

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Игоря Александровича Попова на диссертационную работу **Лаптевой Елены Анатольевны** «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 (технические науки)

Актуальность темы

В современной химической технологии, охватывающей химическую, нефтехимическую и нефтегазоперерабатывающую отрасли, для осуществления процессов разделения гомогенных и гетерогенных жидких и газовых (паровых) смесей широко применяются аппараты газо(паро)-жидкостного контакта. К ним относятся колонны различных типов, такие как ректификационные, абсорбционные (десорбционные), сепараторы аэрозолей, аппараты для охлаждения газов и жидкостей, конденсаторы, испарители, а также установки мокрой очистки газов от дисперсной фазы.

В большинстве упомянутых процессов наблюдается одновременный массо- и теплоперенос, а также перенос дисперсных частиц между фазами. Эти явления протекают на подвижной межфазной поверхности, площадь которой не всегда точно определена. Кроме того, указанные процессы часто характеризуются значительными энергопотреблениями, особенно ректификация, и высокой сложностью конструкций контактных устройств. Неоднородность распределения фаз при масштабировании технологических процессов является существенным фактором, снижающим их эффективность. Описание явлений переноса импульса, массы и энергии в газо(паро)-жидкостных системах традиционно выполняется с использованием приближенных и численных методов, базирующихся на решении

нелинейных систем дифференциальных уравнений, учитывающих межфазные явления.

В контексте растущих требований к качеству продукции, необходимости повышения энергоэффективности и импортозамещения, разработка методов математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов, а также экспериментальные исследования новых конструкций контактных устройств, ориентированных на внедрение энергоэффективных научно-технических разработок, представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Эта задача находит отражение в государственной программе на период до 2024 года и стратегии развития химического и нефтехимического комплекса до 2030 года. Среди десяти приоритетных направлений технологического развития Российской Федерации выделены нефтегазовое машиностроение, оборудование для переработки углеводородов и энергетическое машиностроение.

Диссертационная работа написана при участии грантов РФ и РТ, что подтверждает актуальность работы.

Научная новизна

Диссертационное исследование посвящено разработке теоретических моделей для описания явлений переноса на интенсифицированных поверхностях контактных устройств тепломассообмена в аппаратах химической технологии. Предложен подход, основанный на замене сложной геометрии таких поверхностей эквивалентной условной плоской поверхностью. Такой подход позволяет осреднить локальные эффекты межфазного переноса и сформулировать новые граничные условия. На основе моделей турбулентного пограничного слоя Дайслера и Ван-Дрииста, а также с учетом консервативности законов трения к возмущениям, представлены безразмерные выражения для касательного напряжения трения. Данные выражения применимы как для однофазных сред, так и для двухфазных систем газ-жидкость, в том числе для пленочных и насадочных

аппаратов. Параметрическое представление возмущений обеспечивает гибкость модели при описании различных конфигураций интенсификаторов в каналах.

Для верификации теоретических результатов проведена серия экспериментальных испытаний на системе газ-жидкость и пар-жидкость на трех опытных установках, оснащенных колоннами диаметром 100, 200 и 600 мм. Проводились измерения гидравлического сопротивления, предельных нагрузок и эффективности теплообмена для запатентованных контактных устройств с различными типами интенсификаторов. Исследования охватывали двухфазные процессы, включая ректификацию, абсорбцию, охлаждение воды воздухом и увлажнение воздуха водой. Полученные экспериментальные данные служат базой для валидации развитых теоретических моделей.

Выполнена модификация классической гидродинамической аналогии Чилтона-Кольборна для применения к потокам с переменным градиентом давления, вызванной геометрией интенсификаторов на поверхностях. Отличительной особенностью модификации является учет влияния таких факторов для хаотичных и регулярных насадок, а также с учетом шероховатость поверхности каналов. Подстройка параметров модели осуществляется на основе баланса импульса в пограничном слое, с средним касательным напряжением трения. В результате получены выражения в форме чисел Нуссельта и Шервуда, позволяющие количественно описывать теплообмен в различных контактных устройствах как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения, для одно- и двухфазных сред.

В рамках данной работы проведено исследование турбулентного перемешивания в газожидкостных системах с применением модели локальной изотропной турбулентности. Для пузырькового режима барботажа, а также при стесненном движении пузырей, получены аналитические выражения, позволяющие определять средние коэффициенты турбулентной вязкости в жидкой фазе за пределами пограничного слоя.

