

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Лаптева Анатолия Григорьевича на диссертационную работу **Чебышевой Анны Михайловны** на тему: «Разработка усовершенствованной сетчатой регулярной насадки для ректификации и исследование ее характеристик» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий.

Актуальность темы исследований

В России принята государственная программа по повышению энергетической эффективности промышленных производств, а также стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года. В связи с этим актуальными задачами являются совершенствование процессов и аппаратов для разделения смесей ректификацией. В ректификационных колоннах применяются как тарельчатые, так и насадочные контактные устройства различных конструкций. Среди них особое место занимают регулярные насадки, так как они характеризуются низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью. Следовательно, разработка новой сетчатой регулярной насадки шевронной конструкции, а также разработка методики расчета ее эффективности является актуальной темой диссертационного исследования. В условиях необходимости импортозамещения исследование гидродинамических и массообменных характеристик высокоэффективных контактных устройств для оснащения ими ректификационных массообменных аппаратов является важной задачей для химических, нефтехимических, нефтегазовых, спиртовых, фармацевтических и в некоторых других отраслях промышленности.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Усовершенствованная конструкция сетчатой регулярной насадки ГИПХ-10 обладает высокой эффективностью при достаточно небольшом гидравлическом сопротивлении по сравнению со своими отечественными и

зарубежными аналогами. Это доказано и обосновано значительным объемом выполненных экспериментальных данных с использованием различных режимных параметров процесса ректификации и применением различных смесей.

Результаты проведенных исследований массообменной эффективности процесса ректификации в сетчатой регулярной насадке ГИПХ-10 свидетельствуют о равномерном и симметричном распределении жидкости по высоте слоя насадки шевронной конструкции в сравнении с ее аналогами косоугольного сечения. Количественный анализ показал, что средний коэффициент неравномерности распределения жидкости в зависимости от удельной плотности орошения на насадке ГИПХ-10 в 2,2 раза ниже, чем у листовой регулярной насадки. Качественный анализ распределяющей способности насадки ГИПХ-10 показал, что жидкость течет по насадке ГИПХ-10 двумя способами: по каналам соприкасающихся гофрированных полос насадки и по углу шеврона. Установлено, что низкие значения среднего коэффициента неравномерности распределения жидкости для насадки ГИПХ-10 обусловлены шевронным типом конструкции насадки и оптимальным размером площади ячейки сетки полотняного плетения насадки.

Показано низкое гидравлическое сопротивление насадки ГИПХ-10. Его величина не превышает значений перепада давления для подобных конструкций зарубежных производителей.

Представлены и обоснованы результаты экспериментального исследования высоты эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ) для регулярной насадки ГИПХ-10 в зависимости от фактора нагрузки на смесях циклогексан-гептан и этилбензол-стирол. Установлено, что при разделении смеси циклогексан-гептан в условиях атмосферного давления насадка ГИПХ-10 по эффективности превосходит свои аналоги косоугольной конструкции из листовых материалов в 4,5 раза, из сетчатых - в 2-2,5 раза. В условиях вакуума при разделении смеси этилбензол-стирол эффективность насадки

ГИПХ-10 выше своих аналогов из листовых материалов в 4-5 раз, из сетчатых - в 1,5 раза.

Разработанная методика расчета апробирована на модельных смесях и смеси метиламинов. Показано согласование расчетных и экспериментальных результатов при разделении методом ректификации азеотропной смеси метиламинов.

Научная новизна

Для разработанной усовершенствованной конструкции сетчатой регулярной насадки ГИПХ-10 шевронного типа на трех лабораторных стендах с ректификационными колоннами различного диаметра получены экспериментальные данные по гидравлическим с массообменным характеристикам, которые представлены в виде графических зависимостей и в таблицах. Исследована ректификация смесей циклогексан-гептан, этилбензол-стирол и метиламины.

Получены данные по неравномерности распределения жидкости в локальных областях колонки. Сделаны выводы о влиянии пристеночного эффекта и наиболее рациональном распределении жидкой фазы.

Экспериментально исследованы предельные нагрузки по газу и жидкости для насадки ГИПХ-10. Даны выражения для расчёта скорости захлёбывания.

Получены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению сухой и орошаемой насадки ГИПХ-10. Перепад давления сухой насадки составляет 35-118 Па/м. Перепад давления орошаемой насадки на 30-40% больше, чем у сухой.

Экспериментально получена высота эквивалентная теоретической тарелки (ВЭТТ) для процесса ректификации в колоннах с насадкой ГИПХ-10. Даны табличные и графические зависимости ВЭТТ от расхода флегмы и фактора F (фактор пара) для трех исследованных смесей. На основе применения известных расчётных выражений различных авторов для

гидравлических и массообменных характеристик разработан алгоритм расчёта ВЭТТ для насадки ГИПХ-10.

