

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Актуальность темы диссертационной работы

В современной химической, нефтехимической и нефтегазовой промышленности ключевую роль играют аппараты, обеспечивающие эффективное разделение различных смесей – как однородных, так и неоднородных, находящихся в жидком или газообразном состоянии. К таким аппаратам относятся колонны, используемые для ректификации, абсорбции, сепарации аэрозолей, охлаждения, конденсации, испарения и очистки газов.

Особенностью этих процессов является одновременный перенос тепла, вещества и дисперсных частиц между фазами, происходящий на межфазной поверхности, площадь которой часто трудно определить. Зачастую эти процессы отличаются значительным потреблением энергии и сложностью конструкции контактных элементов. Масштабирование таких установок часто приводит к неравномерному распределению фаз, что снижает общую эффективность проводимых процессов.

Для описания процессов переноса импульса, массы и энергии в газожидкостных средах используются сложные математические модели, основанные на приближенных и численных методах решения нелинейных систем дифференциальных уравнений, учитывающих межфазный перенос.

В условиях растущих требований к качеству продукции, энергосбережению и необходимости импортозамещения, совершенствование методов математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов становится особенно актуальной. Не менее важны

и экспериментальные исследования новых конструкций контактных устройств, направленные на внедрение энергоэффективных технологий на промышленных предприятиях.

Диссертация написана при участии автора в выполнении нескольких грантов и государственных заданий, что подтверждает актуальность темы исследований.

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 аппаратурного оформления.

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

Научная новизна

В данной диссертационной работе исследуются процессы совместного переноса импульса, массы и теплоты в газожидкостных системах, протекающие в аппаратах различных типов (пленочных, вихревых, барботажных и насадочных) при турбулентном режиме движения газа. Особое внимание уделяется аппаратам с различными контактными устройствами, повышающими эффективность процессов. Разработанные автором математические модели и расчеты обладают важной особенностью: они позволяют достоверно определить, насколько эффективно работают аппараты для тепло- и массообмена и разделения аэрозолей, используя только экспериментальные данные о гидравлическом сопротивлении контактных

устройств. Это сокращает сложные и дорогостоящие эксперименты по тепло- и массообмену при проектировании или модернизации аппаратов.

Новизной является разработка диссипативных математических моделей для расчета коэффициентов тепло-и массоотдачи как в одно, так и двухфазных средах при применении контактных устройств с различными интенсификаторами. В работе используются понятия коэффициента переноса импульса (импульсоотдача), консервативности законов трения и применения числа Рейнольдса с динамической скоростью, что приводит к простым расчетным выражениям для чисел Нуссельта и Шервуда, а также коэффициентов эффективной диффузии. Особо следует отметить, что на основе применения систем дифференциальных уравнений в частных производных с межфазными источниками массы и теплоты показана возможность численного моделирования эффективности процессов в насадочных колоннах, пленочных градирнях, скрубберах охлаждения и очистки газов с учетом неоднородности распределения фаз, что дает возможность выбирать более эффективные контактные устройства при решении задач модернизации промышленных аппаратов или их проектирования при масштабном переходе.

На трех опытных установках с колоннами диаметром 100, 200 и 600 мм получены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению, предельным нагрузкам и эффективности тепломассообмена запатентованных контактных устройств с интенсификаторами (процессы ректификации, охлаждения воды воздухом, увлажнение воздуха водой). Эти результаты позволили провести анализ влияния масштаба на рабочие характеристики устройств, выявить закономерности изменения ключевых параметров в зависимости от диаметра колонны и определить требуемые режимы работы аппаратов для каждого типа процессов. Полученные данные служат надежной основой для проектирования промышленных аппаратов.

Достоверность исследований

Достоверность результатов подтверждается применением общепризнанных моделей турбулентного пограничного слоя, проверенных методик и апробированных выражений для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи. Использовались сертифицированные и поверенные средства измерения гидравлических и термодинамических характеристик двухфазных сред. Результаты расчетов по разработанным математическим моделям удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными различных авторов и подтверждаются внедрением модернизированных промышленных аппаратов.

Материалы диссертационной работы опубликованы в отечественных и международных журналах, в ряде монографий, в материалах научных конференций, то есть одобрены научным сообществом.

