

На правах рукописи

КОЗИН ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО КОНТАКТНОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена на кафедре аппаратного оформления и автоматизации технологических производств имени профессора М.Б. Генералова ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Научный руководитель:	Беренгартен Михаил Георгиевич - кандидат химических наук, профессор, профессор кафедры «Аппаратного оформления и автоматизации технологических производств имени профессора М.Б. Генералова» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»
Официальные оппоненты:	Лаптев Анатолий Григорьевич - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерной экологии и безопасности труда» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» Блинов Илья Андреевич - кандидат технических наук, начальник лаборатории «Новые безопасные химические технологии» АО «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 14.00 часов на заседании Диссертационного Совета 24.2.385.11 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета, А-233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. СПб, ул. Ивана Черных, 4, и на сайте <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации, должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент
Соколова Виктория Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Жидкостная экстракция применяется при разделении близкокипящих и азеотропных смесей, веществ, чувствительных к повышенным температурам, извлечении компонентов из сильно разбавленных растворов, получении токсичных или особо ценных компонентов, когда невозможно или нецелесообразно разделение компонентов способом ректификации или выпаривания. Механизмы массопередачи в системах «жидкость-жидкость» по-прежнему недостаточно хорошо изучены и описаны математически, несмотря на широкий круг отечественных и зарубежных публикаций.

Основными элементами экстракторов являются контактные устройства. Их конструкции весьма разнообразны. Ежегодно патентуются десятки новых контактных устройств и публикуются результаты их исследований. Такое разнообразие конструкций закономерно, так как невозможно существование универсальных аппаратов.

Таким образом актуальность темы исследования определяется:

- отсутствием универсальных массообменных аппаратов и необходимостью постоянной разработки новых контактных устройств для химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств;
- нацеленностью на ресурсо- и энергосбережение в области нефтегазопереработки и нефтехимии, повышение эффективности капитальных вложений;
- необходимостью детальной оценки возможностей интенсификации функционирования массообменных контактных устройств для процесса экстракции в системах жидкость-жидкость.

Степень разработанности. Фундаментальные принципы для анализа и создания моделей массопереноса, а также для эффективного использования ресурсов и энергии, были разработаны и детально описаны в множестве научных публикаций известных ученых, среди которых академики Кутателадзе С.С., Кафаров В.В., Жаворонков Н.М., Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., профессора Касаткин А.Г., Плановский А.Н., Кулов Н.Н., Дильман В.В., Комиссаров Ю.А. и другие. Также вклад в данную область внесли члены-корреспонденты РАН, профессора и международные исследователи Данквертс П.В. и Тейлор Э.Ф. Благодаря их работам на сегодняшний день существуют значительные достижения в изучении массообменных процессов и разработки соответствующего оборудования. Но, учитывая ужесточение стандартов в области энергетики и рационального использования ресурсов, а также потребности в замещении иностранного оборудования отечественными аналогами, продолжение научных работ в этих областях является предметом первостепенной важности.

Цель и задачи работы. Цель работы – разработка и экспериментальное обоснование комбинированного контактного устройства для жидкостного экстрактора колонного типа, обеспечивающего снижение расхода экстрагента и повышение степени извлечения целевого компонента за счет синергетического

эффекта от последовательного применения ситчатых тарелок и регулярной насадки с раздельной подачей экстрагента.

Для решения поставленной цели исследования были определены следующие задачи:

1. Выполнить систематический анализ гидродинамических и массообменных характеристик существующих тарельчатых и насадочных экстракторов, выявить их недостатки и определить критерии, ограничивающие эффективность массопередачи.

2. Разработать и теоретически обосновать новую конструкцию комбинированного контактного устройства (ККУ) для жидкостных экстракторов, базирующуюся на синергетическом эффекте от последовательной установки ситчатых тарелок и регулярной насадки с раздельной подачей экстрагента.

3. Экспериментально исследовать структуру потоков в разработанном ККУ трассерным методом, установить количественные зависимости числа Пекле от режимных параметров и обосновать снижение продольного перемешивания при комбинировании тарелок и насадки.

4. Получить и обобщить экспериментальные данные по фазовому равновесию в тройной системе «вода – изопропиловый спирт – дизельное топливо»; установить температурную зависимость коэффициента распределения и вывести эмпирическое уравнение для его расчета в диапазоне температур 20-70 °С.

5. Разработать и верифицировать методику инженерного расчета высоты массообменной зоны комбинированного экстрактора, учитывающую совместное влияние тарельчатой и насадочной секций, и получить регрессионные зависимости для расчета ВЭТТ, ВЕП и гидравлического сопротивления.

6. Оценить эффективность разработанного ККУ в условиях промышленной системы выделения ароматических углеводородов из стабильного катализатора риформинга и подтвердить технико-экономическую целесообразность внедрения.