К недостатку научной новизны следует отнести отсутствие обобщённых расчётных эмпирических зависимостей для гидравлического сопротивления и ВЭТТ исследованной насадки. Кроме этого, не получен экспериментально объёмный и поверхностный коэффициент массопередачи, что не составляло бы труда с применением полученных автором диссертации опытных данных по ректификации смесей.

Достоверность исследования и полученных результатов

Достоверность полученных результатов в диссертационной работе обеспечивается большим объемом представленных экспериментальных данных, полученных на лабораторных и промышленных установках, и подтверждается сходимостью полученных зависимостей с результатами расчетов по разработанной методики определения ВЭТТ, а также с данными, опубликованными в литературе по тематике научной работы. Кроме этого, достоверность проведенных исследований обусловлена использованием современного аналитического оборудования и контрольно-измерительных приборов.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Автором предложена усовершенствованная конструкция регулярной насадки ГИПХ, которая получила наименование – ГИПХ-10. Насадка имеет форму шевронного типа, развитую удельную поверхность - $1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, долю свободного объема – $0,88 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и минимально возможный при изготовлении такого типа насадок шаг гофрирования - 7 мм. За счет этих показателей достигаются высокие значения ВЭТТ: в условиях атмосферного давления и в условиях вакуума величина ВЭТТ составляет $0,11 \div 0,15 \text{ м}$. Это имеет важное значение при получении продуктов особой чистоты.

Предложенная автором методика расчета ВЭТТ для определения эффективности работы ректификационных колонн, оснащенных сетчатой

регулярной насадкой конструкции ГИПХ-10, показала, что полученные результаты расчетов значения ВЭТТ отличаются от экспериментальных величин не более чем на 16%. Это подтверждает адекватность разработанного алгоритма расчета.

Автором разработаны и экспериментально обоснованы рекомендации по установке распределительных устройств газовой и жидкой фаз по высоте слоя насадки ГИПХ-10 в ректификационных колоннах.

Образцы сетчатой регулярной насадки ГИПХ-10 успешно внедрены на АО «Салаватский химический завод» г. Салават и в производстве филиала «ЦЭНКИ» - НПЦ КРТ, п.г.т. Дальнее Константиново. Внедрение предложенных конструкций позволило существенно повысить эффективность производственных процессов и показатели качества целевых продуктов, а также снизить количество образующихся отходов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанная автором конструкция насадки типа ГИПХ-10 рекомендуется к применению в промышленных ректификационных колоннах для разделения термолабильных соединений, а также широкого спектра органических соединений, которые не образуют при нагревании смолы и не содержат взвешенные частицы.

Приведенная в диссертационной работе методика расчета ВЭТТ для определения эффективности работы ректификационных колонн, оснащенных регулярной насадкой конструкции ГИПХ-10, рекомендуется к применению при разработке конструкции колонных аппаратов ректификации при создании новых производств химической и нефтехимической отраслей промышленности, или модернизации существующих производств с целью снижения энергозатрат и повышения качества продукции.

Предложенные автором рекомендации по установке распределительных устройств по высоте слоя насадки ГИПХ-10 следует использовать при конструировании ректификационных колонн.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Диссертация выполнена на высоком экспериментальном научном уровне. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 14 таблиц. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Список использованных источников включает 85 наименований. Диссертация написана научным языком. Работа является цельной и завершенной.

Первая глава посвящена обзору литературных данных, посвященных конструкциям контактных устройств колонных аппаратов для массообменных процессов и обзор научно-технической литературы с целью выявления известных зависимостей для расчета массообменных характеристик регулярных насадок.

Во *второй главе* представлена конструкция усовершенствованной сетчатой регулярной насадке ГИПХ-10, а также дано описание конструкции насадки, приведены основные технические характеристики.

В *третьей главе* с применением известных выражений представлена разработанная методика определения ВЭТТ и алгоритм расчета.

В *четвертой главе* даны схемы и описание экспериментальных установок для изучения закономерностей гидродинамики и массообмена сетчатой регулярной насадки ГИПХ-10.

В *пятой главе* приведены результаты экспериментального исследования распределяющей способности насадки ГИПХ-10.

В *шестой главе* представлены результаты экспериментального определения гидродинамических и массообменных характеристик насадки ГИПХ-10, а также показано сравнение полученных результатов с характеристиками некоторых регулярных насадок отечественных и зарубежных фирм.

В *седьмой главе* диссертации описаны результаты определения возможности масштабирования разработанной методики на примере

технологии выделения метиламинов из продуктов каталитического аминирования метанола аммиаком.

