_{\text{V}}$  – эквивалентный диаметр насадки, м.

На рисунке 5 представлены экспериментальные данные и результаты расчета  $E_{\text{Г}}$ , а на рисунке 6 – экспериментальные данные и результаты расчета  $E_{\text{Ж}}$ .

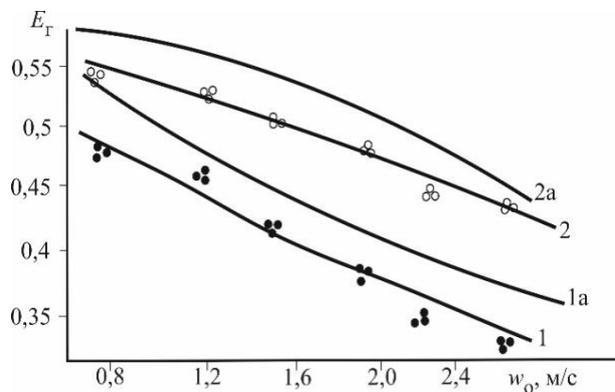


Рисунок 5 – Зависимость тепловой эффективности в воздушной фазе от скорости воздуха:

1 –  $q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2 –  $q_{\text{ж}} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

точки – экспериментальные данные; сплошные

линии – расчет с учетом структуры потоков;

1а, 2а – расчет по модели идеального вытеснения

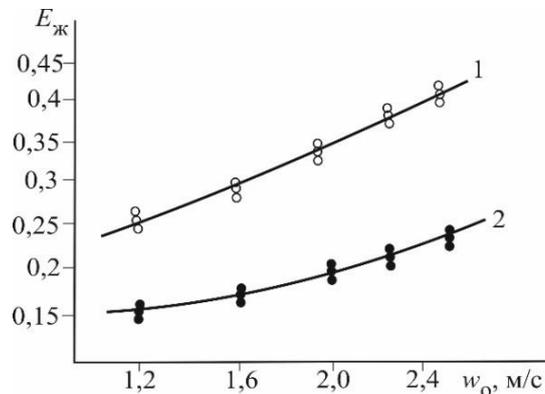


Рисунок 6 – Зависимость

эффективности охлаждения воды от скорости воздуха:

1 –  $q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,

2 –  $q_{\text{ж}} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

точки – эксперимент; линии – расчет

Расхождение расчетных  $E_{\text{Г}}$  и  $E_{\text{Ж}}$ , с учетом перемешивания потоков (кривые 1 и 2), с опытными значениями в пределах погрешности эксперимента ( $\pm 5-7\%$ ).

Из расчетных и экспериментальных данных следует, что неучет обратного перемешивания потоков (кривые 1а, 2а) дает завышенные значения тепловой эффективности  $E_{\text{Г}}$  на 8–15%, что влияет на расчет эффективности в жидкой фазе  $E_{\text{Ж}}$  и на определение температуры охлаждения воды.

**Седьмая глава** посвящена определению эффективности совместных процессов охлаждения и очистки газов от аэрозольных частиц в газожидкостных аппаратах (пленочных, насадочных, барботажных, вихревых и струйных).

Представлена математическая модель конденсационного охлаждения и очистки газов от дисперсной фазы в насадочных скрубберах при противотоке газа и жидкости. Применяется система дифференциальных уравнений в частных производных, представленная в первой главе, где межфазный перенос учитывается источниковыми членами. Для сепарации аэрозолей использована теория турбулентно-инерционного механизма осаждения аэрозолей Фортье, Флетгера, Медникова и др. Сделан анализ полуэмпирических зависимостей для расчета приведенной скорости турбулентного осаждения различных авторов. Сделан вывод о применении выражения В.П. Медникова  $u_t^+ = f(\tau^+, \omega_E, \tau_p)$ . Для расчета тепло- и массоотдачи при охлаждении газа при непосредственном контакте с жидкой фазой в насадке использованы выражения, полученные в третьей главе. Выполнено численное решение системы дифференциальных уравнений при охлаждении дымовых газов водой в колонне с кольцами Рашига ( $35 \times 35$  мм) и показано согласование по профилям температуры и влагосодержания с экспериментальными данными И.З. Аронова. Дана расчетная сепарационная эффективность разделения аэрозолей для насадки «Инжехим-2012».

Показано, что при  $H = 2$  м и скорости газа  $w_{\Gamma} > 2$  м/с эффективность сепарации частиц размером  $\geq 5$  мкм приближается к 100 % при плотности орошения  $2,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Даны сравнительные гидравлические и конструктивные характеристики регулярных и нерегулярных насадок при заданной тепловой эффективности  $E_{\Gamma} = 0,8$  (80 %) и плотности орошения  $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Сделаны выводы, что рационально применение хаотичных насадок – кольца Мебиуса (40 мм) и «Инжехим-2012» (24 мм), из регулярных – рулонная сегментная с просечками.

В следующем параграфе выполнено численное решение системы уравнений теплообмена и сепарации аэрозолей в высокоскоростных дисперсно-кольцевых потоках в контактных трубах при  $w_{\Gamma} = 8\text{--}40$  м/с. Показано удовлетворительное согласование по профилю концентрации и эффективности сепарации частиц размером 9 мкм по высоте трубки без орошения  $d = 15,75$  мм и  $H = 4,5$  м с экспериментом G.A. Sehmel. Расхождение около 1 %. Эксперимент –  $\eta = 0,99$ , расчет –  $\eta = 0,987$ . Также вычислена тепловая эффективность охлаждения газа при орошении водой. При  $w_{\Gamma} = 20$  м/с,  $q = 2,75 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и  $H = 0,5$  м получено  $E_{\Gamma} = 0,82$ . Даны зависимости  $E_{\Gamma}$  и  $\eta$  от длины трубки с гладкой и шероховатой поверхностью. Представлены выражения для определения эффективности сепарации аэрозолей в канале с закруткой потока с учетом турбулентно-инерционного и центробежного механизмов разделения. Показано согласование ( $\pm 5$  %) по эффективности центробежного сепаратора с результатами математического моделирования Н.А. Войнова и др. при скорости газа 10–30 м/с с углом закрутки  $45^\circ$ .

Выполнены расчеты комбинированного газосепаратора для очистки природного газа в местах добычи ООО «Газпром добыча Ямбург». Первая зона очистки состоит из распределителя газа с гофрированными пластинами, а вторая – с вихревыми устройствами. Данный аппарат изготовлен и внедрен ИВЦ «Инжехим» в местах добычи природного газа в северных районах Сибири и показывает высокую эффективность согласно техническому заданию.