Результаты моделирования демонстрируют снижение коэффициента турбулентной вязкости в жидкой фазе при стесненном движении пузырей, что обусловлено изменением турбулентной структуры под действием ограниченного пространства. Дополнительно, на основе модели Тейлора, получено выражение для расчета коэффициента обратного (продольного) перемешивания в жидкой фазе барботажного слоя, что особенно важно для понимания гидродинамики и эффективности процессов в подобных аппаратах.

Разработаны и апробированы алгоритмы для расчета эффективности сепарации тонкодисперсной фазы из газов в различных аппаратах. Исследованы процессы контактирования газа с пленкой жидкости в каналах с интенсификаторами, а также в насадочных слоях, с применением моделей турбулентно-инерционного осаждения частиц из газов. Полученные расчетные выражения для эффективности сепарации учитывают специфику каждого аппарата и позволяют количественно оценивать степень очистки. В рамках численного моделирования проведено исследование влияния неравномерности профиля скорости газа в насадке на эффективность сепарации аэрозолей, что подтвердило важность равномерного распределения потока для достижения максимальной эффективности очистки.

Для количественной оценки эффективности очистки жидкостей от труднорастворимых газов в насадочных десорберах и барботажных деаэраторах записаны системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с объемными межфазными источниками. Проведено численное исследование массопереноса растворенного кислорода в деаэраторном баке с барботажным устройством, что позволило установить связь режимных и конструктивных характеристик барботажа с эффективностью извлечения растворенного кислорода. Для насадочных десорберов в пленочном режиме получено аналитическое решение для расчета эффективности массопередачи, которое обеспечивает возможность

определения эффективности при вариации режимных и конструктивных параметров насадок.

Представлено модифицированное выражение для энергетического коэффициента Кирпичева, предназначенное для оценки массообменно-энергетической эффективности контактных устройств, используемых в десорберах. Данный подход позволяет на начальной стадии проектирования осуществлять рациональный выбор как типов насадок, так и оптимальных режимов их функционирования, тем самым снижая затраты на разработку и повышая производительность аппаратов.

Разработана замкнутая математическая модель, описывающая процессы тепло- и массопереноса на барботажных тарелках при турбулентном режиме. Использование системы дифференциальных уравнений в частных производных позволило детально исследовать поля скоростей и концентраций в двухфазном слое. Особое внимание уделено анализу влияния неравномерностей распределения фаз на эффективность процессов при ректификации, выявлены их негативные последствия. На основе полученных результатов предложены технические решения, направленные на повышение эффективности процессов разделения смесей в тарельчатых колоннах.

В работе записана двумерная система дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающая объемные межфазные источники теплоты и массы. Модель применяется к пленочным блокам оросителей градилен и насадочных скрубберов для охлаждения газов. Выполнено численное решение системы уравнений с учетом неравномерного входного профиля скорости газа. Установлена прямая корреляция между неравномерностью профиля скорости и снижением тепловой эффективности процесса охлаждения воды в градирне, а также в насадочном скруббере.

Соотношение тепловых эффективностей по жидкой и газовой фазам в пленочной градирне позволяет при заданной эффективности по жидкой фазе использовать вычисленную тепловую эффективность по газовой. Для пленочных скрубберов охлаждения газов получили аналогичные

соотношения. Записан показатель теплогидравлической эффективности градирен с различными типами контактных устройств. Получены 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 эффективность процессов основываясь на результатах гидравлических испытаний контактных устройств без идентификации параметров модели по тепло- и массообмену. Полученные выражения значительно сократят трудоемкость, затраты на экспериментальные исследования контактных устройств и время предпроектных разработок.

Диссертация соответствует 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 аппаратного оформления.

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

Теоретическая и практическая значимость

В ходе развития методов математического моделирования совместно протекающих процессов межфазного переноса в системах газ-жидкость, включая пленочные, насадочные и барботажные аппараты, в диссертации разработаны математические модели для учета влияния неоднородностей распределения фаз. Записаны замкнутые системы дифференциальных

уравнений, описывающих перенос импульса, массы, тепла и дисперсной фазы при турбулентном режиме газа. Это позволило существенно сократить количество необходимых экспериментальных стадий и упростило вычислительные процедуры путем использования опытных данных о гидравлическом сопротивлении двухфазной среды на контактных устройствах в колонных аппаратах.

