

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по исследованиям и разработкам
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева»



Павел Геннадьевич
Колесников

« 10 » 09 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» на диссертационную работу **Лаптевой Елены Анатольевны** на тему: «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Актуальность диссертационной работы

Газожидкостные аппараты широко используются в промышленности при проведении ректификации, абсорбции, десорбции, сепарации, охлаждении газов и жидкостей, конденсации, испарения, очистки газов. Процессы протекают в условиях постоянно меняющейся межфазной поверхности при осуществлении обмена импульса, вещества, теплоты и дисперсных частиц. Аппараты, в которых осуществляются указанные процессы, энергозатратны, сложны в конструктивном оформлении, трудно поддаются масштабированию, по причине неравномерности распределения фаз. В связи с этим, совершенствование рассматриваемых в диссертационной работе промышленных аппаратов и контактных устройств, направленное на снижение энергозатрат и замену импортного оборудования на отечественное на основе приближенных и численных методов описания протекающих процессов, опирающееся на всесторонние экспериментальные исследования и обобщенный опыт многочисленных исследований, является актуальным. Это соответствует принятой Государственной программе Российской Федерации на период до 2024 года и стратегии развития химического и нефтехимического комплекса до 2030 года.

Научная новизна работы

В диссертации получил дальнейшее развитие подход, когда сложные процессы переноса в двухфазных средах представляются в виде совокупности элементарных явлений различных пространственно-временных масштабов, имеющих иерархическую структуру. Взаимодействие между явлениями учитывается параметрически, что позволяет использовать фундаментальные законы сохранения для математического моделирования процессов в промышленных теплообменных аппаратах.

На основе экспериментальных исследований и развития методов математического моделирования определены параметры дифференциальных уравнений переноса импульса, массы, теплоты и дисперсной фазы для систем «газ – жидкость» в пленочных, вихревых,

барботажных и насадочных аппаратах с турбулизаторами, позволяющие численно моделировать эффективность промышленного оборудования на основе данных по гидравлическому сопротивлению контактных устройств.

Для насадочных колонн и пленочных градилен получены на трех установках экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению, предельным нагрузкам, объемным коэффициентам массоотдачи и эффективности процессов при применении как известных, так и разработанных автором насадочных колонных устройств. Получены обобщающие расчетные зависимости для данных гидравлических и массообменных характеристик в системе «газ – жидкость».

На основе модификации гидродинамической аналогии получены выражения для расчета массоотдачи и теплоотдачи для контактных устройств исследуемых аппаратов при ламинарном и турбулентном режимах с одно- и двухфазными средами, учитывающие влияние турбулизаторов на интенсификацию процессов за счет гидравлического сопротивления.

Исходя из модели локальной изотропной турбулентности, получены выражения для вычисления средних коэффициентов турбулентной вязкости в жидкой фазе при различных режимах движения пузырьков газа.

На основе использования модели Тейлора, получено выражение для расчета коэффициента продольного перемешивания в жидкой фазе барботажного слоя.

На основе модели турбулентно-инерционного осаждения частиц из газов, получены выражения для расчета эффективности сепарации тонкодисперсной фазы из газов в барботажном и насадочном слоях и на поверхности пленки жидкости.

На основе дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с объемными межфазными источниками, проведено численное исследование массопереноса растворенного кислорода в деаэраторе и установлена эффективность извлечения растворенного кислорода.

С применением системы дифференциальных уравнений с частными производными представлена замкнутая математическая модель тепло- и массопереноса на тарелках с барботажным слоем при турбулентном режиме. Даны результаты расчета эффективности.

Разработана математическая модель охлаждения воды и газов в пленочных градириях и скрубберах, с учетом поперечной неравномерности распределения фаз. Получены новые данные о влиянии неравномерностей профилей скоростей фаз на эффективность теплообмена и сепарации аэрозолей. Предложено использовать энергетические коэффициенты для выбора контактных устройств.

