



Федеральное агентство по рыболовству
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»
Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций сертифицирована DQS
по международному стандарту ISO 9001:2015

Институт нефти и газа

Направление подготовки: **18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»**
(код, наименование)

Направленность: **«Машины и аппараты химических производств»**

Кафедра **«Технологические машины и оборудование»**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АБСОРБЦИОННО-ДЕСОРБЦИОННАЯ
УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ НЕРЕГУЛЯРНЫХ НАСАДОК
(название темы)

Работа выполнена студентом группы
ДНРММ-21 Лоцманова Ольга Васильевна
(Фамилия Имя Отчество)

Руководитель ВКР
к.т.н., доцент Титова Любовь Михайловна
(ученая степень, ученое звание, Фамилия Имя Отчество)

Нормоконтролер _____ **к.т.н. Теличкина Э.Р.**
(ученая степень, ученое звание, Фамилия И.О., подпись)

Допущена к защите «24» _____ июня _____ 2021г.

Заведующий кафедрой _____ **Максименко Ю.А.**

Астрахань 2021



Федеральное агентство по рыболовству
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»
Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций сертифицирована DQS
по международному стандарту ISO 9001:2015

СОГЛАСОВАНО
Стратегический партнер (работодатель)

(предприятие, должность, ФИО)

(подпись)

«__» _____ 20__ г.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой Технологические
машины и оборудование

д.т.н., доцент Максименко Ю.А.

(ученая степень, ученое звание, ФИО)

(подпись)

«24» сентября 2019г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Студенту учебной группы _____ ДНРММ-21 Института нефти и газа

(институт/факультет)

Лоцманова Ольга Васильевна

(фамилия, имя, отчество - полностью)

ТЕМА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Экспериментальная абсорбционно-десорбционная установка для исследования
гидродинамических режимов работы нерегулярных насадок

Тема ВКР сформулирована в соответствии с запросом кафедры «Технологические
машины и оборудование»

(стратегический партнер, работодатель, подразделение (службы) АГТУ и т.д.)

Утверждена распоряжением директора института/декана факультета/директора
филиала (распоряжение от « 24 » сентября 2019г. № 15-16/1)

РУКОВОДИТЕЛЬ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Титова Любовь Михайловна, к.т.н., доцент

(фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание)

Утвержден распоряжением директора института/декана факультета/директора филиала
(распоряжение от « 28 » сентября 2018 г. № 16-313).

Представление выпускной
квалификационной работы на кафедру

« 22 » июня 2021 г.

Дата защиты

« 06 » июля 2021 г.

Целевая установка и исходные данные:

Разработать методику эксперимента и создать экспериментальную абсорбционно– десорбционную установку для возможности изучения основных характеристик нерегулярных насадочных тел разработать методику эксперимента и создать экспериментальную абсорбционно–десорбционную установку для возможности изучения основных характеристик нерегулярных насадочных тел

№ п/п	Перечень чертежей, подлежащих разработке	Формат, количество
-	-	-

Руководитель выпускной квалификационной работы: _____
(подпись)

№ п/п	Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, подлежащих разработке)	Консультанты
1	Аналитическая часть исследования	Титова Л.М.
2	Экспериментально-аналитическая часть исследования	Титова Л.М.
3	Моделирование исследуемого процесса	Титова Л.М.
4	Совершенствование производственных процессов и разработка рациональных конструкторских решений.	Титова Л.М..
5	Практическое применение результатов научных исследований и проектно-технических решений	Титова Л.М..
6	Расчеты технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта	Титова Л.М..

Руководитель выпускной квалификационной работы: _____
(подпись)

Основная рекомендуемая литература

1. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды: учебник для вузов — Изд. 3-е, стер. - Перепечатка со 2-го изд. 1979 г. — М.: Альянс, 2005. — 319с. 2. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природн Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип Формализации : М. «Наука», 1979, 394 с. 2. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. – 282 с. 3. Кафаров В.В. Основы массопередачи [Текст] : Системы газ - жидкость, пар - жидкость, жидкость - жидкость : [Учеб. пособие для хим.-технол. вузов]. - Москва : Высш. школа, 1962. - 655 с.

Задание принял к исполнению « 24 » сентября 20 19г.

Студент: _____
(подпись)

УТВЕРЖДАЮ

К заданию на выпускную
квалификационную
работу

Заведующий кафедрой

д.т.н. доцент Максименко Ю.А.

(ученая степень, ученое звание, ФИО, подпись)

« 24 » сентября 2019г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК
подготовки выпускной квалификационной работы

№ п/п	Разделы, темы и их содержание, графический материал	По плану		По факту		Отметка руководителя о выполнении
		Дата	Объем в %	Дата	Объем в %	
1	Аналитическая часть исследования	18.09.20	20	18.09.20	20	Выполнено
2	Экспериментально-аналитическая часть исследования	20.11.20	20	20.11.20	20	Выполнено
3	Моделирование исследуемого процесса	29.01.21	10	29.01.21	10	Выполнено
4	Совершенствование производственных процессов и разработка рациональных конструкторских решений.	18.03.21	20	18.03.21	20	Выполнено
3	Практическое применение результатов научных исследований и проектно-технических решений	04.06.21	20	04.06.21	20	Выполнено
4	Расчеты технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта	11.06.21	10	11.06.21	10	Выполнено

Руководитель выпускной квалификационной работы: _____

(подпись)

Студент: _____

(подпись)

С « 24 » сентября 2019г.

Содержание

Введение.....	6
1 Аналитическая часть исследования	9
1.1 Аналитический обзор научно-технической литературы, научных статей..	9
1.2 Сравнительный анализ конструкций нерегулярных насадок	13
1.3 Аналитический обзор объектов интеллектуальной собственности по теме магистерской диссертации	22
1.4 Вывод	27
2 Экспериментально-аналитическая часть исследований.....	29
2.1 Обоснование методики проведения экспериментальных исследований	29
2.2 Описание экспериментальной установки.....	44
2.3 Составление плана и протокола эксперимента.....	49
3 Моделирование результатов экспериментальных исследований.....	53
4 Совершенствование производственных процессов и разработка рациональных конструкторских решений.....	63
4.1. Разработана конструкция эксперимент установки.....	63
4.2 Разработка и обоснование новой конструкции нерегулярной насадки .	65
5 Практическое применение результатов научных исследований и проектно-технических решений	70
6 Расчеты технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта.	74
Заключение	82
Литература	83

Введение

Химическая промышленность на данный момент испытывает проблемы, обусловленные конъюнктурой рынка. Это нарастающая конкуренция в условиях мировой глобализации, вызывающей уменьшение времени конкурентно способного существования продукции на рынке, постоянное расширение ассортимента продукции [1] и непостоянность рынков в виду напряженной политической обстановки в мире [2-4]. На данном этапе отрасль химического машиностроения продолжает по инерции двигаться за счет эффекта масштаба, и новые перерабатывающие заводы строятся крупнотоннажными и оптимизированными [5,6]. Хотя обозначенные проблемы заставляют задумываться инженеров - конструкторов над поиском других вариантов.

Действующие заводы химической, нефтехимической и других отраслей промышленности вынуждены находить пути понижения энергоемкости процессов. Применяемые в настоящее время промышленные установки имеют значительные резервы как в направлении увеличения эффективности [7], производительности, так и в снижении энергопотребления.

Одним из перспективных направлений развития проектирования установок химической промышленности является использование высокопроизводительных контактных устройств, позволяющих усиливать протекающие процессы, снижая гидравлическое сопротивление устройства и энергозатраты на единицу продукции.

Для решения этих вопросов в тепломассообменных процессах достаточно давно и успешно применяются контактные устройства типа насадок. Современные насадочные колонны составляют серьезную конкуренцию тарельчатым аппаратам, превосходя последние по целому ряду характеристик, таких как эффективность, производительность, устойчивость работы. Насадочные колонны малогабаритны, имеют

большой диапазон устойчивой работы, маленькую задержку жидкости, несложны в обслуживании, но работают эффективно только при небольших скоростях пара (менее 1,5 м/с) и низких плотностях орошения (менее 10 - 15 м³/м²·ч) [8], т.е. в пленочном режиме.

Создание и внедрение нового поколения массообменных насадок для реализации режимов эмульгирования и значительного повышения эффективности и производительности промышленных объектов (ректификационные и абсорбционные установки) является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

Преобладающую долю применяющихся в промышленности контактных устройств составляют нерегулярные насадки. Их геометрическая форма и применяемые конструкционные материалы очень разнообразны. Основу научно-техническим разработкам в этом направлении дает теория процессов тепломассопереноса, гидродинамика, обоснование - экспериментальные исследования.

Цель магистерской диссертации – разработать методику эксперимента и создать экспериментальную абсорбционно–десорбционную установку для возможности изучения основных характеристик нерегулярных насадочных тел.

Задачи магистерской диссертации:

- Провести аналитический обзор научно-технической литературы и объектов интеллектуальной собственности по теме научного исследования, включающий в себя: анализ научно-технической литературы, научных статей, аналитический анализ объектов интеллектуальной собственности по теме научного исследования; сравнительный анализ конструкций нерегулярных насадок;
- Разработать методику эксперимента, провести описание экспериментальной установки.
- Провести моделирование исследуемого процесса.

- Используя результаты экспериментальных исследований, разработать и обосновать новую конструкцию нерегулярной насадки;
- Показать на конкретных примерах возможную область использования конструкции новой насадки в химической промышленности;
- Рассчитать технико - экономическую, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта.

1 Аналитическая часть исследования

В этом разделе проведен критический обзор разработки и внедрения различных конструкций контактных устройств насадочного типа, проведен анализ известных данных по эффективности, гидравлическому сопротивлению при внедрении в производство и их сравнение. Исследование проводилось с целью определения дальнейших направлений и перспектив развития технологии химических процессов в области насадочных контактных устройств колонных аппаратов тепло – и массообменна.

1.1 Аналитический обзор научно-технической литературы, научных статей

Насадочные колонные аппараты широко используются для проведения тепло- и массообменных процессов химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также в криогенной, пищевой и др. отраслях. Этот тип колонн чаще всего используют для увеличения площади взаимодействия газовой и жидкой фаз, что приводит к сокращению габаритных размеров химико-технологического оборудования для проведения процессов абсорбции, перегонки и ректификации.

Насадочные контактные устройства по конструкции разделяют на нерегулярные – насыпные насадки (Random Packing), и регулярные насадки (Structured Packing). К насыпным насадкам относятся насадки, загружаемые в контактный аппарат «в навал» [9], т.е. самопроизвольно распределяются внутри аппарата, образуя хаотичную структуру пустот. Регулярные насадки представляют собой готовые сегменты, установка которых в аппарат формирует упорядоченную структуру каналов длядвигающихся потоков.

В качестве насыпной насадки можно использовать кусковой материал естественного происхождения (рисунок 1.1), например, кусковой кварц, кокс и адгезит. Наиболее популярными специально изготавливаемыми нерегулярными насадками являются кольца Рашига – кольцевая насадка из керамики, фарфора или стали, пластмассы. Поверхность контакта такой насадки представляет собой цилиндрическую поверхность, высота цилиндра равна их наружному диаметру. Позднее появились другие модификации кольцевой насадки - кольца Бялецкого, кольца Ралу, кольца Палля, кольца Hiflow, НУ-РАК и др. [9]. Усложнение конструкции наблюдается в направлении увеличения удельной поверхности за счет образования внутренних перегородок и уменьшения застойных зон жидкой фазы за счет перфорации элементов насадки.

Торовые поверхности контакта также достаточно часто используются при конструировании контактных устройств. Такие насадки называют седлообразными. Простейшая седлообразная насадка представляет собой четверть тонкостенного тора. Такая конструкция обеспечивает достаточно плотную самопроизвольную укладку насадки в колонне и равномерное стекание жидкости по значительной поверхности. Для увеличения поверхности массопередачи в элементах насадки выполняют перфорацию, дополнительно отогнутые лепестки, выдавленные дуги и т.д. К седлообразным насадкам относятся Supersaddle, Hiflowsaddle, Intaloxsaddle, Nutterring, RMSRmetal, Interpack, Metalconjugated.

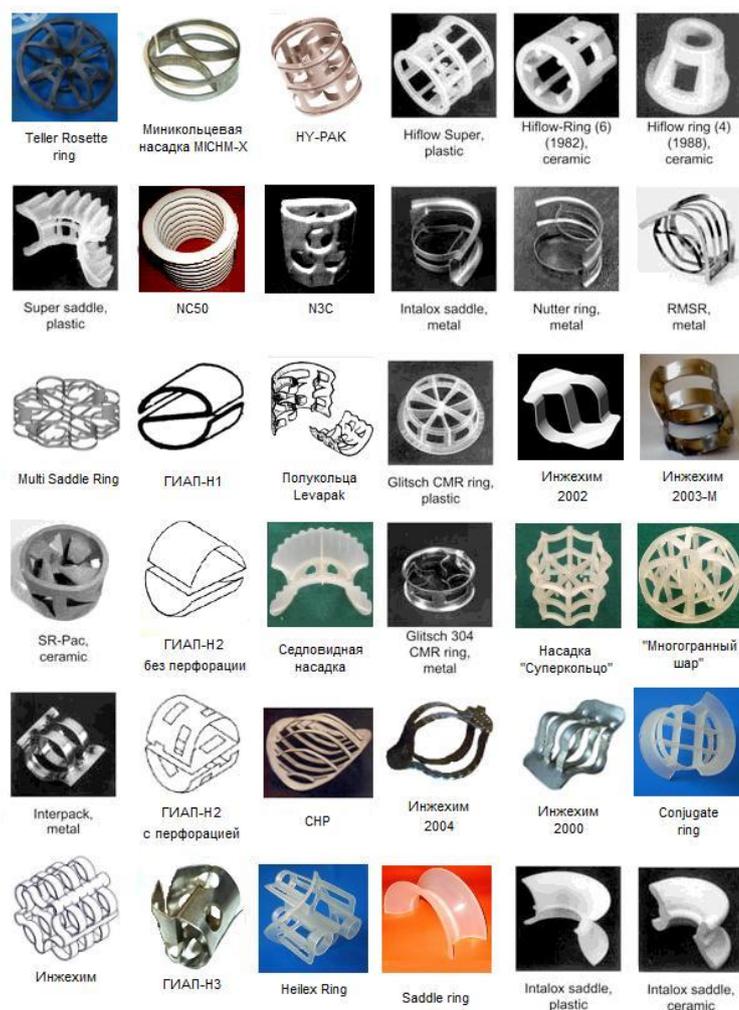


Рисунок 1.1 – Некоторые насыпные насадки

Структурированные насадки также достаточно давно используются в промышленности, первой из которых была деревянная хордовая насадка. Эта насадка (рисунок 1.2) состоит из поставленных на ребро досок, скрепленных между собой посредством реек и образующих пространственно решетчатую структуру, появились позднее, чем первые насыпные насадки. Плоскопараллельная насадка представляет собой вертикально устанавливаемые в контактный аппарат с небольшим зазором друг относительно друга металлические листы. Хордовая насадка представляет собой доски, устанавливаемые в аппарате вертикально, но, как правило в несколько ярусов, каждый из которых повернут на угол, относительно соседних по высоте ярусов [10].

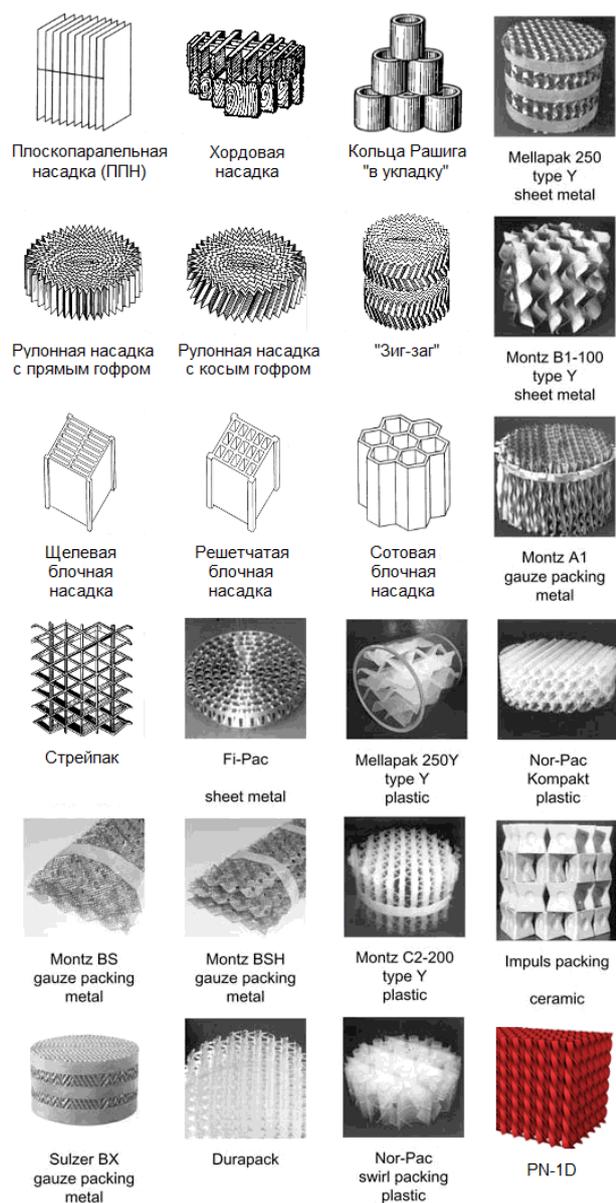


Рисунок 1.2 – Некоторые регулярные насадки

Для повышения интенсивности теплообмена в газожидкостных контактных аппаратах химической промышленности необходимо увеличить удельную площадь насадок. Так появились регулярные насадки с гофрированной поверхностью и разным рифлением.

Для большинства регулярных насадок поверхностью теплообмена является поверхность пленки жидкости, а сама насадка представляет собой единые блоки.

На заводах химической промышленности насадочные колонны загружают в основном кольцами, изготовленными из керамики. Эти кольца

обладают высокой стойкостью к воздействию кислот, кислых газов и других химически агрессивных веществ.