Научная новизна. Разработана новая конструкция жидкостного экстрактора колонного типа.

Установлен и подтвержден экспериментально положительный эффект синергизма при комбинировании контактных устройств различного типа (ситчатые тарелки и регулярная насадка) в одном аппарате для процессов жидкостной экстракции, заключающийся в интенсификации массообмена и снижении продольного перемешивания фаз.

Получены новые экспериментальные данные по влиянию режимных параметров (соотношение потоков фаз, температура, распределение потоков экстрагента по высоте аппарата) на эффективность массопередачи в комбинированном экстракторе.

Впервые получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента распределения изопропилового спирта в системе «вода – изопропиловый спирт – дизельное топливо» в диапазоне температур 20–70 °С, учитывающее температурную зависимость равновесия фаз.

Разработана усовершенствованная методика расчета высоты массообменной зоны комбинированного экстрактора, учитывающая раздельную подачу

экстрагента в зоны тарелок и насадки, что позволяет снизить общий расход экстрагента и повысить энергоэффективность процесса.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость состоит в развитии методологии расчета массообменных аппаратов с комбинированными контактными устройствами за счет введения новых эмпирических зависимостей, учитывающих синергетический эффект от совместной работы тарелок и насадки. Установленные закономерности влияния гидродинамических факторов на структуру потоков и эффективность массопередачи расширяют существующие теоретические модели и позволяют обоснованно выбирать конструктивные параметры экстракторов для конкретных технологических задач.

Практическая значимость:

Разработана новая конструкция массообменного контактного устройства для процессов жидкостной экстракции (патент на полезную модель №213134). Результаты исследований, применимы для технологического расчета характеристик жидкостных экстракторов.

Усовершенствованная методика расчета коэффициента распределения позволяет рассчитать коэффициент распределения переходного вещества, необходимое соотношение расхода потоков в экстракторе и обеспечивают поиск решений для минимизации энергозатрат на процесс массообмена.

Результаты работы будут использованы на АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания» для модернизации экстракционной колонны К-8 установки каталитического риформинга с экстракцией ароматических углеводородов.

Объект исследования – процесс экстракции в системе «жидкость – жидкость» в новой конструкции колонного аппарата с комбинированными контактными устройствами (ККУ).

Предмет исследования – гидродинамические и массообменные характеристики ККУ, включающего последовательно установленные секции ситчатых тарелок и регулярной насадки, а также закономерности распределения переходящего компонента между фазами.

Методология и методы исследования. Методологическая основа работы определяется необходимостью развития аппаратного оформления процессов экстракции в направлении повышения ресурсо- и энергоэффективности. Исходным принципом является отказ от создания универсальной конструкции в пользу специализированных решений, адаптированных к конкретным условиям массообмена. Это предопределило логику исследования: от анализа гидродинамических ограничений существующих аппаратов к синтезу новой конструкции, сочетающей преимущества тарельчатых и насадочных элементов, и далее к экспериментальной верификации и разработке расчетной методики.

Методы исследования – теоретический и индуктивный анализ литературных и документальных источников, обобщение доступной информации, сравнительный анализ, определение массообменных характеристик, анализ экономической эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

В аспекте конкретизации заявленной научной новизны на защиту выносятся следующие основные результаты работы:

- конструкция комбинированного контактного устройства (патент на полезную модель № 213134), обеспечивающая интенсификацию массообмена за счет рационального распределения потоков фаз и дополнительной подачи экстрагента в насадочную секцию;
- результаты экспериментальных исследований гидродинамики и массопередачи в комбинированном экстракторе, включая данные о структуре потоков и влиянии соотношения подачи экстрагента на эффективность разделения;
- эмпирическая зависимость коэффициента распределения от температуры для системы «вода – изопропиловый спирт – дизельное топливо», позволяющая корректировать расчет массообменных аппаратов при изменении технологических параметров;
- рекомендации по промышленной реализации разработанного контактного устройства для модернизации колонных экстракторов в процессах выделения ароматических углеводов.

Степень достоверности результатов исследований и выводов подтверждается использованием стандартных, апробированных в лабораторных условиях методов исследования, применением аттестованных средств измерения, современных методов анализа и корректной статистической обработки, а также массивом экспериментальных литературных и собственных данных, позволяющих сделать обоснованные выводы, а также опубликованием результатов исследований в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научных конференциях: Международная научно-практическая конференция «Инновационные научные исследования: теория, методология, тенденции развития (Уфа, 2021), VI Международная научная конференция «Теория и практика процессов химической технологии» (Марушкинские чтения), посвященная 100-летию профессора Б.К. Марушкина (Уфа, 2021), Всероссийская научно-техническая конференция. «Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология» (Новомосковск, 2022), Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2023» (Москва, 20–27 февраля 2023), Всероссийская студенческая научно-практическая конференция, г. Казань (28–30 мая 2024 г.), VI Международный Косыгинский Форум, международный научно-технический симпозиум «Повышение энерго-ресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежной отраслях промышленности, посвященный 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова (ISTS EESTE-2024) (Москва, 2024), XVII Минский международный форум по тепломассообмену (Минск, Беларусь, 20-24 мая 2024), XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Федеральная территория «Сириус», Россия, 7-12 октября 2024).