Полученные результаты нашли применение в создании моделей и расчетных алгоритмов тепло- и массообменных аппаратов различного типа, работающих в условиях турбулентного режима течения жидкости и газа. Разработаны оригинальные методики расчета конструктивно-технологических параметров для таких устройств, как барботажные тарелки, теплообменники, пленочные колонны, газовые сепараторы аэрозольных частиц, охлаждающие башни (градирни) и термические деаэраторы с инновационными отечественными насадочными элементами.

Приведенные научно-технические разработки внедрены на ряде предприятий химической промышленности и нефтеперерабатывающей отрасли, подтвердив повышение эффективности процессов разделения многокомпонентных жидких смесей. Автором представлены патентные свидетельства на созданные технологии и устройства, а так же акты внедрения.

Результаты работы внедрены в трех ректификационных колоннах разделения этаноламинов на ОАО «Казаньоргсинтез»; В колонне разделения изопрена и изобутилена на ПАО «Нижнекамскнефтехим»; в комбинированных сепараторах – маслоуловителях аэрозолей на линии товарного этилена в холодильных циклах на ПАО «Казаньоргсинтез», газосепаратор на предприятии ГАЗПРОМпереработка в местах добычи природного газа.

Разработанные автором диссертационной работы 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 «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 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

Гидравлические и термодинамические характеристики двухфазной среды достоверно измерены и термодинамически проанализированы на экспериментальных установках благодаря использованию сертифицированных и поверенных средств контрольно-измерительных приборов.

Важным подтверждением достоверности выполненных научных исследований и технических разработок является успешное внедрение в аппаратах химической технологии на ряде промышленных предприятий.

Апробация работы

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. Получены патенты и программы для ЭВМ, опубликовано 8 монографий.

Общая характеристика работы

Введение диссертационной работы содержит обоснования актуальности выбранной тематики, чётко сформулированные цель и задачи, характеристику научной новизны проводимого исследования, оценку теоретической и практической значимости, а также подробное описание

применённых методов исследования, доказательства надёжности полученных результатов и личного вклада автора.

Первая глава посвящена математическому моделированию процессов промышленных аппаратов тепломассообмена и явления переноса в двухфазных средах играет важную роль в современных теоретических и прикладных исследованиях, а также служит основой для модернизации и оптимизации оборудования. В главе рассмотрены фундаментальные законы и их частные формы математического описания тепломассообменных процессов и явлений сепарации аэрозолей на различных конструкциях контактных устройств, предназначенных для повышения производительности и энергоэффективности промышленных аппаратов. Приводятся системы дифференциальных уравнений в частных производных, характеризующие гидродинамическую структуру газовых и жидкостных потоков, а также приводится рассмотрение особенностей взаимодействий газожидкостных сред в пленочных, насадочных и барботажных аппаратах.

При построении математических моделей особое внимание уделяется процессу передачи теплоты и вещества через границу раздела фаз, который описывается с помощью граничных условий четвертого рода или введением локальных источников межфазного переноса. Такие источники определяются соответствующими коэффициентами тепло- и массопередачи, а также зависимостью от соответствующих движущих сил процесса. Кроме того, данная глава представляет собой разработку и обсуждение математических моделей для расчета турбулентной вязкости и коэффициента обратного перемешивания в барботажных аппаратах с различной высотой двухфазного слоя. Результаты расчетов по полученным выражениям сравниваются с доступными экспериментальными данными, представленными в литературе различными авторами. Таким образом, эта глава закладывает основу для последующего математического моделирования анализа механизмов тепломассообмена и перспективных направлений повышения эффективности производств за счет модернизации аппаратов.

Вторая глава. В результате проведенных теоретических исследований процессов переноса импульса в одно- и двухфазных средах, а также выполненного анализа безразмерных параметров трения было достигнуто хорошее согласие рассчитанных значений коэффициентов трения с имеющимися экспериментальными данными для различных типов обтекаемых поверхностей в одно и двухфазных средах.

Особенное внимание уделено применению критерия Рейнольдса, основанному на динамической скорости, при расчете пленочных аппаратов и колонн с нерегулярными насадками. Этот подход обеспечивает адекватное моделирование процессов теплоотдачи и массоотдачи, позволяя перейти к определению критериев Нуссельта и Шервуда, характеризующих интенсивность тепломассообменных процессов в насадочных колоннах. Ключевой исходной величиной для такого расчета выступает перепад давления газа в насадочном слое, что дополнительно повышает точность оценок эффективности теплообменных и массообменных процессов.