Теоретическая и практическая значимость

Данная работа внесла существенный вклад в науку, предложив усовершенствованные подходы к математическому моделированию сложных процессов, происходящих в системах "газ-жидкость". Особое внимание уделено совместным явлениям переноса массы, импульса и теплоты, а также поведению и осаждению дисперсной фазы (аэрозолей) в условиях турбулентности с использованием модели турбулентной миграции.

Представлены замкнутые системы уравнений, описывающие перенос различных субстанций в пленочных, насадочных и барботажных аппаратах. Эти модели учитывают важные факторы, такие как неоднородность распределения фаз и различные возмущения.

Предложенный параметрический подход к учету возмущений, основанный на гидродинамической аналогии и моделях турбулентного пограничного слоя, позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований. Расчеты теперь могут проводиться на основе данных о гидравлическом сопротивлении двухфазных сред используя

свойства консервативности математического описания турбулентного пограничного слоя.

Разработаны математические модели и алгоритмы для расчета тепло- и массообмена в различных типах аппаратов (барботажных, пленочных, насадочных) при разделении смесей в турбулентном режиме. Получены выражения для расчета эффективности аэрозольных газосепараторов, позволяющие оптимизировать их работу путем выбора режимных и конструктивных параметров с использованием энергетического коэффициента. Разработаны модели и алгоритмы для расчета пленочных градиен с новыми типами контактных устройств.

Созданы математические модели и проведены расчеты для барботажных термических деаэраторов и пленочных декарбонизаторов, оснащенных новыми импортозамещающими насадками.

Разработанные автором контактные устройства успешно внедрены в промышленных аппаратах на ряде предприятий нефтехимии и нефтепереработки, что привело к повышению эффективности процессов с повышением качества продукции и снижению энергозатрат. Результаты исследования подтверждены патентами и актами внедрения.

Данная диссертационная работа вносит ценный вклад как в теорию тепломассообменных процессов, так и в практическое применение, предлагая новые, более эффективные научно-технические решения для промышленных процессов и аппаратов в химической технологии.

Общая характеристика диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность исследования, определены цель и задачи, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Описаны методы, использованные в ходе исследований, и подтверждена их достоверность. Подчеркнуто личное участие автора в написании диссертации, экспериментальных исследованиях, математическом моделировании и внедрении модернизированных аппаратов.

Первая глава посвящена разработке математических моделей, описывающих процессы переноса в двухфазных средах, играет ключевую роль, как в фундаментальной науке, так и в практических приложениях, включая совершенствование промышленного оборудования. В рамках данной работы, посвященной моделированию тепломассообмена и сепарации аэрозолей, автор углубляется в теоретические аспекты и концепцию описания явлений переноса в двухфазных средах. Для этого используются системы дифференциальных уравнений в частных производных, а также гидродинамические модели, описывающие структуру потоков. Рассматриваются конкретные сценарии взаимодействия газовой (паровой) и жидкой фаз в различных типах аппаратов: пленочных, насадочных и барботажных. В этих моделях перенос тепла, массы веществ и тонкодисперсной фазы через границу раздела фаз может учитываться с помощью граничных условий четвертого рода или локальных источников межфазного переноса. Эти источники напрямую связаны с коэффициентами тепло- и массопередачи и движущими силами соответствующих процессов.

Такие модели позволяют рассчитывать средние числа Нуссельта и Шервуда для аппаратов различных конструкций, оснащенных как поверхностными, так и объемными интенсификаторами в газожидкостных средах. В данной главе представлены математические модели и расчетные формулы для определения турбулентной вязкости и коэффициента обратного перемешивания в барботажных аппаратах с высокими и тонкими газожидкостными слоями. Приводятся результаты расчетов этих коэффициентов и их сопоставление с экспериментальными данными.

Во второй главе рассмотрен теоретический анализа движения жидкостей и газов, а также их смесей. Были проведены расчеты безразмерных характеристик трения. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными для различных типов поверхностей. Исследование показало, что использование числа Рейнольдса, записанного через динамическую скорость, эффективно при анализе работы аппаратов с

пленочным течением и тех, что оснащены насадками сложной формы. Этот подход открывает путь к определению чисел Нуссельта и Шервуда, которые являются ключевыми для описания процессов тепло- и массообмена в насадочных колоннах. Для успешного применения данного метода важным является знание величины перепада давления газа в слое насадки.