1.2 Сравнительный анализ конструкций нерегулярных насадок

Как уже отмечалось выше, насадочные контактные устройства ао конструкции разделяют на нерегулярные – насыпные насадки (Random Packing) и регулярные насадки (Structured Packing). Ряд теоретических и экспериментальных исследований подтверждают, что гидродинамические и массообменные характеристики регулярных и нерегулярных насадок сильно отличаются друг от друга [11]. Нерегулярная насадка исторически рекомендуется к использованию при работе с высоким давлением, т.к. обеспечивает более низкий перепад давления при высокой эффективности [12], а также активно используется для сильнозагрязненных и коррозионноактивных сред, т.к. легко подвергается замене. Например, случайное заполнение насадки используется для удаления углекислого газа и сероводорода из природного газа при абсорбции пенообразующими растворителями (ДЭА, МДЭА, МЭА) также за счет снижения гидравлического сопротивления слоя, снижения капитальных и эксплуатационных затрат при повышенном гидравлическом воздействии пены. Процесс дегидратации при низкотемпературной ректификации пиролизных газов ответственный и наиболее энергоемкий, из-за высокого расхода энергии на производство низкотемпературных газов и значительного давления в колонне (3-3, 5 МПа). Низкое поверхностное натяжение жидкости и незначительная разница в плотностях фаз в таких условиях требуют обеспечения хорошего контакта между жидкой и газовой фазой, поэтому здесь предпочтительна нерегулярная насадка [13]. По данным [14], в колоннах малого диаметра и колоннах из-за относительно большого числа изгибов газовых потоков и перепада

давления увеличивается для регулярных насадок. Согласно исследованиям [15], противоположный эффект наблюдается при использовании нерегулярной насадки.

Большинство насадок, используемых в промышленности, нерегулярные. Конфигурация и материалы, из которых они изготовлены, претерпели значительные изменения с развитием технологий химического машиностроения и химической промышленности. Теоретическую основу для этого развития дала теория процессов теплопереноса и гидродинамика.

Известно, что нестационарный массоперенос удовлетворительно описывается в моделях обновления поверхности (модель Хигби и ее развития в моделях Данкверта и Кишиневского). Согласно им, скорость массопереноса составляет средним временем пребывания Θ небольших объемов жидкости на поверхности раздела фаз, которые двигаются к поверхности раздела с газовой фазой и возвращаются в жидкость за счет турбулентного движения самой жидкой фазы. При этом теоретически доказано, что скорость массопереноса обратно пропорциональна корню из значения Θ . Теоретические положения моделей обновления подтверждены в аппаратах со значительной турбулизацией потока. Для насадочных колонн за величину Θ принимают время, в течение которого жидкость проходит путь, равный размеру одного элемента насадки [16].

Таким образом, чем меньше элемент, по которому спокойно движется пленка жидкости, тем выше будет скорость массопереноса. Это теоретически обоснованное утверждение, также подтвержденное рядом ученых [17], определяет одно из направлений в разработке конструкций насадочных элементов колонн – стремление к уменьшению длины элемента, по которому стекает пленка жидкости, сохраняя при этом эффективную площадь контакта фаз (например, за счет перфорации в стенках насадки, изготовления ее из пластин небольшой ширины и др.)

В то же время сложность конструкции насадки не всегда увеличивает эффективную площадь контакта фаз, и в литературе имеются весьма противоречивые данные для разных типов насадок, что в первую очередь связано с различиями в методах экспериментального определения этой характеристики. В [18] была проведена сравнительная характеристика методов измерения эффективной площади (метод Ван Кревелена, Шульмана и Данквертса с использованием псевдо-первой химической реакции). Показано, что метод Шульмана и Данквертса пригоден для неупорядоченных слоев насадочных элементов, работающих в условиях пленочного стока жидкости с возможным образованием крупных капель и струй), но последний менее трудоемок и результирующий коэффициент массопереноса не зависит от гидродинамики газовой и жидкой фаз. Исследователи используют различные варианты химических реакций в методе Данкверта С.

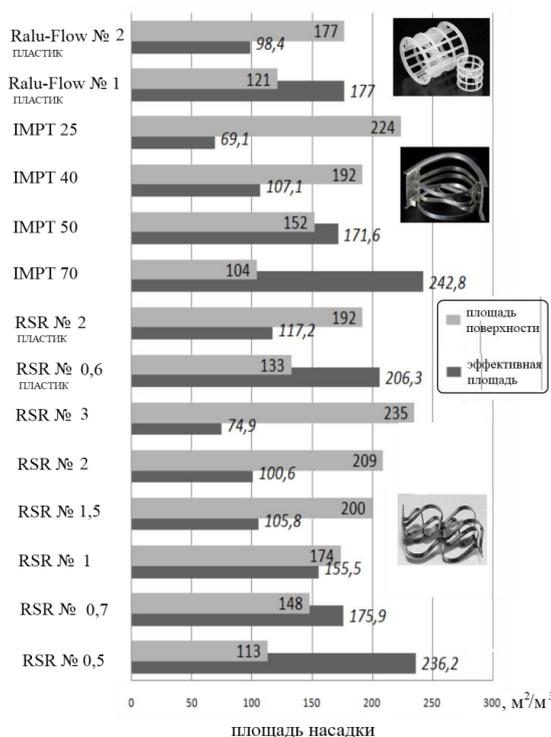


Рисунок 1.3 – Сравнение площади поверхности различных насадок и их эффективной площади (по данным [19], эффективная площадь определена в процессе абсорбции CO₂ из воздуха водным раствором NaOH при расходе жидкой фазы 80 м³/м²·ч)

В работе [19] представлены результаты исследований эффективной площади трех типов насадок на сопоставимых значениях диапазона тока и фазовой скорости в колонне по методу Данкверта при абсорбции CO_2 из воздуха водным раствором гидроксида натрия. Было установлено, что желательнее выполнять насадку в виде узких изогнутых полос (ламелей) без перерыва (насадка называется Raschig Super Ring, RSR, Raschig GmbH, Германия) [20], поскольку такая форма обеспечивает хорошую смачиваемость с обеих сторон жидкости. Наличие конструкции насадки на торце, выступающих пластин, изогнутых под прямым углом к главной оси насадки (насадка IMPT, Raschig GmbH, Германия на рисунке 1.3, конструкция которого равна I-RingTM, Sulzer Management Ltd., Швейцария), усложняя конструкцию, увеличивает удельную площадь и гидродинамическое сопротивление, но эффективная площадь не увеличивается (при той же удельной площади поверхности эффективная площадь меньше на 15%, чем у супер колец Рашига RSR). Моделирование гидродинамических процессов в насадках при проливе воды показало [21], что изогнутые пластины плохо смачиваются и неэффективно участвуют в процессе массообмена. Равномерное смачивание жидкостью с повторяющимися точками соединения металлических полос, изогнутых вдоль синусоиды, способствует турбулизации пленки жидкости в зонах пересечения, и это является еще одной причиной повышения эффективности массопередачи колец супер Рашига. Эффективность супер колец Рашига была экспериментально подтверждена не только в процессах ректификации, абсорбции и десорбции [11] (рисунок 1.4), но и в процессах жидкостной экстракции [22]. В качестве сравнительного исследования были использованы кольца с Палля Pall-Ring, и экспериментально было показано, что супер-кольца Рашига выдерживают более высокие нагрузки на 9-10% по сравнению с кольцами с поддонами и, следовательно, имеют более высокую площадь массопереноса при одинаковом размере капель.

Кроме того, исследования массовой передачи, проведенные с использованием теста системы толуол / ацетон / вода, показывают, что высота единиц переноса (сокращенно рус. WEB, английский NTU) для Raschig super Ring выше, чем для сопоставимого кольца палля. Разница ВЕП для слоев с этими насадками составляет в среднем около 24 см. Косвенным и более точным, основываясь на экспериментальных данных, эффективность передачи массы также может быть рассчитана по значению ВЭТС (англ. NETP) – высота эквивалентной теоретической ступени (рисунок 1.4). Из рисунка 1.4, б видно, что при слишком большой подаче воздуха в супер-кольца Рашига эффективность расстояния увеличивается с увеличением нагрузки, но после прохождения минимального значения ВЭТС — снижается.

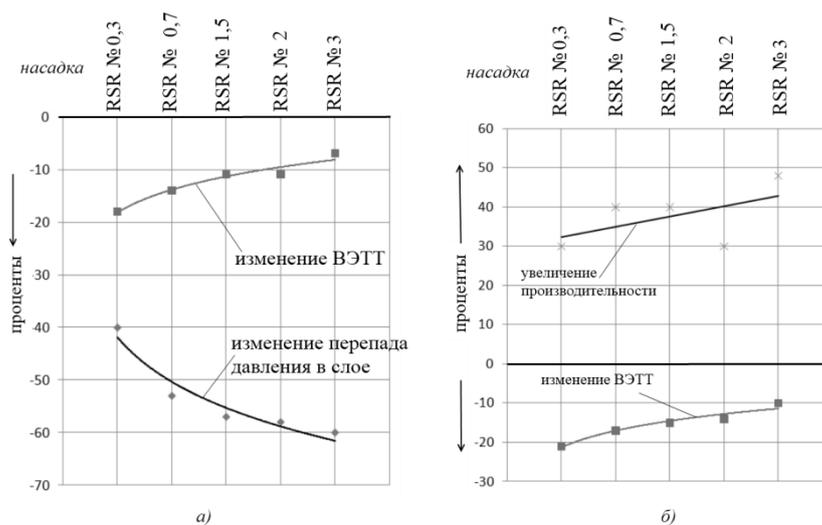


Рисунок 1.4 – Сравнение показателей работы металлических супер колец Рашига и колец Палля (система аммиак – воздух – вода, 1 бар) [19]:

- а) снижение перепада давления и ВЭТТ, % при одинаковой производительности по жидкой фазе;
 б) – увеличение производительности и снижение ВЭТТ, % при одинаковом давлении

Нерегулярная насадка super Raschig используется с 2000-х годов и в промышленных масштабах в процессах экстракции бутадиена с использованием растворителя N-метилпирролидона (технология BASF, разработанная Lurgi Oel-Gas - Chemie), в абсорбционной колонне

Бенфилда для поглощения CO_2 на установке по производству окиси этилена (EC-Dormagen, Германия), в установках по абсорбции формальдегида (BASF в Людвигсхафене, Германия) [11]. Хорошие результаты показывает использование такой насадки в процессах, сопровождающихся реакциями полимеризации, которые могут привести к образованию трудноудаляемого остатка на поверхности насадки (например, параформальдегид в формальдегидной технологии, толуол-диизоцианат). Благодаря образованию непрерывной пленки жидкости обеспечивается непрерывная очистка поверхности насадки, а небольшое удержание жидкости по сравнению с другими геометриями нерегулярных насадок гарантирует отсутствие застойных зон жидкости. Кроме того, уменьшение размера капель в геометрии супер-кольца Рашига предотвращает вспенивание.

Нерегулярные насадки VFF-Twin-Pak, Vereinigte Füllkörper-Fabriken, GMBH & CO, KG [15], имеют аналогичную конструкцию с супер-кольцами Рашига. Их геометрия соответствует теоретическим выводам, полученным из моделей массопереноса обновления поверхности.

Эти положения послужили основой для разработки насадок, работающих при очень низких нагрузках жидкости (например, при равновесном поглощении высоко растворимого газа низкой начальной концентрации) без рециркуляции жидкости в качестве абсорбента. Препятствиями для конструирования насадки из отдельных горизонтальных полос являются, конечно, сложность и высокая стоимость. При изготовлении такой насадки, чтобы избежать этих недостатков, можно использовать технологию листовой штамповки из спеченного ПВХ [23].

Использование пластика вместо металла и керамики с точки зрения производства и стоимости, конечно, предпочтительнее, если позволяют условия работы колонны (температура и давление). Наличие многих видов термопластичных материалов обеспечивает конструктору широкий спектр химических и термических свойств.

Пластиковые насадки не так громоздки, как их керамические и металлические аналоги, и, следовательно, обеспечивают большую производительность и меньший перепад давления. Свойства термопластов позволяют контролировать из них контактные устройства самых разнообразных конструкций с особым рельефом поверхности, например, игольчатая форма насадки из VFFIgel, сетчатая сферическая поверхность-VFF-Netball [23]). Но с технической точки зрения пластмассы - это материалы, которые постоянно деформируются при приложении силы, даже при нормальных температурах. Скорость, с которой пластик будет деформироваться, зависит от величины напряжения, которую должен нести слой насадки, от собственного веса и веса жидкости, температуры и времени. Сжатие на дне насыпного слоя уменьшает долю пустот и может привести к увеличению перепада давления и захлебыванию колонны.

Пластиковые насадки чаще всего используются в процессах абсорбции CO_2 , SO_2 , HCl , и HF , Cl_2 , диоксида хлора, сероводорода и меркаптана, в системах очистки газов от выбросов дыма, летучих органических соединений и для дезодорации; в системах очистки воды для очистки сточных вод, подготовки питьевой воды, технологической системы охлаждения воды

Для возможности использования пластиковых контактных элементов в высоких колоннах кольцевые насадки выполняют высотой меньше или близкой к диаметру элемента (например, CASCADE MINI-RINGS, BETA RING, Компания Koch – Glitsch [24]). В слоях с такими насадками, уложенными насыпью, значительная часть колец лежит почти с вертикальными осями, поскольку смачивание жидкостью и массопередача происходит как на внутренней, так и на внешней поверхности, т. е. такая геометрия обеспечивает более эффективное использование поверхности насадки. При предпочтительном направлении цилиндрической оси в вертикальном положении наибольшее отверстие в направлении потока

газа, что приводит к более низкому давлению и большей емкости, а также повышает механическую прочность насыпного слоя.

Использование пластиковых насадок также предпочтительно в системах биологических очистных сточных вод, поскольку термопласты полностью стабилизированы к ультрафиолетовому излучению и химически инертны, нетоксичны для микроорганизмов и невосприимчивы к грибкам или бактериологическому разложению в диапазоне температур 0-90°C.

Нерегулярная пластиковая насадка ETAPAK, Koch-Glitsch [24] широко используется в одно - или двухступенчатых высокоскоростных фильтрах, черновых фильтров первой ступени водоочистки, где существующая установка перегружена или недостаточно эффективна, установках нитрификации коммунальных стоков и в рыбоводстве.

В работе[18] было проведено исследование металлических и пластиковых насадок одинакового размера, и было показано, что эффективная площадь пластикового нерегулярного насадки на 15% меньше, чем для аналогичного металла, что незначительно. Материал влияет на смачиваемость насадки жидкостью, и эффективная площадь больше в случае больших насадочных элементов, что касается мелких элементов насадки влияние смачиваемости материала жидкостью более выражено.

С кольцевыми насадками успешно конкурируют в настоящее время седловидные насадки, имеющие изогнутую поверхность в виде тора или дуги окружности. Наиболее известные из них - седла Инталокс (INTALOX Saddle) и Берля (Berl-Saddle). Седловидная насадка Берля имеет более округлую форму, чем седла Intalox, и большую площадь поверхности массообмена. Основным преимуществом фасонных насадок, например седел, является большая удельная поверхность без разрывов при стекании пленки жидкости, что обеспечивает более равномерное распределение жидкости и удержание ее на поверхности насадки. Такую конструкцию

возможно использовать для равномерного распределения жидкой фазы по объему колонны в комбинации с насадками кольцевого типа. На практике в процессе эксплуатации происходит прилегание элементов насадки друг с другом, обрастание химическими отложениями (осадки, слой полимеризованных химических соединений), что снижает ожидаемую эффективность массопереноса и увеличивает гидравлическое сопротивление. Для исключения этих эффектов, конструкции седловидных насадок претерпела изменения. Например, седловидная насадка Super INTALOX имеет зубчатые края для обеспечения большей контактной поверхности и фиксации наадочного элемента в слое, а также для уменьшения оседания во время работы. Наличие перфорации (седла Super Saddle Ring, IMTP) облегчает движение газовой фазы по слою в объеме колонны, но повышает стоимость изготовления.

Сферические насадки до недавнего времени редко использовались из-за сложности производства металла и расхода материалов. Но сферическая форма обеспечивает более равномерное распределение жидкости даже при низкой плотности орошения, более высокую плотность упаковки. При заполнении слоя насадки в колонный аппарат, из-за его круглой формы, равномерная и аккуратная укладка происходит самопроизвольно. Некоторые полые шары имеют минимальную поверхность контакта друг с другом и со стенками колонного аппарата, так как контакт между шарообразными телами возможен только в точке соприкосновения. Полые сферы, изготовленные из полосок полимерного материала (например, нерегулярная насадка, Top - Pak, FVV, Германия), обладают стабильной восприимчивостью к загрязнению и обеспечивают свободный выброс из объема колонны в ее очень загрязненном состоянии, что связано с тем, что значительная доля свободного объема такой насадки-98%. Преимуществом является низкий перепад давления в слое насадки.

1.3 Аналитический обзор объектов интеллектуальной собственности по теме магистерской диссертации

Проведен анализ объектов интеллектуальной собственности, результаты которого сведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Патенты на массообменное оборудование и контактные насадочные элементы.

№	Номер патента, страна, дата приоритета	Название изобретения, полезной модели, авторы	Ограничительные признаки формулы	Отличительные признаки формулы	Положительный эффект
	1	2	3	4	5
1	Пат. на изобретение RU 2 443 467 С2 [25]	Элементы нерегулярной насадки и содержащая их колонна НИЕВОУДТ Изак	Элемент из множества отдельных полос и выполнены синусоидально, имеющие вид плоских внешних перемычек (патент США №5882772).	Пара боково расположенных длинных изогнутых боковых элементов, которые вместе образуют изогнутую продольную ось, расположенную между ними; множество противоположно проходящих внутренних и внешних изогнутых реберных элементов, проходящих от боковых элементов и между ними, чтобы совместно образовывать внутренний объем между ними.	Создайте седловидные элементы, которые имеют равномерно распределенный свободный объем, принимая при этом различное направление вращения относительно направления потока.