Для исследования влияния неравномерности (неоднородности) распределения газового потока при сепарации аэрозолей в слое хаотичной насадки разработана численная математическая модель определения эффективности аппарата. Математическая модель основана на решении дифференциального уравнения массопереноса частиц в газах с заданным профилем скорости потока, который находится экспериментально по поперечному сечению насадочного слоя. Используются экспериментальные данные А.М. Кагана, А.С. Пушнова, А.Б. Голованчикова и др. В результате численного решения установлено, что поперечная неравномерность профиля скорости газа снижает эффективность разделения на 30–35 % (у колец Рашига) и на 3–5 % (у насадок из колец Мебиуса и «Инжехим-2012»).

Сделаны выводы о рациональной средней скорости газа  $w_{\Gamma} = 6\text{--}7$  м/с при сепарации частиц размером 5 мкм с эффективностью  $\eta = 0,985$ , обеспечивающей наименьшие энергозатраты на подачу газа при небольшой высоте слоя насадки ( $H = 0,6$  м).

В следующем параграфе седьмой главы представлена разработанная математическая модель сепарации тонкодисперсной фазы из газов в турбулентном барботажном слое на тарелках различных конструкций. Использована концепция

активного входного участка на входе газа в слой жидкости, который характеризуется высокой эффективностью переноса. На основе данной концепции была построена математическая модель массоотдачи в работах С.Г. Дьяконова, В.И. Елизарова и др. для процессов ректификации и абсорбции. Характеристики активного участка связаны с гидродинамикой газовых струй до распада на пузыри. Скорость газа в струе составляет 10–20 м/с, что дает основание применить миграционную теорию турбулентно-инерционного осаждения аэрозолей, рассмотренную в начале седьмой главы. В результате получено выражение для расчета скорости турбулентного осаждения аэрозольных частиц на межфазную поверхность струй в виде

$$u_t = 7,25 \cdot 10^{-4} \left( \frac{W_o^2 - W_{II}^2}{4} + \frac{\rho_{ж} g h_{ф}}{2\rho_{Г}} \right)^{2,5} \left[ \frac{\tau_p}{v_{Г}(1 + \omega_E \tau_p)} \right]^2. \quad (12)$$

Принимая, что газ движется в струе в режиме идеального вытеснения эффективность сепарации записана в форме  $\eta = 1 - \exp(-u_t A \rho_{Г} / G)$ , где  $A$  – активная поверхность контакта фаз, практически равная поверхности струй в барботажном слое. Выполнены расчеты провальных и ситчатых тарелок в скрубберах. Сравнение с экспериментальными данными М.Е. Позина, Э.Я. Тарата и др. показано на рисунке 7.

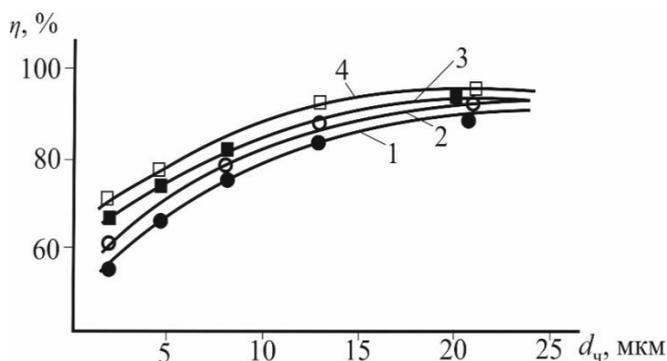


Рисунок 7 – Зависимость фракционной степени улавливания гидрофильной пыли в слое пены от дисперсности частиц. Вид пыли и их плотность ( $\text{г/см}^3$ ): 1 –  $\text{SiO}_2$  ( $\rho = 2,65$ ), 2 –  $\text{CaCO}_3$  ( $\rho = 2,9$ ); 3 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\rho = 4,0$ ); 4 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\rho = 5,2$ ).

Точки – эксперимент Э.Я. Тарат и др.

Процессы очистки газов часто сопровождаются их охлаждением, поэтому разработана математическая модель и алгоритм расчета эффективности конденсационного охлаждения газа и нагрева жидкой фазы в турбулентном барботажном слое на тарелке. Принято, что газ в барботажном слое движется в режиме идеального вытеснения, тогда тепловая эффективность имеет вид

$$E_{Г} = (I_{Н} - I_{К}) / (I_{Н} - I_{К}^*) = 1 - \exp(-N_{Г}),$$

где  $N_{Г} = \beta_{Гf} S_{Т} / (W_{Г} S_{К})$  – тепловое число единиц переноса;  $\beta_{Гf}$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к площади тарелки, м/с.

При этом учитывается, что основное сопротивление переносу сосредоточено в газовой фазе. Для вычисления профиля температуры жидкой фазы на тарелке, которая по мере охлаждения газа увеличивается от приемной планки к сливной, использовано уравнение теплопереноса с частными производными с межфазным источником теплообмена, записанное в двумерной форме для плоскости тарелки с учетом того, что по высоте слоя в жидкой фазе практически идеальное смешение. Показана возможность вычисления эффективности теплообмена с учетом неравномерности профиля скорости газа. Для тарелок небольшого диаметра ( $< 1,0\text{--}1,5$  м) разработана упрощенная математическая ячеечная модель, которая позволяет вычислять на выходе ячеек энтальпию газа, влагосодержание и температуру жидкой

фазы. Даны примеры расчетов для ситчатых и клапанных тарелок и сравнение с известными экспериментальными данными.

**В восьмой главе** представлены научно-технические решения и результаты внедрения модернизированных установок и аппаратов на разных промышленных предприятиях нефтехимии и нефтегазопереработки.

Разработаны и запатентованы варианты модернизации десорберов и термических деаэраторов удаления из воды коррозионно-активных газов. Модернизация заключается в применении новых регулярных и нерегулярных насадок, а также в создании дополнительной активной зоны контакта фаз в прямоточно-турбулентном режиме воздуха (пара) и воды. Такие модернизации необходимы при повышенных концентрациях растворенных газов в воде и увеличенных нагрузках.

Представлена конструкция комбинированной мини градирни с хаотичной и регулярной насадками. Показано, что градирня обеспечивает высокую эффективность охлаждения воды при плотности орошения до  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  при скорости воздуха до  $2,6\text{--}2,8 \text{ м/с}$ .

С применением разработанной в диссертации регулярной рулонной насадки (рисунок 2) выполнена модернизация ректификационной колонны выделения гексена-1 из гексеновой фракции на ПАО «Нижекамскнефтехим». Модернизация заключается в замене устаревших барботажных колпачковых тарелок на насадку (четыре секции общей высотой  $H = 15,3 \text{ м}$ ; общая высота колонны  $19,9 \text{ м}$ , диаметр  $0,8 \text{ м}$ ). В результате при нагрузке по исходному сырью  $1500 \text{ кг/г}$  получен гексен-1 полимеризационной чистоты ( $0,9949 \text{ масс. доли}$ ).