Практическая значимость работы

Представленные научно-технические разработки и их внедрение различными предприятиями и организациями вносят существенный вклад в развитие теории и практики проектирования и создания новых аппаратов различного назначения в химической и нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности, использование которых позволяет обеспечить требуемое качество выпускаемого продукта, снизить текущие и капитальные затраты, сроки внедрения в производство. Полученные результаты доступны и достаточно просты, и будут в дальнейшем использованы для моделирования широкого класса аппаратов разделения газо-жидкостных систем. Теоретическая и практическая значимость подтверждена справками и актами об использовании научно-технических результатов диссертации в научных, проектных и образовательных организациях, и на промышленных предприятиях.

Запатентованная регулярная насадка внедрена в трех ректификационных колоннах разделения этаноламинов в ПАО «Казаньоргсинтез», что позволило повысить качество этаноламинов до высшего сорта и в два раза снизить затраты на ректификацию. Внедрение насадочной колонны разделения изопрена и изобутилена в ПАО «Нижнекамскнефтехим»

позволило повысить качество продукции. Совершенствование ректификационной колонны выделения товарного фенола в ПАО «Казаньоргсинтез», привело к повышению качества фенола и снижению энергозатрат на 30 % при экономическом эффекте более 250 млн. руб. в год. Внедрение ректификационной колонны выделения гексана в ПАО «Нижнекамскнефтехим», а также комбинированных сепараторов на линии товарного этилена в холодильных циклах в ПАО «Казаньоргсинтез», привело к достижению экономического эффекта 500 млн. руб. в год.

Разработанные математические модели и алгоритмы расчета использованы при выполнении проектных работ на нефтегазохимических предприятиях: ООО «Нефтегазпроект», г. Казань; АО «ТАНЕКО», г. Нижнекамск; ЗАО «Балтийская химическая компания», г. Москва; ПАО «Казаньоргсинтез», г. Казань; ПАО «Нижнекамскнефтехим», 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 имени М.В. Ломоносова», г. Москва (филиал в городе Душанбе (Таджикистан); 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.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов подтверждается применением известных моделей турбулентного пограничного слоя, проверенных подходов и апробированных выражений при расчете коэффициентов тепло- и массоотдачи, а также — использованием сертифицированных и поверенных средств измерения гидравлических и термодинамических характеристик двухфазных сред, удовлетворительным согласованием расчетов по разработанным математическим моделям с экспериментальными данными различных авторов и эффективным внедрением модернизированных промышленных аппаратов.

Научные положения, выносимые на защиту, обоснованы и раскрыты в тексте диссертации и в многочисленных опубликованных соискателем работах и монографиях. Диссертация базируется на достаточно большом количестве исходных данных, примеров и расчетов, хорошо структурирована, грамотно и аккуратно оформлена, материал изложен понятно и ясно.

Опубликование основных результатов диссертации в научной печати

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. Опубликовано восемь монографий, получено 3 патента Российской Федерации и зарегистрировано 2 программы для ЭВМ.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа Лаптевой Е.А. состоит из восьми глав, введения, заключения, списка литературы из 286 источников и изложена на 520 страницах, содержит 5 приложений, 158 рисунков и 43 таблицы.

Во введении представлены: актуальность, степень разработанности темы, цель и задачи исследования, объекты и предмет исследований, основы научного подхода и методы решения поставленных задач, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, результаты внедрения научно-технических разработок, положения, выносимые на защиту и личное участие.

В первой главе дано подробное теоретическое описание дифференциальных уравнений стационарного переноса теплоты, массы влаги, дисперсных частиц в двумерной форме, необходимое для математического моделирования тепломассообменных процессов и сепарации аэрозолей при разработке конструкций устройств и модернизации промышленных

аппаратов. Обосновывается переход к приближенному моделированию совместных процессов для решения практических задач. Записаны частные случаи систем уравнений совместного переноса импульса, массы, энергии и тонкодисперсной фазы для пленочных, насадочных и барботажных аппаратов с граничными условиями различного рода и с локальными межфазными источниками, а также представлены системы уравнений структуры потоков жидкой и газовой фаз в виде диффузионных и ячеечных моделей. Вводимые объемные источники связаны с коэффициентами теплоотдачи и массоотдачи и движущими силами процессов, для определения которых разработаны математические модели. Также получены расчетные выражения турбулентной вязкости и коэффициента обратного перемешивания, представлены результаты расчета коэффициентов и проведено их сравнение с экспериментальными данными различных авторов.