В третьей главе на основании модификации метода гидродинамической аналогии были получены формулы для расчета усредненных коэффициентов тепло- и массоотдачи в одно- и двухфазных средах. Основным источником эмпирических данных послужил коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый опытным путем. Приведены конкретные примеры расчетов и сопоставлений с опубликованными результатами различных исследователей для разных типов аппаратов: насадочных колонн, пленочных контактных устройств для осевого и закрученного движения потока, барботажных тарелок с учетом неравномерности распределения фаз. Выражения, полученные для оценки коэффициентов тепло- и массоотдачи, применяются в дальнейших главах диссертации для количественного анализа эффективности различных аппаратов при их модернизации.

В четвертой главе автор представляет результаты экспериментальных исследований, проведенных на трех различных установках колонного типа диаметром 100, 200, 600 мм. Эксперименты были направлены на изучение

гидравлических и массообменных характеристик регулярных, хаотичных и комбинированных насадок, используемых в колонных аппаратах. В ходе исследований протестированы как стандартные, широко известные насадки, так и инновационные конструкции, разработанные автором в рамках данной диссертационной работы. Детальное описание экспериментальных установок, методик проведения опытов и полученных данных позволяет оценить эффективность и поведение разных типов насадок в различных условиях, что является важным для оптимизации процессов разделения веществ. Получены обобщающие зависимости для расчета гидравлического сопротивления насадок и объемных коэффициентов массоотдачи, а при ректификации получены значения ВЭТТ.

В пятой главе рассматриваются математические модели, предназначенные для анализа и инженерного расчета процессов абсорбции и десорбции газов в насадочных и барботажных аппаратах. Основное внимание уделено процессам массообмена, исследованным с использованием численных и приближенных методов моделирования. Представлены численные и приближенные математические модели, описывающие процессы массообмена в указанных аппаратах. Эти модели показали хорошее согласование с экспериментальными данными, подтвержденными рядом испытаний. Установлено, что упрощенные математические модели, основанные на ячейковой структуре потоков, позволяют получать достаточно точные результаты для практических расчётов. В таких моделях учитываются особенности строения контактирующих элементов (например, регулярная или хаотичная структура насадки), а также влияние факторов интенсификации массообмена. Выполнены расчёты эффективности восьми различных типов насадок, среди которых регулярные и хаотичные используемые в модернизированных абсорберах и декарбонизаторах. Исследованы показатели массообменной эффективности и энергопотребления на стадии удаления CO_2 из воды воздухом.

Наиболее эффективными оказались сегментно-регулярная насадка и разработанная в рамках диссертации рулонная гофрированная насадка с шероховатой поверхностью. Эти типы насадок демонстрируют лучшие характеристики по сравнению с традиционными конструкциями.

Также приведены результаты расчёта декарбонизатора с ситчатыми и клапанными тарелками, а также модернизированного термического деаэратора с барботажным баком-аккумулятором. Было отмечено, что клапанные тарелки обладают повышенным гидравлическим сопротивлением, несмотря на схожую эффективность с используемыми насадками.

Модернизация барботажного бака-аккумулятора в термическом деаэраторе привела к увеличению эффективности удаления растворённого кислорода из воды приблизительно на 20%, что свидетельствует о существенном улучшении рабочих характеристик аппарата.

Таким образом, представленные в главе результаты подтверждают возможность применения разработанных математических моделей и конструкций контактных устройств для проектирования и совершенствования аппаратов, обеспечивающих высокую эффективность массообменных процессов в промышленных аппаратах.

В шестой главе рассмотрены процессы тепло- и массообмена в пленочных градирнях. С использованием численных методов решения системы дифференциальных уравнений тепломассообмена продемонстрировано влияние изменения профиля скорости воздушного потока на входе градирни на эффективность охлаждения воды. Предложены научно-технические решения для устранения возникающей неравномерности и увеличения эффективности тепломассообменных процессов. Наряду с численными методами показаны приближенные подходы, основанные на математическом описании структуры потоков, учитывающем обратное перемешивание воды и воздуха, наличие застойных зон, рециркуляцию и байпасирование. В качестве интегрального показателя структуры потоков используется коэффициент обратного перемешивания,