Выводы и практические рекомендации согласуются с содержанием работы. Цель работы достигается решением поставленных задач.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий, пунктам 3) Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения газов, перемещения сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах; 4) Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратного оформления

Замечания по диссертационной работе

1. По научной новизне на стр. 5.

Разработка усовершенствованной конструкции сетчатой регулярной насадки ГИПХ-10 – не является научной новизной, это практическая значимость.

2. В чем заключается научная новизна в методике расчёта ВЭТТ для насадки ГИПХ-10? В методике (алгоритме на стр. 49-53, раздел 3.1) применяются известные выражения физических свойств смеси, гидравлических характеристик и так далее. В чём новизна блок-схемы (алгоритма) расчёта в разделе 3.2.?

3. В обзорной главе 1 разделы 1.1 и 1.2, написаны в форме учебного пособия для студентов. Кроме этого, почти все литературные ссылки на учебники, справочники, учебные пособия прошлого века.

4. В разделе 1.5 (стр. 34-41) приводятся расчётные выражения различных авторов для коэффициентов массоотдачи в паровой и жидкой фазах для насадочных колонн (числа Шервуда) однако не указаны области применения данных формул по числам Рейнольдса и конструктивным

характеристикам насадок. Аналогично для перепада давления (1.23) и задержке жидкой фазы (1.33).

5. В главе 3, где представлена методика расчёта ВЭТТ для насадки ГИПХ-10, не сформулированы принятые допущения к данному алгоритму. Самое главное - не отмечено, что применяемое выражение (1.26) для ВЭТТ авторов [48] получено для идеального вытеснения фаз, что далеко не всегда соответствует действительной гидродинамической структуре потоков в насадочных колоннах. Не менее важным является достоверное определение a_e – эффективной поверхности насадки ($\text{м}^2/\text{м}^3$), которая при плёночном режиме всегда меньше геометрической поверхности насадки. В разделах 1.5 и главе 3 не указано как находится эффективная поверхность насадки ГИПХ-10. В приложении А (стр.113-123), где дан пример расчёта разделения смеси циклогексан-гептан в колонне диаметром 50 мм вдруг появился коэффициент $0,65a_p$, то есть при геометрической поверхности $a_p = 1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, эффективная поверхность записана как $a_e = 0,65a_p = 650 \text{ (м}^2/\text{м}^3)$ и далее используется в расчётах ВЭТТ (стр.123). Как установлен такой коэффициент не указано. Он должен зависеть от плотности орошения.

6. В разделе 6.2 представлены экспериментальные данные по удельному перепаду давления сухой и орошаемой насадки ГИПХ-10. По экспериментальным данным замечаний нет, однако, почему автор не сделал обобщение по коэффициенту гидравлического сопротивления сухой насадки в виде степенной (или иной) зависимости от числа Рейнольдса и орошаемой насадки по перепаду давления, как это принято при исследовании насадочных колонн.

7. Задержка жидкости в насадочных колоннах при пленочном режиме находится в пределах $h_L = 0,05 \div 0,15$. Однако в диссертации на стр.121 получено $h_L = 0,5694$, далее после уточнения $h_L = 0,6375$, а затем ниже в расчётах используется почему-то $0,5988$. В любом случае задержка жидкости не соответствует пленочному режиму работы насадочных колонн.

8. Почему диссертация разбита на 7 глав, в этом нет необходимости. Вторая глава всего 4 стр, а 5 глава – 6 стр. Обычно диссертация на соискание ученой степени кандидата наук состоит из 4-5 глав. Каждая глава по 20-30 страниц.

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость полученных результатов и имеют частный характер.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Чебышевой Анны Михайловны является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки по совершенствованию регулярной насадки для ректификационных колонн, ее экспериментальные исследования и методы расчета, имеющие существенное значение для развития нефтехимического комплекса Российской Федерации, что соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертационная работа Чебышевой Анны Михайловны на тему «Разработка усовершенствованной сетчатой регулярной насадки для ректификации и исследование ее характеристик» соответствует паспорту специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий и отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Автореферат и научные публикации отражают основное содержание диссертации.

Считаю, что автор диссертационной работы Чебышева Анна Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерной экологии
и безопасности труда»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»

А.Г. Лаптев

01.09.2025 г.

Шифр специальности, по которой
защищена докторская
диссертация Лаптева А.Г.
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Рабочий адрес: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Инженерной экологии и
безопасности труда»

Рабочий телефон: 8 (905) 020 85 33; 8(843)519-42-53.

Адрес электронной почты: tvt_kgeu@mail.ru

Подпись Лаптева Анатолия Григорьевича заверяю:

