

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Лаптевой Елены Анатольевны “Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта”, выполненную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

На отзыв представлена диссертационная работа, содержащая 520 листов машинописного текста формата А4 и ее автореферат на 34 листах формата А5. Форма изложения материала почти традиционная и включает введение, 8 глав, списки литературы и обозначений, а также 5 приложений с актами и справками о применении научных результатов, схемами новых аппаратов, патентами и свидетельствами программ ЭВМ, а также аннотациями монографий.

Для оценки **актуальности работы** проанализированы введение и главы диссертаций, характеризующие субъективный взгляд автора на эту квалифицированную характеристику научного исследования и ее доказательную базу с опорой на современные литературные источники информации. Всего их в библиографическом списке 286, а исключая 86 ссылок на собственные работы и работы в соавторстве на такие ссылки, 200. Из них ссылок на иностранных авторов 33, а современных 22 (т.е. опубликованных в ХХІ веке). Маловато для докторской диссертации. Из оставшихся 167 отечественных источников информации и отечественных авторов около 100 современных. Широкий географический спектр изданий: Нью-Йорк, Лейпциг, Вильнюс, Москва, Санкт Петербург, Казань, Иваново, Уфа, Новосибирск, Астрахань, Волгоград и др. с хронологией от 1952 г. до 2024г.

Хочу особо отметить, что работы Казанской школы химиков-процессников мне хорошо известны, начиная с 70 годов прошлого века, когда был сначала аспирантом у профессора Тябина Н.В., выпускника Казанского химико-технологического института, а затем выполнял под его руководством докторскую диссертацию. Постоянно сам ссылаюсь на монографии, статьи и патенты в своих публикациях, в том числе на Лаптеву Е.А. Здесь как оппонент должен отметить особенность ее докторской диссертации. Обычно традиционно литературный и патентный обзор проводится в первой главе или первых двух главах. Здесь соискатель такой информацией предваряет каждую главу, убедительно доказывая актуальность обозначенных в названиях глав материалов научных исследований. Не случайно большие по числу листов главы 1, 2, 5, 6, 8 предваряются введением, а все главы заканчиваются конкретными выводами. **Объективно актуальность** доказывается ее выполнением в рамках госзаказа, грантов Президента Российской Федерации и Академии наук республики Татарстан и государственного задания в сфере научной деятельности и судя по хронологии этих исследований материалы, включённые в диссертацию,

как теоретические, так и экспериментальные, а также опытно-промышленные (13 справок) занимали по времени более 10 лет.

Автор обозначает **цель работы** как комплексное повышение эффективности многообразных сепарационных и тепломассообменных процессов в модернизированных по конструктивному исполнению аппаратах с гомогенными и гетерогенными потоками.

Действительно, переход от бескомпьютерной эры расчётов, основанной на теориях размерности и подобия, на эру компьютерного моделирования и цифровизации всех источников восприятия, переработки и передачи информации, особенно в научной сфере требует новых методов развития физического и математического моделирования.

Конкретно поставленной цели обозначены сложные для решения **8 задач исследований**. Здесь и совместные решения системы дифференциальных уравнений переноса импульса, массы, теплоты тонкодисперсных фаз, особенно в вихревых контактных устройствах с интенсификаторами, и математические модели и алгоритмы расчётов тепломассообмена и сепарации тонкодисперсной фазы (менее 20 мкм) в барботажном слое скрубберов, и абсорбция-десорбция газов при плёночном течении в каналах с интенсификаторами и насадками (как хаотичными так и упорядоченными), также в турбулентном барботажном слое при ректификации с учётом неравномерности распределения фаз по сечению и высоте колонны, и физическое и математическое моделирование охлаждения воды и газов в плёночных скрубберах и градирнях. Достоинством работы в постановке и решения научных задач высокого уровня является подкрепление всех теоретических исследований на пилотных и опытно-промышленных установках и внедрение результатов в более чем в десятке научно-исследовательских организациях, на промышленных предприятиях и в учебном процессе технических ВУЗов.

Объект и предмет исследований записаны лаконично и конкретно и хорошо коррелируются с названием самой диссертации.

Особенности научного подхода автора заключаются в отдельной записи систем дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для ядра потока с межфазными граничными условиями, а учет возмущений (вихреобразования, турбулизации) в пограничных зонах учитывается с использованием гидродинамической аналогии.

Оригинально и вполне квалифицированно для докторской диссертации представлена ее **научная новизна**. Но сначала желательно было сказать о новизне в описании физических процессов гидродинамики гомогенных и гетерогенных систем, а затем их математических моделей - параметров систем дифференциальных уравнений совместного переноса импульса, массы и тепловой энергии при турбулентном течении в плёночных, вихревых, барботажных и насадочных аппаратах.

Представляет интерес идея замены интенсифицированной поверхности тепломассообмена на условную эффективную плоскую поверхность (аналог замены длины реального трубопровода с местными сопротивлениями на приведённую длину, замещающую каждое местное сопротивление).