Личный вклад автора состоял в поиске и обзоре данных отечественных и зарубежных литературных источников по теме исследования, в разработке конструкции жидкостного экстрактора колонного типа, в создании экспериментальной установки, планировании и проведении экспериментальных работ, в создании методики расчета эффективности жидкостного экстрактора колонного типа. Все результаты работы получены при непосредственном участии автора, либо лично автором.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий, пунктам 3) Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах. 4) Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратного оформления. 10) Методы изучения, совершенствования и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, в том числе разработка химико-технологических процессов переработки отходов.

Публикации. По результатам исследований автором опубликовано 12 печатных работ по теме диссертации, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, 8 материалов всероссийских и международных конференций, 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 25 рисунков, 20 таблиц. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Список использованных источников включает 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы цели, задачи исследования и положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе приведен обзор научно-технической литературы, посвященный анализу современного состояния массообменного процесса экстракции для систем «жидкость-жидкость» и его аппаратного оформления. Указаны основные требования к экстракторам.

Рассмотрены модели, используемые для расчета КПД контактных устройств: модели для расчета эффективности разделения. Эффективность разделения смеси зависит от структуры потоков сплошной и дисперсной фаз на тарелке, интенсивности массообмена и площади межфазной поверхности. Влияние конструктивных особенностей контактных устройств на гидродинамику процессов массообмена существенно. Для эффективного осуществления процесса экстракции в экстракционных аппаратах должно быть обеспечено хорошее контактирование взаимодействующих фаз и последующее их разделение. Следовательно,

эффективность работы экстрактора зависит от конструкции аппарата и гидродинамического режима в нем.

Вторая глава посвящена разработке новых контактных устройств. Указано, что комбинация различных типов контактных устройств – один из перспективных путей для повышения ресурсо-энергоэффективности тепло-массообменных процессов.

Сущность разработанного жидкостного экстрактора колонного типа (рисунок 1): корпус экстрактора выполнен в виде колонны; корпус разделен по высоте на секции с массообменными контактными устройствами, отличающимися конструкциями; в верхней секции установлены ситчатые тарелки с отверстиями 3-6 мм; в нижней секции установлен слой структурированной насадки; в нижней и верхней частях экстрактора находятся отстойные зоны перед выходом продуктов экстракции.

В верхней секции осуществляется окончательная очистка рафината от примесей, благодаря предотвращению обратного смешивания. В нижней части, где насадочный слой имеет уменьшенный диаметр, предотвращается возникновение пристеночного эффекта и байпасирования основных потоков, повышая тем самым эффективность разделения.

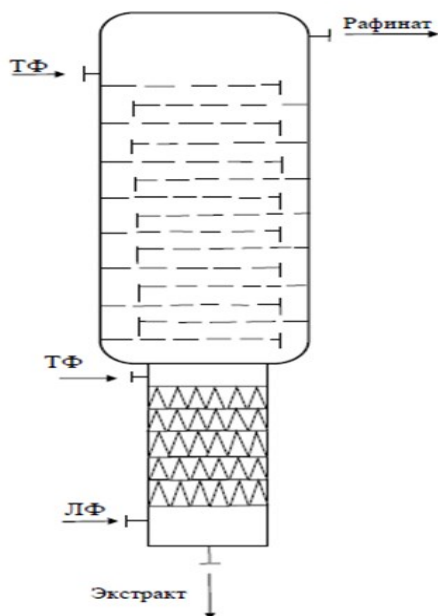


Рисунок 1 - Экстрактор колонного типа с комбинированными контактными устройствами для систем «жидкость-жидкость»

Скомбинировав тарелки с насадками в единой конструкции экстрактора, мы наблюдаем синергию эффектов: эффективный массообмен обеспечивается в слое насадок, в то время как ситчатые тарелки эффективно удаляют примеси. Это подчеркивает актуальность исследований и разработки комбинированных устройств.

По сравнению с известными жидкостными экстракторами колонного типа, комбинацией «тарелки + насадки» обеспечивается:

- интенсификация процесса без применения ввода дополнительной механической энергии от мешалок, пульсаторов и т.д.;
- высокий коэффициент извлечения целевых компонентов и качество продуктов;
- уменьшение массогабаритных размеров, соответственно снижение металлоемкости экстрактора;
- простота в изготовлении и обслуживании.