В третьей главе опираясь на принципы гидродинамической аналогии и ее развития для градиентных течений, выведены формулы для определения показателей тепло- и массообмена как в одно-, так и в двухфазных потоках. Необходимым эмпирическим параметром, использованным для расчетов, является коэффициент гидравлического сопротивления. Показана применимость полученных зависимостей на конкретных примерах. Сравниваются результаты расчетов с экспериментальными данными, полученными различными исследователями. Эти сравнения охватывают широкий спектр аппаратов: от каналов с поверхностными элементами, повышающими теплообмен, до массообменных насадочных колонн и пленочных аппаратов, работающих как с осевыми, так и с вихревыми потоками. Особое внимание было уделено барботажным тарелкам, где учитывалась неравномерность распределения фаз.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные, полученные автором на трех установках с колоннами диаметром 100, 200 и 600 мм. Исследовались регулярные, хаотичные и комбинированные насадки, как известные, так и разработанные автором. Были проанализированы гидродинамические характеристики потоков, теплообмен и массоперенос в зависимости от геометрических параметров насадок и режимов течения. Эксперименты обобщены в виде степенных выражений. Полученные результаты сравниваются с литературными данными и результатами, полученными для ранее разработанных типов насадок. Анализ этих данных выявил закономерности влияния структуры насадок на протекающие в них процессы.

В пятой главе исследованы процессы поглощения и выделения газов жидкой фазой в различных типах оборудования - насадочных и барботажных. Для этого разработаны упрощенные математические модели, описывающие перенос массы и эффективность процессов. Дано сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Важным условием в этих моделях является учет структуры потоков на контактных устройствах, а также использование полученных автором коэффициентов массоотдачи, которые учитывают особенности межфазного переноса. Проведены расчеты для восьми различных типов насадок – как упорядоченных, так и хаотичных – в усовершенствованных абсорберах и установках для удаления диоксида углерода из воды. Наилучшие показатели продемонстрировали регулярная насадка с сегментной структурой и новая, разработанная автором рулонная гофрированная насадка с шероховатой поверхностью. В работе определена эффективность декарбонизаторов с ситчатами и клапанными тарелками, а также модернизированного термического деаэратора, оснащенного барботажным баком-аккумулятором. Установлено, что клапанные тарелки, хотя и сравнимы по эффективности с насадочными устройствами, однако они создают большее сопротивление потоку. Модернизация барботажного бака-аккумулятора в термическом деаэраторе позволила заметно повысить эффективность удаления растворенного кислорода из воды.

В шестой главе на основе разработанной математической модели исследуются факторы, влияющие на эффективность охлаждения воды в промышленных градирнях. Обычно оценка этого влияния носит приближенный характер из-за сложности течения фаз, из-за разнообразия конструкций и использования специальных элементов, улучшающих тепломассообмен.

Для более точного описания процесса применен численный метод, позволяющий анализировать влияние неравномерного распределения воздушного потока на входе в градирню на общую эффективность охлаждения воды. Рассмотрены практические решения для устранения этой

неравномерности и повышения тепломасообменной эффективности. Наряду с численными методами, в работе используются математические модели, учитывающие гидродинамические особенности движения сред внутри аппарата, такие как обратное перемешивание, застойные зоны и байпасные потоки. Для количественной оценки этих явлений применено модифицированное число Пекле, которое определяется экспериментально для каждого аппарата. Зная число Пекле, можно применять диффузионные или ячеечные модели, которые используют безразмерные числа единиц переноса. Представленный в главе модифицированный метод числа единиц переноса является упрощенным вариантом диффузионной модели, который учитывает перемешивание в обеих фазах. В результате удалось получить явные выражения для чисел единиц переноса, косвенно отражающие структуру потоков. Параметры для этих выражений были определены на основе экспериментальных исследований, проведенных автором на макете градирни с трубчатой насадкой. Идентификация параметров позволила рассчитать тепловую эффективность в воздушной фазе, а затем, используя тепловой баланс, определить эффективность градирни по охлаждению воды. Это дает возможность определить конечную температуру охлаждаемой воды и решать задачи проектирования или модернизации градирен. Разработанный подход к оценке энергоэффективности пленочных градирен позволяет определить рациональные рабочие параметры. Особо отмечается преимущество компактных градирен с современными насадками. Полученные математические модели и алгоритмы расчетов рекомендованы для использования при создании новых или усовершенствовании существующих пленочных блоков оросителей градирни.

