

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК 66.023.2(043.3)

Мытько Дмитрий Юрьевич

**ГИДРОДИНАМИКА И МАССОПЕРЕДАЧА В АППАРАТАХ
С РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических
технологий

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель **Вайтехович П.Е.**, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Акулич П.В.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории химико-энергетических процессов ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова» Национальной академии наук Беларуси;
Вилькоцкий А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Опонирующая организация учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Защита состоится «15» декабря 2023 года в 12⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а в ауд. 240 корп. 4.

Тел. (017) 392-71-24; факс (017) 379-26-94, e-mail: dyadenko-mihail@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «14» ноября 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.08.02,
кандидат технических наук, доцент



М.В. Дяденко

ВВЕДЕНИЕ

Массообменные процессы и аппараты широко используются в химической промышленности и других смежных отраслях. Протекающие в них процессы массопередачи чаще всего реализуются в тарельчатых и насадочных колоннах. В первых из них происходит многоступенчатый контакт фаз, из-за чего повышается эффективность массопередачи, но одновременно увеличивается и гидравлическое сопротивление. Этот недостаток не наблюдается в насадочных массообменных аппаратах. Насадки разделяются на нерегулярные, регулярные и регулярно структурированные. Наибольший интерес представляет последний тип насадки. Одной из первых разновидностей таких насадок можно считать зигзагообразную. При ее эксплуатации установлено, что тонкие гофрированные листы, из которых изготавливается насадка, трудно собрать в пакет, сохранив при этом равные по размеру каналы. При этом на ребрах гофров из-за повышения локальных скоростей газа возможен срыв и унос капель жидкости, что снижает диапазон устойчивой работы аппарата в целом. Устранение этих недостатков было принято в качестве ориентира для поиска новых технических решений и проведения исследований по определению оптимальной конструкции регулярной структурированной насадки.

Основным направлением стал отказ от зигзагообразного движения газа в каналах насадки и переход к осевому. При этом сохранение развитой поверхности контакта фаз может быть достигнуто за счет уменьшения поперечного сечения осевых каналов. В результате предложена насадка, представляющая собой коаксиально установленные цилиндры, в зазоре между которыми укреплена гофрированная лента. Такая компоновка образует каналы с поперечным сечением, близким к треугольнику, и способствует увеличению жесткости конструкции.

Новая коаксиальная насадка и направление, в котором она будет совершенствоваться, ставит ряд научных задач. Первая из них заключается в необходимости сравнения предлагаемой насадки по гидродинамическим и массообменным характеристикам с известными в абсолютно одинаковых условиях. Второй задачей является поиск ее оптимальных геометрических параметров, диапазона устойчивой работы по газу и жидкости. Важным при этом будет теоретическое осмысление гидродинамической обстановки в треугольных каналах насадки и ее влияние на эффективность массопередачи, а комплекс экспериментальных и аналитических исследований должен обеспечить возможность проведения масштабного перехода при дальнейшей промышленной реализации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках госбюджетной темы ГБ 21–060 «Изучение гидродинамики и эффективности массопередачи в коаксиальной регулярной структурированной насадке» (БГТУ, № гос. регистрации 20210997 от 04.05.2022).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной методики определения оптимальных геометрических параметров новой регулярной структурированной насадки по результатам исследований гидродинамических и массообменных характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Экспериментальным методом определить наиболее рациональное конструктивное решение регулярной структурированной насадки с высокой эффективностью массопередачи и низким гидравлическим сопротивлением и получить аналитическую зависимость для расчета удельных энергозатрат на проведение процесса.

2. Установить закономерности изменения гидродинамических и массообменных характеристик рациональной регулярной структурированной насадки от технологических и конструктивных параметров для определения режимов работы и оптимального геометрического размера стороны канала.

3. Получить критериальные уравнения для возможности масштабирования полученных результатов и расчета промышленных аппаратов с оптимизированной регулярной структурированной насадкой.

4. С использованием компьютерного моделирования установить влияние гидродинамических режимов в канале насадки на эффективность массопередачи.

Объект исследования. Объектом исследования являются регулярные структурированные насадки и процессы, протекающие в них.