Разработаны и внедрены научно-технические решения по модернизации установки разделения этаноламинов с четырьмя колоннами на ПАО «Казаньоргсинтез». В первой колонне предложено использовать хаотичную насадку «Инжехим», а в остальных – регулярную рулонную (рисунок 2). До модернизации в колоннах использовались барботажные тарелки и ректификация проходила с повышенными флегмовыми числами и значительными энергозатратами. Выполнены расчеты и проектирование новых колонн с насадками, диаметр которых стал меньше, чем у тарельчатых. После модернизации нагрузка по сырью увеличилась на  $15\text{--}30 \%$  (до  $15 \text{ тыс. т/год}$ ), значительно снизились флегмовые числа (в  $1,2\text{--}3$  раза) и тепловая нагрузка кипятильников колонн (на  $18\,240 \text{ Гкал/год}$ ).

Выполнена разработка и проектирование двух новых ректификационных колонн выделения бензола из стабильного конденсата (бензиновая фракция) на предприятии НГДУ «Елховнефть». Выбран тип нерегулярной насадки и габариты колонн (диаметр  $0,8 \text{ м}$ , по два слоя насадки в каждой колонне высотой  $H = 11 \text{ м}$ ). После внедрения колонн промышленная эксплуатация показала содержание бензола меньше  $1 \%$  об., т. е. согласно требованиям технического задания.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках поставленной цели и сформулированных задач в диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты.

Для определения физических полей и эффективности явлений переноса импульса, массы и энергии совместно с сепарацией тонкодисперсной фазы из газов представлены замкнутые системы дифференциальных уравнений с частными производными с учетом

межфазного переноса субстанций для газожидкостных сред. Рассмотрены высокоскоростные дисперсно-кольцевые потоки газа и жидкости, как при осевом, так и закрученном движении в каналах; пленочные противоточные и прямоточные колонны с регулярными и хаотичными насадками; барботажные и струйные тарелки; комбинированные насадочные колонны, пленочные градирни и скрубберы, термические деаэраторы.

1. На основе применения диссипативной модели в турбулентном пристенном слое контактных устройств, как для гладкой поверхности, так и с поверхностными и объемными интенсификаторами получены выражения для безразмерных комплексов трения для одно- и двухфазных газожидкостных потоков, которые применяются для расчета средних значений чисел Нуссельта и Шервуда для контактных устройств различных конструкций. При переходе к моделированию переноса импульса, массы и теплоты в каналах с поверхностными и объемными интенсификаторами использованы идентичные свойства турбулентного движения в пограничном слое на пластине и в пристенном слое каналов, а также свойства консервативности законов трения к возмущениям, которые учитываются параметрически за счет изменения граничных условий по потоку импульса. При этом основной экспериментальной информацией об объекте моделирования является гидравлическое сопротивление контактных устройств в тепломассообменном аппарате.

2. На основе применения модели турбулентно-инерционного осаждения аэрозольных частиц получены выражения и алгоритмы расчета эффективности сепарации аэрозолей в дисперсно-кольцевых потоках, в насадочных колоннах, в турбулентном барботажном слое и в каналах с закруткой потока. Разработана математическая модель для расчета эффективности насадочных скрубберов с учетом неравномерности профиля скорости газа в слое. Показано, что поперечная неравномерность снижают эффективность сепарации аэрозолей на 30-35 %. Выбраны контактные устройства, которые снижают влияние неравномерностей.

3. На основе численных моделей и моделей гидродинамической структуры потоков разработаны алгоритмы расчета эффективности разделения смесей абсорбцией и десорбцией в аппаратах с пленочными контактными устройствами при слабом ( $< 6$  м/с) и сильном ( $> 10$  м/с) взаимодействии фаз с хаотичными и регулярными насадками с интенсификаторами при противотоке и прямотоке, в барботажном аппарате с высоким газожидкостным слоем, а также на барботажных и струйных тарелках.

4. На трех экспериментальных установках с насадочными колоннами диаметром 100, 200 и 600 мм (высотой 2 и 3 метра) на системе воздух-вода, а также ректификации бинарных и многокомпонентных смесей получены данные по гидравлическому сопротивлению, предельным нагрузкам, коэффициентам тепло- и массоотдачи, а также эффективности тепломассообменных процессов для регулярных, хаотичных и комбинированных насадок, одна из которых разработана и запатентована автором. Данная насадка является металлической регулярной рулонной с гофрами и шероховатой поверхностью (выступами). Исследования выполнены при скорости воздуха от 0,6 до 6,0 м/с и плотности орошения от 5,0 до 100 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч). Удельная поверхность насадки 250-350 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Получены обобщенные эмпирические выражения для перепада давления сухой и орошаемой насадки при пленочном режиме. На основе применения разработанной математической модели (глава 4) получен алгоритм

расчета чисел Нуссельта и Шервуда, а также эффективности тепло- и массообмена для данной насадки.

Также выполнены экспериментальные исследования гидродинамики и тепло-массообмена регулярной насадки из вертикальных полиэтиленовых труб с диаметром 0,05 м ( $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) с дискретно-регулярной шероховатостью поверхности при комбинированном расположении с хаотичной насадкой (1 метр + 0,2 метра). Получены обобщенные выражения для расчета исследованных характеристик при противотоке воды и воздуха.

Сделаны выводы о рациональной комбинации насадок при увлажнении воздуха водой, а также охлаждения воды воздухом как в градирнях. Показано удовлетворительное согласование результатов расчетов по математической модели (глава 3) эффективности теплообмена с полученными экспериментальными данными.

5. Разработана численная и упрощенная математические модели и алгоритм расчета эффективности процессов абсорбции и десорбции газов в пленочных (слабое и сильное взаимодействие), насадочных и тарельчатых колоннах при различных режимах работы. Показано согласование с экспериментальными данными и даны сравнительные характеристики отечественных и зарубежных контактных устройств, сделаны рекомендации по применению.

6. Разработана численная и упрощенная математические модели с алгоритмами расчета тепло- и массообмена в тонком ( $< 0,25$  м) пенном слое на тарелках и с высоким (1–3 м) барботажным слоем при турбулентном режиме. Показано влияние неравномерности распределения газовой и жидкой фаз на тарелке при ректификации на эффективность разделения смесей. На основе применения концепции активного (входного) участка разработана математическая модель и алгоритм расчета эффективности турбулентного осаждения и газов тонкодисперсной фазы в барботажном слое на тарелках в скрубберах. Дано сравнение с экспериментальными данными.