2	<p>Пат.на изобретение RU 2 289 473 C2 [26]</p>	<p>Спиральная насадка для теплообменных и совмещенных с ними реакционных процессов Богатырёв В.Ф.</p>	<p>Труба со спиральной насадкой из спиралей</p>	<p>Устанавливается в виде последовательных рядов спиралей в пакете параллельно друг другу и потому предпочтительно плотной схеме размещения (равносторонним треугольником), при этом соседние и последовательные спирали могут быть соосными или несоосными.</p>	<p>Обеспечение эффективного взаимодействия фаз в трех возможных относительных движениях: прямоточном, противоточном и псевдооживления</p>
3	<p>Пат.на полезную модель RU 196 444 U1 [27]</p>	<p>Насадка для тепло- и массообменных процессов Голованчиков А.Б. (RU), Прохоренко Н.А. (RU), Чёрикова К. В. (RU), Шибитова Н.В. (RU), Залипаева О. А. (RU), Кочарян Р. С. (RU)</p>	<p>Цилиндрические внешнее и внутреннее тела вращения, соединённые двумя пружинами, уложены упорядоченно в ряды, а внутреннее тело вращения соединено с наружным кольцом</p>	<p>Внутреннее тело вращения состоит из перфорированной цилиндрической части с лепестками, отогнутыми внутрь.</p>	<p>Увеличение производительности</p>

4	Пат.на полезную модель RU 195 485 U1 18.07.2019 [28]	Насадка для массообменных процессов	Два тела вращения цилиндрической формы, соединенные проволочной пружиной	Полый цилиндр в плотную облегает витую проволочную пружину, принимая форму гофры, и выполнен из пенополимерного эластичного материала.	Увеличение производительности массообменных процессов
5	Авт. свидетельство на изобретение 572284 28.04.1975 [29]	Насадка для аппаратов с псевдоожиженным трехфазным слоем Алекперов Г.З., Лернер Г.Я.	Шары, диаметр которых больше диаметра отверстий в тарелке	Шары насадки выполнены со сквозными каналами	Увеличение производительности аппаратов с псевдоожиженныморошаемым слоем насадки и повышение по эффективности съема продукции с единицы объема аппарата
6	Авт. свидетельство на изобретение SU1031483 А 29.12.1981 [30]	Насадка для массообменных аппаратов с псевдоожиженным слоем Миронов В.П., Фрякин Н.В., Чаусов М.В.	Насадка выполнена в виде шара со сквозными каналами	Снабжена эжектором и стабилизатором положения, радиальными каналами, которые сходятся в месте сужения эжектора	Интенсификация процесса массообмена за счет развитой поверхности контакта фаз, увеличения частоты ее смены и принудительного отсоса пограничной пленки жидкости с поверхности насадки

Как видно из анализа таблицы 1.1 в столбцах 3-5 выявилось влияние изменяемых элементов конструкций (признаков) рассматриваемых контактных элементов нерегулярной насыпной насадки на положительный эффект (повышение производительности, эффективности, интенсификация тепломассообменных процессов, увеличение турбулизации потоков и др.). Это позволяет выявить наиболее совершенные аналоги и прототипы для элементов насадки насыпного типа,

которые кратко описаны на основе описания изобретения (полезной модели) с рисунками устройств. В дальнейшем, изменив конструкцию, можно будет получить новое техническое решение на уровне изобретения, полезной модели.

Одним из лучших решений является патент «Насадка для аппаратов с псевдооживленным трехфазным слоем» (572284), но и у него имеются недостатки. Недостатком насадки является недостаточно развитая поверхность контакта фаз и невозможность принудительного отсоса пограничной пленки жидкости.

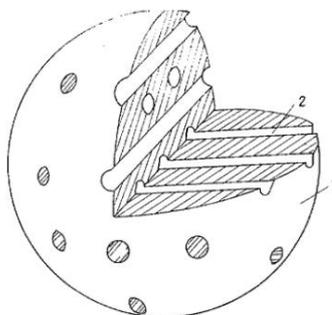


Рисунок 1.5 – Общий вид насадки: 1 – шар, 2 – каналы.

Насадка (рисунок 1.5) имеет сферическую форму с каналами, которые заполняются жидкой фазой. При увеличении расхода газовой фазы через слой элементы насадки переходят во взвешенное состояние, начинают активно двигаться в пределах взвешенного слоя и создают активную гидродинамическую обстановку внутри аппарата. Интенсивная турбулизация жидкостного потока обусловлена также выбросом жидкости из каналов. При этих условиях поток газа проходит по каналам, образуя вихри при отрыве от поверхности шара. Таким образом, в момент выноса шаров в верхнюю часть межтарельчатого пространства интенсивность массообмена не падает. С такими шарами можно проводить массообменные процессы под повышенным давлением в отличие от полых шаров, использование которых в этих процессах невозможно.

Предложенная конструкция насадки позволяет увеличить производительность и поверхность контакта фаз.

Более эффективным представляется решение «Насадка для массообменных аппаратов с псевдооживленным слоем» (SU 1031483 А). К недостаткам можно отнести малую поверхность контакта.

Насадка (рисунок 1.6) работает также в гидродинамическом режиме псевдооживления. Стабильно фиксированное состояние в этом случае обеспечивается за счет стабилизатора. Жидкая фаза движется в пленочном режиме по поверхности насадки, газовая фаза при этом проходит через эжектор и подсасывает жидкую в каналы. Увеличение площади контакта двух фаз происходит за счет разбрасывания капель эжектором. Газожидкостной поток активно турбулизируется, обеспечивая многократное обновление поверхности контакта за счет прососа жидкой фазы по каналам, тем самым увеличивая эффективную поверхность контакта фаз и интенсифицируя процесс переноса.

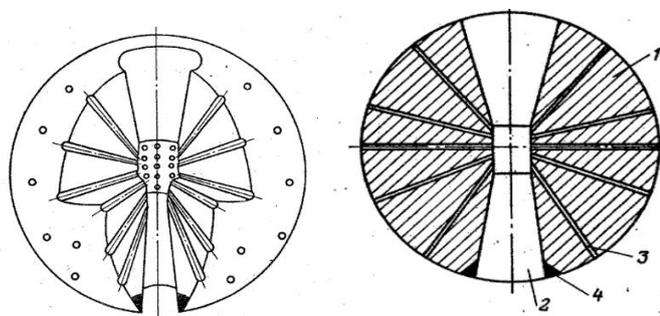


Рисунок 1.6 - Насадка для массообменных аппаратов с псевдооживленным слоем :
1 – шар, 2 - эжектор, 3 - радиальный клапан, 4 – стабилизатор.

В качестве общего недостатка описанных конструкций насадочных тел можно отметить невозможность их применения для работы с загрязненными средами, т.к. в этом случае каналы будут забиваться, что приведет к нарушению гидродинамической обстановки в аппарате и снижению эффективности тепломассообменного процесса. Насадки описанных конструкций могут работать только в узких пределах изменения нагрузки по газовой фазе, что обусловлено использованием

режима псевдооживления для эффективной их работы. Изготовление элементов насадочных тел из металла трудоемко и значительно увеличивает стоимость конструкции в целом.

1.4 Вывод

Проведенный критический обзор современных конструкций насадок показал, что каждое новое инженерное решение обеспечивает незначительное снижение гидравлического сопротивления, данные об эффективности конструкции насадки трудно сопоставимы из-за различных методов ее определения, разрозненны и противоречивы, хотя можно выделить несколько трендовых линий при проектировании контактных узлов колонных аппаратов в химической промышленности.

Во-первых, усложнение геометрии насадки позволяет добиться более равномерного распределения жидкой фазы в объеме устройства и повысить эффективность массопереноса за счет длительного контакта с жидкостью и газом, стекающими по поверхности насадки, многократного обновления контакта с поверхностью в широком диапазоне нагрузок. При этом сложная геометрическая конфигурация должна отвечать технологическим требованиям, таким как низкая материалоемкость, низкое гидравлическое сопротивление, а также в эксплуатации, простота замены и очистки, возможность работы на различных плотностях орошения (здесь трудности заключаются как в минимальных, так и значительные величины этого показателя), а также со средами, склонными к образованию трудноудаляемых остатков на поверхности насадки.

Большая часть работ в России и за рубежом направлены на создание конструкций со значительной эффективной площадью контакта фаз в широком диапазоне нагрузок и одновременным снижением гидравлического сопротивления слоя за счет увеличения доли свободного объема в контактном элементе (97-99%).

В то же время стремление повысить производительность и улучшить пропускную способность всей поверхности элемента за счет увеличения доли свободного объема приводит к уменьшению контакта фаз с поверхностью. При режим работы всех известных нерегулярных насадок является пленочным, что теоретически оправдано, но не должно ограничивать инженера-конструктора.

Во-вторых, поиск и использование новых конструкционных материалов обеспечивает, с одной стороны, наличие производственных сложных пространственных форм, а с другой-равномерность распределения жидкой фазы за счет повышенных адгезионных свойств поверхности насадки. В настоящее время задача по поиску таких новых конструктивных решений актуальна, так как используемый термопласты имеют недостатки (узкая рабочая температура, низкий удельный вес, низкая механическая прочность и др.).

Взаимодействующие фазы в массообменных аппаратах могут находиться в различных агрегатных состояниях и иметь определенный характер движения. В химической промышленности чаще используются противоточные колонные аппараты с системой жидкость – газ (пар). Производительность такого аппарата при атмосферном давлении зависит прямо пропорционально скорости газовой фазы. Увеличение скорости приводит к увеличению площади контакта фаз, что интенсифицирует процесс и уменьшает высоту колонны (необходимый объем насадки). С другой стороны, гидравлическое сопротивление устройства движению газовой фазы увеличивается, и растет расход энергии на проведение процесса. Таким образом, для того, чтобы говорить о возможной экономической эффективности данной конструкции насадки, необходимо учитывать как изменение эффективности процесса, так и падение давления в насадке. Решение об эффективности новой конструкции насадочных тел будет приниматься с учетом обоих этих показателей, исходя из результатов экспериментальных исследований.

2 Экспериментально-аналитическая часть исследований

Для обоснования эффективности конструкции нерегулярной насадки необходимо обосновать целевую функцию, по значению которой возможно будет сравнение эффективности. Кроме того, необходимо выбрать метод определения коэффициентов массопереноса и эффективных межфазных поверхностей в насадочных абсорбционных колоннах, смоделировать условия близкие к промышленным и правильно подобрать параметры, чтобы облегчить масштабный переход.

2.1 Обоснование методики проведения экспериментальных исследований

Для проектирования и анализа колонн с конкретными контактными устройствами необходимы надежные данные о кинетике массопереноса. Кинетику массопереноса учитывают различными методами (с помощью коэффициентов массопередачи, объемных коэффициентов массопередачи, косвенно – через число единиц переноса, высоту эквивалентную теоретической ступени контакта). Коэффициент массопереноса является коэффициентом пропорциональности в основном уравнении массопередачи, связывающем в общем случае количество перенесенной массы с площадью поверхности контакта и временем процесса. В случае стационарного массообмена:

$$\varphi = K_y(y - y^*) = K_x(x^* - x) \quad (2.1)$$

где φ — скорость переноса массы на единицу поверхности ($\text{моль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$);
 K_G — коэффициент массопередачи при выражении движущей силы через концентрацию газовой фазы, K_L — коэффициент массопередачи при выражении движущей силы через концентрацию жидкости ($\text{моль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$);
 x^*, x — равновесная и рабочая концентрации растворенного вещества в

жидкой фазе; y^* , y — равновесная и рабочая концентрации растворенного вещества в газовой фазе.

Коэффициенты массопереноса отдельных фаз (K_y — для газа и K_x — для жидкости) характеризуют скорость массопереноса в соответствующих фазах и, следовательно, имеют разные значения.

Величиной, обратной коэффициенту массопереноса, является коэффициент сопротивления массопередаче. Определить его можно, приняв тот или иной упрощенный механизм массопередачи и модель массопереноса.

В процессе массопередачи следует различать два случая:

1. перенос вещества осуществляется из потока газа (пара, жидкости) в поток жидкости (массопередача в системе жидкость-жидкость, газ (пар) — жидкость);

2. перенос вещества осуществляется из твердого тела, содержащего внутри пор или капилляров распределенное вещество, в поток жидкости/ газа/ пара) (массопередача в системе жидкость — твердое тело).

Основной вопрос массопередачи стоит в том, что происходит на межфазной поверхности. Ввиду сложности одновременно протекающих явлений не разработана строгая теория массопередачи на границе фаз, имеющей стохастико-детерминированную природу, потому прибегают к составлению упрощенных моделей.

Основными из них являются: пленочная модель массопередачи (Льюис, Уитмен); модель пограничного диффузионного слоя; модель проникания и обновления поверхности (модель Хигби, Данквертса, Кишиневского); модель массопередачи с учетом явлений адсорбции.

Пленочная модель предусматривает наличие двухдиффузионных слоев, примыкающих к границе раздела фаз. Толщина этих слоев зависит от гидродинамической обстановки в фазах. Основные положения пленочной модели следующие:

1. Ядра потоков фаз полностью перемешаны, поэтому градиенты концентраций в них равны нулю. Переход вещества между турбулентным ядром и диффузионным слоем через границу раздела фаз является единственным кинетическим фактором, определяющим скорость процесса переноса в данной фазе. Разность концентраций компонентов на границе диффузионный слой – турбулентное ядро является единственной движущей силой процесса в данной фазе;

2. На границе раздела фаз наблюдается термодинамическое равновесие и достигается стационарные условия массообмена. Градиенты концентраций в пределах диффузионных слоев принимаются постоянными.

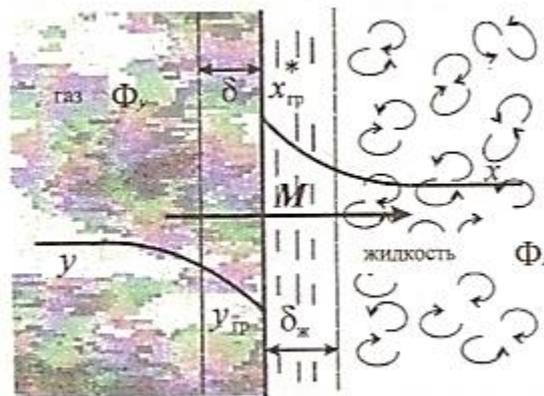


Рисунок 2.1 – Схема массопередачи согласно пленочной теории

Согласно этой модели количество вещества dM , продиффундировавшего через единицу поверхности dF в единицу времени $d\tau$, пропорционально разности концентраций в ядре c и на грани $c_{гр}$ и обратно пропорционально толщине пограничного слоя δ , сопротивление которого молекулярной диффузии эквивалентно сопротивлению переносу, обусловленному в действительности конвективным переносом:

$$\frac{dM}{dF d\tau} = \frac{D}{\delta} (c - c_{гр}) \quad (2.2)$$

Согласно пленочной модели общее сопротивление массообмену между двумя фазами является суммой сопротивлений отдельных фаз,

сопротивлением поверхности раздела пренебрегают. Сопротивление массопередачи складывается из сопротивлений процессам массоотдачи из ядра потока фазы к поверхности раздела (закон аддитивности фазовых сопротивлений - общее диффузионное сопротивление равно сумме диффузионных сопротивлений в фазах):

$$R = \frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x} \quad (2.3)$$

где m – коэффициент распределения вещества между фазами:

$$y = mx \quad (2.4)$$

Определение коэффициента каждой фазы требует измерений граничной и объемной концентрации распределяемого вещества. Однако современные экспериментальные методы не позволяют проводить измерения концентрации на границе фаз. Таким образом, сопротивление в каждой фазе может быть определено только в условиях, когда не учитывается удельное сопротивление одной из фаз. Когда одно из диффузионных сопротивлений преобладает, то коэффициент массопередачи становится равным соответствующему коэффициенту массоотдачи. В этом случае вместо основного уравнения массопередачи для описания процесса применяется уравнение массоотдачи.

Таблица 2.1 – применение уравнения массоотдачи вместо основного уравнения массопередачи

Процесс	Коэффициент массопередачи	Уравнение массотдачи
Абсорбция при хорошей растворимости газа	$K_y = \beta_y$	$M = \beta_y \Delta y_{cp} F$
Абсорбция при слабой растворимости газа	$K_x = \beta_x$	$M = \beta_x \Delta x_{cp} F$
Первый период конвективной сушки	$K_d = \beta_d$	$W = \beta_d \Delta d_{cp} F \tau$
Выщелачивание	$K_y = \beta_y$	$dM = \beta_y (y^* - y) F \tau$
Адсорбция	$K_y = \beta_y$	$M = \beta_y \Delta y_{cp} F \tau$
Кристаллизация (рост кристаллов)	$K_y = \beta_y$	$dM = \beta_y (y^* - y) F d \tau$

Наиболее приемлемым процессом для изучения эффективности насадки в колонном аппарате является процесс абсорбции и согласно выше

изложенному в исследуемой системе необходимо подбирать абсорбтив либо с ярко выраженной хорошей растворимостью в данном поглотителе, либо очень плохой растворимостью в нем. Строгое выполнение этого условия невозможно, т.к. единственный случай, когда в одной из фаз нет никакого сопротивления, - если фаза является чисто растворенным веществом. В ином случае пренебрежение диффузионным сопротивлением является приближением, справедливость которого необходимо проверить.

Общая скорость переноса массы на единицу объема насадки напрямую зависит от эффективной площади насадки a_e (M^2/M^3), т.е. доли площади поверхности контактных устройств, находящихся в единице объема слоя, и непосредственно участвующих в массообмене (смоченная поверхность насадки).

Тогда количество перенесенной массы из одной фазы в другую:

$$\Phi = a_e \cdot \varphi = \beta_y \cdot a_e (y - y_i) = k_x \cdot a_e (x_i - x) \quad (2.5)$$

Отсюда можно определить коэффициенты скорости переноса массы, зная из эксперимента Φ и a_e .

Ошибки в a_e будут распространяться на коэффициенты массопереноса. Поэтому, чтобы избежать чрезмерных неопределенностей, лучше всего использовать параметры массопереноса, полученные на одном и том же оборудовании. В частности, при выборе размера колонны β_y или β_x , последние должны использоваться только с корреляцией эффективных площадей, из которой они были получены, чтобы быть согласованными с экспериментально измеренными скоростями поглощения.

С момента признания пленочной теории межфазного массопереноса было проведено огромное количество исследований для определения параметров массопереноса $\beta_y \cdot a_e$ и $\beta_x \cdot a_e$ различных типов насадок. Методики проведения экспериментов также очень разнообразны. Результаты экспериментальных исследований также предлагались

обобщать с помощью различных эмпирических и полуэмпирических методов и предложены различные корреляции для их практического использования [31]. Зачастую они справедливы в узких пределах изменения исследуемых величин, дают плохую сходимость при масштабном переходе и использовании других условий экспериментов. Эти различия отражают экспериментальные результаты, полученные на различных устройствах, и иллюстрируют необходимость осторожной оценки экспериментальных методов. Часть различий может быть результатом использования полуэмпирических уравнений за пределами их диапазона достоверности. Этот факт наблюдается даже несмотря на включение в корреляции коэффициентов вязкости, плотности или поверхностного натяжения уже потому, что эксперименты проводились только в пределах небольшого диапазона изменения значений таких свойств.