Предмет исследования. Предметом исследования являются гидродинамические и массообменные характеристики разработанных насадок. Основная сущность данной работы заключается в проведении исследований гидравлического сопротивления, эффективности массопередачи и относительной величины брызгоуноса с последующим получением расчетных зависимостей для этих параметров; разработке новой конструкции регулярной структурированной насадки и проведении исследований ее гидродинамических и массообменных характеристик, а

также в компьютерном моделировании гидродинамики пленочного течения в каналах данной насадки.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в определении рациональной конструкции регулярной структурированной насадки на основании закономерностей изменения эффективности массопередачи и гидравлического сопротивления, а также границ ее гидродинамических режимов с дальнейшим установлением оптимальных геометрических размеров и получением критериальных уравнений для возможности масштабирования и расчета промышленных аппаратов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика технико-экономического сравнения различных типов насадки для массообменных аппаратов, основанная на использовании экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению и эффективности массопередачи, позволяющая на основе удельных энергозатрат на единицу эффективности определить наиболее рациональный вариант насадки и наметить пути ее совершенствования.

2. Закономерности изменения гидравлического сопротивления, эффективности массопередачи, величины брызгоуноса в зависимости от технологических и конструктивных параметров выбранной насадки, позволяющие установить границы гидродинамических режимов, диапазон эффективной работы, верхнюю границу нагрузок по газу и оптимизировать ее геометрические размеры, а также предложить метод масштабирования при переходе к промышленным образцам, основанный на теории подобия.

3. Метод определения параметров пленочного течения жидкости в треугольных каналах насадки при ее свободном стекании и противоточном движении с газовым потоком, базирующийся на математическом и компьютерном моделировании, позволяющий подтвердить установленные ранее границы режимов движения пленки жидкости и связанное с этим изменение эффективности массопередачи, гидравлического сопротивления и брызгоуноса за счет полноты смачиваемости стенок и возможности перетока части жидкости со стенок в углы каналов.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации. Автором данной диссертационной работы полностью выполнено экспериментальное исследование и его анализ для разработанных регулярных структурированных насадок. Соискателем проведен анализ влияния конструкций и поверхностей на пленочное течение, а также изучены работы, направленные на исследование регулярных структурированных насадок. Совместно с научным руководителем автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач, разработке методик и

проведении теоретических и экспериментальных исследований. Для осуществления последних были спроектированы и разработаны модельные образцы регулярных структурированных насадок. Их исследование проводилось на лабораторном стенде с изучением эффективности массопередачи, гидравлического сопротивления, относительной величины брызгоуноса, а также влияния различных факторов на их изменение. Полученные результаты позволили определить рациональное конструктивное решение регулярной структурированной насадки с оптимальными геометрическими параметрами. В публикациях с соавтором вклад соискателя определяется в рамках излагаемых в диссертационной работе результатов. Автор осуществлял проектирование промышленных образцов регулярной структурированной насадки, курировал их изготовление и принимал активное участие в их промышленных испытаниях.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях и форумах: 84-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), БГТУ, Минск, 2020 г.; 85-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), БГТУ, Минск, 2021 г.; Международный научно-технический форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке, БГТУ, Минск, 2021 г.; Международный научно-технический форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке, БГТУ, Минск, 2022 г.; 86-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), БГТУ, Минск, 2022 г.; Международная научно-практическая конференция им. Д.И. Менделеева, ТИУ, Тюмень, 2023 г.; проведены промышленные испытания на ООО «МВПак-Групп».

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 8 статьях сборников материалов конференций и 1 отчете по НИР. Новизна технических решений подтверждена патентом на полезную модель Республики Беларусь №12802 от 24.05.2021 «Регулярно-структурированная насадка». Общий объем опубликованных материалов составляет 5 авторских листов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений (3 с.), введения (2 с.), общей характеристики работы (3 с.), пяти глав (119 с.), заключения (2 с.), библиографического списка, содержащего 131 использованный источник (7 с.) и 17 собственных работ соискателя (2 с.), и приложений (18 с.). Результаты

исследований изложены на 87 с. машинописного текста и представлены на 50 иллюстрациях (16 с.) и в 3 таблицах (1 с.)

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен анализ многочисленных источников информации и опыта промышленного применения, который позволил установить наиболее перспективные направления для создания новых насадочных массообменных аппаратов. Они связаны с использованием регулярной структурированной насадки, характеризующейся упорядоченной структурой в виде каналов определенной формы и размеров, в которых противотоком движутся и взаимодействуют газовая и жидкая фазы. Аппараты с такой насадкой по сравнению с тарельчатыми и другими насадочными аппаратами имеют ряд преимуществ. При достаточно высокой эффективности массопередачи гидравлическое сопротивление их значительно ниже. Более того, при изготовлении регулярной структурированной насадки в виде пакетов из тонкого листового материала ее материалоемкость существенно снижается.

В этой связи многие зарубежные университеты и фирмы начали активно заниматься разработкой, исследованием и внедрением такой насадки в производство. Лидером в этом процессе является швейцарская фирма Sulzer Chemtech, выпускающая насадку Mellapak. Отличительная особенность насадки заключается в наличии между гофрированными листами пакета зигзагообразных каналов. При движении по ним газ и жидкость дополнительно турбулизируются и повышается эффективность массопередачи.

Однако в процессе эксплуатации аппаратов с такой насадкой выявлен ряд недостатков. Первый из них заключается в том, что на гребнях гофров происходит срыв капель жидкости и увеличивается ее унос, а соответственно, сужается диапазон устойчивой работы аппарата. Кроме того, в процессе сборки и монтажа пакета из тонких листов возникают трудности в обеспечении его жесткости. В этом случае добиться стабильной ширины каналов практически невозможно.

Анализ указанных недостатков показал, что преодолеть их можно при возвращении к варианту ячеечной насадки с вертикальными каналами. А достижение высокой эффективности массопередачи в них, как и в насадке Mellapak, планируется обеспечить дополнительными турбулизаторами потока: шероховатыми стенками каналов, завихрителями. Снижение металлоемкости ячеечной насадки возможно при использовании современных технологий ее изготовления.

Таким образом, в структуре насадки мы возвращаемся к вертикальным осевым каналам многоугольного сечения, что приведет к уменьшению уноса и снижению гидравлического сопротивления. Насадка будет изготавливаться из тех же тонколистовых материалов, но предварительно спрофилированных под требуемую форму канала. Первая насадка выполнена в виде коаксиально установленных цилиндров, между которыми вставлена и укреплена гофрированная лента. В результате этого образованы каналы, близкие по сечению к треугольным. Листы второй из них выполнены с трапецидальным профилем. При их соединении образуются шестиугольные (сотовые) каналы. Разрезав торцевые края листов и отогнув их под определенным углом, получим дополнительное устройство для закрутки газового потока. Такой метод изготовления обеих насадок обеспечит жесткость пакетов и стабильность размеров каналов.

Анализ научно-исследовательских работ по регулярным структурированным насадкам показал, что подавляющее их большинство проводилось на зигзагообразных насадках.

Отсюда можно сделать вывод, что экспериментальные исследования предлагаемых насадок с целью оптимизации их гидродинамических, массообменных характеристик и геометрических параметров являются весьма актуальными. Кроме того, с использованием математического моделирования и современных компьютерных технологий планируется изучить гидродинамическую обстановку в многоугольных каналах и оценить ее влияние на основные параметры насадки.

Во второй главе на основании анализа основных направлений в разработке насадочных массообменных аппаратов и особенно регулярных структурированных насадок для сравнительных исследований выбрано три типа таких насадок: зигзагообразная, сотовая, коаксиальная. В качестве эталона принята насадка в виде колец Рашига (рисунок 1). Диаметр пакета насадки (аппарата) составлял 0,15 м, а его высота – 0,1 м [1–А, 9–А].