записанный в безразмерной форме числом Пекле. Экспериментальные значения числа Пекле определяются индивидуально для каждого конкретного типа аппарата. Значение величины числа Пекле позволяет применять диффузионные или ячеечные модели структуры потоков с учётом источников массы и теплоты, выражаемых обычно в виде числа единиц переноса. В данном исследовании рассмотрен модифицированный метод расчёта единиц переноса, который можно интерпретировать как упрощённое решение диффузионной модели с учётом перемешивания в обеих фазах. В результате проведённой идентификационной работы предложено выражение для единицы переноса, косвенно учитывающее структуру потоков, где необходимые параметры найдены автором путём экспериментального исследования макета градирни с трубчатой насадкой, оснащённой шероховатой поверхностью. Предложенный подход позволяет рассчитывать эффективность теплообмена в газовой фазе, а с помощью теплового баланса – и в жидкой фазе, что даёт возможность определить конечную температуру охлаждённой воды и решать задачи проектирования или модернизации градирни. Разработанный метод оценки энергоэффективности пленочных градирен помогает устанавливать эффективные режимные и конструктивные параметры градирен. Подтверждено преимущество мини градирен с современной насадкой перед традиционными крупногабаритными. Полученные в данной главе математические модели и расчётные алгоритмы рекомендуются для применения при проектировании новых блоков орошения с насадками либо модернизации действующих установок.

Таким образом, разработанные в данной работе математические модели тепломассообменных процессов в градирнях и соответствующие алгоритмы расчёта позволяют эффективно подбирать рабочие и конструктивные параметры пленочных контактных устройств с использованием результатов гидравлических исследований на макете градирни.

В седьмой главе проведено численное решение системы дифференциальных уравнений для научно-технической оценки эффективности насадочных скрубберов, применяемых для конденсационного охлаждения и очистки газов от дисперсной фазы в условиях стационарного пленочного течения жидкости по поверхностям регулярных и хаотичных контактных устройств. Система дифференциальных уравнений с частными производными описывает совместный перенос теплоты, влаги и дисперсной фазы внутри слоя насадки. Процессы тепло- и массообмена, а также перенос дисперсных частиц между газом и жидкостью учтены посредством объемных источниковых членов, осредненных по локальным областям слоя. Представлены аналитические выражения для определения параметров этих источников.

По результатам численного интегрирования приведён анализ полей температуры и влажности, полученный при сравнении с существующими экспериментальными данными. Выявлена зависимость эффективности очистки газов от тонкодисперсных примесей от скорости газового потока и степени неравномерности его распределения в слое насадки. Приведены сравнительные характеристики различных типов насадок и реализованные научно-технические решения по созданию эффективных конструкций скрубберов и газосепараторов, нашедших применение в промышленности.

Для расчета тепломассообменных процессов на барботажных тарелках использованы приближённые методы и численные исследования. Поскольку площадь межфазной поверхности барботажного слоя зависит от процесса диспергирования газа в жидкость и зачастую неизвестна заранее, для инженерных расчетов предпочтительнее использование приближённых подходов с осредненными характеристиками тепло-и массообмена.

На основе одного из таких методов в данной главе предложен алгоритм расчета гидравлических и тепломассообменных характеристик турбулентного барботажного слоя на примерах ситчатых, колпачковых, клапанных и струйных тарелок. Ключевыми параметрами предлагаемого

алгоритма служат тепловые и массообменные числа единиц переноса, которые при предположении об идеальном вытеснении газа позволяют оценить эффективность протекающих процессов и вычислить необходимые термодинамические параметры охлажденного газа и охлаждающей жидкости. Данный алгоритм может успешно использоваться в инженерных расчетах барботажных (пенных) аппаратов, применяемых в химической промышленности и энергетике. Для мокрой очистки и охлаждения газов эффективны скрубберы с современными металлическими регулярными и хаотичными насадками, такими как кольца «Мебиуса», «Инжехим – 2012» и сегментно-регулярная насадка «Инжехим». Хотя существует риск забивки насадок при высоких концентрациях твердых частиц, опыт эксплуатации промышленных скрубберов с комбинированным расположением регулярной и хаотичной насадок для очистки пирогаза в производстве этилена (при высокой плотности орошения) показал устойчивую работу в течение года. Модернизация аналогичных колонн на АО «Казаньоргсинтез» подтвердила эти результаты. Эффективно применение контактных устройств с высокоскоростными дисперсно-кольцевыми потоками и вихревых аппаратов для очистки природного газа, например, на установках ООО «Газпром добыча Ямбург». Тонкая пленка жидкой фазы образуется за счет сепарации капель воды и жидких углеводородов, а также масляного аэрозоля.

