

В настоящее время на стадию выделения этилхлорсилана из реакционной смеси приходится более 90% энергозатрат. Существенное удешевление данной технологической стадии может быть достигнуто исключительно за счёт применения современных энергосберегающих технологий, требующих меньшего количества единиц оборудования.

Таким образом, существует острая необходимость в разработке современного эффективного научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего снижение капиталоемкости, энергосбережение на стадии ректификационного разделения продуктов синтеза, стабильное качество получаемых продуктов, низкие потери ценного сырья и высокую устойчивость при переменном составе продуктов реакции, поступающих на стадию разделения.

Эти аспекты отражены в диссертационной работе А.В. Панкрушиной, поэтому выбранная соискателем тема исследования является актуальной задачей.

2. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В качестве цели работы соискатель выбрал модернизацию технологии разделения этилхлорсиланов с применением сложных ректификационных комплексов, включающих колонны с различным положением внутренних разделительных стенок. Анализ диссертационной работы показал, что проведенные исследования полностью соответствуют поставленной цели. Для её достижения автором разработаны методики определения порядка разделения многокомпонентной смеси, процедуры разработки компьютерной модели энергоэффективной технологической схемы разделения, методические подходы к моделированию и управлению сложными колоннами с различным положением внутренних разделительных стенок, синтезирована модернизированная система ректификационных колонн для разделения смеси этилхлорсиланов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 222 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 53 таблицы, список литературы включает 64 наименования.

В введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основная цель диссертационного исследования и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, определены научная новизна, достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов, практическая значимость работы, приведена информация об апробации работы и публикациях.

В первой главе дан аналитический обзор современного состояния научных исследований в области энергосбережения процессов разделения и промышленных технологий получения кремнийорганических продуктов. Рассмотрены вопросы современных энергоэффективных решений при проектировании систем ректификационных колонн, в том числе комплексы с частично и полностью связанными материально-тепловыми потоками. Особое внимание уделено ректификационным колоннам с внутренними разделительными стенками. Также обоснован выбор универсальной моделирующей программы ChemCad в качестве инструментального средства для решения поставленных задач.

Во второй главе рассматривается предложенный автором критерий энергетической эффективности для выбора варианта топологии комплекса ректификационных колонн с внутренними разделительными стенками. С использованием треугольника Гиббса с линиями равного уровня энергетических затрат проведены исследования энергетической эффективности различных вариантов топологий разделения трехкомпонентных смесей. Показано, что на основе предлагаемого критерия можно определить не только топологию комплекса, но и начальные приближения для расчета ректификационных колонн с применением строгих методов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию на математической модели сложных колонн с внутренними разделительными стенками стационарных и нестационарных режимов их работы. В первой части главы предложены этапы моделирования сложных колонн с внутренними разделительными стенками, расположенными как в верхней, так и в нижней частях колонн. С использованием процедуры исследования чувствительности определены точки контроля температуры для управления ректификационными колоннами. Во второй части главы рассмотрены методики построения и настройки параметров ПИД регуляторов динамической модели ректификационной колонны, а также проведены исследования динамических свойств модели в программной среде ChemCad.

В четвертой главе рассмотрены вопросы модернизации технологии разделения смеси этилхлорсиланов с применением разработанной в главе 2 методики определения оптимального порядка разделения смесей. Для разделения смеси этилхлорсиланов построены и исследованы математические модели сложных ректификационных установок с внутренними разделительными стенками, расположенными в средней и верхней частях колонн.

По каждой главе даны выводы. В завершение работы дано заключение.

Анализ полученных результатов, выводов и рекомендаций позволяет сделать заключение по **научной новизне** диссертации, которая заключается в следующем:

1 Предложены и теоретически обоснованы критериальные уравнения, позволяющие на основании знания теплот испарения компонентов и параметров исходной зеотропной смеси выбирать наиболее предпочтительный порядок разделения смеси как для комплексов простых ректификационных колонн, так и для колонн с внутренними разделительными стенками.

2. Предложен алгоритм выбора последовательности разделения трехкомпонентных зеотропных систем методом ректификации для условия

четкого разделения с использованием энергетического критерия оптимизации.

3. Предложен метод синтеза технологических схем ректификации, включающих колонны с внутренними разделительными стенками.

3. Значимость полученных результатов для науки и производства

Соискателем Панкрушиной А.В. на основе разработанных критериальных уравнений создан пакет прикладных программ, позволяющий с минимальными трудозатратами определить энергоэффективный порядок ректификационного разделения зеотропной многокомпонентной смеси.

В среде универсальной моделирующей программы ChemCad предложена процедура синтеза компьютерных моделей сложных ректификационных колонн с внутренними разделительными стенками.

В программной среде ChemCad разработана и смоделирована схема управления сложными ректификационными колоннами с внутренними разделительными стенками.

Предложен способ непрерывного разделения смеси этилхлорсиланов, позволяющий существенно сократить энергетические затраты на процесс разделения.