Рисунок 1 – Насадки для массообменных аппаратов

Усовершенствована лабораторная установка для исследования гидродинамических и массообменных характеристик насадок. Она снабжена современными контрольно-измерительными приборами. Обоснован выбор методики определения гидравлического сопротивления различных типов насадок и их эффективности массопередачи по жидкой и газовой фазам. Массообменные характеристики насадок изучались на двух модельных средах: при десорбции диоксида углерода из воды и насыщении воздуха парами воды. Для первой из них основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе и оценивается эффективностью $E_{ж}$, а для второй – в газовой фазе – соответственно $E_{г}$. Скорректирована методика технико-экономического обоснования выбора наиболее рационального типа насадки, основанная на расчете удельных энергозатрат на единицу эффективности J ($\text{Вт} \cdot \text{с}/\text{м}^3$), рассчитываемых по формуле

$$J = \frac{N}{Q \cdot E}, \quad (1)$$

где N – энергозатраты, Вт; Q – расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$; E – эффективность массопередачи.

С учетом того что $N = p \cdot Q$, а $p \geq \Delta p$, где Δp – гидравлическое сопротивление насадки Па/м, получим, что критерий эффективности эквивалентен соотношению

$$J = \frac{\Delta p}{E}. \quad (2)$$

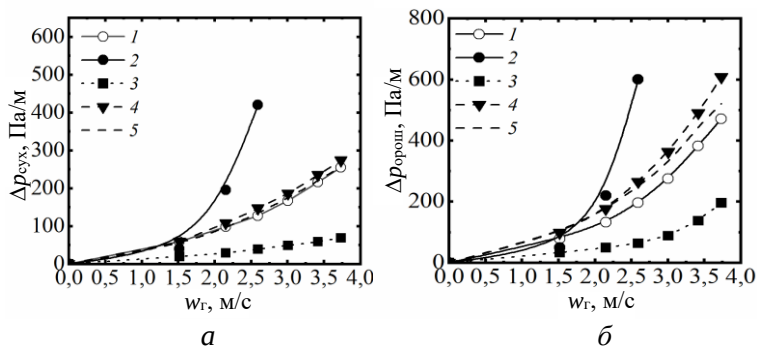
Гидравлическое сопротивление и эффективность массопередачи стали основными параметрами для сравнения разных типов насадки. Варьируемыми параметрами приняты скорость газа ($w_{г} = 0\text{--}4$ м/с) и плотность орошения ($U = 10,8\text{--}15,48$ $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) на полное сечение аппарата.

В ходе гидродинамических исследований установлено, что гидравлическое сопротивление повышается с увеличением скорости газа и плотности орошения. Наименьшим гидравлическим сопротивлением в диапазоне скоростей газа в аппарате $0\text{--}3,7$ м/с обладает коаксиальная насадка ($0\text{--}280$) Па/м, наибольшим – сотовая ($0\text{--}1100$ Па/м). Это объясняется наличием в сотовой насадке завихрителей, препятствующих движению газа и жидкости. Здесь же установлены гидродинамические

режимы работы насадок в следующих диапазонах по скорости газа: 0,5–1,5 м/с – пленочный; 1,5–2,0 м/с – подвисяния; 2,0–2,5 м/с – эмульгирования; 2,5–3,0 м/с – уноса [1–А].

Полученные результаты по гидравлическому сопротивлению исследуемых насадок сравнивались с результатами одной из перспективных и широкоизвестных конструкций MellapakPlus 250.Y.

На рисунке 2, а, б наглядно видно преимущество насадок с вертикальным расположением каналов.



1 – зигзагообразная, 2 – MellapakPlus 250.Y, 3 – коаксиальная, 4 – кольца Рашига (экспериментальные данные), 5 – кольца Рашига (рассчитанные данные)

а – без орошения; б – с орошением

Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления насадок Δp , Па/м, от средней скорости газа w_T , м/с

Диапазон нагрузок по газу для MellapakPlus 252.Y (рисунок 2, б) составляет 0–2,0 м/с, после чего происходит увеличение гидравлического сопротивления, захлебывание и брызгоунос жидкости из аппарата. Для коаксиальной насадки верхним пределом нагрузок по газу является скорость 2,5 м/с, что на 0,5 м/с выше, чем у MellapakPlus 252.Y. Помимо этого, видна разница в 160 Па/м при скорости газа 2,0 м/с между значениями $\Delta p_{\text{орош}}$ для MellapakPlus 252.Y и коаксиальной насадки. Полученные результаты подтверждают выдвинутые нами ранее предположения о преимуществах вертикальных каналов.