Нельзя не отметить и решения проблемы масштабирования на трех опытных установках с диаметрами 100, 200 и 600 мм, полученных критериальных уравнений для Нуссельта и Шервуда на различных контактных устройствах в ламинарном и турбулентном течениях.

Весьма важны результаты исследований для определения коэффициента обратного (продольного перемешивания) для сплошной фазы в барботажном слое. Это важно для моделирования тепло и массообменных процессов с учётом числа Пекле продольной диффузии в ректификации, адсорбции, абсорбции, экстракции, сушки и др.

Большое уважение вызывает в научной новизне постановка и решение задачи для плёночных блоков оросителей градилен и скрубберов для охлаждения газов. Очень редко кто решает задачу с двухмерной системой дифференциальных уравнений в частных производных. А как показывают многие авторы, в том числе и мы в лабораторных исследованиях на кафедре профили скорости воздуха действительно являются функциями и радиуса, и высоты. Да и по угловой координате φ и на входе, и в самом слое внутри аппарата скорость значительно меняется.

Нужно отметить и вывод о возможности количественной оценки эффективности процессов тепло- и массопередачи по результатам гидродинамических испытаний контактных устройств в плёночных, насадочных и барботажных аппаратах без идентификации параметров тепло- и массообмена.

Раздел **теоретической и практической части работы** записан в общем виде.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химической технологии по трем указанным пунктам (п.п.2,4,9). Это хорошо видно из самого названия диссертации, монографий, статей, патентов, тезисов, актов использования.

Апробация материалов, изложенных в диссертации, вполне соответствует докторскому уровню по количеству и рангу журналов: 30 статей из перечня ВАК, 37 в изданиях баз SKOPUS и WOS, 3 патента и 2 программы для ЭВМ, а также опубликованию 8 монографий. Кроме того, более десятка весомых международных и всероссийских конференций и семинаров с изданием тезисов докладов в Лондоне, Санкт-Петербурге, Казани, Тюмени, Воронеже, Иванове.

Ниже проводится краткий критический анализ по главам диссертации.

Во введении первой главы приводится небольшой литературный обзор по математическому моделированию и интенсификация совместных тепло- и массообменных процессов и сепарации гомо- и гетерофазных систем. Берётся в основу экспериментальная информация о гидравлическом сопротивлении. На него влияет неоднородность профиля скоростей фаз, особенно при масштабных переходах от модельных лабораторных аппаратов к промышленным объектам.

Проводится учет молекулярной и турбулентной диффузии и теплопроводности для сплошной фазы и для дисперсной фазы в уравнениях плотности потока (1.16-1.18). Для описания гидродинамической структуры

потоков выбрана ячеечная модель. Потоки проиллюстрированы на рис. 1.1., а схема насадочного аппарата на рис. 1.2.

В частных производных по радиусу и высоте записаны уравнения конвективного теплообмена в газовой и жидкой фазах, перенос влаги в газовой фазе и перенос тонкодисперсных капель (1.2.1 - 1.2.4). Вполне корректно сделаны допущения в разделе 1.3.2., где рассматривается возможность применения более сложной (чем ячеечная) диффузионной модели с дифференциальными уравнениями II порядка (1.3.5 - 1.3.7) и специальными граничными условиями Данкверста. Переход к математической модели разделения многокомпонентных систем (МКС) приводит к матричной записи объемных коэффициентов массопередачи (1.3.11-1.3.13). Переход к математическому моделированию тепло- и массообмена и сепарации дисперсной фазы в тарельчатых колоннах рассмотрен в разделе 1.4 с рис. 1.3 для колонны с провальными и ситчатыми тарелками, рис. 1.4 с барботажным пенным слоем. Тепло- и массообмен по газовой, жидкой и дисперсной фазам описывается дифференциальными уравнениями II порядка в частных производных по радиусу и высоте (1.4.1 - 1.4.5).

Модель турбулентной вязкости в барботажном высоком слое рассмотрена в разделе 1.7. Важно отметить совпадение результатов расчётов числа Re по формуле (1.7.5) автора диссертации и формулы Като-Нишиваки (1.7.7, рис.1.13). А почему такое рассогласование при расчёте $Re=f(Fr)$ на рис.1.12, когда $Fr > 10^{-2}$?

Таблица новых формул для расчетов коэффициентов турбулентной вязкости и числа Пекле для перемешивания приведена на стр. 69.

Вторая глава также начинается с краткого введения и обозначения проблемы, связанной с диссипацией энергии и трением в аппаратах с турбулизаторами для одно и двухфазных сред. Рассмотрены различные математические модели для описания импульса в пограничном слое, в том числе трехслойная модель пограничного слоя в пластине, в гладкой трубе (рис.2.1) и турбулизаторами (раздел 2.5). Показана адекватность диссипативной модели трения в капле с гладкими трубами и графиками Никурадзе (рис.2.2).

Отдельно в разделе 2.6 рассмотрено трение в сухих нерегулярных (хаотичных) насадках с анализом известных формул и примерами расчётов, а также трение при противоточном движении газа с плёнкой жидкой фазы (раздел 2.7 и 2.8). В разделе (2.9) рассмотрена упрощённая модель трения в барботажном смесителе (рис.2.9). Отдельно выделен материал, связанный с уравнениями для коэффициентов переноса импульса (стр.100). Здесь же в конце второй главы приведены 9 основных формул, выведенных автором, связанных с диссипацией энергии, динамической скоростью, безразмерными параметрами трения в гладких насадках и в каналах с интенсификаторами, с насадочным слоем (сухим и пограничной жидкой фазой), а также в барботажном слое.

В третьей главе автор диссертации оценивает эффект тепло- и массообменных переносов, опираясь на их гидравлическое сопротивление в

контактных устройствах, условно используя модельный подход представления поверхности с интенсификаторами. Здесь собственные математически выкладки, как и в предыдущих главах работы, предваряет литературный обзор, в котором сравниваются критериальные зависимости Nu и Sh и объясняется разброс в показателях степени критериальных уравнений формованием и разрушением вязкого пограничного подслоя. Анализируются разные виды интенсификаторов (кольцевые накатки в трубе, трубы с сферическими выступами (рис.3.1 - 3.5) и их геометрические размеры (шаг, высота, форма). Раздел 3.5 посвящён тепло- и массоотдаче в насадочных аппаратах для однофазных потоков и в орошённых насадках. Показана возможность повышения коэффициента теплоотдачи на порядок за счёт турбулизации потока насадочными телами (стр. 115, рис. 3.5 - 3.8).

Такой же эффект турбулизации потока проявляется и для массоотдачи (табл. 3.1) в газовой фазе, теоретические результаты подкреплены примером расчёта и графиками (рис. 3.9. - 3.10). Здесь же описан и алгоритм расчёта. Дано объяснение результатов с использованием модифицированной гидродинамической аналогии (раздел 3.3). Модификация связана с учетом градиента давления. Видна хорошая математическая эрудиция автора в выводе формул (3.3.1.-3.3.11). То же можно сказать о формулах массоотдачи в орошаемых каналах (раздел 3.3.2., рис 3.11 и 3.12); в осевых и закрученных потоках газа с плёночным течением жидкости (3.4.1. - 3.4.5, рис. 3.13 и 3.14) и массоотдача в турбулентной плёнке жидкости (3.4.8 - 3.4.13, рис.3.16 - 3.19). Сделана удачная попытка оценки эффекта масштабирования для барботажных колонн (раздел 3.5) при неравномерном распределении фаз по сечению и высоте на каждой тарелке (рис. 3.20 и 3.21).

Мы привыкли использовать ячеечную модель структуры потока по высоте аппарата. Здесь автор применяет эту модель по ширине рабочей зоны тарелки. Здесь также связывается число ячеек с гидравлическим сопротивлением и соответственно выводятся коэффициенты массоотдачи для газовой (паровой) и жидкой фазами (3.5.8 - 3.5.10, рис. 3.22) и эффективности массообмена (рис. 3.24 - 3.26) для ситчатой и клапанной тарелок. Девять новых формул, выведенных автором для коэффициентов массоотдачи и чисел Нуссельта и Шервуда, представлены в таблице на стр. 155.

Теоретические выкладки полученных результатов подкреплены материалами экспериментов по связи гидравлических и массообменных характеристик.

Проверка проводилась на регулярной насадке из полиэтиленовых труб с гладкой и регулярной шероховатостью в виде прямоугольных кольцевых выступов (рис. 4.1.- 4.3). Варьировались перепад давления, расходы газа и воды, влагосодержание газа на входе и выходе в параллельных опытах. Результаты сравнивались с типовой керамической насадкой - кольцами Рашига.

Да, гидравлическое сопротивление насадки с шероховатой поверхностью возрастает по сравнению с гладкой поверхностью на 15-25 %

(рис. 4.4). Но рост коэффициентов массоотдачи значительно выше (рис.4.5 и 4.6), что приводит к снижению высоты и общему уменьшению энергозатрат.

Автор успешно преодолевает сложности, связанные с влиянием смачиваемости поверхности (4.1.9). Такие же многочисленные и трудоёмкие экспериментальные исследования проведены на современных рулонных насадках (раздел 4.3, рис.4.11 - 4.15) и насадке «Инжехим 2012» (рис.4.16 и 4.17). В таблицах (4.3 и 4.4) проведено сравнение основных характеристик разных насадок («Инжехим 2012», сетка, кольца Рашига), а сами исследования проводились на лабораторных ректификационных колоннах для бинарной смеси «ацетон-вода» и для трехкомпонентной смеси «метанол-этанол-вода» (рис. 4.18 и 4.19). Для оценки эффекта масштабирования и его нивелирования диаметры колонн составляли 100, 200 и 600 мм.