В третьей главе описаны результаты проведенных экспериментальных исследований. Серии экспериментов направлены на изучение структуры течения фаз внутри аппарата, степени турбулизации потоков и диспергации фаз, процесса массопереноса из одной жидкой фазы в другую, влияния расхода экстрагента их соотношения, температуры на процесс массопереноса на модельной смеси и определение КПД аппарата при разных режимах.

Практика и дополнительные исследования указывают на то, что для эффективного массообмена насадки требуют более высокого и стабильного объема орошения по сравнению с тарелками. С целью оптимизации распределения жидкости по слою насадки, предложено внедрение системы дополнительного орошения в пространстве между тарелкой и насадкой.

Основные характеристики стенда:

- внутренний диаметр секции тарелок – 50 мм;
- внутренний диаметр секции насадки – 30 мм;
- общая высота колонны – 1200 мм;
- материал – стекло, фторопласт, коррозионностойкая сталь (для узлов ввода и отбора).

Для моделирования процесса массопередачи разработана методика определения коэффициента распределения переходного вещества в зависимости от температуры. Изучено фазовое состояние системы на модельной смеси «вода-ИПС-ДТ» и построены изотермы экстракции для определения рабочих линий и коэффициента распределения процесса экстракции ИПС из ДТ водой в диапазоне температур 20÷70 °С (рисунок 2).

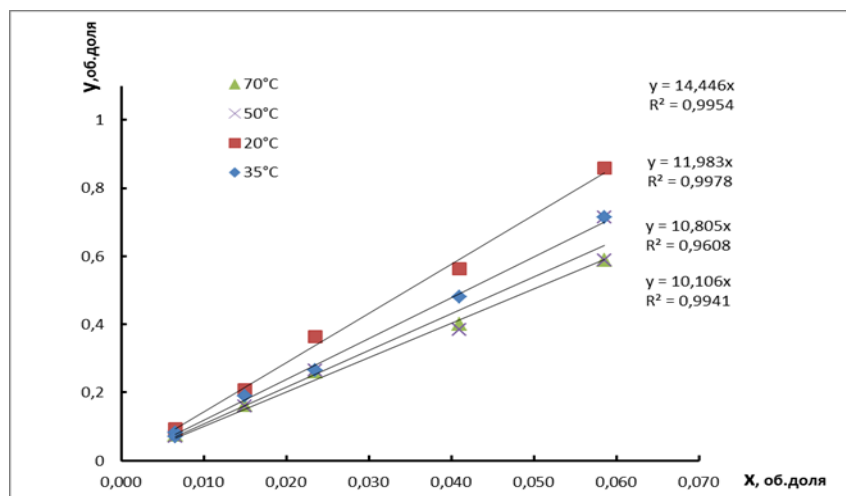


Рисунок 2 - Зависимость равновесной концентрации ИПС в ВОДЕ (экстракте) от концентрации ИПС в ДТ (рафинате) при температурах 20-35-50-70°C.

Апробация полученных зависимостей проведена на лабораторной установке (рисунок 3), моделирующей промышленный процесс экстракции.

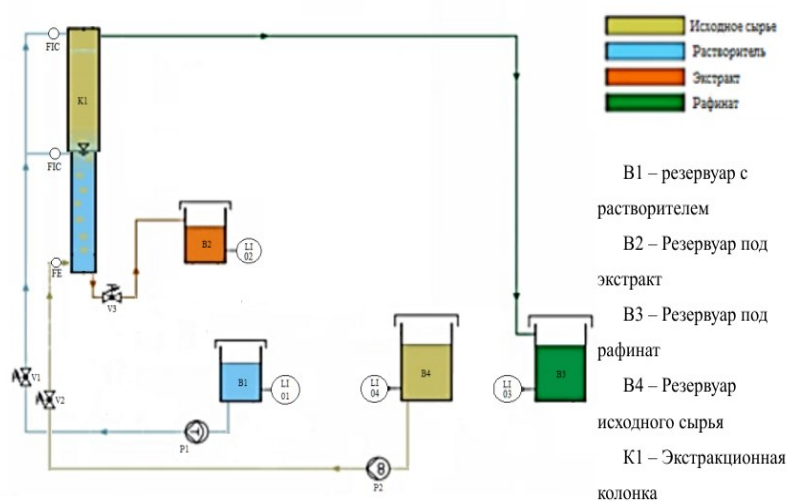


Рисунок 3 – Принципиальная схема лабораторной установки:

K1 – экстракционная колонка; P1 – насос для перекачивания растворителя; P2 – насос для перекачивания исходного сырья; LI01-LI04 – уровнемеры; V1, V2, V3 – регуляторы расхода потоков; FE – расходомер сырья, FIC – расходомер подачи экстрагента с регулирующей функцией (ротаметр).