Знание эффективной межфазной площади для массопереноса имеет определяющее значение, т.к. ошибки в ее определении будут распространяться на значение коэффициентов массопереноса.

В литературе, посвященной насадочным колоннам, были разработаны различные методы определения площади, однако они не всегда измеряют одну и ту же площадь. В работе [31] рассмотрены методы определения коэффициентов массопереноса и эффективных межфазных поверхностей в насадочных абсорбционных колоннах. Методы сгруппированы по категориям в зависимости от их физического принципа. Обсуждены используемые химические системы, протокол эксперимента, а также преимущества и недостатки. На основании этого анализа выберем и обоснуем методику проведения эксперимента для определения эффективности насадочных контактных устройств.

По физическому или химическому принципу измерения эффективной площади насадки и коэффициентов массопереноса в слое методы можно разделить на следующие группы:

- химическая абсорбция;
- испарение чистой жидкости;
- физическая абсорбция;
- томография;
- колориметрия;
- сублимация насадки.

Некоторые из этих методов измеряют межфазную площадь, другие – смоченную поверхность насадки, а третьи - эффективную площадь, все из которых могут иметь разные значения. Очень важно четко указать, какой тип площади измеряется, чтобы его можно было использовать в последующих расчетах. Например, расчетное уравнение для насадки типа N, полученное путем испарения, не будет подходящим для использования в расчете процесса физической абсорбции из-за насыщения застойных зон, которые уменьшили бы эффективную площадь для массопереноса растворенного вещества, но не для испарения. Это одна из причин, по которой уравнения расчета коэффициента массопереноса и площади не должны использоваться вместе, если получены при разных условиях проведения эксперимента.

Метод, использующий физическую абсорбцию компонента газа жидкостью, позволяют вычислить эффективную площадь путем деления объемного коэффициента массообмена. Значение последнего должно быть сначала определено путем измерения объемного коэффициента массопередачи в другом аппарате, имеющем четко определенную эффективную площадь поверхности раздела в условиях, которые обеспечивают равенство β_y или β_x между двумя аппаратами. Удовлетворение этого последнего ограничения - главная трудность реализации метода.

Методы, основанные на физической абсорбции и испарении чистых жидкостей, требуют аналогии с другим оборудованием или сравнения с

другой насадочной колонной, использующей полностью увлажненные насадки.

По принципу измерения методы определения коэффициента массоотдачи на стороне газа можно разделить на следующие группы:

- испарение чистой жидкости;
- физическая абсорбция (и десорбция);
- химическая абсорбция.

Рассмотрим методы подробнее.

В **методе испарения чистой жидкости** эксперимент основан на следующих положениях. Чистая жидкость свободно испаряется, переходя таким образом в газовую фазу, и, значит, сопротивление со стороны жидкости отсутствует. Колонна при этом должна работать близко к состоянию адиабатического насыщения, чтобы минимизировать градиенты температуры, возникающие при испарении жидкой фазы. Разность температур будет оказывать значительное влияние на парциальные давления пара на границе раздела фаз и сдвигать фазовое равновесие. Адиабатные условия в колонне создаются за счет рециркуляции жидкости и достижения стабильности температуры. Другой вариант описан в литературе [32], [33]. Суть его заключается в изменении температуры входящей жидкости для минимизации разницы температур между входом и выходом. Другая сложность метода испарения состоит в том, что в высота уплотненного слоя насадки, при котором достигается насыщение паром в газовой фазе, относительно мала, [34.]. При малой высоте слоя распределение газа и жидкости внутри насадок может не успеть стать полностью установившимся по сравнению с распределением фаз в промышленных колоннах, что приводит к возникновению значительны ошибок при масштабном переходе.

При использовании и метода на практике в качестве абсорбента используют воду, абсорбтива – воздух. Такой выбор поглотителя позволяет измерять в ходе эксперимента только температуру и влажности

воздуха без использования других химических веществ и средств химического анализа. По указанным выше причинам должна быть обеспечена стабильность температуры воды, предпочтительно в пределах $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Более того, высота уплотненного слоя должна быть достаточно небольшой, чтобы избежать приближения к насыщению, которое в противном случае также вызывает погрешности в определении движущей силы.

Метод физической абсорбции основан на использовании абсорбтива с очень высокой растворимостью в жидкости, чтобы минимизировать диффузионное сопротивление со стороны жидкой фазы. В большинстве случаев диффузионным сопротивлением жидкой фазы пренебречь нельзя, что требует некоторых средств оценки его значения. Относительная величина двух диффузионных сопротивлений также зависит от гидродинамических условий потока, для которых предпочтительно высокое значение расходов фаз L / G , чтобы минимизировать сопротивление на стороне жидкости. Определить эффективную площадь массопередачи из уравнения аддитивности фазовых сопротивлений можно, измерив диффузионное сопротивление жидкой фазы (либо получив уравнение для его расчета в определенном диапазоне изменения параметров). Многие авторы допускают зависимость диффузионных сопротивлений от расходов газа и жидкости, чтобы учесть влияние гидродинамики потоков. Хотя некоторые авторы утверждают независимость коэффициента массопереноса от расхода газа ниже точки инверсии. [35.] и [36]

На основании вышеизложенного общее сопротивление со стороны газа можно выразить как:

$$\frac{1}{K_x \cdot a_e} = \frac{1}{\beta_x \cdot a_e} + \frac{m}{\beta_y \cdot a_e} = \frac{1}{\beta \cdot G^q \cdot L^r} + \frac{m}{\alpha \cdot L^p} = \frac{m}{K_x \cdot a_e} \quad (2.6)$$

Уитни и Вивиан [37] применили это уравнение и нашли зависимости для расчета показателя степени p и r .

Некоторые авторы предположили, что показатель q равен 0,8 [38] и [39]. Справедливость его сомнительна, поскольку многие другие измерения привели к значениям экспоненты в диапазоне от 0,5 до 1.

Некоторые авторы получили расчетные уравнения, пренебрегая сопротивлением со стороны жидкости [40].

В качестве абсорбтива использовали различные хорошо растворимые в поглотителе (чаще всего – вода) газы: NH_3 , органические растворители, такие как ацетон, метанол, этанол и изопропанол, или CO_2 . В качестве газа – носителя использовались воздух или азот.

Концентрации растворенных веществ в исходной смеси обычно находятся в диапазоне от 1 до 10 % мол. (в некоторых источниках более низкие значения до 0,12 мол.% б Scheibel и Othmer [42], а более высокие значения до 25 мол.% б Gross и Simmons,[44] Hutchingsetal. [46], а также Уитни и Вивиан[47].

В качестве поглотителя только Gross and Simmons [44] и Landauetal [45] использовали тяжелые углеводороды (молярная масса 750 г / моль). исследовались экстремальные условия с точки зрения плотности, вязкости, коэффициента диффузии флюидов, чтобы оценить возможность экстраполяции корреляций для методов проектирования и расчета .Было получено хорошее согласие между экспериментальными результатами и значениями, рассчитанными с использованием корреляций для $\beta_x \cdot a$ и $\beta_y \cdot a$ (с поправкой на измененные физические свойства). Авторы также использовали данные десорбции из той же системы.

В таблице 2.2 перечислены известные экспериментальные исследования массообменных характеристик насадок, использующих метод физической абсорбции, а также допущения для обработки данных.

Таблица 2.2 — Основные характеристики исследований, проведенных с использованием метода физической абсорбции

Газовая фаза		Абсорбент	Тип насадки	Допущения	источник
абсорбтив	Газ - носитель				
NH ₃	Воздух	Вода	Кольца Рашига	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Дуайер и Додж[41]
			Кольца Рашига, седла Берля, спиральные кольца, кольцевая насадка с перегородками, керамические решетки, деревянные решетки	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Molstadet al.[43]
			Керамические решетки	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Мольстад и Парсли[48]
			Кольца Палля, импульсный тип 50	k_{L,a_e} вычитается из NTU_{OG}	Биллет и Мачковяк [53]
			Mellapak, Montz, Gempak	k_{L,a_e} вычитается из NTU_{OG}	Мачковяк [54]
Органический растворитель (ацетон, метанол, бутанон)	Воздух	Вода	Кольца Рашига, Седла Берля	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Заббан и Додж [50]
			Кольца Рашига	Сопротивление со стороны жидкости пренебрегли	Ёсида и Коянаги [51]
			Кольца Рашига	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Шульман и др.[52]
			Кольца Рашига	Учитывается диффузионная сопротивление обеих фаз	Хьюстон и Уокер[49]
CO ₂	Воздух	Вода	Кольца	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Пейн и Додж[56]

			Кольца Рашига, кольца Бялецкого, кольца I-13	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Мачковяк [63]
			Кольца Палла, кольца NSW, кольца Hiflow, Hacketts, Impulsetype 50	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Биллет и Мачковяк, [64]
			Montz B1, C1, Gempak 2A	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Мачковяк [54]
			Кольца Рашига, плоские кольца, спирали, седла	Сопротивление на стороне газа не учтено или сопротивление на стороне газа отсутствует	Мерчука [62]
O ₂	Воздух	Вода	Кольца Полла	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Lineketal. [65]
			Модифицированные седла Intalox	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Mouchaetal [66]
			Лавовые породы, пористые керамические бусины и кольца Рашига, кольца Палла, пенополиуретан	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Ким и Deshusses [67]
			Flexiring, Refilltech, PAS Winded Media	Сопротивление на стороне газа не учитывается	Сан-Валеро и др. [55]
CO ₂ чистый	-	Вода	Кольца Рашига, седла Берла (штабелированные / разгрузочные, с парафиновым покрытием и без него)	Нет сопротивления со стороны газа	Hikitaetal. [57]
			Кольца	Нет сопротивления со стороны газа	Ueyamaetal. [58]

Продолжение таблицы 2.2

			Кольца Рашига, седла Берла	Нет сопротивления со стороны газа	Фудзита и Хаякава [59]
			Кольца Рашига, седла Берла	Нет сопротивления со стороны газа	Ёсида и Коянаги [60]
			Сферы	Нет сопротивления со стороны газа	Ondaetal [61]

Из перечня используемых газов – абсорбтивов наиболее безопасным для человека является углекислый газ. Углекислый газ (CO_2) - газ без цвета и запаха, тяжелее воздуха, растворим в воде. При атмосферном давлении не плавится, а испаряется, температура сублимации -78°C . CO_2 образуется при разложении и сгорании органических материалов. Содержится в воздухе и минеральных источниках, выделяется при дыхании животных и растений. Слабо-растворим в воде (1 объем CO_2 на один объем воды при 15°C). Его можно использовать в чистом виде и смешивать с воздухом (см. таблицу 2.2).

Для увеличения чистоты эксперимента возможно увлажнение газовой фазы перед подачей в колонну [52], [47], [41]. В этом случае исключается влияние изменения температуры вследствие фазового перехода воды в пар. Испарение воды может повлиять на скорость массопередачи и эффективную площадь, а также напрямую препятствовать диффузии распределяемого вещества, которая идет в противоположном направлении. Единственным автором, исследовавшим ошибку измерения, вызванную испарением воды, были Дуайер и Додж [41], которые обнаружили, что общий коэффициент массопереноса ниже, если газ был увлажнен, но в большинстве случаев разница укладывалась в пределы экспериментальной неопределенности.

Преимущество метода физической абсорбции состоит в том, что не происходит химической реакции и насыщение жидкой фазы обычно не является проблемой. Однако проблемой является наличие сопротивления со стороны жидкости, вклад которого следует оценивать для каждого режима потока. В некоторых случаях им можно пренебречь, но чаще всего сопротивление на стороне жидкости в этих системах оказывает влияние, которое становится все более важным при более низких значениях *плотности орошения*. Если необходимо учитывать оба диффузионных сопротивления, тогда нужно вводить в эмпирическое уравнение расходы фаз.

Сопротивление на стороне жидкости может быть устранено или значительно уменьшено химической реакцией, быстро связывающей растворенное вещество. Тогда метод будет относиться к группе химических. Реакция может быть мгновенной или с конечной скоростью, но должна быть очень быстрой, чтобы удалить растворенное вещество из жидкой фазы и, значит, диффузионным сопротивлением жидкой фазы можно будет пренебречь. Абсорбцию с химической реакцией подробно описывал в своих работах Данквертс.

Подходящими реакциями являются реакции диоксида серы, галогенов (хлор, йод) с NaOH, SO₂ с Na₂CO₃ и NH₃ или триэтиленамина (Et₃N) с H₂SO₄. В этих системах парциальное давление растворенного вещества на границе раздела пренебрежимо мало.

Большинство методов используют мгновенные или очень быстрые реакции. например, в Аликс и Рейнал [68] используется быстрая реакция (CO₂ + NaOH), в этом случае сопротивлением со стороны газа нельзя пренебречь из-за высокой концентрации NaOH, которая приводит к градиенту концентрации CO₂ в газовой пленке за счет увеличения скорости реакции. В этой ситуации можно применить метод построения графика Данквертса с использованием выражения для отношения парциального давления растворенного вещества (p) и объемной скорости абсорбции (Φ).

Система $\text{CO}_2\text{-NaOH}$ [68] стоит особняком от остальных, поскольку реакция относится к режиму быстрой реакции, а сопротивление со стороны жидкости можно объяснить только кинетикой химической реакции без участия физических сил и стохастических законов.

Метод химической абсорбции позволяет пренебречь сопротивлением жидкой фазы, если реакция удовлетворяет необходимым критериям, и это его несомненное преимущество, т.к. методы измерения концентраций газовой фазы более точные, чем концентрации жидкой фазы.

Шервуд и Холлоуэй [69] рекомендуют метод химической абсорбции вместо испарения чистой жидкости из-за потенциальных экспериментальных трудностей, таких как необходимость невысоких слоев насадки и тщательного контроля температуры жидкости. Однако высота уплотненного слоя в случае химической абсорбции также может быть ограничена, потому что быстрое потребление растворенного вещества может привести к тому, что абсолютные остаточные значения в газовой фазе будут настолько малы, что находятся в пределах неопределенности аналитических устройств.

Таким образом, каждый из методов направлен на устранение диффузионного сопротивления одной из фаз или, по крайней мере, на снижение его до значения, которым можно безопасно пренебречь. В случае испарения это очевидно. За счет физической абсорбции очень хорошо растворимого соединения диффузионное сопротивление жидкой фазы может быть значительно снижено. В этом случае требуется проверка его значения экспериментально. Если сопротивлением со стороны жидкости нельзя пренебречь, можно также получить значения диффузионных сопротивлений фаз из уравнения аддитивности фазовых сопротивлений, приняв какой-то закон распределения общего сопротивления. Однако эти подходы, по-видимому, могут включать дополнительные ошибки. Мгновенная или очень быстрая реакция гарантирует, что растворенное вещество расходуется на границе раздела газ-жидкость, устраняя

сопротивление жидкой фазы. Затем необходимо проверить, что условия устанавливаются системе в соответствующий режим реакции.

С практической точки зрения каждая группа методов имеет определенные недостатки и они были указаны выше.

Проанализировав известные методы, выбираем для проведения дальнейших исследований хорошо зарекомендовавший себя метод физической абсорбции. В качестве абсорбтива будем использовать CO_2 , газ-носитель – воздух, абсорбент – дистиллированная вода. По сравнению с другими абсорбтивами, обладающими хорошей растворимостью в воде (метанол, этанол и др. – см таблицу 2.2), менее токсичен.

2.2 Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводим в экспериментальной установке. Процесс, протекающий в насадочной колонне – абсорбция углекислого газа CO_2 из его смеси с воздухом, абсорбент – дистиллированная вода.

С этой целью разработана экспериментальная установка для исследования гидравлических и массообменных характеристик слоя нерегулярной насадки (рисунок 2.2 и 2.3).

Установка состоит из абсорбера 1 колонного типа, который для облегчения визуального наблюдения за гидродинамической обстановкой выполнен из стекла. Колонна имеет круглое сечение диаметром 160 мм и высотой 2 м с целью минимизации пристеночных эффектов. В нижней части колонны жестко закреплена газораспределительная решетка, под которую подается через распределительное устройство абсорбент. Жидкая фаза подается насосом 13 вверх колонны, где равномерно распределяется оросительным устройством. Контрольно-измерительные приборы обеспечивают фиксирование показателей работы установки. Расход жидкости контролируется по показаниям ротаметра 8, регулирование его

осуществляется посредством вентиля 9. Расход газовой фазы осуществляется расходомером 6. Гидравлическое сопротивление слоя насадки можно определить по разности показаний манометров 7 и 10 или посредством присоединения к контрольным точкам (над и под слоем насадки) трубок U – образного микроманометра.

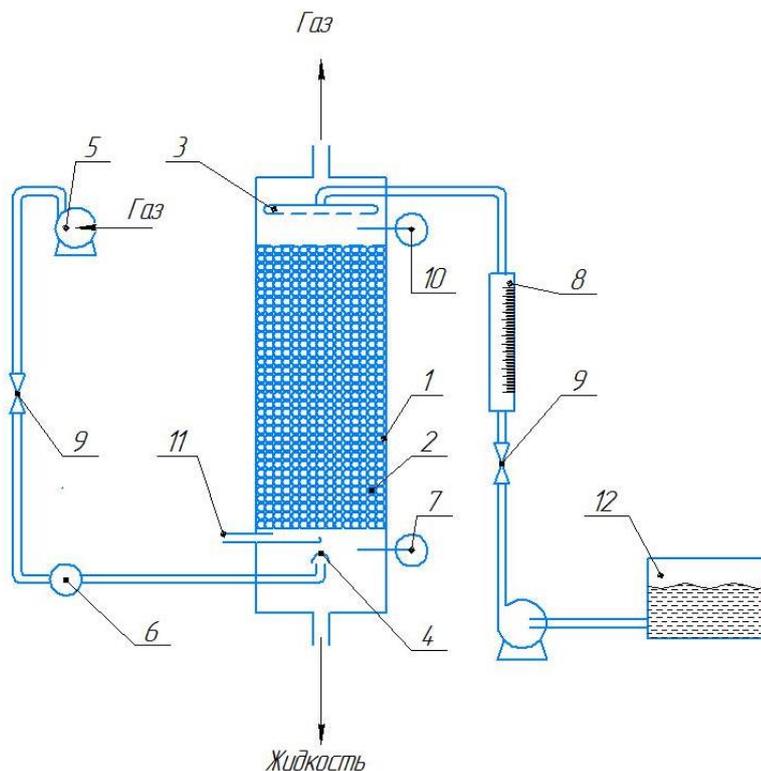


Рисунок 2.2– Экспериментальная абсорбционная установка:
 1 -абсорбционная колонна, 2 – слой насадки, 3 – распределительное устройство,
 4 – газораспределительное устройство, 5 – компрессор, 6 – расходомер,
 7, 10 – манометры, 8 – ротаметр, 9 – вентиль, 11 – рН-метр, 12 – колонна насыщения, 13 – насос.

Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления слоя насадки и эффективности массопередачи в колонне для новых конструкций нерегулярных насадок и их сравнительная характеристика в аналогичных условиях по этим же показателям с уже известными конструкциями проводилась на системе жидкость (вода) – газ (смесь воздуха и углекислого газа).

Оценить эффективность массопереноса и эффективность насадки можно, рассчитав изменение концентрации углекислого газа в воде при

прохождении ее через насадку. Концентрация углекислого газа в жидкой фазе экспериментально определяется в сечении под распределительной решеткой, после прохождения абсорбента через слой насадки по показаниям рН-метра 11, установленного в специальной «ловушке».



Рисунок 2.3 – Экспериментальная установка



Рисунок 2.4 – Мановакуумметр двухтрубный

Для экспериментального определения гидравлического сопротивления слоя насадочных тел используется мановакуумметр (рисунок 2.4) стеклянный жидкостной. Диапазон измерения давления от 1000 Па до 20000 Па. Мановакуумметр МВ состоит из стеклянной U-образной трубки, закрепленной на металлическом основании с полистирольной шкалой проградуированной в мм. Цена деления шкалы прибора составляет 10 Па (1 мм водяного столба — 1 мм в.д.ст.) и обеспечивает высокую точность эксперимента. Пределы допустимой основной абсолютной погрешности измерений составляет ± 20 Па.



Рисунок 2.5 - рН метр с выносным пластиковым электродом РН98105

рН-метр РН-98105 (рисунок 2.5) предназначен для измерения уровня рН-концентрации свободных ионов водорода на поверхности полутвердых сред. Прибор оснащен профессиональным электродом и специально разработан для высокоточного измерения рН полутвердых и гелеобразных сред. Прибор имеет функцию блокировки измеренного значения. Показания прибора путем пересчета по зависимости концентрации ионов CO_2 от рН среды дают значение концентрации растворенного углекислого газа в жидкости.



Рисунок 2.6– Ротамер типа РМ

Для измерения объемного расхода жидкой фазы в экспериментальной установке используем ротаметр (рисунок 2.6) типа РМ ГОСТ 13045, который подходит для измерения объемного расхода плавно изменяющихся однородных потоков чистых и слабозагрязненных жидкостей, нейтральных к стали 12Х18Н9Т и стеклу марок ХС и ТХС.

2.3 Составление плана и протокола эксперимента

Экспериментальные исследования проводим, используя описанную в п.2.2 экспериментальную установку. Процесс, протекающий в насадочной колонне – абсорбция углекислого газа CO_2 из его смеси с воздухом, абсорбент – дистиллированная вода.

Варьируемыми в ходе эксперимента **факторами** являются (таблица 2.3):

- массовый расход жидкости;
- массовый расход газа.

Для расчета необходимо иметь значения величин:

плотность жидкости; плотность газа; динамическая вязкость жидкости; динамическая вязкость газа.

Определяемыми величинами (целевая функция), характеризующими эффективность массопередачи, согласно проведенному выше анализу, являются гидравлическое сопротивление и степень поглощения CO_2 при прохождении слоя насадки высотой 1 м. Последний параметр косвенно характеризует интенсивность массопередачи. Для его определения необходимо фиксировать экспериментально концентрацию абсорбтива в газе на входе и выходе из колонны и концентрацию абсорбтива в жидкости на выходе из колонны.

Таблица 2.3 – Факторы, влияющие на ход эксперимента, и целевые функции

Варьируемые факторы			
Обозначение	Определение	Единица измерения	Диапазон
L	Массовый расход жидкости	кг/(ч · м ²);	[3,8...24,8]
G	Массовый расход газа	МПа	[0,1...0,6]
Неварьируемые факторы при t = 25°C			
$\rho_{ж}$	Плотность жидкости	кг/м ³ .	997 [70]
$\rho_{г}$	Плотность газа	кг/м ³ .	1,9768 [70]
$\mu_{ж}$	Динамическая вязкость жидкости	Па · с	$8,9 \cdot 10^{-4}$ [71]
$\mu_{г}$	Динамическая вязкость газа	Па · с	$1,486 \cdot 10^{-4}$ [72]
$\gamma_{ж}$	Удельный вес жидкости	Н/м ³ .	9770,6 [34]
$\gamma_{г}$	Удельный вес газа	Н/м ³ .	19,3726 [34]
Целевые функции			
ΔP	Перепад давления	Па	
$c_{п}$	Степень поглощения CO ₂	Безразм.	$c_{п} = \frac{Y_{н}-Y_{к}}{Y_{н}}$, где Y _н , Y _к - начальная и конечная концентрации CO ₂ в воздухе

Таблица 2.4 - План эксперимента

Параметр	Значение					
L	0	20	40	60	80	100
G	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
ΔP	Фиксируется по показаниям мановакуумметрадвухтрубного					
X _к	Фиксируется по показаниям рН метра					
сп	Рассчитывается (см. ниже)					

Для определения степени поглощения CO₂c_п составим схему потоков в экспериментальной насадочной колонне (рисунок 2.5). На схеме укажем расходы фаз и их концентрации в относительных единицах (кмоль диоксида углерода на 1 кмоль второго компонента, т.е. воды или воздуха).

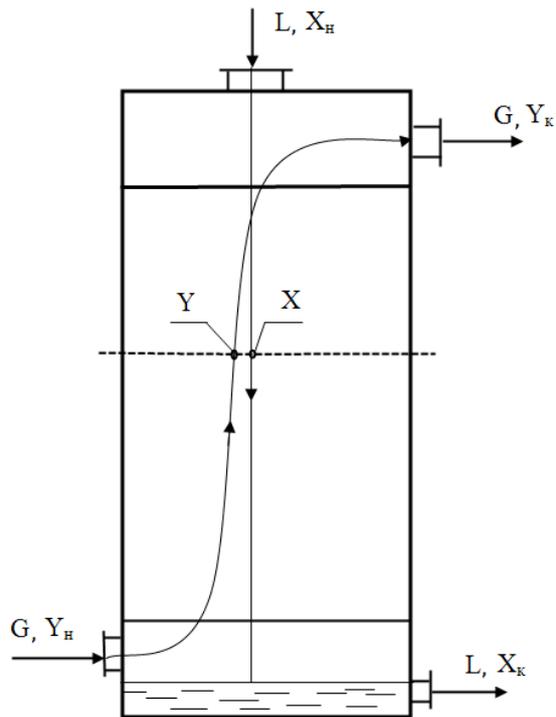


Рисунок 2.5 - Схема абсорбера

Конечная концентрация CO_2 в жидкости:

$$X_k = \frac{M \text{ мол}}{L \text{ мол}}, \frac{\text{кмоль жидкости}}{\text{кмоль абсорбента}} \quad (2.7)$$

где $L_{\text{мол}} = \frac{L}{M_{\text{воды}}}$ — мольный расход абсорбента, кмоль/ч,

(таблица 2.4), $M_{\text{воды}} = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ — мольная масса воды.

Конечная концентрация газа определяется посредством составления материального баланса абсорбера:

$$(X_k - X_n)M_{\text{мол}} = (Y_n - Y_k) \cdot G_{\text{мол}}, \quad (2.8)$$

где $G_{\text{мол}} = \frac{G_{\text{об}}}{22,4}$ — мольный расход газа, кмоль/ч; (таблица 2.4)

Начальная концентрация CO_2 в жидкости $X_n = 0$.

Тогда конечная концентрация CO_2 в воздушном потоке на выходе из абсорбера равна:

$$Y_k = Y_n - \frac{X_k \cdot M_{\text{мол}}}{G_{\text{мол}}}, \frac{\text{кмольгаза}}{\text{кмольвоздуха}} \quad (2.9)$$

Начальная концентрация CO_2 известна, т.к. газ подаем в абсорбер из баллона (об.%). При пересчете этой концентрации в относительных единицах получим:

$$Y_H = \frac{y_H}{1 - y_H} \cdot \frac{\text{кмольгаза}}{\text{кмольвоздуха}} \quad (2.10)$$

Тогда степень поглощения можно найти по формуле, имея указанные в таблице 2.4 экспериментальные данные:

$$c_{II} = \frac{Y_H - Y_K}{Y_H} = \frac{\frac{y_H}{1-y_H} - \left(Y_H - \frac{X_K \cdot M_{\text{мол}}}{G_{\text{мол}}} \right)}{\frac{y_H}{1-y_H}} = \frac{\frac{X_K \cdot M_{\text{мол}}}{G_{\text{мол}}}}{\frac{y_H}{1-y_H}}. \quad (2.11)$$

3 Моделирование результатов экспериментальных исследований

Одной из целей создания новых конструкций насадочных тел колонных аппаратов является увеличение эффективности протекающих в нем процессов. Достигнуть ее можно, в частности, посредством увеличения турбулизации потоков. При этом необходимо учитывать изменение гидравлического сопротивления слоя насадки, т.к. оно оказывает значительное влияние на энергоэффективность процесса в целом.

В насадочных колоннах пар (газ) и жидкость движутся в противоположных направлениях через слой твердых тел различной формы. Режимы возникают в зависимости от плотности орошения и от скорости движения пара (рисунок 3.1).

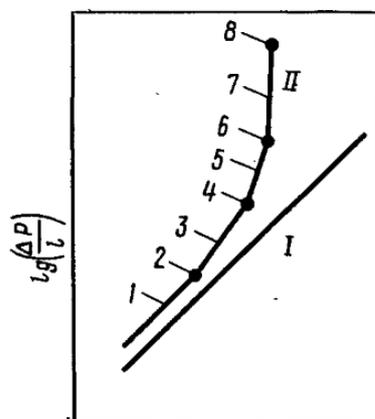


Рисунок 3.1– Гидродинамические режимы и переходные точки в насадочных колоннах:
I – сухая насадка; II – орошаемая насадка
1 - пленочный режим; 2 – точка торможения; 3 – промежуточный режим; 4 – точка подвисяния; 5 – режим турбулизации двухфазной системы; 6 – точка инверсии газа; 7 – режим эмульгирования; 8 – точка захлебывания

Рассмотрим возникающие по мере увеличения скорости газа режимы в насадочном аппарате. Первый из них – пленочный, существует при малых плотностях орошения жидкостью и незначительных скоростях газа. Жидкость движется спокойно, образуя на поверхности насадки пленку, при перетекании с одного элемента насадки на другой возможно разбивание

на отдельные капли и струйки. Контакт фаз осуществляется через поверхность насадки, смоченную жидкостью.

При увеличении скорости подачи газа выше т.2. возникает промежуточный режим, при котором за счет тормозящего действия газа на жидкость – струйчато - пленочный. Он характеризуется образованием отдельных струек, пленки на поверхности насадки и вихрей в свободном объеме слоя.

Следующий режим – режим турбулизации системы газ – жидкость характеризуется уже более значительным влиянием сил трения о жидкость. Площадь поверхности контакта фаз в этом режиме резко возрастает, т.к. в свободном объеме слоя насадки образуется развитая межфазная поверхность в виде брызг, вихрей, смоченная поверхность насадки также увеличивается.

Режим эмульгирования характеризуется накоплением жидкости в свободном объеме слоев до тех пор, пока сила трения между стекающей жидкостью и поднимающимся по колонне и газом не уравнивает силу тяжести, находящейся в насадке. При этом наступает обращение, или инверсия, фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной). Образуется газожидкостная дисперсионная система, по внешнему виду напоминающая барботажный слой (пену) или газожидкостную эмульсию

Эмульгирование жидкости начинается в самом узком сечении насадки. Граница появления эмульгированного слоя насадки не является строго фиксированной и может перемещаться по его высоте в зависимости от того, где при заполнении образовалась узкое сечение. Путем создания искусственного немного более узкого поперечного сечения на опорной сетке, на границе появления эмульгированного слоя можно переместить на опорную решетку.

При некоторых постоянных нагрузках на колонну, когда начинается заполнение насадки эмульгированной жидкостью, колонна может быть заполнена не полностью. Эмульгированная жидкость заполняет свободный

объем насадки только до определенной постоянной высоты. Перепад давления через насадку при этом, достигнув определенного значения, также становится постоянным. Режим стабилизирован, и количество жидкости, поступающей в насадку и выходящей из него, остается одинаковым. Увеличение скорости газа приводит к увеличению слоя эмульгированной жидкости, при этом режим подачи газа снова стабилизируется. Это явление можно объяснить тем, что накопление жидкости в насадке увеличивает абсолютное давление в колонне и уменьшает линейную скорость газа

Когда режим эмульгирования достигается по всей высоте насадки, дальнейшее увеличение нагрузки колонны на обеих фазах или в одной из фаз приводит к накоплению слоя жидкости над насадкой. Высота слоя жидкости может достигать такого значения, что над насадкой образуется жидкостный затвор, который препятствует нормальной работе насадочных колонн. Незначительное увеличение расхода воды в последнем случае приводит к быстрому увеличению высоты слоя и его выбросу из колонны.

На рисунке 3.2 показан профиль поверхности контакта фаз при различных режимах в насадочной колонне.

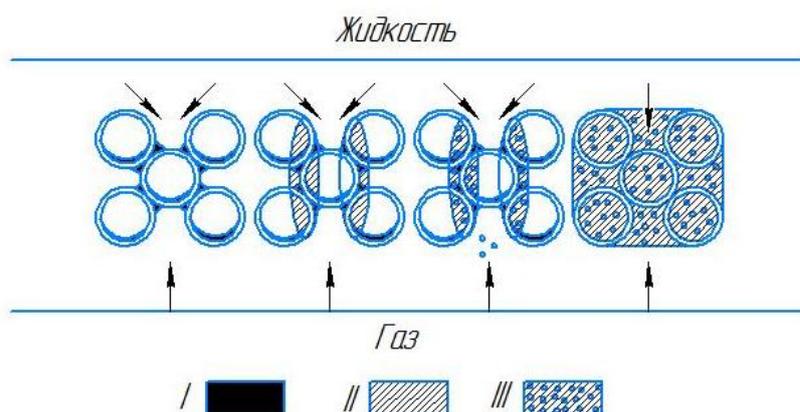


Рисунок 3.2– Характер движения потоков в колонне с насадкой:

1 – пленочный режим при капельно-пленочном течении жидкости; 2 – промежуточный режим при пленочно-струйчатом движении; 3 – режим при пленочно-струйчатом движении и турбулизации жидкости

I – контакт жидкости; II – пленка жидкости; III – турбулизация жидкостной пленки

Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности для насадочных колонн, в основном за счет увеличения фазового контакта, который в этом режиме определяется не столько поверхностью насадочных тел, сколько поверхностью образующейся газожидкостной эмульсии, заполняющей свободный объем насадки. Следует отметить, что такое повышение эффективности насадочной колонны сопровождается резким увеличением ее гидравлического сопротивления. В насадочных колоннах без специальных устройств очень трудно поддерживать режим эмульгирования, так как интервал изменения скорости газа в насадочной колонне, работающей в этом режиме, невелик.

Согласно проведенным теоретическим исследованиям обосновать эффективность новой конструкции необходимо посредством проведения экспериментальных исследований и дальнейшего аналитического сравнения по следующим показателям: относительное свободный объем, гидравлическое сопротивление, эффективность массопередачи.

Для математического описания турбулентного движения в многофазных потоках можно использовать теорию свободно развитой турбулентности В. В. Кафарова [73], согласно которой вещество переносится из одной фазы в другую вихрями с осями, перпендикулярными к направлению движения потоков. Продвижение вихревых потоков к границе раздела двух фаз обуславливает активное эмульгирование жидкой фазы газовым потоком. Турбулентность развивается одновременно в газовом и жидкостном потоке. Процесс трудно поддается математическому описанию в виду сложности явлений, происходящих внутри потоков, и сложной геометрии.

Основные положения теории свободно развитой турбулентности В. В. Кафарова можно использовать следующим образом.

Можно принять, что в сравнимых точках турбулентного потока, не ограниченного твердой стенкой, возникают вихри равной величины с одинаковыми скоростями циркуляции. Процесс массообмена протекает на

границе раздела фаз за счет конвективного массопереноса. Перепад давления будет, таким образом, характеризовать интенсивность образования новых вихревых потоков и должен рассчитываться с учетом лишь той энергии, которая затрачивается на взаимодействие между потоками. Эта энергия пропорциональна разности:

$$(\Delta P_{\Gamma-Ж} - \Delta P_{\Gamma})$$

где $(\Delta P_{\Gamma-Ж})$ — сопротивление двухфазного потока; (ΔP_{Γ}) — сопротивление однофазного потока при одной и той же скорости однофазного потока.

Количество энергии, затрачиваемой на взаимодействие между потоками фаз и на развитие их турбулентности прямо пропорционально указанной разности между сопротивлением орошаемого и сухого аппарата при данной плотности орошения [73].

Количественный учет влияния на массопередачу межфазной турбулентности было предложено производить при помощи фактора гидродинамического состояния двухфазной системы [73].

Согласно теории свободно развитой турбулентности В.В. Кафарова количественно описать процесс образования вихрей в двухфазной системе возможно при помощи фактора гидродинамического состояния двухфазной системы f . Его определяют по специальным критериальным уравнениям, разработанным для ряда массообменных аппаратов [73].

Представляет интерес получение такого уравнения для исследуемой системы в указанных условиях протекания процесса абсорбции. На основании экспериментальных данных определим фактор гидродинамического состояния двухфазной системы экспериментальной насадочной колонны (насадка – пластиковые кольца Рашига).