Во второй главе на основе развития приближенного метода моделирования Ландау-Левича, модели турбулентного пограничного слоя Дайслера и Ван-Дрифта, а также функций турбулентной вязкости Прандтля для плоской стенки, смоделирован процесс переноса, и получены упрощенные выражения для расчета среднего касательного напряжения для каналов с поверхностными и объемными интенсификаторами для одно и двухфазных сред различной вязкостью. Конкретно рассмотрены примеры моделирования переноса импульса и трения на пластине (в постановках известных авторов), и дан анализ выражений для расчета коэффициента импульсоотдачи, коэффициента трения, числа Шервуда. Представлены результаты расчета и даны рекомендации по их использованию. Дано обоснование применения результатов моделирования, полученных на пластине применительно к гидравлически гладким трубам, исходя из известных представлений о распространении области пограничного слоя. Рассмотрены примеры моделирования трения в пограничном слое на пластине и в трубе. Доказана адекватность диссипативной модели трения в каналах с гладкими стенками, которая затем применена для модели диссипации энергии и трения на поверхности с интенсификаторами, что позволило получить выражение для расчета безразмерного параметра трения в каналах с поверхностными турбулизаторами. Представлены результаты расчета и их анализ. Рассмотрено применение разработанного подхода моделирования однофазного потока в хаотичных объемных структурах, получено выражение безразмерного числа Рейнольдса. Проведено сравнение результатов расчета с результатами вычислений по уравнению баланса сил и сделан вывод о несоответствии результатов, то есть, подтверждена обоснованность применения диссипативной модели. Далее получены выражения Рейнольдса в каналах при противотоке газа с пленкой жидкости и для орошаемых насадочных колонн. В конце главы представлен пример применения коэффициентов переноса импульса фазы в барботажном аппарате.

В третьей главе осуществлено применение полученных приближенных математических моделей для расчета тепломассообмена в газо-жидкостных контактных устройствах с различными поверхностными интенсификаторами. Развита модель гидродинамической аналогии, устанавливающая связь между коэффициентом трения и числом Стантона с поправкой на неоднородность полей скорости, температуры и концентрации, на основе полученных во второй главе коэффициентов переноса импульса и с учетом поправки Чилтона-Колборна, что позволило получить выражения для расчета числа Нуссельта для цилиндрического канала с применением параметров пограничного слоя на пластине. Сравнение результатов расчета по известному критериальному выражению Михеева М.А. подтвердило адекватность представленной математической модели. Далее полученная зависимость была адаптирована к поверхности с искусственной шероховатостью на основе консервативности законов трения и теплообмена в пограничном слое, относительно возмущений с учетом толщины вязкого подслоя на поверхности интенсификаторов и толщины пограничного слоя. Представлено сравнение результатов расчета теплоотдачи с различными типами выступов на поверхности и их геометрических параметров и получено удовлетворительное согласование. Математическая модель проверена также исходя из результатов промышленной эксплуатации внедренных в