7. Численно и экспериментально исследована эффективность процесса охлаждения воды воздухом в пленочных градирнях с различными контактными устройствами, в том числе и с учетом неравномерности профиля скорости воздуха. Установлено, что неравномерности распределении фаз в контактных устройствах при противотоке снижают тепловую эффективность на 30 % и более. Аналогичные исследования выполнены и для скрубберов охлаждения газов водой. Даны сравнительные гидравлические и теплообменные характеристики различных контактных устройств. Даны рекомендации по применению отечественных насадок с повышением эффективности процессов.

8. Разработаны и запатентованы несколько конструкций насадочных десорберов для повышения эффективности очистки воды от коррозионно-активных газов в системах водоподготовки в химических цехах ТЭС и промышленных предприятий. Предложено использовать на линии входа воды в аппараты турбулентно-прямоточный десорбер с хаотичной насадкой при подаче дополнительного воздуха или водяного пара. В результате значительно повышается эффективность массопередачи при повышенных концентрациях растворенных газов. Разработана и запатентована конструкция комбинированной мини градирни с регулярной и хаотичной насадками. Показано значительное (в 2–4 раза) повышение гидравлической нагрузки и тепло-массообменных характеристик мини градирни, а также снижение удельных энергозатрат на охлаждение воды.

9. На основе применения математических моделей, алгоритмов расчета эффективности процессов и полученных экспериментальных данных разработаны и внедрены научно-технические решения по модернизации с применением насадок ряда ректификационных установок на промышленных предприятиях, а именно:

- ректификационной колонны выделения гексена-1 полимеризационной чистоты из гексеновой фракции на АО «Нижекамскнефтехим»;

- ректификационной установки с четырьмя колоннами разделения этанол-аминов с повышением производительности и качества продукции, а также значительным снижением энергозатрат (на 18240 Гкал в год по греющему пару) на ПАО «Казаньоргсинтез»;

- колонны получения товарного бензина, т.е. выделения бензола из стабильного конденсата (бензиновая фракция) на предприятиях «Елховнефть». Снижено содержание бензола менее 1% об., согласно технологическим требованиям.

В результате промышленной эксплуатации ректификационных колонн с новыми насадками установлено повышение эффективности процессов, что обеспечивает регламентные значения по требованиям качества разделения смесей и производительности установок.

Кроме промышленных предприятий, результаты научно-технических разработок применяются в проектных, инжиниринговых фирмах, научных центрах и в технических университетах: «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» СО РАН г. Новосибирск; НПФ «МИКСИНГ» г. Санкт-Петербург; «МГУ им. Ломоносова» г. Москва (филиал в г. Душамбе); ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» г. Казань, в фирмах: ООО «Инженерный центр «Нефть и Газ» г. Самара; ООО «Волга НИПИТЭК» г. Самара; проектный институт «СХПП» г. Казань, ООО ИВЦ «Инжехим» г. Казань и др.

Развитие разработанных математических моделей теплообмена и сепарации аэрозолей возможно для других типов устройств газожидкостного контакта при интенсивном турбулентном режиме взаимодействия фаз. Разработанная регулярная рулонная насадка может применяться в ректификационных и абсорбционных колоннах, скрубберах и мини градирнях.

Автор выражает благодарность коллективам научно-проектных организаций и промышленных предприятий за внедрение научно-технических разработок на действующих производствах. Особая благодарность коллективу инженерно-внедренческого центра «Инжехим» (инженерная химия) (г. Казань) и директору, д.т.н. Фарахову М.И. – научному консультанту диссертационной работы.

#### **Условные обозначения**

$a_v$  – удельная поверхность насадки (или пузырей),  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $d_3$  – эквивалентный диаметр, м;  $c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $G$  – массовый расход газа (пара), кг/с;  $h_f$  – высота газовой струи до распада на пузыри, м;  $L$  – массовый расход жидкости, кг/с;  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $I$  – энтальпия, кДж/кг;  $q_{жс}$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $S_k$  – площадь свободного сечения колонны,  $\text{м}^2$ ;  $T$  – температура потока, °С;  $T_{\text{MT}}$  – температура мокрого термометра, °С;  $u_*$  – динамическая скорость,  $u_* = \sqrt{\tau_{\text{CT}}/\rho}$ , м/с;  $u_{\text{CP}}$  – средняя скорость среды, м/с;  $W_0$  – средняя скорость газа в отверстиях газораспределительных элементов на входе в барботажный слой, м/с;  $w$  – скорость газа

в насадках, м/с;  $\beta_x$  – коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $\gamma$  – коэффициент переноса импульса, м/с;  $\delta$  – толщина пограничного слоя, м;  $\bar{\varepsilon}$  – средняя скорость диссипации энергии, Вт/м<sup>3</sup> или м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $\theta$  – угол движения пленки;  $b$  – приведенная толщина пленки, м;  $\nu$ ,  $\nu_T$  – коэффициенты кинематической молекулярной и турбулентной вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления насадки (каналов) и др.;  $\eta$  – эффективность процесса разделения (сепарации);  $\omega_E$  – частота энергоемких пульсаций, с<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – касательное напряжение, Па.

**Комплексы:**  $C_f = 2\tau/(\rho U_\infty^2)$  – коэффициент трения;  $Nu = \alpha l/\lambda$  – число Нуссельта;  $Sh = \beta l/D$  – число Шервуда;  $Sh = \gamma l/\nu$  – число Шервуда для импульсоотдачи;  $Re = U_\infty l/\nu$  – число Рейнольдса;  $R_1 = u_* \delta_1/\nu$  – безразмерная толщина вязкого подслоя;  $R_\delta = u_* \delta/\nu$  – безразмерная толщина пограничного слоя;  $Re_* = u_* d_\odot/\nu$  – число Рейнольдса с динамической скоростью;  $Sc = \nu/D$  – число Шмидта;  $\tau^+ = u_* \tau_p/\nu_T$  – безразмерное время релаксации;  $\tau_p$  – время релаксации для частицы.

**Нижние индексы:** г – газовая фаза; х, ж – жидкая фаза; ст – значение параметров на стенке; н, к – значение параметров на входе и на выходе;  $\infty$  – значение параметров в ядре потока; ш – шероховатая поверхность; т – турбулентность.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

*в изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:*

1. Лаптева, Е. А. Эффективность десорбции труднорастворенных газов из воды в колоннах с различными нерегулярными насадками / Е. А. Лаптева, М. И. Фарахов // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 7. – С. 104–108.
2. Лаптева, Е. А. Гидравлические и массообменные характеристики комбинированной насадки в колонном аппарате / Е. А. Лаптева, М. М. Фарахов, А. Г. Лаптев // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 48–52.
3. Лаптева, Е. А. Сравнительные характеристики эффективности насадочных контактных устройств в газосепараторах аэрозолей / Е. А. Лаптева, М. М. Башаров, А. Г. Лаптев // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 5. – С. 27–32.
4. Алексеев, К. А. Разделение многокомпонентной смеси методом периодической азеотропной ректификации: моделирование и эксперимент / К. А. Алексеев, Д. Р. Латыпов, Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 53–57.
5. Лаптева, Е. А. Моделирование тепломассообмена при контактном охлаждении газов водой в пленочных скрубберах с интенсификаторами / Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 1. – С. 36–40.
6. Лаптев, А. Г. Диссипация кинетической энергии и трение в турбулентном пристенном слое в каналах с интенсификаторами / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, Т. М. Фарахов // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 64–70.
7. Лаптева, Е. А. Определение режимных и конструктивных характеристик барботажных тарелок охлаждения газов / Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 77–82.
8. Лаптева, Е. А. Исследование массообменной эффективности в газовой фазе в насадочной колонне с интенсификаторами / Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 5. – С. 55–59.