Результаты этих многочисленных исследований систематизированы на графиках (рис. 4.20 - 4.23), а сами новые формулы по коэффициентам сопротивления, удерживающей способности, числам Шервуда в таблице на стр. 189.

Ещё более сложные теоретические и экспериментальные исследования описаны в **пятой главе**, оценивающие эффективность насадочных и барботажных абсорберов, опора сделана на результаты, представленные в главах II и III, но конкретизированные на абсорбционно-десорбционные процессы в насадочных колоннах. Предполагается плёночное течение жидкости по поверхности контактных элементов сверху вниз и противоточное движение газовой фазы в каналах сложной геометрии.

Записывается система дифференциальных уравнений II порядка в частных производных (5.1.1 - 5.1.4) для жидкой и газовой фаз и уравнения материального и теплового балансов со специальными граничными условиями (стр. 193) с учётом теплового эффекта растворения газа в жидкости, а также уравнений тепло- и массоотдачи (5.1.5 и 5.1.6) и тепло- и массопередачи (5.1.9 и 5.1.10). Результаты расчётов эффективности массообмена представлены на рис. 5.1 в сравнении с моделью идеального вытеснения.

Далее в этой же главе рассмотрены промышленный, то есть реальный процесс эффективности насадочных колонн-декарбонизаторов, связанный с очисткой воды от углекислого газа и удалением кислорода. Здесь ячеечная модель используется для описания структуры потока традиционно по высоте колонны (рис. 5.3), а также более точная, но и более сложная в математическом описании однопараметрическая диффузионная модель с обратным перемешиванием.

Рассмотрено ламинарное волновое (искусственно созданное за счёт регулярной шероховатости поверхности канала или насадочных тел) и турбулентное течение плёнки жидкости ($Re > 2000$).

Приведены результаты расчётов насадок: Инжехим-2012, сегментно-регулярной насадки «Инжехим» (рис. 5.4) и регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рис.5.5), нерегулярной насадки «Инжехим-2000» и «Инжехим-2002» (рис. 5.6 и 5.7), а также регулярной металлической сетчатой насадки «ВАКУ-ПАК» (таблицы 5.2 ÷ 5.8),

Наглядно преимущества каждой типа насадок представлены на рис. 5.9, позволяющие выбрать оптимальную насадку «Инжехим». Аналогичная гистограмма сравнения гидравлического сопротивления рассмотренных насадок представлены на рис. 5.10.

В таблицах 5.7 и 5.10 представлены сравнительные параметры: коэффициенты массоотдачи для газовой и жидкой фаз для типовых промышленных насадок и насадок «Инжехим», а также перепады давления при разных плотностях орошения. Видно преимущества разработанных автором насадок «Инжехим» по сравнению с типовыми насадками.

Далее в разделе 5.4 аналогичные вопросы рассматривались и сделаны аналогичные выводы для барботажных декарбонизаторов. Здесь физическая картина процесса усложняется, особенно для тарелок большого диаметра из-за неравномерности потоков газа и жидкости по ширине тарелки (рис. 5.13).

Несколько необычно выглядит физическое и математическое моделирование термического деаэрата с барботажным баком-аккумулятором, когда извлечение кислорода из воды проводится водяным паром в барботажном слое горизонтального деаэрата. Здесь неплохо было бы представить схему с материальными и тепловыми потоками. Показано значительное влияние скорости пара на коэффициент массоотдачи (рис. 5.14), а также довольно высокая точность теоретических расчётов зависимости концентрации кислорода на выходе от удельного расхода пара (рис. 5.15), расхода воды (рис. 5.16) и длины барботажного устройства (рис. 5.16). Правда, для последних двух рисунков не представлены экспериментальные результаты.

Хорошие результаты физического и математического моделирования позволили создать усовершенствованную конструкцию тарельчатого деаэрата (рис. 5.19), заключающуюся в установке поперек движения потока перфорированных секционных перегородок, снижающих обратное перемешивание, а значит увеличивающих движущую силу массопередачи на 5-20 % в зависимости от скорости пара и расхода воды (стр. 239).

Ещё один интересный метод десорбции при турбулентном прямоточном движении пузырей пара в жидкости с каналами, снабжёнными интенсификаторами, рассмотрен в разделе 5.6. На рис. 5.20 представлена схема потоков воды и воздуха через интенсификаторы (мелкая нерегулярная насадка - кольца Палля или «Инжехим»). Приведём пример и результаты расчётов с графиками зависимостей профиля концентрации CO_2 по длине (рис. 5.21) и массоотдачи от числа Рейнольдса для колец Палля (рис. 5.22). Здесь также было бы уместно такие графики привести и для насадки «Инжехим».

Важно, что результаты исследований внедрены в производство.