промышленность теплообменников. Далее в главе показано применение полученных выражений для чисел Нуссельта, Шервуда и Рейнольдса в расчетах при турбулентном режиме движения однофазных сред в аппаратах с насадками нерегулярного типа. Представлены рекомендации по использованию выражений числа Нуссельта и Шервуда и составлен алгоритм расчета, исходя из которого на основании дифференциальных уравнений массообмена, с объемным межфазным источником, вычисляются концентрации компонентов на выходе насадочного слоя и эффективность процесса массопередачи. Рассмотрена массоотдача в орошаемых насадках на примере массоотдачи в газовой фазе орошаемой рулонной насадки и в противотоке со стекающей по насадке пленки жидкости.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные, полученные автором на опытных установках с регулярными и хаотичными насадками. Для проверки адекватности разработанных математических моделей и получения рекомендаций по промышленному внедрению, был исследован процесс массообмена при противотоке фаз в трубчатой насадке с гладкой и шероховатой поверхностью, выполненной в виде прямоугольных кольцевых выступов. Представлены и обсуждены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению и коэффициенту массоотдачи, проведено сравнение с известными данными других типов насадок. Показано преимущество разработанной конструкции в сравнении с насадкой, используемой в промышленности, выполненной из сетки. Рассмотрены результаты исследования гидравлического сопротивления и массоотдачи в аппарате с комбинированными насадками и установлена значимость хаотичной насадки, размещенной в верхней части аппарата и её влияние на величину коэффициента массоотдачи. Представлены результаты исследования колонны диаметром 0,6 м, высотой 2,6 м с рулонной гофрированной насадкой, разработанной диссертантом, получены графические зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения, а также расчетные уравнения для определения коэффициента сопротивления и удельной задержки жидкости.

Для восходящего прямотока в регулярной рулонной насадке с перфорированной поверхностью, на основании данных исследований и гидродинамической аналогии, получено выражение для числа Шервуда, учитывающее касательные напряжения на межфазной поверхности. Представлены расчеты массоотдачи в газовой фазе и проведено сравнение с экспериментальными данными известных авторов, а также – экспериментальные исследования ректификации бинарной и многокомпонентной смесей в колонне с разработанными насадками, что позволило получить данные по перепаду давления, температуры и составу смесей по высоте колонны. Вычислены значения высоты эквивалентной теоретической тарелки для различных типов насадок. Высота эквивалентная теоретической тарелки для бинарной смеси составила для насадки «Инжехим-2012» 0,25 м и регулярной насадки из ленты и сетки – 0,43 м. Представлены характеристики исследованных насадок и показано преимущество трубчатой насадки с дискретной шероховатой поверхностью.

В пятой главе представлена математическая модель определения эффективности процесса абсорбции в насадочной колонне, включающая систему дифференциальных уравнений тепло- и массообмена с частными производными в цилиндрической системе координат для колонны с хаотичными насадками при противотоке с учетом межфазного переноса источниковыми членами, в которой плотности потоков массы и теплоты определялись с использованием коэффициентов массо- и теплоотдачи. Выполнено численное решение системы уравнений для процесса увлажнения воздуха водой в колонне с трубчатой насадкой с интенсификаторами и проведено сравнение по эффективности с экспериментальными данными, при этом достигнуто хорошее согласование. Далее приводится упрощенная математическая модель, построенная с применением ячеечных моделей структуры, в которой коэффициенты массоотдачи вычисляются с учетом интенсификаторов контактных устройств.

Установлены технологические и кинетические параметры восьми типов насадок, согласно представленным данным они обеспечивают структуру потоков по жидкости и газовой фазам, близкую к идеальному вытеснению, и высокую эффективность массопередачи. Выполнены расчеты декарбонизаторов с рассмотренными выше насадками, на основании чего представлена гистограмма высоты слоя насадки, необходимая для очистки воды от растворенного диоксида углерода и мощность, затраченная на подачу газа, а также представлены рекомендации по использованию насадок в промышленных аппаратах.

Рассмотрен теоретический подход моделирования деаэратора с барботажным баком-аккумулятором при извлечении растворенного кислорода из воды водяным паром, который включает дифференциальное уравнение конвективного массопереноса в жидкой фазе для зоны бака с барботером с учетом массопередачи с паровой фазой, уравнение конвективного теплопереноса в жидкой фазе и уравнения баланса массы и теплоты между фазами. После принятых допущений выполнены численные исследования эффективности аппарата. Получено удовлетворительное согласование с экспериментальными данными. Даны графические зависимости по эффективности удаления из воды кислорода при разных значениях скорости пара и расхода воды. Предложено для снижения обратного перемешивания водной фазы устанавливать в аппарате перфорированные перегородки.