Математические модели и алгоритмы расчета, разработанные автором, а также технические решения, были переданы ИВЦ «Инжехим», сотрудники которого участвовали в разработке конструкторской документации и внедрении. Промышленная эксплуатация аппаратов газоочистки подтвердила правильность расчетов и научно-технических решений.

В восьмой главе показано применение разработанных математических моделей, алгоритмов, экспериментальных данных и запатентованных конструкций контактных устройств в реальных промышленных условиях нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих предприятий. Представлены конкретные примеры модернизации оборудования, включая

десорберы, мини-градирни и ректификационные колонны. Особое внимание уделено успешному внедрению разработанной автором регулярной рулонной насадки в колонну для выделения гексена-1, что является значимым достижением. Подробно описана модернизация установки разделения энанламинов, включающая четыре ректификационные колонны с различными типами насадок. Внедрение новых технических решений позволило повысить производительность, улучшить качество энанламинов до высшего сорта и существенно снизить энергопотребление.

Также рассмотрена задача и разработанные технические решения выделения бензола из стабильного конденсата с помощью спроектированных ректификационных колонн с хаотичными насадками, успешно внедренных в промышленности.

Все представленные технические решения отвечают требованиям промышленных предприятий и обеспечивают существенный экономический эффект. Подчеркивается, что результаты демонстрируют возможность импортозамещения оборудования с использованием насадок «Инжехим», одна из которых разработана и исследована автором диссертации.

Замечания

1. Математическое описание всех процессов в работе строится на разработке собственных математических моделей и их решение. Почему автор не воспользовался известными коммерческими CFD пакетами расчета с обоснованием выбора моделей взаимодействия фаз. Применение последних позволяет более четко визуализировать происходящие процессы по полям концентраций, скоростей, давления, температур и т.д. и четко определять критические зоны и параметры в аппаратах и процессах, требующие модернизации для повышения эффективности аппаратов.

2. В чем новизна большинства записанных математических моделей в главах 1 и 2, ведь они построены на известных уравнениях состояния и переноса? Как ранее рассчитывались рассматриваемые тепломассообменные аппараты и какой выигрыш в точности расчетов параметров аппаратов дали

предлагаемые автором модели? В заключении об этом не сказано, а это важно.

3. Насколько обосновано использование в моделях условия адиабатных стенок с окружающей средой?

4. В главе 4 приведены многочисленные экспериментальные данные по тепломассообменным аппаратам различных типов. Однако на графиках параметров нет сравнения с результатами расчетов по предложенным математическим моделям.

5. Учитывалось ли в моделях тепломассообмена в насадочных аппаратах размеры и формы насадок или изменение геометрии насадок учитывалось только их геометрическими параметрами и неравномерностью распределения потоков?

6. Учитывался ли в предложенных моделях тепломассообменных аппаратов брызгоунос или данный параметр был определяемым?

7. Предложенный подход оценки эффективности тепломассообменных аппаратов через гидравлические сопротивления оставляет за рамками рассмотрения физические механизмы происходящих процессов, а этим самым обоснование выбора оптимизации аппаратов, их отдельных частей – насадок, тарелок,

Заключение

Диссертационная работа Елены Анатольевны Лаптевой, «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта», является завершенной научно-квалификационной работой. В ней автор, проводя собственные исследования, совершенствовала ряд теоретических положений моделирования тепломассообмена. Эти положения касаются создания усовершенствованных математических моделей алгоритмов и методов, которые позволяют более точно рассчитывать, насколько эффективно происходит разделение смесей – как однородных (гомогенных), так и неоднородных (гетерогенных) – в модернизированных аппаратах, где газ и

жидкость контактируют друг с другом. Внедрение этих разработок вносит существенный вклад в развитие технологических процессов в таких важных отраслях российской промышленности, как нефтепереработка и нефтехимия. Диссертационная работа Лаптевой Елены Анатольевны «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. по докторской диссертации и она достойна присвоения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»



Попов Игорь
Александрович

Доктор технических наук по специальности
01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая
теплотехника»

Профессор

12.09.2025

Адрес организации: 420111 Республика Татарстан, г. Казань, г.
ул. К. Маркса, 10 +7 (843) 231-97-34 e-mail: kai@kai.ru
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля



Вход. № 05-8530
« 15 » 09 2025г.
подпись 