Большой и интересный материал представлен соискателем в **шестой главе**, в котором комплексно рассматриваются вопросы эффективности охлаждения воды в модернизированных плёночных градирнях.

Небольшой экскурс в теорию и практику тепломассообменных процессов в градирнях предваряет во введении исследования, опирающиеся на увеличение охлаждающей способности блоков насадки с искусственной

шероховатостью, устройством волн на поверхности, устройством разрывов по высоте и гофрированием. Рассматриваются известные модели тепломассопереноса в противоточной градирне с принудительной циркуляцией воздуха (рис. 6.1). Подчеркивается, что в хаотичных насадках турбулизация воздуха начинается при $Re > 40$, а в насадках с гладкой поверхностью и упорядочено установленных при $Re > 2300$ (как в гладких трубах). Если установлены поверхностные интенсификаторы (выступы, насадки, гофры и т.п.) турбулизация наступает при $Re_{\text{с}} > (300 \div 500)$.

Записывается система дифференциальных уравнений I - го порядка в цилиндрических координатах в частных производственных по радиусу и высоте (6.2 ÷ 6.8) с граничными условиями по обоим фазам: при $x = 0$ для газа на входе; для жидкости на входе и выходе по радиусу; для жидкости на твёрдой стенке и безградиентные условия симметрии на оси. К ним добавляются уравнения тепло- и массопередачи (6.9), уравнения, учитывающие смачиваемость насадки (6.10 и 6.11), и уравнение турбулентной вязкости (6.12). Далее определяются коэффициенты тепло и массопередачи и соответственно функции зависимости числа Шервуда газа и Рейнольдса газа в цилиндрическом канале (рис.6.2) и в насадочных слоях (рис. 6.3 и 6.4). Здесь же приведены сравнения с экспериментальными данными. Параллельно оцениваются коэффициенты сопротивления сухих и смоченных пленкой воды насадок. Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных показано на графиках зависимости объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха при разных расходах воды (рис. 6.5), причем рассмотрены, как и в предыдущих главах разные типы насадок и прежде всего авторская «Инжехим», кольца кольца Рашига, деревянная хордовая.

На графиках видно значительное преимущество ($300 \div 500 \%$) насадок с интенсификаторами (рис. 6.6). Особый интерес представляют процессы, связанные с тепловой эффективностью градирен. Показано сильное влияние на эффективность охлаждения воды плотности орошения и скорости воздуха. Графики на рис. 6.8 подтверждают, что с ростом скорости воздуха тепловая эффективность нагрева воздуха падает, а тепловая эффективность охлаждения жидкости - воды $E_{\text{ж}}$ растёт. Теоретические и экспериментальные исследования позволили модернизировать градирню и провести на ней экспериментальные исследования (раздел 6.4).

Модернизация заключалась в создании новой комбинированной насадки. В нижней части устанавливается регулярная насадка с дискретной кольцевой шероховатостью, а поверх неё нерегулярная насадка. Первая создаёт при обычном расходе воды ламинарно волновой поток, а при увеличенном расходе воды развитые турбулентные режимы течения плёнки и воздуха. Необходимость засыпки нерегулярной насадки автор объясняет равномерностью распределения жидкости по сечению и уменьшением дробления струй на капли и предотвращение их уноса.

Здесь также сравнивались полиэтиленовые шероховатые трубы без верхнего слоя, затем с верхним слоем из полиэтиленовых колец, и наконец, с хаотичной металлической насадкой «Инжехим-2012». Параллельно с тепло -

массообменными характеристиками исследовались гидравлические сопротивления макетных лабораторных градирен (рис. 6.9). Многочисленные экспериментальные данные систематизированы в виде графиков зависимости коэффициентов массоотдачи от скорости воздуха (рис. 6.10), эффективности охлаждения воды от скорости воды (рис. 6.11) и эффективности охлаждения газа от скорости воздуха.

Отдельно раздел 6.5 посвящён расчёту крупномасштабных промышленных градирен, где крайне неравномерно жидкость и газ распределяются в рабочем объёме как по радиусу, так и по высоте (мы с этим столкнулись даже в лабораторных насадочных аппаратах диаметром 100 мм, где скорости воды и воздуха являются функциями всех трех координат r , φ , z и даже времени: пульсирующие пиковые потоки с резкими скачками скоростей и их затуханием).

Автор в постановке своей задачи предполагает симметрию по координате φ и записывает дифференциальные уравнения в частных производных по x и z (6.66 ÷ 6.68) с рассмотренными выше граничными условиями и уравнениями тепло- массоотдачи. Сделано допущение о равенстве турбулентной диффузии с турбулентной вязкостью воздуха (6.77). Получены формулы для расчета коэффициентов теплоотдачи (6.79) и массоотдачи (6.80).