В заключительном параграфе пятой главы рассмотрен турбулентный прямоток воды и воздуха в трубе с хаотичной насадкой, в которой за счет интенсивного дробления пузырей обеспечивается высокая эффективность удаления растворенных газов из воды. Для определения профиля концентрации записана численная модель массообмена турбулентного прямотока газа и жидкости путем решения уравнения массообмена, которое записано для цилиндрического канала с объемным межфазным источником масс переходящего компонента из жидкости в пузырьки газа. В этом случае средний коэффициент массоотдачи в жидкой фазе принимался с учетом турбулентности потока и с учетом движения пузырей. Представлен пример расчета декарбонизации в насадочном слое, показаны профили концентрации CO_2 по длине канала и эффективность десорбции от числа Рейнольдса.

В шестой главе представлено математическое моделирование и экспериментальное исследование пленочных противоточных градилен с насадками, широко используемых в промышленности. Проведен исчерпывающий обзор работ по исследованию данного типа оборудования и сделан вывод, что дальнейшая интенсификация процесса охлаждения воды на промышленных предприятиях и тепловых станциях возможна путем развития теоретических и прикладных исследований в этой области. В этой связи, в работе исследованы насадки с интенсификаторами и разработана математическая модель расчета учитывающая неравномерность распределения фаз. Разработанная модель представлена системой дифференциальных уравнений тепломассообмена с частными производными с учетом межфазного переноса теплоты и влаги, что позволило получить профили влагосодержания и температур в газовой и жидкой фазах, необходимые для определения эффективности охлаждения воды в градирне. На основе результатов, полученных диссертантом ранее, представлены выражения для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи для нескольких типов регулярных и хаотичных насадок с поверхностными интенсификаторами. Экспериментальными параметрами в данных выражениях является гидравлическое сопротивление контактных устройств. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами других авторов. Показано преимущество регулярной рулонной гофрированной насадки и металлической пакетной насадки «Инжехим», изготовленной из гофрированных листов с шероховатыми поверхностями. На основании полученных данных, разработана и исследована опытная градирня с активным участком тепломассообмена, размещенным в верхней части установки, что позволило максимально использовать движущую силу процесса испарительного охлаждения.

Далее в шестой главе представлена численная математическая модель для определения температурных профилей воды, воздуха и влагосодержания по высоте насадки в промышленной градирне с учетом неравномерного профиля скорости воздуха. Получены

выражения для коэффициентов тепло- и массоотдачи, а также турбулентного обмена в локальных областях градиентности, при различных скоростях воздуха и гидравлического сопротивления насадки. В результате расчетов установлено, что при условии равномерного орошения насадки водой, из-за неравномерности скорости воздуха, снижение теплового КПД составило до 30 %. С учетом только неравномерности подачи воды, расхождение эффективности составило не более 7÷8 %. Выполнены расчеты требуемой насадки блоков оросителей с различными насадками с учетом неравномерности распределения воздуха, и проведено их сравнение. Предложены технические решения для компенсации неравномерности локального гидравлического сопротивления с целью повышения эффективности.

Представлено упрощенное решение диффузионной модели с учетом перемешивания потоков в газовой и жидкой фазах на основе модифицированного метода числа единиц переноса. Полученное в явном виде число единиц переноса косвенно учитывает структуру потоков, параметры которого определены автором на основе экспериментальных исследований. Разработан подход к оценке энергоэффективности пленочных градиентных, который позволяет определять их рациональные характеристики. Полученные в данной главе математические модели и алгоритмы расчетов рекомендованы к применению при проектировании или модернизации.