Перепад давления на единицу высоты аппарата в двухфазном потоке складывается из сопротивления движению газовой фазы, и сопротивления трению потока жидкости:

$$\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-Ж} = \lambda_{\Gamma} \cdot \frac{\omega_{\Gamma}^2 \cdot \gamma_{\Gamma}}{2 \cdot g \cdot d_{\text{ЭГ}}} + \lambda_{Ж} \cdot \frac{\omega_{Ж}^2 \cdot \gamma_{Ж}}{2 \cdot g \cdot d_{\text{ЭЖ}}} \quad (3.1)$$

Обозначим ε долю сечения колонны, занятую жидкой фазой. Тогда скорость движения жидкости, отнесенная к полному поперечному сечению аппарата, определим по формуле:

$$\omega_{\text{ж}} = \frac{L}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot 3600} \quad (3.2)$$

где $\omega_{\text{ж}}$ – линейная скорость движения жидкости, м/с; L – массовый расход жидкости, кг/ч · м²; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Доля сечения, занятая газовой фазой, определится как $(1 - \varepsilon)$. Получаем скорость газовой фазы:

$$\omega_{\text{г}} = \frac{G}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{\text{г}} \cdot 3600} \quad (3.3)$$

где $\omega_{\text{г}}$ – линейная скорость движения газа, м/с; G – массовый расход газа, кг/ч · м²; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³.

Эквивалентный диаметр для газового и жидкого потока

$$d_{\text{эг}} = \frac{4 \cdot (1 - \varepsilon)}{s} \quad (3.4)$$

$$d_{\text{эж}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{s}$$

где s – удельная поверхность взаимодействия потоков, $\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$.

Используя уравнение (3.1), найдем отношение перепада давления в двухфазном потоке к перепаду давления газового потока при прохождении через сечение, равное $(1 - \varepsilon)$:

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\text{г-ж}}}{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\text{г}}} = 1 + \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{г}}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{ж}}}{\omega_{\text{г}}}\right)^2 \cdot \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{г}}} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Коэффициенты сопротивления в общем виде могут быть представлены следующим образом:

для жидкостного потока

$$\lambda_{\text{ж}} = \frac{c}{\left(\frac{4L}{3600 \cdot s \cdot g \cdot \mu_{\text{ж}}}\right)^m} \quad (3.6)$$

Для газового потока

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{c}{\left(\frac{4G}{3600 \cdot s \cdot g \cdot \mu_{\Gamma}}\right)^m} \quad (3.7)$$

Подставляя значения коэффициентов $\lambda_{\text{ж}}$ и λ_{Γ} , а также значения скоростей из уравнений (3.2) и (3.3) в уравнение (3.6), получим

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-\text{ж}}}{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma}} = 1 + \left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \cdot \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^3 \quad (3.8)$$

В полученном уравнении (3.11) отношение $\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$ имеет физический смысл и характеризует относительную величину свободной площади поперечного сечения аппарата, занятой газом, по отношению к площади поперечного сечения, занятой жидкостью.

Так как величины $(1 - \varepsilon)$ и ε неизвестны, необходимо определить их косвенно посредством учета газосодержания потока f_{Γ} и отношения перепада давления газа при прохождении его через орошаемую насадку к перепаду давления при прохождении газа через сухую насадку величиной фактора f гидродинамического состояния двухфазной системы [74].

Задачу о перепаде давления решаем таким образом. Согласно известным теоремам теории подобия, возможна следующая замена безразмерный комплекса в правой части уравнения (3.11):

$$1 + \left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \cdot \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^3 \sim \left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \cdot \eta$$

На основании экспериментальных данных величин $\frac{L}{G}$, $\frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}}$ и $\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}$, соответствующих опытному значению $\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-\text{ж}}$, можно найти зависимость:

$$\eta = f \cdot \left[\left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \right] \quad (3.9)$$

или

$$\left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m = \Phi$$

Получим

$$\eta = f(\Phi) \quad (3.10)$$

Уравнение (3.11) можно привести к виду

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-Ж}}{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma}} = 1 + \left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{Ж}} \cdot \left(\frac{\mu_{Ж}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \cdot \eta \quad (3.11)$$

Или

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-Ж}}{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma}} = 1 + \Phi \eta \quad (3.12)$$

Для получения конкретной функциональной зависимости (3.12) необходимо иметь данные экспериментальных исследований.

Во-первых, определяется гидродинамический режим однофазного потока, согласно которому устанавливается показатель степени m .

Т.к. исследуется режим выраженной турбулентности, то примем $m = 0$.

При принятом значении m и по опытным значениям факторов, рассчитывается параметр

$$\Phi = \left(\frac{L}{G}\right)^{2-m} \cdot \frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{Ж}} \cdot \left(\frac{\mu_{Ж}}{\mu_{\Gamma}}\right)^m \quad (3.13)$$

При данном опытном значении $\frac{L}{G}$, при той же линейной скорости газа (или одной и той же массовой скорости газа G при данном гидродинамическом режиме), которой соответствует сопротивление сухого аппарата $\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma}$, замеряется сопротивление орошаемого аппарата и по уравнению (3.12), определяется значение параметра η .

На основании полученного графика устанавливается уравнение связи между η и Φ

$$\eta = B \cdot \Phi^{-z} \quad (3.14)$$

Полученное значение η подставляется в уравнение (3.12)

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-ж}}{\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma}} = 1 + \Phi(B \cdot \Phi^{-z}) \quad (3.15)$$

Тогда уравнение для перепада давления в окончательном виде после подстановки значения Φ из уравнения (3.13) в (3.15) может быть представлено следующим образом

$$\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma-ж} = \left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{\Gamma} \left[1 + \beta \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^a \left(\frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{ж}}\right)^b \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{\Gamma}}\right)^c \right] \quad (3.16)$$

Из уравнения (3.16) может быть рассчитан фактор гидродинамического состояния двухфазной системы

$$f = \frac{\Delta P_{\Gamma-ж} - \Delta P_{\Gamma}}{\Delta P} = \beta \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^a \left(\frac{\gamma_{\Gamma}}{\gamma_{ж}}\right)^b \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{\Gamma}}\right)^c \quad (3.17)$$

Таким образом, в результате обработки экспериментальных данных количественно оценена межфазная турбулентность с помощью безразмерной величины — фактора гидродинамического состояния двухфазной системы.

Фактор гидродинамического состояния двухфазной системы вводится в уравнение массопередачи для двухфазных потоков в качестве определяющего:

$$Nu_{\Gamma} = a_1 \cdot Re_{\Gamma}^{m_1} \cdot Pr_{\Gamma}^{n_1} (1 + f_{\Gamma}) \quad (3.18)$$

$$Nu_{ж} = a_2 \cdot Re_{ж}^{m_2} \cdot Pr_{ж}^{n_2} (1 + f_{\Gamma}) \quad (3.19)$$

где a_1, a_2 — постоянные коэффициенты.

Уравнение (3.18) применимо при выражении движущей силы через разность концентраций по газовой фазе, уравнение (3.19) через разность концентраций, выраженной по жидкой фазе:

Выражения $a_1 \cdot Re_{\Gamma}^{m_1} \cdot Pr_{\Gamma}^{n_1}$ и $a_2 \cdot Re_{ж}^{m_2} \cdot Pr_{ж}^{n_2}$ определяют количество вещества, переносимого в пределах данной фазы за счет молекулярной и вихревой диффузий, а $a_1 \cdot Re_{\Gamma}^{m_1} \cdot Pr_{\Gamma}^{n_1} \cdot f_{\Gamma}$ и $a_2 \cdot Re_{ж}^{m_2} \cdot Pr_{ж}^{n_2} \cdot f_{\Gamma}$ — количество вещества, переносимого за счет взаимодействия

потоков фаз. [75] Таким образом, уравнения (3.18) и (3.19) являются уравнениями общего вида для процессов массопередачи

4 Совершенствование производственных процессов и разработка рациональных конструкторских решений

4.1. Разработана конструкция эксперимент установки

Согласно проведенным исследованиям данная абсорбционная установка имеет следующие трудности (рисунок 2.):

- неустойчивость по потокам газа и жидкости;
- неустойчивость распределения концентраций в фазах;
- неустойчивость работы при скачках концентраций в фазах, и при скачках давления.

Для обеспечения высокой точности экспериментов установка должна соответствовать следующим условиям:

- Иметь колонку достаточно большого диаметра, обеспечивающую независимость полученных результатов от размеров колонки.
- Обеспечить хорошее регулирование расхода жидкости и газа.
- Обеспечить стабильную начальную концентрацию абсорбтива в газовой фазе и чистоту жидкой
- Обеспечить равномерное распределение газовой и жидкой фазы по сечению колонны.

Так как данная экспериментальная установка не соответствует ряду условий, предлагаем усовершенствовать экспериментальную абсорбционную установку (2.2) до экспериментальной абсорбционно-десорбционной установки (4.1).

Методика проведения экспериментов та же – физическая абсорция, абсорбтив – углекислый газ, абсорбент – вода.

Схематическое изображение установки представлено на рисунке 4.1. Десорбционная колонна 1, диаметром 160 мм и высотой 2 м заполнена насадкой 2, абсорбционная колонна 12 диаметром 160 мм и высотой 2 м заполнен насадкой 14.

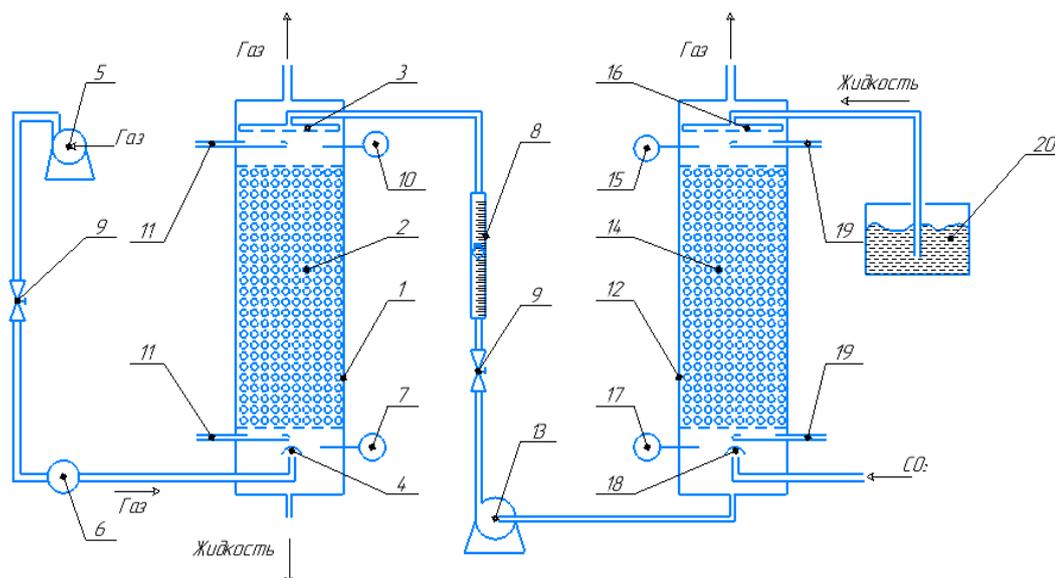


Рисунок 4.1 — Абсорбционно-десорбционная установка:

1 – десорбционная колонна, 2, 14 – насадка, 3, 16 – распределительное устройство, 4, 18 – распределитель газа, 5 – компрессор, 6 – расходомер, 7, 10, 15, 17 – манометры, 8 – ротаметр, 9 – вентиль, 11, 19 – рН-метр, 12 – абсорбер, 13 – насос, 20 – емкость.

Методика эксперимента заключается в следующем. В качестве абсорбента используется дистиллированная вода, которая подается сверху абсорбера 12, представляющий собой стеклянную вертикальную колонну диаметром 160 мм и высотой 2 м. В нижнюю часть абсорбера, через распределительное устройство 18 подается углекислый газ, в результате чего достигается насыщение абсорбента углекислым газом. Насыщенный абсорбент из нижней части абсорбера подается насосом 13 в десорбционную колонну 1 через распределительное устройство 3. Гидравлическое сопротивление отслеживается по показаниям манометров 15 и 17. В абсорбере 12 концентрация углекислого газа определяется по показаниям рН-метров 19, установленных в специальных «ловушках» сверху и снизу слоя насадки.

Расход подаваемого абсорбента измеряется ротаметром 8 и регулируется с помощью вентиля 9. Для выделения углекислого газа в нижнюю часть десорбционной колонны 1 подается инертный газ (воздух) с помощью компрессора 5. Количество инертного газа (воздуха), поступающего в колонну через распределитель 4, определяется с

помощью расходомера 6. Гидравлическое сопротивление отслеживается по показаниям манометров 7 и 10. Расход газа регулируется вентилем 9.

Оценить эффективность массопереноса и эффективность самой насадки при десорбции можно, узнав изменение концентрации углекислого газа в воде при прохождении ее через насадку. Концентрация углекислого газа в абсорбенте определяется по показаниям рН-метров 11, установленных в специальных «ловушках» сверху и снизу слоя насадки.

Использование в экспериментальной установке системы из двух колонн, в которых протекают обратные процессы (десорбция – сорбция) позволяет обеспечить стабильную начальную концентрацию абсорбтива в газовой фазе жидкой фазы и исключить появление случайных ошибок.

Обеспечить равномерное распределение газовой и жидкой фазы по сечению колонны.

4.2 Разработка и обоснование новой конструкции нерегулярной насадки

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция нерегулярной насадки для колонных аппаратов химической промышленности.

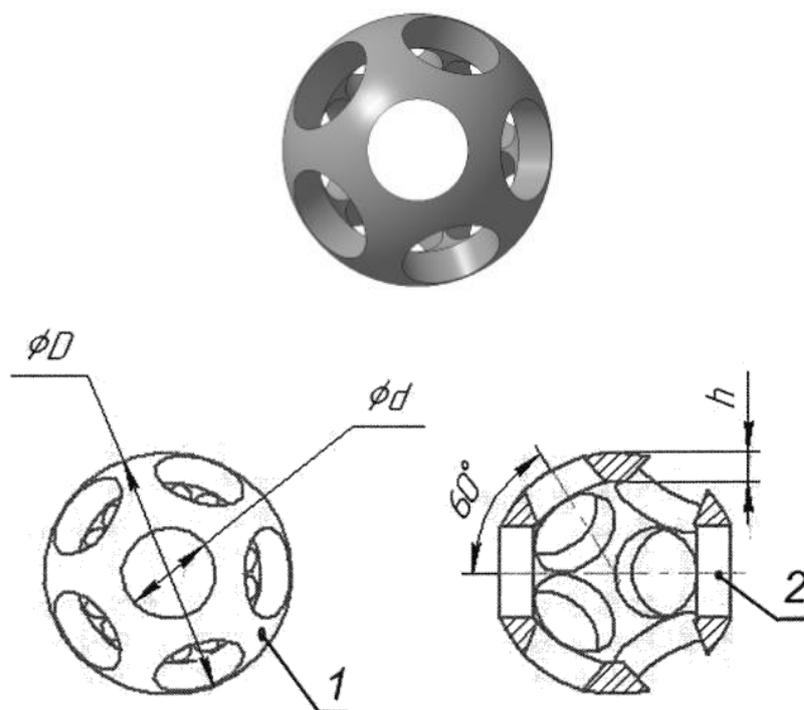


Рисунок 4.2 – Насадка для массообменных аппаратов «Инверсия 3D»

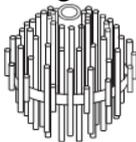
Насадка (рисунок 4.2) [77], представляющая собой пустотелый шар 1 с внешним диаметром D и толщиной стенки h с отверстиями круглой формы 2 диаметром d . Отверстия общим числом $n=12$ равномерно распределены по поверхности шара. Оси отверстий проходят через центр шара. Диаметр отверстий подобран таким образом, чтобы отношение объема полости шара к суммарному объему отверстий находилось в интервале $0,5...3$ (таблица 4.1. п.3). Количество отверстий равно 12 выбрано не случайным образом, т.к. при уменьшении наблюдается эффект капиллярообразования и накапливание жидкости в местах контакта отдельных элементов насадки, при увеличении – снижение механической прочности насадочного тела.

Сравнительная характеристика разработанной новой конструкции и аналогичных (выполненных из полимерного материала и имеющих форму, близкую к сферической) приведена в таблице 4.1.

Полая конструкция насадки с круглыми отверстиями обеспечивает эффективное распределение фаз в объеме слоя и внутри насадочного тела. В режиме эмульгирования наблюдается активное раздробление

жидкостного потока внутри отдельного насадочного элемента, т.к. при выбранном соотношении объема полости шара к суммарному объему отверстий газовый поток свободно проходит во внутреннюю полость. В этом случае исключается возможность образования капель и стекающих жидкостных потоков. Отдельные вихревые потоки равномерно распределяются по сечению колонны или вызывают образование новых. Все это приводит к резкому возрастанию интенсивности массопередачи.

Таблица 4.1-Сравнительная характеристика известных и новой конструкций насадок [78]

№	Название, изготовитель	Номинальный размер(мм)	Техническая масса (кг/м ³)	Удельная поверхность (м ² /м ³)	Свободный объём%
1	 <p>Igel Германия, Vereinigte Füllkörper- Fabriken</p>	40	120	300	87
2	 <p>VFF-NetBall Германия, Vereinigte Füllkörper- Fabriken</p>	45 90	42 41	140 130	95 95
3	 <p>Инверсия 3D Россия</p>	20 30 40	63 149 161	393 299 318	70 72 74

Разработанная и обоснованная конструкция насадки эффективно перераспределяет контактирующие фазы при их интенсивном взаимодействии как в объеме отдельной насадки, так и в колонне в целом. В аппарате не происходит образования крупных капель и стекающих

струй, что интенсифицирует процессы теплообмена за счет развития межфазной поверхности.

К преимуществам конструкции следует отнести низкое гидравлическое сопротивление слоя насадки, что дает возможность получить равномерную гидродинамическую обстановку в различных точках сечения аппарата при условии использования высокоэффективного гидродинамического режима эмульгирования.