В седьмой главе представлены математическая модель и результаты численного моделирования работы насадочных скрубберов, предназначенных для охлаждения газов и одновременной очистки их от твердых тонкодисперсных частиц. Исследована эффективность различных типов насадочных контактных устройств – как упорядоченных, так и хаотичных –

при стационарном пленочном течении жидкости в противотоке с газом. Для описания процессов были составлены дифференциальные уравнения с частными производными, учитывающие совместный перенос теплоты, водяного пара и дисперсной фазы в слое насадки. Тепло- и массообмен, а также перемещение частиц между газовой и жидкой фазами моделировались с помощью объемных источников. Приведены формулы для расчета параметров этих источников. Установлено, что эффективность очистки газов от мелкодисперсной фазы зависит от скорости потока газа и равномерности его распределения в слое насадки. Представлены сравнительные характеристики различных типов насадок и предложены конструктивные решения для скрубберов и газосепараторов, которые успешно внедрены в промышленности. При расчёте барботажных тарелок, где часто используются приближенные методы и численные исследования, отмечается, что из-за сложности определения межфазной поверхности, образующейся при диспергировании газа, предпочтение отдается приближенным подходам. На основе одного из таких методов разработан алгоритм для расчета гидравлических и тепломассообменных характеристик турбулентного барботажного слоя для ситчатых, колпачковых, клапанных, струйных тарелок. Ключевыми параметрами этого алгоритма являются числа единиц переноса теплоты и массы, которые, при условии идеального вытеснения газа, позволяют определить эффективность процессов и необходимые термодинамические параметры охлаждаемого газа и охлаждающей жидкости. Анализ результатов расчетов и опыт внедрения аппаратов для газоочистки и охлаждения газов в промышленности позволяет сделать следующие выводы и рекомендации: для процессов мокрой очистки и охлаждения газов наиболее эффективными являются скрубберы с современными металлическими насадками, как регулярными, так и хаотичными. Примерами таких насадок являются кольца «Мебиуса» и «Инжехим – 2012» (хаотичные), а также сегментно-регулярная «Инжехим». Существует риск налипания частиц и засорения насадки при высоких концентрациях твердой дисперсной фазы.

Опыт эксплуатации промышленных скрубберов, использующих комбинацию регулярной насадки в нижней части и хаотичной в верхней для очистки пирогаза от кокса и смол в производстве этилена при высоких расходах воды ($50-80 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), показывает устойчивую работу в течение года до планового технического обслуживания. Модернизация трех аналогичных установок на АО «Казаньоргсинтез» подтвердила эти результаты. Применение контактных устройств, создающих высокоскоростные дисперсно-кольцевые потоки и вихревые структуры, было успешно апробировано автором на установках очистки природного газа ООО «Газпром добыча Ямбург». В этих случаях тонкая восходящая пленка жидкости формируется за счет сепарации капель воды и жидких углеводородов, а также может включать масляный аэрозоль, попадающий в газ в небольших количествах. Важно отметить, что разработанные в рамках данной главы математические модели и алгоритмы расчета были переданы сотрудникам ИВЦ «Инжехим» для использования при выборе технических решений. Автор диссертационной работы принимала участие в расчетах эффективности промышленных аппаратов, а также в разработке конструкторской и технической документации.

В восьмой главе представлены запатентованные автором конструкции контактных устройств и аппаратов, успешно применяемые на практике в нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности. Описаны модернизированные конструкции десорберов, компактных градилен и ректификационной колонны для выделения гексена-1 из гексеновой фракции с помощью разработанной автором регулярной рулонной насадки внедренной на промышленном предприятии.