В седьмой главе рассмотрены методы расчета эффективности очистки газа от аэрозольных частиц в высокоскоростных потоках газа и жидкости, совмещенные с конденсационным охлаждением газов, а также представлены математические модели рассматриваемых процессов в комбинированных насадочных и вихревых газосепараторах и газожидкостных аппаратах. В этом случае используется система дифференциальных уравнений в частных производных, представленная в первой главе работы, где межфазный перенос учитывается источниковыми членами. Для сепарации аэрозолей использована теория турбулентно-инерционного механизма осаждения аэрозолей. В этой связи, выполнен анализ полуэмпирических зависимостей для расчета приведенной скорости турбулентного осаждения, полученных различными авторами. Для практических расчетов было использовано выражение В.П. Медникова. Представлено численное решение системы дифференциальных уравнений, при котором кинетические характеристики явлений переноса вычислялись по зависимостям, полученным в третьей главе диссертации, преобразованным под условия рассматриваемого процесса, на основании чего были изучены профили концентрации частиц, эффективность сепарации для восходящего дисперсно-кольцевого потока и дан их анализ. Для мелких частиц, с целью повышения эффективности процесса сепарации, рекомендуется использовать каналы с шероховатыми стенками или завихрителями потока. Показано, что эффективность сепарации в сухом гладком канале при слабом взаимодействии ниже, в сравнении с каналами с дискретной шероховатостью. Причем отмечается, что в режиме сильного взаимодействия эффективность существенно выше, а также увеличивается тепловая эффективность и производительность канала по газу. Показано влияние режимных и конструктивных параметров на эффективность аппаратов газоочистки с восходящим движением фаз. Далее рассмотрена математическая модель сепарации дисперсной фазы в аппарате с двумя зонами с различными механизмами осаждения на поверхность контактных устройств. Представлены выражения для определения эффективности сепарации аэрозолей в канале с ленточным завихрителем с учетом турбулентно-инерционного и центробежного механизмов разделения. Также показаны расчеты комбинированного сепаратора для очистки природного газа, который внедрен ИВЦ «Инжехим» в местах добычи природного газа в северных районах Сибири.

Для исследования влияния неоднородности распределения газового потока при сепарации аэрозолей в слое хаотичной насадки, разработана численная математическая модель определения эффективности аппарата, которая основана на решении дифференциального уравнения массопереноса частиц в газах с заданным экспериментальным профилем скорости потока по поперечному сечению насадочного слоя.

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 «Инжехим-2012»). Также разработана модель сепарации тонкодисперсной фазы в барботажном слое на тарелках различной конструкции, которая построена с применением теории турбулентной миграции частиц и известной концепции активного участка на входе газа в слой жидкости. В результате получено выражение для расчета скорости турбулентного осаждения аэрозольных частиц на межфазную поверхность струй, вследствие чего, получены выражения для вычисления эффективности мокрой очистки газа по результатам гидравлических исследований, представлены алгоритм и примеры расчета. Получены зависимости степени очистки газа от размера частиц и удельного расхода орошаемой жидкости. Разработанная математическая модель рекомендована для проектирования и модернизации барботажных аппаратов, внедряемых в промышленность. Далее в рассматриваемой главе представлена численная ячеечная математическая модель охлаждения газа в барботажном слое на провальных тарелках. Принято допущение о полном перемешивании газа в межтарельчатом пространстве колонны и идеальном вытеснении газа в барботажном слое. Представлены примеры расчета охлаждения водой сухого и влажного газа для пяти типов тарелок. Проведено сравнение результатов расчетов тепловой эффективности охлаждения газа в зависимости от высоты газожидкостного слоя и скорости газа в колонне. Проведено сопоставление полученных данных с известными экспериментальными данными, а также показана возможность вычисления эффективности теплообмена с учетом неравномерности профиля скорости газа. Полученные математические модели и алгоритмы расчета использованы при разработке и внедрении аппаратов газоочистки в промышленность.

В восьмой главе на основе разработанных автором математических моделей и конструкций контактных устройств, представлены научно-технические решения модернизации промышленных колонн ректификации и десорбции смесей, а также градирен.

Модернизация насадочных десорберов позволила повысить эффективность очистки воды от растворенных коррозионно-активных газов и увеличила диапазон устойчивой работы.

Представлена конструкция разработанной и запатентованной мини градири, обеспечивающая увеличение эффективности процессов тепломассообмена и плотности орошения.