Статистическая обработка показала достоверность экспериментальных данных на уровне среднего отклонения значений концентрации не более 10%.

В исследуемом диапазоне значений с достаточной точностью более 94% изотерма экстракции, построенная на основе экспериментальных данных, описывается прямой линией, коэффициент распределения равен постоянной величине $m=15,02\pm0,90$.

Температура оказывает существенное влияние как на равновесие фаз, так и на кинетику массообмена. На рисунке 4 представлены совмещенные зависимости коэффициента распределения m и высоты единицы переноса ВЕП для насадочной секции и ККУ от температуры.

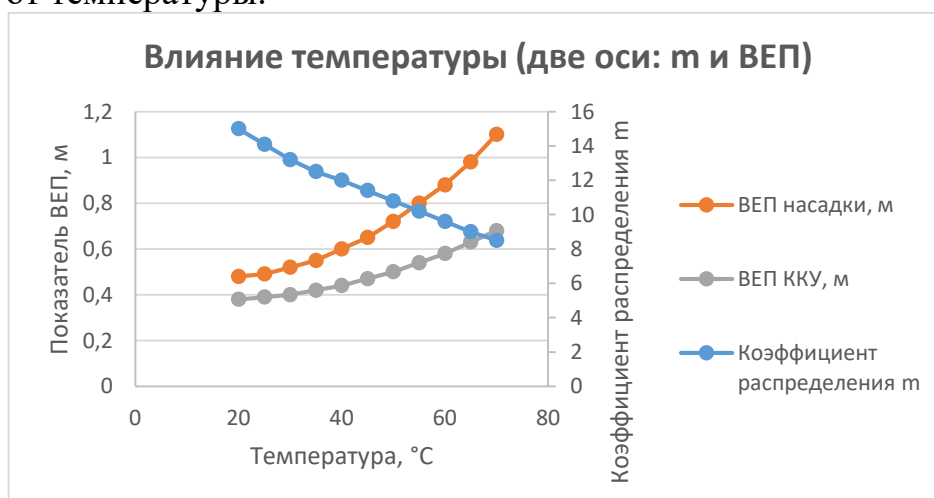


Рисунок 4 - Влияние температуры на коэффициент распределения (правая ось) и высоту единицы переноса (левая ось).

Теоретическое обоснование эффективности раздельной подачи экстрагента иллюстрирует рисунок 5. В отличие от классической прямой рабочей линии для чистой насадки, при вводе дополнительного потока экстрагента между секциями рабочая линия претерпевает излом, что увеличивает движущую силу массообмена.

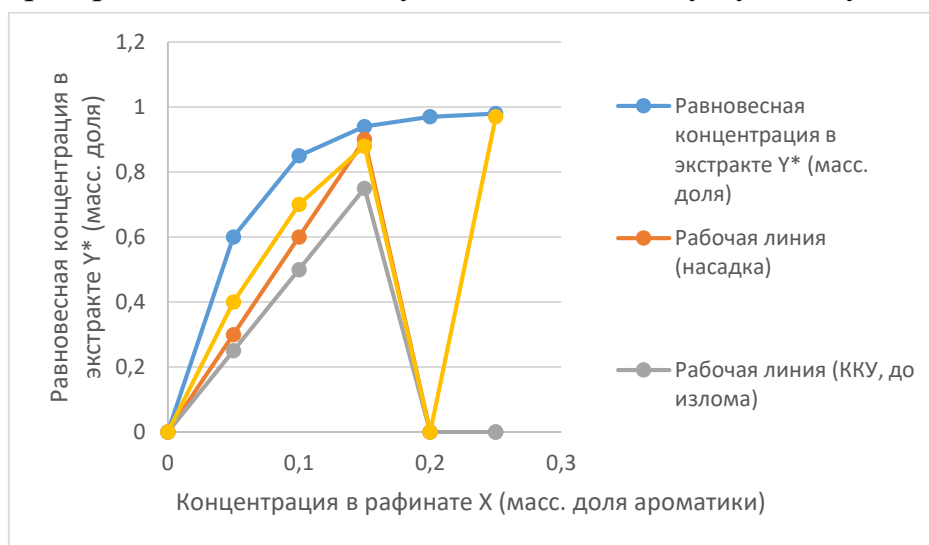


Рисунок 5 – Сравнение рабочих линий для чистой насадочной колонны и ККУ с раздельной подачей экстрагента.