9. Агеев, А. А. Эффективность очистки газов от аэрозольных частиц в режиме сильного взаимодействия газа с пленкой жидкости / А. А. Агеев, Д. А. Яхонтов, Т. Ф. Кадыров, Е. А. Лаптева, М. М. Фарахов // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 11. – С. 34–38.
10. Лаптева, Е. А. Математическая модель массообмена в многокомпонентной смеси и применение насадок в колоннах получения товарного бензина / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев, А. Д. Гилязов // Вестник технологического университета. – 2020. – Т. 23. – № 10. – С. 43–45.
11. Лаптева, Е. А. Модернизация термических деаэраторов и декарбонизаторов ТЭС / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Вода: химия и экология. – 2019. – № 3–6. – С. 120–124.
12. Лаптев, А. Г. Показатель энергоэффективности пленочных десорберов при сильном взаимодействии фаз / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 7. – С. 76–79.
13. Лаптева, Е. А. Тепловая эффективность и расчет охлаждения воды в пленочных градирнях / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Вода: химия и экология. – 2018. – № 4–6 (115). – С. 101–105.
14. Лаптев, А. Г. Сравнительные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочных регулярных насадок в градирнях / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 18. – С. 71–74.
15. Лаптев, А. Г. Массоотдача в газовой фазе в регулярных рулонных насадках при слабом и сильном взаимодействии газа и жидкости / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 20. – С. 40–42.
16. 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.
17. Фарахов, Т. М. Обобщенные гидравлические и массообменные характеристики новых контактных насадок колонных аппаратов / Т. М. Фарахов, М. М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Химическая промышленность сегодня. – 2016. – № 2. – С. 50–56.
18. Лаптева, Е. А. Ячеечная модель тепломассопереноса в пленочных блоках оросителей градирни / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 11. – С. 181–185.
19. Лаптев, А. Г. Определение коэффициентов массоотдачи от пузырей в жидкости и эффективности процесса при турбулентном режиме / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 7. – С. 49–55.
20. Лаптев, А. Г. Модели и расчет коэффициентов турбулентной вязкости и перемешивания в жидкой фазе барботажного слоя / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Вода: химия и экология. – 2014. – № 11 (77). – С. 42–47.
21. Долгова, А. Н. Определение эффективности массообменных тарелок колонных аппаратов с учетом неравномерности распределения фаз / А. Н. Долгова, Е. А. Лаптева // Нефтегазовое дело : электронный журнал. – 2013. – № 6. – С. 283–309.
22. Лаптева, Е. А. Модели расчета турбулентного пограничного слоя у проницаемой поверхности / Е. А. Лаптева, М. В. Сайтбаталов, Т. М. Фарахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 89. – С. 800–835.
23. Лаптев, А. Г. Обобщение гидродинамической аналогии для различных условий обтекания поверхностей / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 23. – С. 64–69.

24. Лаптев, А. Г. Модель турбулентности в жидкой фазе барботажного слоя / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 12. – С. 18–22.

25. Лаптев, А. Г. Гидравлические характеристики рулонной гофрированной тепло-массообменной насадки / А. Г. Лаптев, Т. М. Фарахов, Е. А. Лаптева, Р. М. Минигулов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 1. – С. 35–37.

26. Лаптев, А. Г. Тепло- и массообменные характеристики рулонной гофрированной насадки / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Р. М. Минигулов, Е. А. Лаптева // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 5 (67). – С. 64–66.

27. Лаптева, Е. А. Эффективность насадочных декарбонизаторов в водоподготовке ТЭС / Е. А. Лаптева, Г. К. Шагиева, А. Г. Лаптев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11–12. – С. 20–25.

28. Лаптева, Е. А. Модель перемешивания жидкости в высокослойных барботажных аппаратах / Е. А. Лаптева, А. Х. Шакирова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 129–133.

29. Башаров, М. М. Модель теплоотдачи при турбулентном гравитационном пленочном течении / М. М. Башаров, Е. А. Лаптева, Г. К. Хамидуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9–10. – С. 39–46.

30. Фарахов, М. И. Энергосбережение на установке разделения этаноламинов / М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8. – С. 133–136.

***Публикации в научных журналах, индексируемых в базах данных  
Scopus и Web of Science***

31. Laptev, A. G. A method for determining the heat and mass transfer efficiency in a film cooling tower with intensified fill packs / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // Thermo-physics and Aeromechanics. – 2024. – Vol. 31. – No. 3. – Pp. 469–479.

32. Laptev, A. G. Methods of Mathematical Modeling of Desorption of Poorly Soluble Gases in Packed Devices / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, O. V. Solovieva, V. A. Klochkova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58. – No. 4. – Pp. 1027–1035.

33. Lapteva, E. A. Mathematical model and experimental data for water cooling in counterflow film cooling towers / E. A. Lapteva, A. G. Laptev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 57. – № 4. – Pp. 469–477.

34. Laptev, A. G. Gas condensation cooling and liquid heating efficiency in a turbulent bubbling layer on a tray / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2023. – Vol. 96. – № 5. – Pp. 1320–1328.

35. Lapteva, E. A. Mathematical model of contact cooling and purification of the dispersed phase of gases in packed scrubbers / E. A. Lapteva, A. G. Laptev, S. W. Alasgarli // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 56. – № 2. – Pp. 244–251.

36. Laptev, A. G. Mathematical model and thermohydraulic characteristics of packed scrubbers of condensation cooling of a gas / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95. – № 1. – Pp. 257–265.

37. Laptev, A. G. Numerical model of heat and mass transfer and separation of the dispersed phase in high-speed dispersed-annular flows of gas and liquid / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // Technical Physics. – 2022. – Vol. 92. – No. 9. – Pp. 1129–1136.

38. Laptev, A. G. Modeling of intensified heat exchangers with different viscosities of fluids / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, A. A. Akhmitshin // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2022. – Vol. 57. – № 6. – Pp. 917–925.