Исследование эффективности массопередачи (рисунок 3, а, б) в насадках на двух системах с основным сопротивлением в жидкой и газовой фазах показали высокое значение этого параметра для большинства из них. Наибольшей и стабильной эффективностью

массопередачи во всем диапазоне скоростей газа обладает коаксиальной насадкой. Так, для нее $E_{ж} = 0,85\text{--}0,95$, а $E_{г} = 0,75\text{--}0,90$ [2–А].

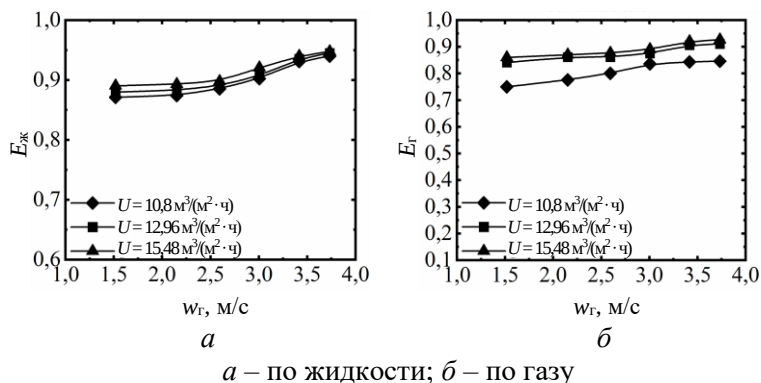


Рисунок 3 – Зависимость эффективности массопередачи для коаксиальной насадки от скорости газа

Технико-экономический расчет, основанный на определении удельных энергозатрат (рисунок 4, a , $б$) на единицу эффективности, показал преимущества коаксиальной насадки перед остальными.

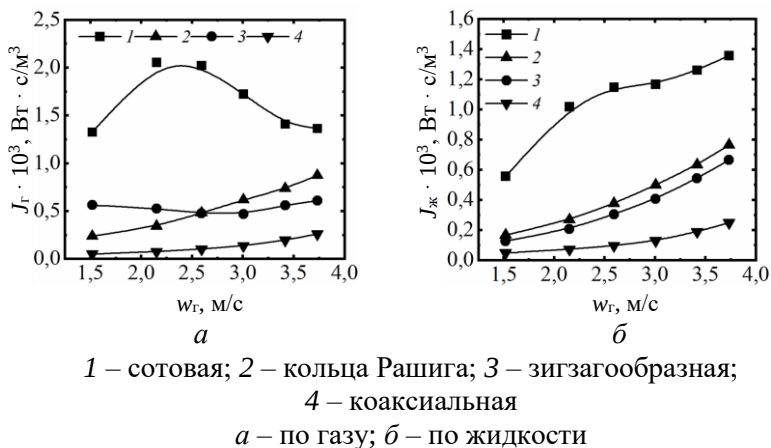


Рисунок 4 – Изменение удельных энергозатрат насадок в рабочем диапазоне скоростей газа

Эта конструкция имеет наименьшее гидравлическое сопротивление и более высокую эффективность массопередачи на обеих

модельных средах. Именно эта насадка была принята нами для дальнейших исследований [3–А, 10–А].

В третьей главе проведена оптимизация конструктивных и технологических параметров коаксиальной насадки, признанной по результатам сравнительных исследований наилучшим вариантом.

В качестве основного конструктивного параметра насадки выбран размер поперечного сечения канала, характеризуемый стороной равностороннего треугольника. Для исследований были изготовлены пакеты насадки с длиной этой стороны 12, 17 и 22 мм, условно обозначенные К12; К17; К22 [4–А, 11–А].

Варьируемыми параметрами в этой части работы приняты скорость газа ($w_r = 0\text{--}4$ м/с) и плотность орошения ($U = 10,80\text{--}15,48$ м³/(м² · ч)) на полное сечение аппарата.