Экспериментально установлено, что эффективность массообмена в ККУ существенно зависит от распределения подачи экстрагента между секциями. На рисунке 6 приведена зависимость степени извлечения ИПС от доли экстрагента, подаваемого на тарельчатую секцию (при фиксированном общем расходе 300 мл/мин и расходе сырья 100 мл/мин).

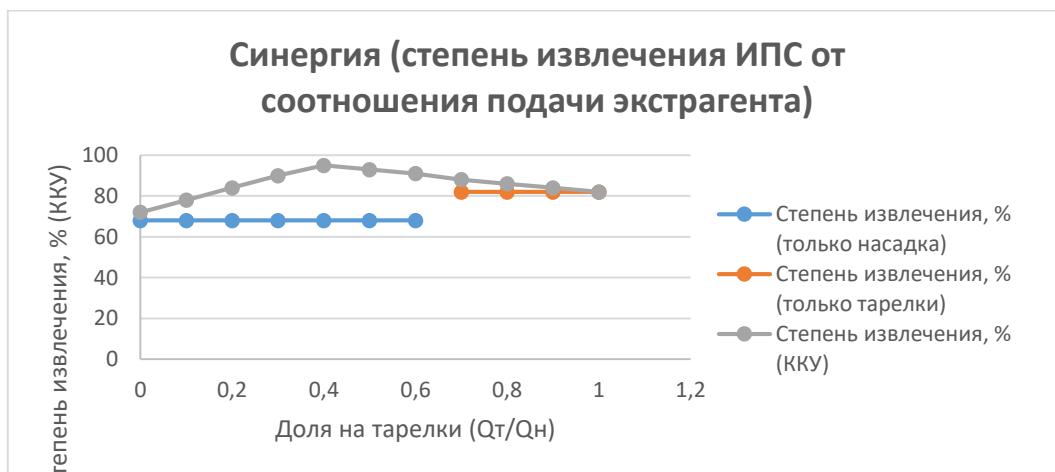


Рисунок 6 - Зависимость степени извлечения ИПС от соотношения подачи экстрагента на тарельчатую и насадочную секции (Q_T/Q_N).

Зависимость коэффициента распределения от температуры имеет множество составляющих и не имеет линейности на данном диапазоне. В связи с этим данную зависимость можно описать эмпирическим уравнением, с необходимой степенью точности:

$$m = 0,00192T^2 - 1,3078T + 232,56; (R^2 = 0,9968), \quad (1)$$

В таблице 1 приведены экспериментальные значения гидравлического сопротивления ККУ при различных режимах работы (получены на лабораторной установке).

Таблица 1 – Гидравлическое сопротивление ККУ в зависимости от режимных параметров

Режим	Расход легкой фазы, л/ч	Расход экстрагента, л/ч	Соотношение подачи (тарелки:насадка)	$\Delta P_{\text{ККУ}}$, кПа
1	100	180	0:100	3,2
2	100	180	100:0	8,5
3	100	300	40:60	5,8
4	100	300	60:40	6,2
5	100	400	0:100	4,1
6	100	400	100:0	10,2

Как следует из таблицы 1, оптимальное соотношение подачи 0,4:0,6 обеспечивает умеренное гидравлическое сопротивление (5,8 кПа), которое существенно ниже, чем при подаче всего экстрагента на тарелки (8,5–10,2 кПа), и лишь незначительно выше, чем при подаче только на насадку (3,2–4,1 кПа). При этом нужно учесть, что эффективность массообмена при раздельной подаче значительно выше, чем при подаче только на насадку.

Для обоснования возможности масштабирования результатов проведен анализ критериев подобия, определяющих гидродинамическую обстановку и эффективность массопередачи:

1. Критерий Шмидта (Sc) – характеризует соотношение вязкостных и диффузионных свойств:

$$Sc = \rho \cdot D_{\mu} \quad (2)$$

Расчетные значения для модельной и промышленной систем в рабочем диапазоне температур (20–50 °С) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение критериев подобия модельной и промышленной систем

Критерий	Модельная система (ИПС–вода–ДТ)	Промышленная система (ароматика–ТЭГ–катализат)
Sc (сплошная фаза)	450–550	500–600
Sc (дисперсная фаза)	1200–1500	1000–1400
Pe (насадочная секция)	8–12	10–15

Как видно из таблицы 2, значения критериев Шмидта для обеих систем различаются не более чем на 20%, что находится в пределах точности инженерных расчетов массообменных аппаратов.

2. Число Пекле (Pe) – характеризует соотношение конвективного и диффузионного переноса. Экспериментально установлено, что для разработанного ККУ число Пекле составляет 15–25, что соответствует режиму, близкому к идеальному вытеснению. Для промышленной колонны аналогичной конструкции ожидаемые значения Pe находятся в том же диапазоне.