Основные результаты диссертационной работы широко апробированы. Так научные и практические результаты диссертации изложены в 6 тезисах докладов конференций, опубликовано 5 статей в журналах, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ; на основании проведённых исследований получен диплом лауреата конкурса «Молодые ученые» в рамках 21-ой Международной промышленной выставки «Металл ЭКСПО 2015», а также специальный именной грант Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ» в 2017 и в 2018 годах; осуществлена государственная регистрация программы для ЭВМ «Программа выбора последовательности разделения трехкомпонентных зеотропных систем методом ректификации для условий четкого разделения с использованием энергетического критерия оптимизации» в Федеральной

службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации; получен патент «Способ непрерывного разделения смеси этилхлорсиланов».

Исследования, результаты которых нашли отражение в представленной работе, проведены диссертантом лично в процессе изысканий. Из совместных публикаций в работе изложен материал, принадлежащий ее автору.

4. Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы по выполненной работе рекомендуются для ознакомления и внедрения в научно-исследовательских и проектных институтах, инжиниринговых фирмах, предприятиях химической и нефтехимической промышленности, занятых исследованиями и проектированием энергосберегающих ректификационных установок, в том числе для разделения кремнийорганических продуктов: АО «ГНИИХТЭОС», ОАО «Казанский завод синтетического каучука», КЗСК-Силикон, АО «Алтайхимпром», ООО ИВЦ «Инжехим», а также в высших учебных заведениях при проведении практикумов для студентов, обучающихся по направлениям «Системный анализ и управление в химической технологии», «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии».

5. Соответствие полученных соискателем научных и практических результатов паспортам специальностей

В соответствии с паспортом специальности **05.17.04** – Технология органических веществ – с целью создания энерго- и ресурсосберегающих технологий разделения этилхлорсиланов исследованы физико-химические закономерности процессов разделения смесей этилхлорсиланов методом ректификации. В диссертационном исследовании автор развивает следующие области исследования согласно паспорту специальности:

П1. Разработка физико-химических основ и технологических принципов наукоемких химических технологий, позволяющих решать проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности;

П5. Математическое моделирование процессов химической технологии, протекающих в реакторах, разделительных и других аппаратах;

П9. Разработка методов выбора оптимальных технологических схем производства целевых продуктов.

В соответствии с паспортом специальности **05.13.18** – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ – автор развивает следующие области исследования:

П4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;

П8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

6. Замечания по работе

1. В работе не рассматривается очистка выделенных конечных продуктов синтеза этилхлорсиланов от имеющихся примесей. Было бы целесообразным изучить и дальнейшие стадии разделения вплоть до получения конечных товарных мономеров.

2. В работе упоминается, что моделирование парожидкостного равновесия проводилось с использованием уравнения NRTL, однако не представлены исходные данные по параметрам бинарного равновесия основных компонентов разделяемой смеси.

3. К замечаниям технического характера следует отнести наличие некоторого количества опечаток, некорректные фразы, как то «наиболее оптимальное...» и нечеткую формулировку выводов, в которых отмечается практическая значимость, но не уделено должного внимания научной новизне.

4. Глава 3 крайне перегружена. Глава изложена на 100 стр. (стр. 75–188) и включает крупные разделы по моделированию стационарных и нестационарных режимов, которые желательно было бы разбить на две соответствующие этим разделам главы. Кроме этого, глава содержит 70 рисунков и 37 таблиц, часть из которых можно было вынести в приложения. При этом в главе отсутствует информация с результатами расчета параметров ПИД регуляторов.

5. Вызывает сомнение правильность выбора в качестве критерия оптимальности проектируемой системы ректификационных колонн минимума суммарных энергетических затрат, без учета капитальных затрат. Любая задача оптимального проектирования есть задача поиска компромисса между капитальными и эксплуатационными затратами.

6. Вызывает недоумение необоснованное высказывание о 40 вариантах возможных схем разделения всех компонентов смеси на отдельные продукты (п. 4.3., стр. 193), тогда как реально предполагается ее разделение максимум на 5 фракций (рис. 4.1, рис. 4.2., рис. 4.4.), что включает 14 вариантов схем разделения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки выполненной диссертационной работы.

7. Заключение

Диссертационная работа Панкрушиной А.В. является законченным научным трудом, в котором на примере технологии разделения кремнийорганических продуктов содержатся новые подходы к решению задач проектирования, исследования и управления ректификационными колоннами и комплексами, включающих колонны с различным положением внутренних разделительных стенок. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа по своей новизне, актуальности, научной и практической ценности соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а ее автор, Панкрушина Алла Вадимовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.17.04 – Технология органических веществ (технические науки) и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Отзыв обсужден на заседании кафедры Системотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Протокол № 13 от 26 апреля 2019 г.

Заведующий кафедрой системотехники
ФГБОУ ВО «КНИТУ», доктор технических наук, профессор
Зиятдинов Надир Низамович 

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, тел. 8 (843) 231-41-94, e-mail: nnziat@yandex.ru

Подпись <i>Н.Н. Зиятдинов</i>	
Удостоверяю: Ученый секретарь ученого совета ФГБОУ ВО «КНИТУ» <i>З.В. Коновалова</i>	
« 26 » 04 2019 г.	