Представлены научно-технические решения по модернизации промышленной ректификационной колонны выделения гексана-1 из гексановой фракции, которые выполнены с применением разработанных математических моделей, а также лицензионного программного пакета ChemCad.

Представлено описание технологической схемы блока разделения этаноламинов с новыми разработанными аппаратами, оснащенными запатентованной автором регулярной гофрированной насадкой. Даны технические решения по режимам работы насадочных колонн и результаты промышленной эксплуатации ректификационной установки.

Проведена модернизация колонны получения товарного бензина с применением хаотичных металлических насадок, что позволило обеспечить очистку бензиновых фракций от бензола. Таким образом, в восьмой главе убедительно показана возможность импортозамещения аппаратов химической технологии с применением научно обоснованного подхода.

В заключительной части диссертации изложены основные научные результаты и выводы, полученные соискателем в комплексных научных, экспериментальных и промышленных разработках.

В приложениях представлены многочисленные акты и справки о применениях научных результатов, схемы модернизированных сепараторов и разработанных ректификационных колонн разделения этаноламинов, а также размещены аннотации на монографии диссертанта: «Тепломассообмен и энергоэффективность противоточных

пленочных аппаратов», «Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики», «Сопряженные процессы тепломассообмена и сепарации дисперсной фазы в газожидкостных аппаратах», «Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе», «Модели и эффективность процессов межфазного переноса», «Эффективность влияния переноса в газожидкостных средах при десорбции и охлаждении жидкостей», «Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах». В пятом приложении диссертации представлен полученный диссертантом патент на полезную модель и свидетельства программ для ЭВМ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты работы можно применять в ректификационных колоннах, абсорберах, градирнях, деаэраторах и декарбонизаторах на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки, таких как компании «СИБУР»: АО «СИБУР-Нефтехим», г. Дзержинск; АО «Воронежсинтезкаучук», г. Воронеж; ПАО «Нижнекамскнефтехим», г. Нижнекамск; ПАО «Казаньоргсинтез», г. Казань; компании «Лукойл» (нефтеперерабатывающие заводы в России – в Перми, Волгограде, Нижнем Новгороде и Ухте, а также на предприятиях ГАЗПРОМ, НОВАТЭК и др.) и в проектных организациях.

Замечания по представленной диссертации

1. В виду большого количества обсуждаемых поверхностных и объемных интенсификаторов, следовало бы дать их классификацию и указать какие из них подходят под научную концепцию, защищаемую автором диссертационной работы.

2. Из многообразия известных типов завихрителей наибольшее внимание в работе уделено ленточному, который однако обладает сравнительно большим сопротивлением и низкой круткой потока. В чем состоит преимущество исследуемого устройства?

3. Использовать величину скорости газа в канале для установления перехода в область сильных взаимодействий при пленочном течении не совсем корректно. Для этого применяют относительное число Рейнольдса, так как диаметр канала и плотность орошения оказывают влияние на смену режима.

4. На величину интенсивности массоотдачи в газовой фазе так и теплоотдачи в жидкости большое влияние оказывает брызгоунос с поверхности пленки или наличие дисперсной фазы в потоке, с увеличением концентрации капель интенсивность процесса снижается, что следовало бы отразить в работе.

5. Изменение неравномерности профиля скорости газа на входе в аппарат приводит к различным значениям коэффициента сопротивления контактных устройств, размещенных на ступени. Как это оценивалось при расчете эффективности?

6. Эффективность ректификационной ступени для используемых бинарных смесей зависит от сопротивления переносу как в жидкой, так и газовой фазах. Как это учитывалось при проведении расчетов эффективности?

7. На чем основано утверждение автора об интенсивном дроблении пузырьков газа при пропускании его через канал с насадкой, так как данных по дисперсному составу не представлено?

8. В работе используются различные зависимости для расчета коэффициента трения в жидкой фазе. Как учитывалось влияние пузырьков газа в жидкости на этот параметр?

9. Разработан комбинированный центробежный сепаратор для отделения тонкодисперсной фазы из природного газа, который как правило эксплуатируется при высоком давлении. Как учитывалось при расчетах влияние давления на величину нормального ускорения (центробежной силы)?

10. На тарелках барботажного типа (колпачки, клапаны) кроме застойных зон присутствуют циркуляционные контуры, вокруг каждого контактного устройства. Проводилась ли оценка их влияния на эффективность?

11. Модернизированные установки для деаэрации воды снабжены прямоточными насадочными устройствами, которые усложняют технологическую обвязку. В этой связи, при каком соотношении потоков L/G можно рассчитывать на существенное увеличение эффективности?

12. Требуется пояснить, почему хаотичная насадка в мини градишне улучшает равномерность распределения жидкости по сечению аппарата и проводились ли такие исследования?

13. Высота, эквивалентная теоретической тарелке для бинарной смеси составила для насадки «Инжехим-2012» 0,25 м. Следовало бы указать, как влияет концентрация легколетучего компонента в смеси на этот параметр?

14. Для мелких частиц, с целью повышения эффективности процесса сепарации, рекомендуется использовать каналы с шероховатыми стенками. Если поток турбулентный, то за счет чего тогда будет вызван эффект сепарации от турбулизатора?

15. Пленочные трубчатые аппараты и насадочные аппараты относят к пленочному типу. В чем заключается отличие расчета коэффициентов в жидкой фазе для этих устройств?

Следует отметить, что все изложенные вопросы и замечания носят рекомендательный характер и не снижают научную и практическую значимость полученных результатов.

Заключение

От анализа известных работ, разработки математического описания, всесторонних исследований, моделирования и описания гидромеханических, теплообменных и массообменных процессов, протекающих в газо-жидкостных аппаратах, диссертант приходит к научно обоснованным методам расчета, проектирования и промышленного внедрения с учетом поставленной проблемы и решенных задач исследования. Оценивая работу в целом, следует отметить, что диссертация Лаптевой Елены Анатольевны по содержанию, объему теоретических, лабораторных и промышленных исследований, по актуальности поставленных и решенных задач, по тщательности обработки и достоверности полученных результатов является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным самостоятельно на высоком научном уровне. Автор работы разобрался в сути поставленных задач и показал научную эрудицию и практические навыки, способность самостоятельно решать сложные научно-технические задачи.

В работе впервые приведены результаты исследования новых научных и практических разработок, позволяющие квалифицировать их как решение научной проблемы по повышению энергоэффективности аппаратов и установок с импортозамещением оборудования на предприятиях нефтегазохимического комплекса, связанной со снижением затрат, сроков расчета и проектирования, повышением качества выпускаемого продукта и снижением его себестоимости. Результаты работы также вносят значительный вклад в совершенствование процессов и аппаратов химической технологии. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат отражает основные результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа Лаптевой Елены Анатольевны на тему: «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта» соответствует паспорту 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий, а также требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изм. и доп. от 16.10.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Автор, Лаптева Елена Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Лаптевой Елены Анатольевны на тему: «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта» рассмотрен на заседании кафедры машин и аппаратов промышленных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (протокол заседания кафедры от 03.09.2025 № 1)».

Отзыв подготовили:

Профессор, доктор технических наук (специальность 05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки древесины), профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Подпись *Войнов Н.А.*
УДОСТОВЕРЯЮ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
НАЧАЛЬНИКА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ



Н.А.

Николай Александрович Войнов
03.09.2025

Доцент, кандидат технических наук (специальность 05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины), заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Подпись *Марченко Р.А.*
УДОСТОВЕРЯЮ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
НАЧАЛЬНИКА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ



Р.А.

Роман Александрович Марченко
03.09.2025

Адрес организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 660037, Красноярский край, г. Красноярск, просп. им. газеты "Красноярский рабочий", дом 31, тел. 8 (391) 264-00-14, факс 8 (391) 264-47-09, email: info@sibsau.ru, <https://www.sibsau.ru/>

Вход. № 05-2542
« 19 » 09 2025 г.
подпись *Р.А.*