3. Коэффициент распределения (m). Полученная для модельной системы температурная зависимость коэффициента распределения имеет аналогичный характер с промышленной системой: снижение m при повышении температуры. Для системы «ароматика–ТЭГ» коэффициент распределения при 20 °С составляет 8–12, что того же порядка, что и для модельной системы ($m = 15,02 \pm 0,90$).

Для инженерных расчётов может быть использовано упрощённое уравнение, полученное для оптимального соотношения подачи (0,4:0,6):

$$ВЭТТ = 0,35 \cdot Re^{0,25} \quad (3)$$

В диапазоне $Re = 500–5000$ уравнение (3) даёт погрешность не более 12%. Сравнение полученных значений ВЭТТ для ККУ с литературными данными для традиционных контактных устройств показывает, что разработанное устройство обеспечивает снижение ВЭТТ на 20–30% по сравнению с регулярной насадкой и на 40–50% по сравнению с ситчатыми тарелками.

На основании проведенного анализа обосновано, что:

1. Выявленное на модели оптимальное соотношение подачи экстрагента – 40% на тарелки и 60% на насадку – является справедливым и для промышленной системы, так как определяется преимущественно гидродинамическими факторами (перераспределение потоков, смачиваемость насадки), а не химической природой компонентов.

2. Полученное эмпирическое уравнение для расчета ВЭТС может быть использовано для предварительной оценки высоты массообменной зоны при модернизации промышленных колонн с установкой ККУ, поскольку число Рейнольдса в рабочем диапазоне нагрузок для обеих систем сопоставимо.

3. Эффект снижения продольного перемешивания при комбинировании тарелок и насадки ($Pe_{ККУ} = 15–25$ против $Pe_{нас} = 8–12$) будет проявляться и в промышленных условиях, так как обусловлен конструктивными особенностями ККУ, а не свойствами конкретной системы.

Таким образом, результаты, полученные на модельной системе «вода–ИПС–ДТ», с достаточной для инженерной практики точностью могут быть масштабированы на промышленную систему выделения ароматических углеводородов на установке каталитического риформинга.

В четвертой главе проведен расчет экономической эффективности при совершенствовании существующего жидкостного экстрактора колонного типа К-8 технологической установки Л-35-6 АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания». Назначение экстрактора – выделения ароматических углеводородов (бензол, толуол, ксилолы) из стабильного катализата риформинга. В экстрактор

К-8 установлены внутренние контактные устройства – регулярная насадка, для улучшения распределения потока на насадке, насадка установлена в шесть слоев, перед каждым слоем имеется распределитель. Предлагается для приведения в норму качеству продуктов верхний 6-ой пакет насадки заменить на ситчатые тарелки. Комбинация «насадка и тарелки» в экстракторе позволит обеспечить надежный процесс массообмена и соответственно привести качество продуктов к норме.

Комбинированные таким образом контактные устройства (рисунок 7) дают синергетический эффект: эффективный массообмен, снижение расхода растворителя (ТЭГа), повышение качества, исключение брака продукции.

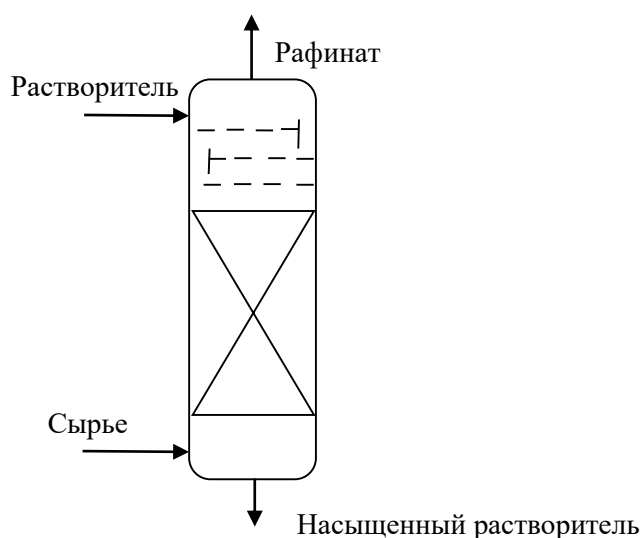


Рисунок 7 – Принципиальная схема усовершенствованной экстракционной колонны с комбинированными массообменными контактными устройствами

Экономический эффект после внедрения данного технического решения «Повышение эффективности работы колонны-экстрактора К-8 установки Л-35/6» 93 116 318 руб./год.

Заключение

1. Выполнен анализ гидродинамических и массообменных характеристик, существующих тарельчатых и насадочных экстракторов, выявлены их недостатки и определены критерии, ограничивающие эффективность массопередачи.