Проведены исследования по определению влияния указанных геометрических размеров на гидравлическое сопротивление и эффективность массопередачи. Установлено, что эффективность массопередачи явно выше у насадки К12, как и гидравлическое сопротивление. Причем в интервале К22–К17 идет равномерное повышение гидравлического сопротивления, а в К17–К12 – резкое, примерно в два раза. Обратная ситуация с эффективностью массопередачи. Например, при скорости газа 2,6 м/с эффективность по жидкости для К12 $E_{ж} = 0,9$; К17 – $E_{ж} = 0,85$; К22 – $E_{ж} = 0,75$. Полученные данные позволили выполнить технико-экономическое сравнение по методике, описанной во второй главе, и определить удельные энергозатраты по формуле (2). Они показали, что оптимальным можно считать канал с размером стороны треугольного сечения 15–20 мм [4–А, 11–А].

В результате этих комплексных исследований установлено, что в диапазоне скоростей газа $w_r = 0\text{--}2,6$ м/с все типоразмеры коаксиальной насадки работают в устойчивом гидродинамическом режиме. При дальнейшем ее увеличении начинается унос [4–А, 11–А].

Поскольку массообменные аппараты могут работать в условиях частичного уноса, то было детально исследовано это явление при скоростях газа, превышающих 2,6 м/с. Экспериментальные исследования в широком диапазоне изменения скоростей газа и при разных плотностях орошения показали, что при принятой допустимой норме уноса 10 г/м³ насадка К12 может работать до скорости 4,2 м/с; К17 – 3,85 м/с; К22 – 3,7 м/с (рисунок 5) [5–А, 12–А].

В заключительной части главы приведен инженерный метод расчета коэффициентов критериальных уравнений для возможности масштабирования при переходе от лабораторных к промышленным

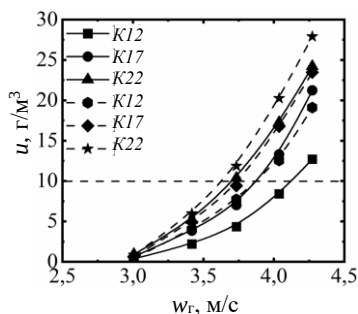


Рисунок 5 – Изменение относительного брызгоуноса жидкости при плотности орошения $12,96 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

образцам насадочных аппаратов. По экспериментальным данным составлены критериальные уравнения, где определяемыми являются критерий Нуссельта диффузионный для жидкости $Nu'_ж$ и Эйлера Eu , а изменяемыми – критерий Рейнольдса для жидкости $Re_ж$ и газа $Re_г$:

$$Nu'_ж = Re_г^{0,25} \cdot Re_ж^{-1,08}; \quad (3)$$

$$Eu = Re_г^{-0,31} \cdot Re_ж^{1,55}. \quad (4)$$

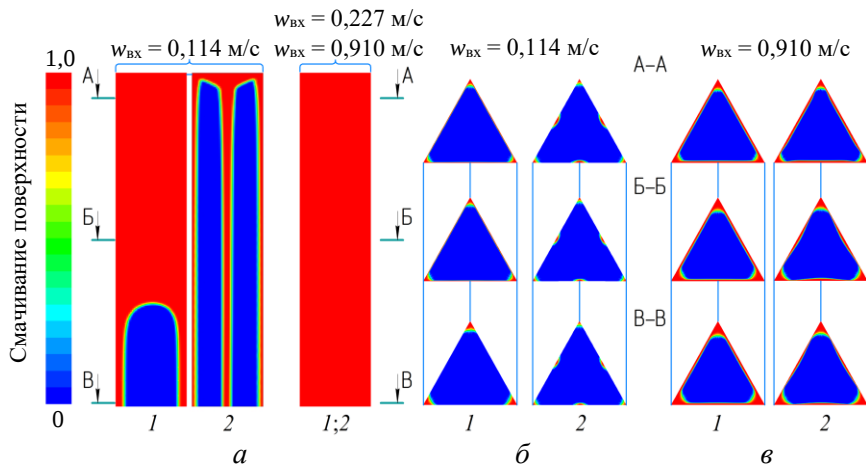
Погрешность расчета по полученным уравнениям (3), (4) значений параметров не превышает 10% [6–А].