Снизить гидравлическое сопротивление слоя насадки можно за счет использования новых конструкционных материалов, в частности, пластмасс. Полимерные композиты обладают особыми эксплуатационными свойствами, могут отличаться повышенной прочностью, термостойкостью, устойчивостью к низким температурам, пожаробезопасностью. Конструкции, изготовленные из полимеров, имеют меньший удельный вес и проще изготавливаются (технологичнее), чем металлические аналоги.

Использование термопластов дает возможность создания недоступных для классических методов машиностроения геометрий. Сферические насадки мало применяются в теплообменных колоннах с покоящимся слоем насадки ввиду сложности изготовления из металла и материалоемкости. Хотя такая геометрия обуславливает ряд преимуществ, таких как высокие плотность упаковки и потенциальная возможность самоорганизации слоя, а также более равномерное распределение жидкости. Пустотелые шары обладают минимальной поверхностью соприкосновения между собой и со стенками колонного аппарата при равномерном заполнении его поперечного сечения, т.к. не имеют выступающих, отогнутых поверхностей, способных привести к перекрыванию поверхностей массообмена. Известные промышленные сферические насадки и их технические характеристики приведены в таблице 4.1 п.1-2. Как видно из таблицы 4.1, сферическая форма насадки от VFF Igel, образованная вершинами отдельных цилиндров, скрепленных

кольцом, сферическая поверхность – VFF–Netball, сформированная отдельными сегментными полосками, обладают значительной удельной поверхностью и долей свободного объема, но легко деформируемы при приложении силы даже при обычных температурах. Минимальное усилие деформации обусловлено конструктивными свойствами материала, из которого изготовлена насадка. Такие сложные формы возможно изготовить только из легко деформируемых материалов – термопластиков, не отличающихся значительной механической прочностью по сравнению с металлом и керамикой. Слой насадки в колонном аппарате должен выдерживать не только собственный вес, но и вес жидкости, а также усилие от воздействия газовой среды. Условие сохранения доли пустот одинаковым по высоте колонного аппарата необходимо выполнять, т.к. сжатие на дне колонны приводит к увеличению гидравлического сопротивления и захлебыванию колонны. Потому целесообразно упростить конструкцию для увеличения ее механической прочности.

5 Практическое применение результатов научных исследований и проектно-технических решений

Задача перехода на использование термопластичных композитных материалов является существенной для предприятий химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Ее постановка скоординирована подпрограммой «Развитие производства композиционных материалов (композитов) и изделий из них» Государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утвержденной постановлением правительства от 15 апреля 2014 года № 328.[79]

Полимерные композиты обладают особыми эксплуатационными свойствами, могут отличаться повышенной прочностью, термостойкостью, устойчивостью к низким температурам, пожаробезопасностью. Конструкции, изготовленные из полимеров, имеют меньший удельный вес и проще изготавливаются (технологичнее), чем металлические аналоги.

Аппараты химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности часто работают с агрессивными средами в виде органических и неорганических кислот, оснований и их водных растворов, газообразующих примесей (CO_2 ; NH_3 ; NO_2 ; SO_2 ; P_2O_5), которые могут оказывать негативное влияние на свойства полимерных материалов (набухание, диффузия среды в полимер и химическое взаимодействие, приводящее к деструкции пластика).

Стойкостью к агрессивной химии и повышенной температуре, возможностью создания недоступных для классических методов машиностроения геометрий обладают различные термопласты. К инженерным пластикам применяется ряд требований связанных с устойчивостью к высоким и низким температурам, огнестойкостью, механической прочностью. Конкретные примеры осуществления полезной модели с использованием определенного термопласта раскрыты ниже.

Пример 1. Насадку для тепломассообменных аппаратов изготавливают из полимерного материала – термопласта поликарбоната, PC [80], устойчивого к агрессивным средам и термостойкого, в виде пустотелого шара 1 с круглыми отверстиями 2 в стенках, при этом количество отверстий в шаре 12, отверстия равномерно распределены по поверхности шара и их ось проходит через центр шара, отношение объема полости шара к суммарному объему проходов, образованных отверстиями, составляет от 0,5 до 3. Насадки для тепломассообменных аппаратов загружают в колонный аппарат в навал. Поликарбонат — пластик с высокой ударопрочностью, устойчив к кислотам, но чувствителен к УФ-излучению и разрушается под воздействием нефтепродуктов. Устройство может быть использовано для проведения тепло- и массообменных процессов в колонных аппаратах химической и газоперерабатывающей промышленности (например, абсорбционные колонны, установки очистки газоздушных выбросов).

Пример 2. Насадку для тепломассообменных аппаратов изготавливают из полимерного материала – термопласта полиэфирэфиркетона, PEEK (торговые марки Intamsys PEEK; Apium PEEK; Roboze PEEK) [81], устойчивого к агрессивным средам и термостойкого, в виде пустотелого шара 1 с круглыми отверстиями 2 в стенках, при этом количество отверстий в шаре 12, отверстия равномерно распределены по поверхности шара и их ось проходит через центр шара, отношение объема полости шара к суммарному объему проходов, образованных отверстиями, составляет от 0,5 до 3. Насадки для тепломассообменных аппаратов загружают в колонный аппарат в навал. Поликарбонат — пластик с умеренной ударопрочностью, химически инертный. Устройство может быть использовано для проведения тепло- и массообменных процессов колонных аппаратах химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности с температурным режимом до 250 °С.

Пример 3. Насадку для теплообменных аппаратов изготавливают из полимерного материала – термопласта полиэфиримида, PEI (торговые марки Stratasys Ultem 1010 и 9085, Intamsys Ultem 1010 и 9085, Roboze UltemAM 9085F, Apium PEI 9085) [82], устойчивого к агрессивным средам и термостойкого, в виде пустотелого шара 1 с круглыми отверстиями 2 в стенках, при этом количество отверстий в шаре 12, отверстия равномерно распределены по поверхности шара и их ось проходит через центр шара, отношение объема полости шара к суммарному объему проходов, образованных отверстиями, составляет от 0,5 до 3. Насадки для теплообменных аппаратов загружают в колонный аппарат в навал.

Устройство может быть использовано для проведения тепло- и массообменных процессов в колонных аппаратах химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности с химически агрессивными средами с температурой не более 200 °С.

Пример 4. Насадку для теплообменных аппаратов изготавливают из полимерного материала – термопласта полифенилсульфона, PPSF/PPSU (торговые марки Stratasys PPSF; 3 DX Tech Firewire PPSU) [83], устойчивого к агрессивным средам и термостойкого, в виде пустотелого шара 1 с круглыми отверстиями 2 в стенках, при этом количество отверстий в шаре 12, отверстия равномерно распределены по поверхности шара и их ось проходит через центр шара, отношение объема полости шара к суммарному объему проходов, образованных отверстиями, составляет от 0,5 до 3. Насадки для теплообменных аппаратов загружают в колонный аппарат в навал.

Устройство может быть использовано для проведения тепло- и массообменных процессов в колонных аппаратах химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности с химически агрессивными средами с температурой не более 200 °С.

Пример 5. Насадку для теплообменных аппаратов изготавливают из полимерного материала – термопласта полисульфона, PSU (3DXTech Firewire PSU) [84], устойчивого к агрессивным средам и термостойкого, в виде пустотелого шара 1 с круглыми отверстиями 2 в стенках, при этом количество отверстий в шаре 12, отверстия равномерно распределены по поверхности шара и их ось проходит через центр шара, отношение объема полости шара к суммарному объему проходов, образованных отверстиями, составляет от 0,5 до 3. Насадки для теплообменных аппаратов загружают в колонный аппарат в навал. Устройство может быть использовано для проведения тепло- и массообменных процессов в колонных аппаратах химической, газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности с химически агрессивными средами с рабочей температурой не более 175°C.

Таким образом, преимуществом насадки «Инверсия 3D» является: надежная работа слоя насадки в режиме эмульгирования / инверсии фаз, что определяет эффективность и повышенную производительность аппарата; относительно высокие допустимые нагрузки по газовой и жидкой фазе; малая удельная материалоемкость; возможность работы с загрязненными средами; простота изготовления высокоэффективных насадочных тел и т.д.

6 Расчеты технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта.

Для оценки экономической эффективности при внедрении в конкретную технологию, необходимо кроме капитальных затрат, учитывать объем производства, объем продаж конечного продукта, себестоимость и т.д.

Оценка экономической эффективности выполнена на примере модернизации колонного насадочного аппарата в технологической схеме блока очистки жирного газа установок АТ и АВТ и сжиженных головок стабилизации. В колонный аппарат, а именно абсорбционную колонну на отчистку от сероводорода 15%-м раствором МЭА. Абсорбер оснащен тремя пакетами насадок (кольца Рашига, металлические)

Для повышения эффективности работы колонного аппарата предлагается использование массообменной насадки нового поколения «Инверсия-3D» диаметром 35 мм. Эффективность насадки обуславливается малым перепадом давления, возможностью работы в широком диапазоне нагрузок и хорошим контактом сырья и моноэтаноламина. Степень очистки сырья от сернистых соединений после замены контактной насадки составила 99%.

Инвестиции рассчитываются согласно формуле:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 - K_6, \quad (6.1)$$

где K_1 – стоимость приобретенной насадки;

K_2 – стоимость монтажных работ;

K_3 – стоимость транспортных расходов;

K_4 – стоимость демонтажных работ;

K_5 – неамортизированная часть стоимости снимаемого оборудования;

K_6 – выручка от продажи снимаемого оборудования.

$$K_1 = 680 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K_2 = K_1 \cdot 15\% = 680 \cdot 15\% = 102 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K_3 = K_1 \cdot 10\% = 680 \cdot 10\% = 68 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K_4 = C_{\text{CH}} \cdot 15\% = 2000 \cdot 15\% = 300 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K_5 = C_{\text{CH}} - \frac{C_{\text{CH}} \cdot H_a \cdot t_p}{100}, \quad (6.2)$$

где C_{CH} – цена снимаемого насадки (кольца Рашига из нержавеющей стали 12Х18Н10Т);

H_a – норма амортизации;

t_p – время в работе.

$$K_5 = 15000 - \frac{2000 \cdot 5 \cdot 15}{100} = 1500 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K_6 = 227 \text{ (тыс. руб.)}$$

$$K = 680 + 102 + 68 + 300 + 1500 - 227 = 2423 \text{ (тыс. руб.)}$$

Объем производства

Объем производства определяется исходя из количества рабочих дней, смен и производительности установки, объем производства составляет в нашем случае 6300 тыс. м³.

Цена

Цена рассчитывается из следующих составляющих - сколько затрачено труда, сырья, материалов, комплектующих изделий на получение продукции. В конечном счете, цена отражает не только величину совокупных издержек производства и обращения товаров, но и размер прибыли.

Выручка от реализации, выручка от реализации без налогов

Выручка от реализации находится по формуле:

$$BP = Q \cdot C, \quad (6.3)$$

где Q – объем производства, м³;

C – цена, руб;

Выручка от реализации без налогов (НДС, акциз) находится по формуле:

$$BP_{\text{чист}} = BP - BP \cdot (0,18 + 0,12), \quad (6.4)$$

где BP – выручка от реализации, руб.

Из приведённого определения следует, что происхождение прибыли от реализации связано с получением валового дохода предприятием от реализации своей продукции (работ, услуг) по ценам, складывающимся на основе спроса и предложения.

Полная себестоимость

Полная себестоимость отражает все затраты на производство и реализацию продукции, складывается из производственной себестоимости и внепроизводственных расходов (расходы на тару и упаковку, транспортировку продукции, прочие расходы).

Амортизация – определяется как возмещение (в денежном выражении) износа основных фондов путем включения части их стоимости в затраты на выпуск продукции. Расчет нормы амортизации производится по формуле:

$$A = \frac{C_{\text{ОБ}} \cdot H_a}{100}, \quad (6.5)$$

где $C_{\text{ОБ}}$ – цена оборудования, руб;

H_a – норма амортизации.

Заработная плата представляет собой часть издержек на производство и реализацию продукции, идущую на оплату труда работников предприятия и определяется по формуле:

$$ЗП = \frac{0,29\% \cdot C}{100}, \quad (6.6)$$

где C – себестоимость, руб.

Отчисления на социальные нужды включают в себя отчисления в пенсионный фонд, в фонд социального страхования и в фонды обязательного медицинского страхования. Отчисления на социальные нужды рассчитываются по следующей формуле:

$$ОСН = 34\% \cdot ЗП, \quad (6.7)$$

где ЗП – заработная плата.

Полная себестоимость годового объема

Расчёт полной себестоимости осуществляется по формуле.

$$ПС_{г.о.} = ПС \cdot Q, \quad (6.8)$$

где ПС – полная себестоимость, руб;

Q – объем производства, м³.

Балансовая прибыль

Сумма всех прибылей называется балансовой (валовой) прибылью предприятия и находится по формуле:

$$БП = ВР - ПС_{г.о.}, \quad (6.9)$$

где ВР – выручка от реализации, руб;

$ПС_{г.о.}$ – полная себестоимость годового объёма продукции, руб.

Налог на прибыль

Объектом для определения налога на прибыль является валовая прибыль, уменьшенная или увеличенная в установленном порядке.

Налог на прибыль определяется по формуле:

$$НП = 20\% \cdot БП, \quad (6.10)$$

где БП – балансовая прибыль, руб

Чистая прибыль

Прибыль показывает чистый доход, созданный в сфере материального производства.

Чистую прибыль рассчитывают по формуле.

$$ЧП = БП - НП, \quad (6.11)$$

где БП – балансовая прибыль, руб;

НП – налог на прибыль, руб.

Денежные поступления

$$ДП = ЧП + А, \quad (6.12)$$

где ЧП – чистая прибыль, руб;

A – амортизация, руб.

Норма дисконта, дисконтированный множитель

Норма дисконта – это коэффициент доходности капитала (отношение величины дохода к капитальным вложениям), при которой другие инвесторы согласны вложить свои средства в создание проектов аналогичного профиля.

Коэффициент дисконтирования α определяем для постоянной нормы дисконта по формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + r)^t}, \quad (6.13)$$

где r – норма дисконта;

t – время от момента получения результата (произведения затрат) до момента сравнения, измеряемое в годах.

Дисконтированные денежные поступления

Дисконтированные денежные поступления – это текущая стоимость денежных поступлений. Расчет производим по формуле:

$$\text{ДДП} = \text{ДП} \cdot \alpha_t, \quad (6.14)$$

где ДП – денежные поступления, руб;

α_t – дисконтированный множитель.

Сальдо – итог

Разница между денежными поступлениями и расходами за определенный период времени и определяется по формуле:

$$\text{НДП} = \text{ДДП} - \text{НДП}_{n-1}, \quad (6.15)$$

где ДДП – дисконтированные денежные поступления, руб;

НДП – накопление денежных поступлений, руб;

НДП_{n-1} – накопление денежных поступлений за прошедший год.

Чистый дисконтный доход

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) находят как суммарную величину текущих эффектов за весь расчетный период, приведённую к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами и рассчитывается следующим образом:

$$\text{ЧДД} = \sum (\text{ДП} \cdot \alpha_t) - K, \quad (6.16)$$

где ДП – денежные поступления, руб;

α_t – дисконтированный множитель;

K – капитальные затраты, руб.

Индекс рентабельности инвестиций

$$P_i = \frac{\sum (\text{ДП} \cdot \alpha_t)}{K}, \quad (6.17)$$

$P_i > 1$, следовательно, проект рентабелен и должен быть принят к внедрению.

Результаты расчета экономической эффективности проекта приведены в таблица 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет экономической эффективности

№ п/п	Показатели	Годы				
		2021	2022	2023	2024	2025
1	Капитальные затраты, К, тыс. руб	2423	-	-	-	-
2	Объем производства, Q, тыс м ³ в год	0	6300	6300	6300	6300
3	Цена за 1 тонну продукции с НДС, тыс. руб.	30	30	30	30	30
4	Выручка от реализации, В, тыс. руб	0	189000	189000	189000	189000
5	Выручка от реализации (без налогов), тыс. руб.	0	132300	132300	132300	132300
6	Себестоимость 1 тонну, тыс. руб. в том числе:	0	20	20	20	20
	а) амортизация, тыс. руб.	0	0,22	0,22	0,22	0,22
	б) заработная плата, тыс. руб.	0	0,058	0,058	0,058	0,058
	в) отчисления на социальные нужды, (34 %), тыс. руб	0	0,01972	0,01972	0,01972	0,01972

Продолжение таблицы 5.2

7	Полная себестоимость годового объема производства, тыс. руб.	0	126000	126000	126000	126000
8	Балансовая прибыль, тыс. руб.	0	6300	6300	6300	6300
9	Налог на прибыль, 20%, тыс. руб.	0	1260	1260	1260	1260
10	Чистая прибыль, тыс. руб.	0	5040	5040	5040	5040
11	Денежные поступления, тыс. руб.	0	5040,22	5040,22	5040,22	5040,22
12	Норма дисконта	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
13	Дисконтированный множитель	0	0,8695652	0,7561437	0,6575162 32	0,5717532 46
14	Дисконтированные денежные поступления, тыс. руб.	0	4382,8	3811,1304	3314,0264 65	2881,7621 44
15	Накопленное сальдо денежных поступлений, тыс. руб.	-2423	1959,8	5770,9304	9084,9569	11966,719 04

2021	2022	2023	2024	2025
0	4382,8	3811,1304	3314,0264 65	2881,7621 44

Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.:

11966,719

Индекс рентабельности инвестиций:

5,9388027

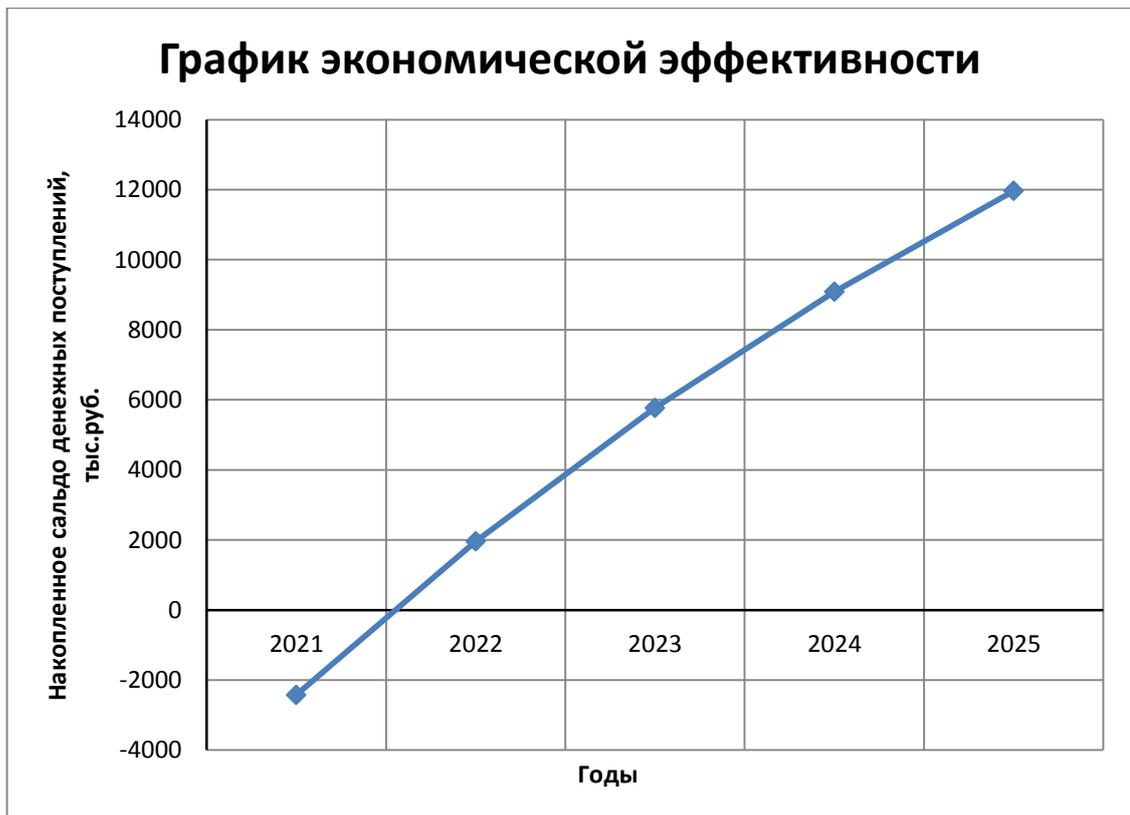


Рисунок 6.1 - График периода возврата капитала.