39. Laptev, A. G. Updating packed fractionating columns using mathematical model of multicomponent mixture separation / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, A. D. Gilyazov // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2021. – Vol. 57. – № 1. – Pp. 1–8.
40. Laptev, A. G. Mathematical models of friction on the surface of phase separation and heat and mass transfer in film units of cooling-tower sprinklers with intensifiers / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 55. – № 5. – Pp. 906–913.
41. Lapteva, E. A. Determining the efficiency of desorption of corrosive-active gases in columns with chaotic and regular nozzles / E. A. Lapteva, M. I. Farakhov // *Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 68. – № 2. – Pp. 165–169.
42. Laptev, A. G. Determining the efficiency of packed gas separators of droplets taking into account the nonuniformity of the gas velocity profile / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 55. – № 2. – Pp. 301–306.
43. Laptev, A. G. Thermal hydraulic effectiveness of heat exchangers with volumetric enhancers for high-viscosity liquid media / A. G. Laptev, T. M. Farakhov, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2021. – Vol. 30. – № 2. – Pp. 293–299.
44. Lapteva, E. A. Numerical estimation of the heat and mass transfer efficiency considering nonuniformity in water and air distribution / E. A. Lapteva, E. Yu. Stolyarova, A. G. Laptev // *Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 67. – № 4. – P. 234–240.
45. Laptev, A. G. Determination of the thermal efficiency and height of the blocks of countercurrent cooling tower sprinklers / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93. – № 3. – Pp. 693–699.
46. Basharov, M. M. Heat and mass transfer characteristics and energy characteristics of the packing of column apparatuses / M. M. Basharov, E. A. Lapteva // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2020. – Vol. 56. – № 1–2. – Pp. 15–19.
47. Laptev, A. G. A Mathematical model and design calculation of a thermal deaerator with a bubbling storage tank / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 66. – № 9. – Pp. 681–686.
48. Ageev, A. A. Mathematical model of dispersed phase gas separation in a combined equipment / A. A. Ageev, D. A. Yakhontov, T. F. Kadyrov, M. M. Farakhov, E. A. Lapteva // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2019. – Vol. 55. – № 7–8. – Pp. 611–618.
49. Lapteva, E. A. Thermohydraulic efficiency of the process of cooling of water in miniature cooling towers with regular packing / E. A. Lapteva, E. Y. Stolyarova, A. G. Laptev // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2018. – Vol. 54. – № 3–4. – Pp. 161–164.
50. Laptev, A. G. A modified method of the number of transfer units for calculating a cooling tower / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2018. – Vol. 54. – № 7–8. – Pp. 569–575.
51. Laptev, A. G. Efficiency of water purification from dissolved gases under weak and strong phase interaction in film degassers / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, G. K. Shagieva // *Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 65. – № 4. – Pp. 226–231.
52. Laptev, A. G. A Model of heat and mass transfer in gas phase in axial and turbulent dispersed annular flows / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2018. – Vol. 27. – № 1. – Pp. 45–50.
53. Laptev, A. G. Modeling and modernization of tray towers for reactive distillation processes / A. G. Laptev, S. V. Karpeev, E. A. Lapteva // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 52. – № 1. – Pp. 3–12.

54. Laptev, A. G. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, M. M. Basharov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2017. – Т. 51. – № 5. – Pp. 639–646.

55. Laptev, A. G. Improving the efficiency of water purification from dissolved gases at tpp / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, G. K. Shagieva // *Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 64. – № 1. – Pp. 68–72.

56. Laptev, A. G. Mathematical models and calculation of the coefficients of heat and mass transfer in the packings of mechanical-draft towers / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2017. – Vol. 90. – № 3. – Pp. 644–650.

57. Laptev, A. G. Model of multicomponent mass transfer in a turbulent bubbling bed based on the concept of an active site / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, V. A. Danilov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 50. – № 3. – Pp. 242–249.

58. Lapteva, E. A. Models and calculations of the effectiveness of gas and liquid cooling in foam and film apparatuses / E. A. Lapteva, A. G. Laptev // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 50. – № 4. – Pp. 430–438.

59. Laptev, A. G. Mathematical model and calculation of water-cooling efficiency in a film-filled cooling tower / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 63. – № 10. – Pp. 724–729.

60. Laptev, A. G. Numerical modeling of heat and mass transfer efficiency of the processes in turbulent foam layers in distillation / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2016. – Vol. 25. – № 4. – Pp. 527–535.

61. Laptev, A. G. The model of heat and mass transfer in rough and irrigated ducts / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2015. – Vol. 22. – № 4. – Pp. 435–440.

62. Laptev, A. G. Model of gas purification from the fine-dispersed phase in the bubbling layer based on the concept of active input section / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Theoretical foundations of chemical engineering*. – 2015. – Vol. 49. – № 2. – Pp. 157–162.

63. Laptev, A. G. Models of transport phenomena in random packed and granular beds / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, T. M. Farakhov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 49. – № 4. – Pp. 388–395.

64. Laptev, A. G. Numerical simulation of mass transfer in the liquid phase of the bubble layer of a thermal deaerator / A. G. Laptev, R. S. Misbakhov, E. A. Lapteva // *Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 62. – № 12. – Pp. 911–915.

65. Laptev, A. G. Determination of heat and mass transfer efficiency on a bubbling plate with account for scale transition / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – Vol. 88. – № 4. – Pp. 806–814.

66. Лаптев, А. Г. Энергетическая модель пылеулавливания тонкодисперсной фазы в пенном слое / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 103–107.

67. Лаптев, А. Г. Определение режима работы барботажных усреднителей потоков в технологии водоочистки / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // *Экология и промышленность России*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 60–62.

### *Монографии*

68. Лаптева, Е. А. Сопряженные процессы тепломассообмена и сепарации дисперсной фазы в газожидкостных аппаратах : монография / Е. А. Лаптева. – Казань: Отечество, 2022. – 227 с.

69. Лаптев, А. Г. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : монография / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева. – Казань : КГЭУ ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.

70. Модели и эффективность процессов межфазного переноса : монография. В 2 частях. Часть 2. Тепломассообменные процессы / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева [и др.]; под редакцией А. Г. Лаптева. – Казань : Центр инновационных технологий, 2020. – 565 с.

71. Лаптева, Е. А. Эффективность явлений переноса в газожидкостных средах при десорбции и охлаждении жидкостей : монография / Е. А. Лаптева. – Казань : Отечество, 2019. – 224 с.

72. Модели и эффективность процессов межфазного переноса : монография. В 2 частях. Часть 1. Гидромеханические процессы / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. Л. Лаптева, Т. М. Фарахов ; под общей редакцией А. Г. Лаптева. – Казань : Центр инновационных технологий, 2017. – 392 с.