В четвертой главе выполнены аналитические исследования, посвященные изучению пленочного течения жидкости по стенкам каналов регулярной структурированной насадки. В качестве модельных жидкостей принята вода и 50%-ный раствор NaOH с большим диапазоном изменения вязкости и поверхностного натяжения. Поверхность канала регулярной структурированной насадки принималась выполненной из кислотоупорной керамики. Краевой угол смачивания воды и раствора NaOH определялся экспериментально. Моделирование пленочного течения проводилось с применением многофазной модели Volume of Fluid (VOF).

Турбулентность потоков жидкости и газа учитывалась моделью Re-Normalisation Group (RNG). Модель турбулентности RNG *k-ε* разработана на основании теории ренормализованных групп. Данная модель улучшает точность вычислений для жидкостей с высокими скоростями деформаций и описывается системой уравнений. В модель RNG включены уравнения, полученные аналитическим путем для эффективной вязкости, которая используется для жидкостей с низкими числами Рейнольдса. Данные характеристики делают модель более точной и надежной, позволяя эффективно применять ее для более широкого класса жидкостей [7–А, 14–А, 15–А].

Первая часть аналитических исследований была направлена на изучение поверхности смачивания стенок канала жидкостью с разными физическими свойствами при ее свободном стекании без подачи газа. Это позволило определить скорости на входе в канал, при которых

происходит полное смачивание стенок. Для воды $w_{\text{вх}} = 0,910$ м/с, для щелочи $w_{\text{вх}} = 0,227$ м/с (рисунок 6, а–в) [7–А, 15–А].



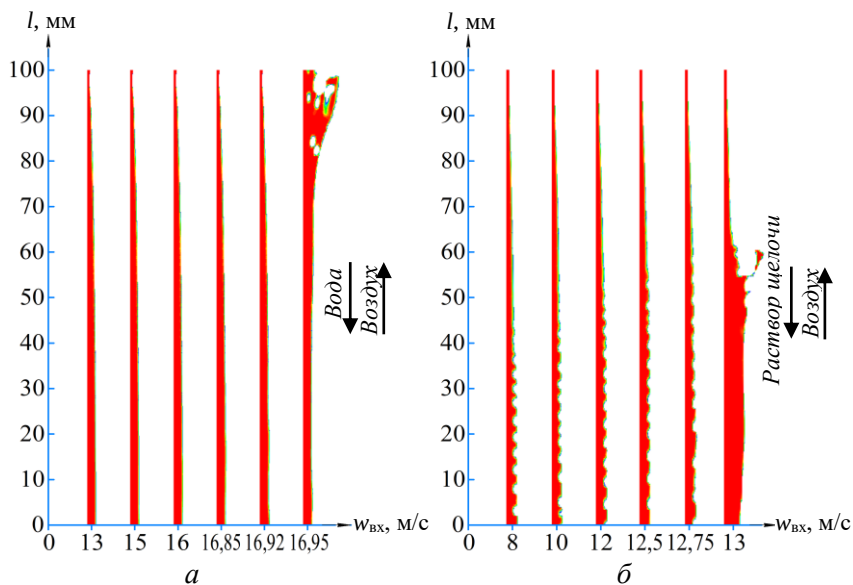
1 – смачивание пленкой раствора щелочи; 2 – смачивание пленкой воды
а – распределение жидкости на стенке канала (при различных значениях скорости пленки жидкости $w_{\text{вх}}$); б, в – распределение жидкости в трех сечениях канала (б – при $w_{\text{вх}} = 0,114$ м/с, в – при $w_{\text{вх}} = 0,910$ м/с)

Рисунок 6 – Смачивание поверхности канала коаксиальной регулярной структурированной насадки высотой 100 мм

Следующий этап заключался в изучении влияния противоточного движения газа на гидродинамику пленочного течения. Обозначены гидродинамические режимы течения. Для воды пленочное течение заканчивается при скорости газа на входе 16,0 м/с. Режим подвисяния устанавливается в диапазоне 16,00–16,92 м/с, после чего наступает интенсивный унос капель (рисунок 7, а). Для щелочи скорость газа, при которой заканчивается пленочный режим, равна 12,0 м/с. В диапазоне скоростей 12,50–12,75 м/с устанавливается подвисяние с утолщением пленки жидкости в отдельных местах, а при скорости выше 12,75 м/с наступает захлебывание и унос (рисунок 7, б) [7–А, 15–А].