Главное в отличие от малых градирен: учтён профиль скорости по ширине градирни (рис. 6.13), при этом профиль скорости воды - идеальное вытеснение, то есть поршневой - профиль скорости воздуха подтверждён экспериментально (рис. 6.14) для промышленной градирни СК-400 ($D=20$ м). Автор показывает сильное влияние неравномерности профиля скорости по ширине на снижение теплового КПД (от 5 до 30 %, рис. 6.15), то же подтверждается зависимостью локальной тепловой эффективности от профиля скоростей воздуха и воды (рис. 6.16), где эти расхождения достигают 50 %.

Интересные материалы работы промышленной градирни СК-400 систематизированы в таблице 6.4, где сравниваются ее опытные данные по месяцам работы с полученными автором теоретическими зависимостями. Приводится гистограмма зависимостей высоты блоков оросителей для разных типов насадок (рис. 6.17). Даны рекомендации по установке насадок различных размеров по радиусу (ширине) градирен для выравнивания профиля скорости воздуха и тепловой эффективности.

Интересна идея использования теплового метода единиц переноса, предложенного академиком Кафаровым В.В., для расчёта градирен (раздел 6.6). Впервые автор получил уравнения для расчёта высоты градирни с учётом коэффициентов массоотдачи по газовой и жидкой фазам, коэффициентов диффузии обеих фаз и энтальпии воздуха (6.87 ÷ 6.90). Теоретические результаты подтверждены экспериментальными данными (рис. 6.18 ÷ 6.21), причём проверка диффузионных моделей структуры потока дублировались ячеечной моделью (раздел 6.7).

Приведены алгоритмы и пример расчёта (рис. 6.22 и 6.23). Помимо промышленных градирен больших габаритов рассмотрены вопросы

моделирования и расчёта эффективности мини-градирен с интенсификаторами-турбулизаторами потоков (раздел 6.8) с тремя разными видами регулярных насадок, в том числе «Инжехим» (таблица 6.6). Получены формулы для расчётов энергоэффективности и мощности на подачу воды и воздуха (6.108 и 6.109). Выявлены предпочтительные виды насадок (гистограмма на рис. 6.24) и проведено их сравнение по высоте (рис. 6.25). Показана возможность и даже целесообразность замены крупномасштабных градирен на мини-градирни (раздел 6.10, таблица 6.7, рис. 6.26).

В конце шестой главы представлены 11 новых формул для расчёта технологических и геометрических параметров градирен.

Эффективность процессов одновременного охлаждения и очистки газов от дисперсной фазы рассмотрена в **седьмой главе диссертации**. Использована известная модель Медникова В.П. и других турбулентной миграции и улавливания микрочастиц, хотя обычно считалось, что турбулизация с образованием вихрей, наоборот, ухудшает этот процесс улавливания, так как радиус вихрей меньше радиуса закрутки потока в самом аппарате (локальные факторы разделения в вихре препятствуют эффективному проведению процессу центробежного осаждения). Рассмотрены физические и математические модели с опорой на коэффициенты турбулентной диффузии (7.1.1 и 7.1.2) и массоотдачи, полученные автором в третьей главе для хаотичных и регулярных насадок с интенсификаторами. Корректно сделаны и доказаны допущения (стр. 322), приведена таблица 7.1 с формулами зарубежных и отечественных авторов для расчёта приведённой скорости турбулентного осаждения тонкодисперсных частиц и проведено их сравнение с экспериментальными данными (рис. 7.1) (часто с некоторыми погрешностями теоретических значений в сравнении с экспериментальными результатами). Важно, что описание гидродинамических процессов сепарации микрочастиц сопровождается расчетами тепловых процессов охлаждения газов (рис. 7.3 - 7.7) на разных типах насадок с интенсификаторами - турбулизаторами потоков. Это весьма трудоёмкое комплексное исследование сложных технологических и технических процессов (рис. 7.8). Успешно автором реализуется численное моделирование систем дифференциальных уравнений в частных производных со специальными граничными условиями (раздел 7.2.1): график на рис. 7.9 подтверждает высокую точность теоретических выкладок с экспериментальными данными.

В циклонах, гидроциклонах, скрубберах мы ограничиваемся улавливанием мелких частиц 10 мкм. Здесь же оценка улавливания проводится автором для частиц в 3 мкм со степенью улавливания $\eta=0,997$ и даже 1 мкм с эффективностью $\eta = 0,75$ (стр. 349). Такая эффективность объясняется как закруткой потока, так и дискретной шероховатостью стенок турбулизаторов-интенсификаторов (таблица 7.2, рис. 7.10). Приведены примеры расчёта слабого взаимодействия жидкости и газовой фаз на границе их раздела и сильного взаимодействия, когда газ,двигающийся с большой скоростью, увлекает жидкую плёнку (рис. 7.11). При длине канала $H \geq 1$ м

даже микронные частицы при сильном взаимодействии фаз в гладком канале улавливаются с эффективностью близкой к 100 %, а в шероховатом канале эта длина снижается в 1,5 - 2 раза при той же эффективности.