73. Лаптева, Е. А. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии (гидромеханика и тепломассообмен) : монография / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев. – Казань : Печать-Сервис XXI век, 2015. – 236 с.

74. Лаптева, Е. А. Тепломассообмен и энергоэффективность противоточных пленочных аппаратов : монография / Е. А. Лаптева, М. В. Саитбаталов ; под редакцией А. Г. Лаптева ; ФГБОУ ВПО «КГЭУ». – Москва : Теплотехник, 2014. – 207 с.

75. Башаров, М. М. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе : монография / М. М. Башаров, Е. А. Лаптева ; под редакцией А. Г. Лаптева. – Казань : Отечество, 2013. – 297 с.

#### ***Основные объекты интеллектуальной собственности:***

76. Патент № 54818 Российская Федерация, МПК В01J 19/32 (2006.01). Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов : № 2005111912/22; заявл. 20.04.2005 : опубл. 27.07.2006 / Фарахов М. И., Шигапов И. М., Маряхин Н. Н., Фарахов Т. М., Лаптева Е. А. ; патентообладатель: ООО «ИВЦ «ИНЖЕХИМ». – 10 с.

77. Патент № 155710 Российская Федерация, МПК С02F 1/20 (2006.01). Установка для декарбонизации воды : № 2015104200/05 : заявл. 09.02.2015 : опубл. 20.10.2015 / Лаптева Е. А., Амирханова Г. Р., Лаптев А. Г. ; патентообладатель: ФГБОУ ВО «КГЭУ». – 6 с.

78. Патент 175714 Российская Федерация, МПК F28C 1/00 (2006.01). Мини градирня с насадками : № 2017112126 : заявл. 15.12.2017 : опубл. 10.04.2017 / Лаптева Е. А., Столярова Е. Ю., Лаптев А. Г. ; ФГБОУ ВО «КГЭУ». – 5 с.

79. Свидетельство № 2021616879 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет высоты блоков оросителей градирни : № 2021615841 : заявл. 22.04.2021 : опубл. 28.04.2021 / Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Столярова Е. Ю. ; правообладатель: ФГБОУ ВО «КГЭУ». – Бюл. № 5.

80. Свидетельство № 2021615596 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет насадочных декарбонизаторов : № 2021614170 : заявл. 29.03.2021 : опубл. 09.04.2021 / Бальзамов Д. С., Харитоновна О. С., Лаптева Е. А., Мирзагалямова Е. В. ; правообладатели: Бальзамов Д. С., Харитоновна О. С., Лаптева Е. А., Мирзагалямова Е. В. – Бюл. № 4.

#### ***Публикации в других изданиях и материалах конференций:***

81. Лаптева, Е. А. Повышение эффективности охлаждения воды в градирнях с комбинированными блоками оросителей / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова, А. Г. Лаптев //

Энергетика и энергосбережение: теория и практика : материалы VII Международной научно-практической конференции, 07–09 декабря 2022 г. – Кемерово : КГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2023. – С. 149-1–149-5.

82. Лаптева, Е. А. Математическое моделирование процессов тепломассообмена в газожидкостных средах / Е. А. Лаптева, Р. Я. Исхакова // Математическое моделирование в теплоэнергетике : материалы докладов Молодежной научной конференции, 12 апреля 2023 г. – Москва : ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», 2023. – С. 47–51.

83. Лаптева, Е. А. Методы моделирования эффективности тепломассообмена в пленочных градирнях с интенсификаторами / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, 31 мая – 02 июня 2023 г. – Иваново : ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2023. – С. 255–258.

84. Lapteva, E. A. Mathematical models of heat transport in film apparatus with intensifiers for gas cooling and water heating / E. A. Lapteva, A. S. Ulvi Oglu // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia : сборник докладов, 02–05 марта 2022 г. – Новосибирск, 2022. – С. 2978–2983.

85. Лаптева, Е. А. Математическая модель и энергоэффективность охлаждения газов и жидкостей в насадочных скрубберах и градирнях / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Моделирование энергоинформационных процессов : сборник докладов X Национальной научно-практической конференции с международным участием, 21–23 декабря 2021 г. – Воронеж : ВГУИТ, 2022. – С. 239–245.

86. Лаптева, Е. А. Модернизация ректификационной колонны выделения гексена-1 из гексеновой фракции / Е. А. Лаптева, М. И. Фарахов, А. Г. Лаптев // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 8. – С. 22–25.

87. Laptev, A. G. Determination of friction coefficients as well as heat and mass transfer coefficients in film-type countercurrent apparatuses with intensifiers / A. G. Laptev, E. A. Lapteva // Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE-2021» : материалы Международной конференции, 18–20 февраля 2021 г. – Казань : КГЭУ, 2021. – С. 894–902.

88. Лаптев, А. Г. Математическая модель и сравнительные характеристики пленочных скрубберов охлаждения дымовых газов / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения) : материалы Международной научно-технической конференции, 2021 г. – Иваново : ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2021. – С. 254–256.

89. Лаптева, Е. А. Математическая модель конденсационного охлаждения газов и нагрева воды в пленочных скрубберах с учетом неравномерности распределения фаз / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 1. – С. 65–69.

90. Лаптев, А. Г. Математическая модель контактного охлаждения газов в высокоскоростных дисперсно-кольцевых потоках / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, С. У. Аласгарли // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 12. – С. 44–47.

91. Laptev, A. G. Dissipative mathematical model of heat transfer in channels with process intensifiers / A. G. Laptev, T. M. Farakhov, E. A. Lapteva // International scientific conference CAMSTECH-2020: advances in material science and technology : IOP Conference

Series: materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 2020. – Красноярск, 2020. – С. 52045.

92. Laptev, A. G. Modelling of mass transfer in separation of hydrocarbon mixtures and modernization of industrial columns / A. G. Laptev, E. A. Lapteva, A. D. Gilyazov // Actual Problems of the Energy Complex: Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection : materials II International Scientific and Practical Conference, Moscow, Russian Federation, 16–17 April 2020. – London, 2020. – С. 012016.

93. Лаптев, А. Г. Определение эффективности комбинированных газосепараторов очистки углеводородных газов от аэрозольных частиц / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Нефть и газ: технологии и инновации : материалы Национальной научно-практической конференции : в 3 томах. – Тюмень : ТИУ, 2020. – Т. 3. – С. 147–149.

94. Лаптева, Е. А. Многофункциональные контактные устройства для процессов смешения и тепломассообмена тяжелых углеводородов / Е. А. Лаптева, М. М. Фарахов // Нефть и газ: технологии и инновации : материалы Национальной научно-практической конференции : в 3 томах. – Тюмень : ТИУ, 2020. – Т. 3. – С. 152–154.