Кроме того, описаны научно-технические решения, внедренные в производство, которые позволили усовершенствовать установку разделения этаноламинов методом ректификации. Модернизация включала использование как хаотичных, так и регулярных насадок в четырех колоннах. В результате повысилась производительность установки, повышено качество этаноламинов и существенно сокращено энергопотребление на единицу

продукции. Также решена важная научно-техническая задача по выделению бензола из стабильного конденсата (бензиновой фракции). Для этого были спроектированы и внедрены в промышленность две ректификационные колонны с хаотичными насадками.

Все предложенные и реализованные научно-технические решения обеспечивали значительный экономический эффект.

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

По работе есть замечания и вопросы.

1. В каких случаях при расчёте тепло-массообменных аппаратов используются граничные условия 4 рода, а в каких межфазные источники?
2. Как оценивалась погрешность экспериментальных результатов? Какова погрешность приборов на экспериментальной установке?
3. При каких скоростях газа при фиксированной плотности орошения наступает захлебывание колонны с насадками: трубчатыми, гофрированными и рулонными?
4. Учитывается ли в системе газ-жидкость межфазная турбулентность и наличие ПАВ?
5. Какие конструктивные особенности рулонной гофрированной насадки, разработанной автором, обеспечивает повышение эффективности массопередачи в колонных промышленных аппаратах?
6. Каким образом экспериментально можно найти коэффициенты обратного перемешивания в газовой и жидкой фазах, которые используются в диффузионных и ячеечных моделях?
7. Необходимо отметить, что в формулах для эффективности E_{Γ} и $E_{\text{ж}}$ фигурируют средние значения концентраций газа и жидкости на выходе соответствующих фаз, так как в общем случае эти концентрации даже на выходе могут зависеть от поперечных координат.

8. Наряду с удельным расходом жидкости в плёнке $q_{\text{ж}}$ желательно бы указывать соответствующие значения числа Рейнольдса, так как от величины последнего зависит режим стекания плёнки по насадке.

Несмотря на то, что стиль изложения материала оставляет хорошее впечатление, однако имеются небольшие замечания и к оформлению:

а) пропущен рис.5.11; б) в ряде случаев отсутствуют ссылки на оригинальные работы других авторов (например, на Рис.3.17-3.19 нет ссылок на работы Николаева Н.А. и Харина В.Д.; на стр.234 отсутствует ссылка на работу Буссинеска-Хигби и т.д.); в) по всему тексту часто встречается слитные написания слов, есть опечатки.

Заключение

Диссертационная работа Елены Анатольевны Лаптевой «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта», является завершённой научно-квалификационной работой. В ней автор, проведя экспериментальные и теоретические исследования, разработала ряд математических моделей для расчёта ректификации, абсорбции, десорбции, охлаждения воды в градирнях, очистки и охлаждения газов в скрубберах. На основе математических моделей созданы алгоритмы и методы, которые позволяют достоверно рассчитывать эффективность упомянутых выше процессов. Внедрение этих разработок вносит существенный вклад в развитие технологических процессов в таких важных отраслях российской промышленности, как нефтепереработка и нефтехимия. Полученные результаты можно квалифицировать как научное достижение в области процессов и аппаратов химической технологии. Диссертационная работа Лаптевой Е.А. «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта» по своей

актуальности, научной новизне, практической значимости, обоснованности решений соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Елена Анатольевна Лаптева достойна присвоения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник группы
математического моделирования
физико-химических процессов
Федерального исследовательского
центра проблем химической физики и
медицинской химии Российской
академии наук,
доктор физико-математических наук
по специальности 05.17.08. Процессы
и аппараты химических технологий

Бабак Владислав Николаевич

Бабак

17.09.2025

Адрес организации: 142432 Московская область г. Черноголовка, проспект академика Семенова, 1, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук
Телефон +7 496 522-44-74
Электронная почта: director@icp.ac.ru

Подпись Бабака В.Н. удостоверяю.

Учёный секретарь ФГБУН
Федерального исследовательского
центра проблем химической физики и
медицинской химии РАН.
Доктор химических наук
Психа Борис Львович



Вход. № 05-2558
« 24 » 09 2025 г.
подпись *Рлс*