Произведён расчёт производительности промышленного аппарата с определением технологических и геометрических параметров, показывающих как увеличение тепловой эффективности, так и производительности (рис. 7.13) в восходящем потоке дымового газа по сравнению с противотоком, хотя противоток в тепло-массообменных процессах лучше прямотока из-за выравнивания движущей силы.

Далее дополнительно рассмотрена эффективность сепарации тонкодисперсной фазы в комбинированном аппарате с двумя зонами разделения: в первой зоне для крупных частиц и капель, во второй зоне для тонких фракций (рис. 7.16 - 7.21). Отдельно в разделе 7.2.1 проводится оценка эффективности насадочных газосепараторов капельных аэрозолей с учетом профиля скорости газа (рис. 7.22). Здесь опять приходится опираться на двухпараметрическую диффузионную модель. Показано значительное влияние профиля скорости на локальную степень улавливания (рис. 7.23 ÷ 7.25) и приведена гистограмма, сравнивающая различные насадки по высоте и гидравлическому сопротивлению (рис. 7.26). Выявлена лучшая насадка «Инжехим» (рис. 7.27) и описаны режимы её работы. Далее рассмотрены аналогичные вопросы, связанные с сепарацией тонкодисперсной фазы в барботажном слое и обозначенной автором концепцией активного входного участка (раздел 7.5). В её основе полагается, что газ движется в режиме идеального вытеснения, а жидкость - идеального смешения, а сама концепция входного участка связана с «входным эффектом», т.е. переносом основной массы и тепла (75 - 100 %) у входа газа в слой жидкости из-за очень малой толщины пограничного слоя.

Приведены формулы, алгоритм и результаты расчётов (рис. 7.28 ÷ 7.30) для разных частиц гидрофильной пыли на основе теории турбулентной миграции частиц с выходом на уравнения тепловой и массообменной эффективности (7.6.1 и 7.6.2), чисел единиц переноса (7.6.3) и критериальной зависимости числа Шервуда газа от Рейнольдса и Вебера. Эмпирические коэффициенты этих уравнений для разных типов тарелок систематизированы в таблице 7.3, а результаты расчётов основных технологических параметров в таблице 7.4. Для наглядности основные теоретические и хорошо коррелирующие с ними точки экспериментальных данных представлены на графиках 7.31 и 7.32.

Для барботажных тарелок небольшого диаметра ($D_k < 1,5$ м) можно обеспечить равномерный режим подачи газа для всех отверстий, что экспериментально подтверждает режим идеального вытеснения для газа и идеального смешения для жидкости.

Для примера представлен алгоритм и результаты расчётов ситчатой тарелки (таблицы 7.5 и 7.6). Но для повышения точности расчетов автор рассматривает в разделе 7.6.3 одномерную ячеечную модель на плоскости тарелки (а не как обычно, когда она используется по высоте). Эта неравномерность потока жидкой фазы для аппаратов большого диаметра в

разделе 7.6.4 учитывается в двумерной модели, то есть и по высоте, и по площади тарелок с использованием в теплопереносе энтальпийных параметров воздуха и числа единиц переноса.

В последней восьмой главе диссертации автор, опираясь на разработанные математические модели и алгоритмы, предлагает разработанные модернизированные конструкции аппаратов для разделения и охлаждения гомогенных и гетерогенных систем с точки зрения их энерго- и ресурсосбережения. Это, во-первых, модернизация насадочных десорберов (почему не абсорберов?). В них обычно одновременно протекают тепло- и массообменные процессы, а кроме того акцент сделан на очистку воды от коррозионно активных газов.

Во-вторых, модернизация деаэраторов и декарбонизаторов (рис. 8.1 - 8.7). В-третьих, это новая конструкция мини-градирни (рис.8.5) с принудительной циркуляцией и двумя зонами: новой регулярной насадки «Инжехим» и хаотичной насадкой. В-четвёртых, модернизация промышленных ректификационных колонн Кт - 148 и Кт - 112 с заменой колпачковых тарелок на регулярную сегментную насадку «Инжехим». Преимущества этих модернизаций подтверждены расчетными параметрами, приведёнными в таблицах 8.1 и 8.9 с технологической схемой, представленной на рис. 8.7. Аналогичные модернизации ректификационных колонн приведены в тех. схеме разделения этаноламинов с таблицами параметров, подтверждающими их эффективность (таблицы 8.5 и 8.6), колонны K_n - 29 разделения триэтанолamina, колонны K_n - 40 отгонки товарного моноэтанолamina, колонны K_n - 56 отгонки легких компонентов из технического триэтанолamina, колонны K_n - 92 выделения товарного триэтанолamina.

По всем модернизациям представлены акты внедрения или использования.

Материалы исследований с описанием квалификационных характеристик в автореферате в концентрированном виде отражают все основные результаты, представленные в самой диссертационной работе.