95. Лаптева, Е. А. Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением градирен / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова // Математические методы в технике и технологиях. – Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2020. – Т. 1. – С. 22–26.

96. Лаптева, Е. А. Математическая модель определения эффективности насадочных газосепараторов с учетом неравномерности скорости газа в слое / Е. А. Лаптева, М. И. Фарахов, А. Г. Лаптев // Математические методы в технике и технологиях. – Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2020. – Т. 6. – С. 82–85.

97. Лаптев, А. Г. Энергосепарационные характеристики насадочных аппаратов очистки газов от жидких аэрозольных частиц / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева // Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды : материалы Международной научно-технической конференции, 03–07 июня 2019 г. – Алушта : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. – Ч. 1. – С. 217–221.

98. Лаптев, А. Г. Математическая модель газосепарации и внедрение аппаратов очистки природного газа / А. Г. Лаптев, М. М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019. – Т. 12–2. – С. 135–137.

99. Лаптева, Е. А. Повышение эффективности очистки воды от растворенных газов / Е. А. Лаптева // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : тезисы докладов : в 6 томах. – Санкт-Петербург, 2019. – Т. 3. – С. 229.

100. Лаптев, А. Г. Внедрение в промышленность модернизированных энерго-ресурсосберегающих аппаратов разделения углеводородных смесей / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : тезисы докладов : в 6 томах. – Санкт-Петербург, 2019. – Т. 3. – С. 230.

101. Лаптева, Е. А. Показатели энергоэффективности градирен / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 217–221.

102. 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.

103. Лаптев, А. Г. Моделирование массоотдачи в многокомпонентных и бинарных смесях в пленочных контактных устройствах при слабом взаимодействии фаз /

А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Наука. Исследования. Практика : материалы докладов Международной научной конференции, 26 октября 2017 г. – Санкт-Петербург : ГНИИ «Нацразвитие», 2017. – С. 32–36.

104. Лаптева, Е. А. Эффективность охлаждения воды в мини градирне с регулярной насадкой / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2017. – Т. 12. – С. 60–62.

105. Лаптева Е. А. Определение эффективности насадочных декарбонизаторов и деаэраторов ТЭС / Е. А. Лаптева, М. М. Фарахов, Г. К. Шагиева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. – № 10 (92). – С. 61–63.

106. Лаптева, Е. А. Математическая модель процесса абсорбции в насадочных колоннах / Е. А. Лаптева, О. Г. Дударовская // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 4 (88). – С. 105–115.

107. Лаптева, Е. А. Энергетические и тепломассообменные характеристики пленочных блоков оросителей в градирнях / Е. А. Лаптева, Л. М. Ишмуратова, А. Г. Лаптев // IX семинар вузов по теплофизике и энергетике : материалы докладов, 21–24 октября 2015 г. – Казань, 2015. – С. 54–60.

108. Лаптева, Е. А. Определение коэффициентов теплоотдачи в турбулентных пленках / Е. А. Лаптева, Г. К. Хамидуллина // IX семинар вузов по теплофизике и энергетике : материалы докладов, 21–24 октября 2015 г. – Казань, 2015. – С. 87–94.

109. Лаптева, Е. А. Коэффициенты турбулентного перемешивания в одно- и двухфазных средах в диффузионной модели структуры потоков / Е. А. Лаптева, Т. М. Фарахов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2015. – № 7 (77). – С. 76–79.

110. Лаптев, А. Г. Энергосепарационные характеристики насадочных аппаратов очистки газов от жидких аэрозольных частиц / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева // Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды : сборник докладов Международной научно-технической конференции. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. – С. 217–221.

111. Лаптев, А. Г. Модель тепло- и массоотдачи в шероховатых и орошаемых каналах / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2013. – № 9-1 (59). – С. 154–156.

112. Лаптева, Е. А. Модель очистки газов от тонкодисперсной фазы в турбулентном барботажном слое / Е. А. Лаптева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – № 2 (61). – С. 37–41.

113. Лаптева, Е. А. Модель структуры потока и эффективность пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова, А. Г. Лаптев // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 11–2. – С. 150–154.

114. Лаптев, А. Г. Показатели энергосепарационной эффективности газосепараторов капельных аэрозолей / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова, А. Г. Лаптев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21. – № 1–2. – С. 3–9.

115. Лаптев, А. Г. Определение коэффициентов турбулентного перемешивания в одно- и двухфазных средах по модели Тейлора / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–13. – С. 2810–2814.

116. Лаптева, Е. А. Сравнительная характеристика контактных насадок в декарбонизаторах и термических деаэраторах ТЭС / Е. А. Лаптева, Г. К. Шагиева, А. Г. Лаптев // Вестник КГЭУ. – 2017. – № 2 (34). – С. 33–42.

117. Лаптев, А. Г. Тепло- и массоотдача в газовой фазе пленочных аппаратов при слабом и сильном взаимодействии фаз в осевых и закрученных потоках / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева // Вестник КГЭУ. – 2017. – № 4 (36). – С. 38–44.
118. Лаптева, Е. А. Трение в восходящем газожидкостном потоке в канале с хаотичной насадкой / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова, А. Г. Лаптев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 1–2. – С. 170–173.
119. Лаптев, А. Г. Эффективность тепло- и массоотдачи в насадочных слоях / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–2. – С. 278–282.
120. Лаптева, Е. А. Модель турбулентной вязкости в барботажных аппаратах / Е. А. Лаптева, Т. М. Фарахов // Вестник КГЭУ. – 2012. – № 4 (15). – С. 26–33.
121. Столярова, Е. Ю. Экспериментальные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочной градирни с комбинированными насадками / Е. Ю. Столярова, Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Вестник КГЭУ. – 2023. – Т. 15 – № 1 (57). – С. 37–47.
122. Лаптев, А. Г. Эффективность охлаждения жидкостей в турбулентном барботажном слое на ситчатых тарелках / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, С. У. Аласгарли // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 6. – С. 13–24.
123. Лаптева, Е. А. Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини градирен / Е. А. Лаптева, Е. Ю. Столярова // Труды Академэнерго. – 2020. – № 2 (59). – С. 23–30.
124. Фарахов, М. М. Экспериментальные исследования бинарной и многокомпонентной ректификации смесей в колонне с новыми насадками / М. М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Труды Академэнерго. – 2020. – № 2 (59). – С. 43–54.
125. Лаптев, А. Г. Проблемы и решения масштабного перехода в химической технологии / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева // Труды Академэнерго. – 2019. – № 4 (57). – С. 21–35.
126. Лаптев, А. Г. Моделирование массоотдачи в многокомпонентных и бинарных смесях в режиме сильного взаимодействия фаз при пленочном течении в каналах / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева // Труды Академэнерго. – 2017. – № 4. – С. 24–32.