2. Предложена новая расчетная модель, на основе которой разработана и теоретически обоснована новая конструкция комбинированного контактного устройства (ККУ) для жидкостных экстракторов, защищённая патентом на полезную модель № 213134. Обоснован синергетический эффект от последовательной установки ситчатых тарелок и регулярной насадки с раздельной подачей экстрагента.

3. Экспериментально исследована структура потоков в разработанном ККУ трассерным методом, установлены количественные зависимости чисел Пекле от режимных параметров и обосновано снижение продольного перемешивания при комбинировании тарелок и насадки.

4. Выведено эмпирическое уравнение, описывающее распределение целевого компонента в системе «ИПС – вода – дизельное топливо» в функции температуры. Установлено, что коэффициент распределения изопропилового спирта между фазами составляет $15,02 \pm 0,90$ и подчиняется нелинейной температурной зависимости вида: $m = 0,00192 \cdot T^2 - 1,3078 \cdot T + 232,56$.

5. На основе экспериментальных данных получено регрессионное уравнение для расчёта ВЭТТ ККУ ($R^2 = 0,94$). Установлено, что при оптимальном соотношении подачи (0,4:0,6) ВЭТТ составляет 0,35–0,55 м, что на 20–50% ниже, чем для традиционных контактных устройств.

6. Выполнена оценка эффективности разработанного ККУ в условиях промышленной системы выделения ароматических углеводородов из стабильного катализатора риформинга и подтверждена технико-экономическая целесообразность внедрения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Публикации и издания, входящих в перечень ВАК РФ

1. **Козин Ю.В.** Экспериментальное изучение структуры потоков в тарельчато-насадочных колонных экстракторах / М.Г. Беренгартен, Ю.В. Козин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – Том 84. № 2. – С.228-233.

2. **Козин Ю.В.** Разработка новой конструкции жидкостного экстрактора колонного типа / М.Г. Беренгартен, Ю.В. Козин // Промышленные процессы и технологии. – 2024. – Том 4 № 1 (11). – С.77-85.

3. **Козин Ю.В.** Исследование массообменного процесса в системе вода – изопропиловый спирт – дизельное топливо в жидкостном экстракторе колонного типа новой конструкции / М.Г. Беренгартен, Ю.В. Козин, А.Д. Маслов, С.А. Юдаев, М.Г. Ахмадиев. Технология нефти и газа. – 2025. – №1 (156). – С.34-38.

Объекты интеллектуальной собственности

4. Патент RU 213134 Российская Федерация, МПК В01J 14/00; В01D 11/04; В01J 19/32 Жидкостный экстрактор колонного: № 2022111694 заявл. 28.04.2022 опубл. 26.08.2022 бюл. № 24 / Беренгартен Михаил Георгиевич, **Козин Юрий Васильевич**, заявитель ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех).

Тезисы докладов:

5. **Козин Ю.В.** Комбинированные контактные устройства для процесса экстракции «жидкость-жидкость» / М.Г. Беренгартен, Ю.В. Козин // Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции: Инновационные научные исследования: Теория, Методология, Тенденции развития, Уфа, 23 февраля 2021 года.

6. **Козин Ю.В.** Разработка новых комбинированных контактных устройств / М.Г. Беренгартен, Ю.В. Козин // Теория и практика процессов химической технологии (Марушкинские чтения): Материалы VI Международной научной конференции, Уфа, 17 ноября 2021 года.

7. **Козин Ю.В.** Повышение ресурсо-энергоэффективности жидкостных экстракторов колонного типа / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен // Всероссийская научно-техническая конференция. Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология, Новомосковск, 31 октября – 2 ноября 2022 г.
8. **Козин Ю.В.** Повышение эффективности процесса экстракции на примере колонны-экстрактора К-8 установки Л-35-6 АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания» / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен // Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2023», Москва, 20–27 февраля 2023 г.
9. **Козин Ю.В.** Теоретические методы исследования тепло-массообменных процессов / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен, М.Г. Ахмадиев // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: VII Всероссийская студенческая научно-практическая конференция, г. Казань, 28–30 мая 2024 г.
10. **Козин Ю.В.** Разработка новой конструкции жидкостного экстрактора колонного типа / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен // IV Международный Косыгинский Форум, международный научно-технический симпозиум «Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежной отраслях промышленности, посвященный 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова (ISTS EESTE-2024), г. Москва, 20-22 февраля 2024 г.
11. **Козин Ю.В.** Барометрический конденсатор смешения с комбинированными контактными устройствами / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен // XVII Минский международный форум по тепломассообмену, Минск, 20-24 мая 2024 г.
12. **Козин Ю.В.** Повышение ресурсосбережения процесса экстракции в системах «жидкость-жидкость» / Ю.В. Козин, М.Г. Беренгартен, С.А. Юдаев // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Федеральная территория «Сириус», 7-12 октября 2024 г.