Благодаря проведенному экономическому расчету и таблицы 5.1 проект окупится через 1,1 года.

Заключение

Совершенствование конструкций насыпных насадок идет по пути создания и внедрения контактных элементов, отличающихся повышенной способностью к перераспределению жидкой фазы, а также обеспечивающих высокую кратность обновления поверхности контакта и эффективность в широком диапазоне нагрузок.

Целью магистерской диссертации была разработка методики эксперимента и создание экспериментальной абсорбционно–десорбционной установки для возможности изучения основных характеристик нерегулярных насадочных тел.

В магистерской диссертации необходимо были выполнены следующие задачи:

- Провести аналитический обзор научно-технической литературы и объектов интеллектуальной собственности по теме научного исследования, включающий в себя: анализ научно-технической литературы, научных статей, аналитический анализ объектов интеллектуальной собственности по теме научного исследования; сравнительный анализ конструкций нерегулярных насадок;
- Разработать методику эксперимента, провести описание экспериментальной установки.
- Провести моделирование исследуемого процесса.
- Используя результаты экспериментальных исследований, разработать и обосновать новую конструкцию нерегулярной насадки;
- Показать на конкретных примерах возможную область использования конструкции новой насадки в химической промышленности;
- Рассчитать технико-экономическую, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта.

Литература

1. Moggridge G.D., Cussler E.L. – An introduction to chemical product design. – 2000. – V.78. – P.5-11.
2. Muller S., Lier S., Grunewald M. – Development and characterization of a modular absorption column for transformable plants. – 2015. – V. 99. – P. 256-264.
3. Von K.F. Fruh, Maier U., Schaudel D. – Handbuch der Prozess automatisierung – Prozessleittechnik fuer fahrende Anlagen. – 2006. – V.88. – P. 1539-1539.
4. Buchholz S. Future manufacturing approaches in the chemical and pharmaceutical industry. – 2010. – V.49. – P.993-935.
5. Kent. Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology [Text]. – 2007. – 1875 p.
6. Grunewald M., Lier S. – Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants. – 2011. – V.34. – P.809-816.
7. Титова Л.М., Алексанян И.Ю., Лоцманова О.В. – Термодинамический анализ и оценка эффективности действующего реактора синтеза аммиака – Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – №4 (28). – С.24-29.
8. Ворошин А.В. –Разделение бикомпонентной смеси в ректификационной установке непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой: диссертация ... кандидата технических наук : 05.17.08 / Ворошин Андрей Валерьевич; [Место защиты: Иван. гос. хим.- технол. ун-т].- Иваново, 2013. – 112 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/535
9. Каган А.М. – Контактные насадки промышленности теплообменных аппаратов: Монография; Под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013 . – 454 с. : ил.

10. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассобменных процессов: Монография. Казань: Изд-во Казанского университета, 2007. – 500 с.
11. Schuites M. Raschig Super-Ring – A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages. – 2003. – V.81. – P.48-57.
12. Bu S.S., Yang J., Zhou M., Wang Q.W., Li S.Y., Cuo Z.X. – On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres. – 2014. – V.270. – P.21-33.
13. Официальный сайт компании Sulzer [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.sulzer.com/>.
14. Brunazzi E., Paglianti A. – Mechanistic Pressure Drop Model for Columns Containing Structured Packings. – 1997. – V.43. – P 317 – 327.
15. Olujic Z. – Effect of Column Diameter on Pressure Drop of A corrugated Sheet Structured Packing. – 1999. – V. 77. – P. 505 – 510.
16. Касаткин А.Г. –Основные процессы и аппараты химической технологии / Учебник для вузов. 10-е издание. – 2004. – 753 с.
17. Kolev N., Krlev B., Razkazova -Velkova E. – Packing with Stamped Horizontal Lamellae Operating at Extremely Low Liquid Loads II. Effective Surface Area. – 2007. – V.31. – P.103-109.
18. Kolev N., NakovSv., Ljutzkanov, Kolev D. – Effective area of a highly efficient random packing / Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2006. – V.45. – P. 429-436.
19. NakovSv., Kolev N., Ljutzkanov, Kolev D. – Comparison of the effective packings. – 2007. – V.46. – P. 1385-1390.
20. Официальный сайт компании Raschig GmbH [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.raschig.de/>.
21. Kolev N., Razkazova-Velkova E. – Liquid phase leakage in the free volume of columns filled with vertical-wall packing. – 1999. – Tome, 52 (9/10). – P 55-58.

22. Mark W. Hlawitschka, Stephan Schmidt, Hans-Jorg – Bart Rashig Super-Ring Operating Characteristics in Unpulsed Liquid – Liquid Extraction Columns / Chemical Engineering and Technology. – 2015. – V.38. – P. 446-454.

23. Kolev N., Razkazova - Velkova E. – A new column packing for operation at extremely low liquid loads. – 2001. – V.40. – P. 471-476.

24. Официальный сайт компании Koch-Glitsch [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://koch-glitsch.com/>

25. Пат. На изобретение RU 2 443 467 C2, B01J 19/20 (2006.01) Элементы нерегулярной насадки и содержащая их колонна [Текст] / НИЕВОУДТ Изак (US) Патентообладатель(и): КОХ-ГЛИЧ, ЛП (US) - 2009117608/05. Заявлено: 20.11.2010. Опубликовано: 27.02.2012 Бюл. № 6

26. Пат. на изобретение RU 2 289 473 C2, МПК B01J 19/32 (2006.01), B01D 3/00 (2006.01), B01F 3/04 (2006.01) Спиральная насадка для теплообменных и совмещенных с ними реакционных процессов [Текст] / Богатырёв Владимир Фёдорович Патентообладатель(и): Богатырёв Владимир Фёдорович - 2004115769/15. Заявлено: 24.05.2004. Опубликовано: 20.12.2006 Бюл. № 35

27. Пат. на полезную модель RU 196 444 U1, МПК B01J 19/30 (2006.01) Насадка для тепло- и массообменных процессов [Текст] / Голованчиков Александр Борисович (RU), Прохоренко Наталья Андреевна (RU), Чёрикова Ксения Васильевна (RU), Шибитова Наталия Валентиновна (RU), Залипаева Ольга Александровна (RU), Кочарян Роман Саргисович (RU) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU) - 2020101476, Заявлено: 16.01.2020. Опубликовано: 28.02.2020 Бюл. № 7.

28. Пат. на полезную модель RU 195 485 U1, МПК B01J19/32 (2006.01) Насадка для массообменных процессов [Текст] / Залипаева Ольга

Александровна(RU), Голованчиков Александр Борисович(RU), Залипаев Павел Павлович (RU), Прохоренко Наталья Андреевна(RU), Коссону Бае Рожер Пьер Месмер(RU), Бодров Алексей Олегович(RU) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU) - 2019122563, Заявлено: 18.07.2019. Опубликовано: 29.01.2020 Бюл.№4.

29. Авт. свидетельство на изобретение 572284 МПК: B01D 53/20 Насадка для аппаратов с псевдооживленным трехфазным слоем [Текст] / Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт по подготовке к транспортировке и переработке природных газов "внипигаз" Алекперов Газанфар Зульфугар, Лернер Галина Яковлевна - 2129552, заявлено: 28.04.1975. Опубликовано: 15.09.1977 Бюл. № 34

30. Патент 103148, B01D53/20 (2006.01). Насадка для массообменных аппаратов с псевдооживленным слоем [Текст] / В.П. Миронов, Н.В. Фрякин, М.В. Чаусов; Патентообладатель: В.П. Миронов, Н.В. Фрякин, М.В. Чаусов; Заявка3377029/2329.12.1981; Опубликовано: 30.07.1983Бюл. №28.

31. Laszlo Hegely,John Roesler,Pascal Alix,David Rouzineau,Michel Meyer – Absorption methods for the determination of mass transfer parameters of packing internals: A literature review. – 2017. – Tome, 52 (9/10). – P 55-58.

32. Yoshida F, Koyanagi T. Mass transfer and effective interfacial areas in packed columns. AIChE J. 1962; 8(3): 309 – 316

33. Lynch EJ, Wilke CR. Effect of fluid properties on mass transfer in the gas phase. AIChE J. 1955; 1(1): 9 – 19.

34. Sherwood TK, Holloway FAL. Performance of packed towers—experimental studies of absorption and desorption. Trans Am Inst Chem Eng. 1940; 36: 21 – 37

35. Wang GQ, Yuan XG, Yu KT. Review of mass-transfer correlations for packed columns. Ind Eng Chem Res. 2005; 44(23): 8715 – 8729

36. Murrieta CR, Seibert AF, Fair JR, Rocha-U JA. Liquid-side mass-transfer resistance of structured packings. *Ind Eng Chem Res.* 2004; 43: 7113 – 7120
37. Whitney RP, Vivian JE. Absorption of sulfur dioxide in water. *Chem Eng Prog.* 1949; 45(5): 323 – 337
38. Sherwood TK. *Absorption and Extraction.* New York: McGraw-Hill, 1937.
39. Kowalke OL, Hougen OA, Watson KM. Transfer coefficients of ammonia in absorption towers. *Bull Univ Wis Eng Exp Stn.* 1925; 68: 1 – 86.
40. Gross WF, Simmons CW. Countercurrent absorption in non-aqueous systems. *Trans Am Inst Chem Eng.* 1944; 40: 121– 141
41. Dwyer OE, Dodge BF. Rate of absorption of ammonia by water in a packed tower. *Ind Eng Chem.* 1941; 33(4): 485– 492.
42. Othmer DF, Scheibel EG. Acetone absorption by water in a semi-commercial packed tower. *Trans Am Inst Chem Eng.* 1941; 37: 211– 234.
43. Molstad MC, McKinney JF, Abbey RG. Performance of drip-point grid tower packings III. Gas-film mass transfer coefficients; additional liquid-film mass transfer coefficients. *Trans Am Inst Chem Eng.* 1943; 39: 605– 660.
44. Gross WF, Simmons CW. Countercurrent absorption in non-aqueous systems. *Trans Am Inst Chem Eng.* 1944; 40: 121– 141.
45. Landau R, Birchenall CE, Joris GG, Elgin JC. Absorption in a high molecular weight non-aqueous system - uranium hexafluoride in heavy oil. *Chem Eng Prog.* 1948; 44(4): 315– 326.
46. Hutchings LE, Stutzman LF, Koch HA. Gas absorption-mass transfer coefficients as function of liquid, gas rates, tower packing characteristics. *Chem Eng Prog.* 1949; 45(4): 253– 268.
47. Whitney RP, Vivian JE. Absorption of sulfur dioxide in water. *Chem Eng Prog.* 1949; 45(5): 323– 337.
48. Molstad MC, Parsly LF. Performance of drip-point grid tower packings V. Absorption of ethanol vapor. *Chem Eng Prog.* 1950; 46(1): 20– 28.

49. Houston RW, Walker CA. Absorption in packed towers. Effect of molecular diffusing on gas film coefficient. *Ind Eng Chem.* 1950; 42(6): 1105–1112.
50. Zabban W, Dodge BF. Effect of total pressure on the gas-film absorption coefficient in a packed tower. *Chem Eng Prog Symp Ser.* 1954; 10: 61–72.
51. Yoshida F, Koyanagi T. Mass transfer and effective interfacial areas in packed columns. *AIChE J.* 1962; 8(3): 309–316.
52. Shulman HL, Savini CG, Edwin RV. Performance of packed columns VII. The effect of holdup on gas-phase mass transfer rates. *AIChE J.* 1963; 9(4): 479–484.
53. Billet R, Maćkowiak J. Development and process characteristics of Impulse Packing for gas-liquid systems. *Fette Seifen Anstrichm.* 1983; 85(10): 383–391.
54. Maćkowiak J. Untersuchungen des gas- und flüssigkeitsseitigen Stoffüberganges in Kolonnen mit strukturierten Packungen. *Chem Ing Tech.* 1999; 1–2(71): 100–104.
55. San-Valero P, Peña-Roja JM, Álvarez-Hornos FJ, Gabaldón C. Modelling mass transfer properties in a biotrickling filter for the removal of isopropanol. *Chem. Eng. Sci.* 2014; 108: 47–56. Payne JW, Dodge BF. Rate of absorption of carbon dioxide in water and in alkaline media. *Ind Eng Chem.* 1932; 24(6): 630–637.
56. Payne JW, Dodge BF. Rate of absorption of carbon dioxide in water and in alkaline media. *Ind Eng Chem.* 1932; 24(6): 630–637.
57. Hikita H, Sugata M, Kamo K. Liquid film coefficients of commercial packings: gas absorption in a packed tower. *Kagaku Kogaku.* 1954; 18(10): 454–456.
58. Ueyama K, Hikita H, Nishigami K, Funahashi S. Liquid-film coefficient for small glass rings: gas absorption in a packed column. *Kagaku Kogaku.* 1954; 18(2): 68–72.

59. Fujita S, Hayakawa T. Liquid-film mass transfer coefficients in packed towers and rod-like irrigation towers. *Kagaku Kogaku*. 1956; 20(3): 113–117.
60. Yoshida F, Koyanagi T. Liquid phase mass transfer rates and effective interfacial area in packed absorption columns. *Ind Eng Chem*. 1958; 50(3): 365–374.
61. Onda K, Sada E, Otubo F. Liquid-side mass-transfer coefficient for a tower packed with Raschig rings. *Kagaku Kogaku*. 1958; 22(4): 194–199.
62. Merchuk JC, Nakanishi K, Yoshida F. Gas absorption with second-order chemical reaction in a packed column. *J Chem Eng Jpn*. 1970; 3(1): 62–67.
63. Maćkowiak J. Dissertation. TU Wrocław, Wrocław, Poland, 1975.
64. Billet R, Maćkowiak J. Application of modern packings in thermal separation processes. *Chem Eng Technol*. 1988; 11: 213–227.
65. Linek V, Petříček P, Beneš P, Braun R. Effective interfacial area and liquid side mass transfer coefficients in absorption columns packed with hydrophilised and untreated plastic packings. *Chem Eng Res Des*. 1984; 62(1): 13–21.
66. Moucha T, Linek V, Prokopová E. Effect of packing geometrical details - influence of free tips on volumetric mass transfer. *Chem Eng Res Des*. 2005; 83 (1): 88–92.
67. Kim S, Deshusses MA. Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. Experimental results. *Chem Eng Sci*. 2008; 63: 841–855.
68. Alix P, Raynal L. Pressure drop and mass transfer of a high capacity random packing. Application to CO₂ post-combustion capture. *Energy Procedia*. 2009; 1(1): 845–852.
69. Sherwood TK, Holloway FAL. Performance of packed towers—experimental studies of absorption and desorption. *Trans Am Inst Chem Eng*. 1940; 36: 21–37.

70. <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityTable/>
71. <http://www.fptl.ru/spravo4nik/vyazkost-vodi.html>
72. <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazy-raznye/dinamicheskaya-vyazkost-gazov-i-parov>
73. Кафаров В.В. Основы массопередачи [Текст] : Системы газ - жидкость, пар - жидкость, жидкость - жидкость : [Учеб. пособие для хим.-технол. вузов]. - Москва: Высш. школа, 1962. - 655 с.
74. Сийрде Э. К., Теаро Э. И., Миккал В. Я. Дистилляция. Изд-во «Химия», 1971, стр. 216, рис. 79, табл. 7
75. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. – 282 с.
76. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип Формализации : М. «Наука», 1979, 394 с.
77. Описание полезной модели к патенту 199476 РФ, МПК В01J19/30 (2006.01). Насадка для теплообменных аппаратов [Текст] / Максименко Ю. А., Васина Н.П., Теличкина Э. Р., Титова Л. М., Свирина С. А., Шевелев М.А.; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» – 2020102093; Заявлено 20.01.2020. Опубликовано 03.09.2020, Бюл. №25
78. Официальный сайт компании Vereinigte Füllkörper-Fabriken [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.vff.com/ru/>
79. Государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утвержденной постановлением правительства от 15 апреля 2014 года № 328
80. <https://polimerinfo.net/polikarbonat/>
81. <https://poliks.ru/spravochnik/novye-materialy/peek-poliefirfirketon>

82. <http://www.engplast.ru/content.php?665-PEI>
83. <http://www.engplast.ru/content.php?676-PPSU>
84. <http://www.engplast.ru/content.php?678-PSU>