Замечания, вопросы и пожелания

1. Мало ссылок на зарубежные источники информации, особенно современные, т.е. опубликованные в XXI веке - всего 22 источника.
2. Приведите пример применения собственной программы для ЭВМ, почему ее необходимо было разработать, так как типовых пакетов Aspen Hysys и Chemcad было недостаточно (стр.11)?
3. В чем заключалась модификация гидродинамической аналогии Чилтона-Кольборна (стр.12)?
4. Вы получили выражения для расчета коэффициента обратного перемешивания (продольной диффузии) для сплошной жидкой фазы барботажного слоя (стр.12). А можно ли его применять для газовой фазы (в сушилках псевдосжиженного слоя или газофазных каталитических реакторах)?

5. Рациональность конструкций - это все-таки техническая, а не научная новизна. Её, на мой взгляд, лучше отнести к практической значимости работы (п. II на стр. 14 научной новизны).
 6. Раздел «Теоретическая и практическая значимость работы» записан слишком обще как аннотация, без количественных показателей. А они весомы и их можно было взять из выводов по каждой главе и заключения. Тоже касается раздела «Достоверность исследований», нет численных значений погрешностей, да и названий приборов.
 7. Почему коэффициент турбулентной вязкости на рис. 1.6 имеет сначала максимум, а затем минимум (стр. 55) для клапанных тарелок, почему он сначала падает, а потом становится автомодельным на ситчатых тарелках (рис. 1.7, стр. 56). На стр. 52 дается объяснение только для клапанных тарелок. Объясните пик турбулентной вязкости на пересечении линий 1 и 2 рис. 1, 10, в барботажных аппаратах.
 8. Почему эффективность массообмена (увлажнения воздуха) снижается с увеличением скорости газа (рис. 4.8 и 4.10), а объемный коэффициент массотдачи растет (рис. 4.9, таблица 4.1)?
 9. Рассматривался ли самый эффективный режим массопередачи в насадочных колоннах - режим эмульгирования, когда жидкая фаза сплошная, а газовая дисперсная в виде пузырьков в главе V? (Судя по физической модели, описанной на стр. 91 рассматривается плёночное течение жидкости по поверхности насадки, т.е. жидкость дисперсная фаза, а газ сплошная).
 10. На рис. 5.1 графики эффективности массообмена в газовой фазе для идеального вытеснения теоретически должны быть выше, чем для любых других структур потока, в том числе экспериментальных (В.М. Рамм, В.В. Кафаров, А.Г. Касаткин). Чем объяснить, что у Вас линия 4 а идёт выше линии 4 б при скорости $Wr < 1,6$ м/с.
 11. Как объяснить резкое снижение эффективности в газовой фазе при росте скорости воздуха с 1 м/с до 2 м/с? (рис. 6.7, линии 1 и 2).
 12. На рис. 7.9 делается ссылка на экспериментальные данные двух зарубежных учёных, а на графике представлен только один ($\square$ - есть, Δ - нет).
 13. Нет рисунка, характеризующего i, j ячейки. Это i по высоте ячейки аппарата или слоя жидкости на тарелке (раздел 7.6.4)?
 14. Отдельные выводы по главам как и часть абзацев в заключении выглядят как аннотации (например, первый, второй абзацы к седьмой главе на стр. 405).
- Сделанные замечания и пожелания имеют частный характер и не затрагивают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Лаптевой Елены Анатольевны «Эффективность разделения гомогенных и гетерогенных смесей в модернизированных аппаратах газожидкостного контакта» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований

разработаны теоретические положения, связанные с созданием новых алгоритмов и методов расчёта эффективности разделения гомогенных и гетерогенных систем в модернизированных тепломассообменных аппаратах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие технологических процессов нефтеперерабатывающей и нефтехимической отрасли страны.

По уровню актуальности, достижения поставленной цели и решённых задач, научной новизны теоретических исследований, технологической, технической и практической значимости, связанных с созданием новых алгоритмов и методов расчёта эффективности разделения гомогенных и гетерогенных систем в модернизированных тепломассообменных аппаратах, а также высокой математической эрудиции автора, результатам внедрения научно-технических разработок в промышленность с общим экономическим эффектом около 800 млн. руб./год, высокому рангу публикаций по количеству и международному весу журналов, в которых они изданы, апробации на международных и всероссийских конференциях, числу монографий диссертация 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:

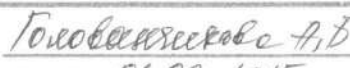
профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»)
Доктор технических наук по специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий», профессор

 Голованчиков
Александр
Борисович

дата 02.09.2025

Адрес организации: 400005, Волгоград, пр. Ленина, 28
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»
тел. (8442) 24-00-76, e-mail: rector@vstu.ru
тел. (8442) 24-84-40, e-mail: pahp@vstu.ru



Подпись 
ДОСТОВЕРЯЮ 02.09.2025
Нач. общего отдела  (подпись)

Вход. № 05-8527
« 10 » 09 2025 г.
подпись 