Толщина пленки жидкости на стенках канала по ходу ее нисходящего движения уменьшается, что связано с соответствующим увеличением скорости движения. Однако для воды на расстоянии от входа канала $l = 67$ мм наблюдается небольшое утолщение пленки и стабилизация ее скорости, что свидетельствует о волновом движении жидкости [7–А, 14–А, 15–А].

Пленка раствора щелочи на начальном участке канала 0–45 мм движется так же, как и пленка воды, далее наблюдаются ее утолщение и снижение скорости вследствие высокой вязкости раствора щелочи.



а – пленка воды; *б* – пленка раствора щелочи

Рисунок 7 – Диаграммы контуров (толщины) пленки жидкости по длине канала l при противоточном движении воздуха со скоростью w_{BX}

Движение пленки жидкости в углах канала несколько отличается. Вначале на небольшом участке длины канала (1,5 мм) толщина пленки уменьшается (для обеих жидкостей), а затем – существенно увеличивается в связи с воздействием пристенных эффектов от двух граней канала. Толщина пленки раствора щелочи больше толщины пленки воды в связи с ее высокой вязкостью и меньшей скоростью движения, что способствует образованию ряби на поверхности при выходе из канала.

По результатам моделирования установлено, что уменьшение толщины пленок жидкостей на стенке и по высоте канала связано с ее перетеканием в углы, где наблюдается более высокая скорость течения.

Таким образом, при использовании более вязких растворов в аппарате с регулярной структурированной насадкой снижается верхний предел нагрузки аппарата по газу. Реальные среднерасходные

скорости в насадке аппаратов существенно ниже, однако локальные значения скорости газа в определенных зонах за счет сужения каналов могут достигать указанных величин.

На следующем этапе моделирования рассматривалось воздействие интенсификаторов массопередачи, таких как перфорация стенок каналов, закрутка газового потока, на пленочное течение в них. Использована математическая модель движения пленки жидкости под воздействием закрученного потока газа в перфорированном канале [8–А]. Она основана на уравнениях Навье – Стокса, которые были преобразованы к виду формул:

$$\frac{d^2 w_z}{dr^2} - \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{w_o \cdot R}{v_{ж}} - 1 \right) \cdot \frac{dw_z}{dr} = - \frac{\rho_{ж} \cdot g - \Delta p}{\mu_{ж}}; \quad (5)$$

$$\frac{d^2 w_{\phi}}{dr^2} - \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{w_o R}{v_{ж}} - 1 \right) \cdot \frac{dw_{\phi}}{dr} - \frac{1}{r^2} \cdot \left(\frac{w_o \cdot R}{v_{ж}} + 1 \right) \cdot w_{\phi} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial p_{изб}}{\partial r} = \rho_{ж} \cdot \left(\frac{w_{\phi}^2}{r} + \frac{w_o^2 \cdot R^2}{r^3} \right), \quad (7)$$

где w_z , w_{ϕ} – скорость пленки в соответствующих координатах полярной системы и оттока, м/с; r – радиальная координата до поверхности пленки; w_o – скорость оттока, м/с; R – радиус перфорированного цилиндра, м; $v_{ж}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; $\rho_{ж}$ – плотности жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Δp – гидравлическое сопротивление канала, Па/м; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости, Па · с; $p_{изб}$ – избыточное давление, Па.

Ее реализация с помощью формул (4), (6) позволила рассчитать среднюю толщину пленки жидкости, которая изменялась в диапазоне 0–490 мкм, среднюю осевую $\bar{w}_z$ скорость пленки – 0,702 м/с и скорость оттока жидкости по формулам:

$$\bar{w}_z = \frac{Q}{\delta}, \quad (8)$$

где Q – объемный расход м³/с; δ – толщина пленки, м;

$$w_0 = \frac{\Delta p_r \cdot \left(1 - \exp \left(-\varpi \cdot \sqrt{\Delta p_r / (\rho \cdot w_z^2)} \right) \right)}{\mu \cdot \lambda_{п.с}}, \quad (9)$$

где ϖ – поправочный коэффициент; $\lambda_{п.с}$ – сопротивление перфорированной стенки, м^{-1} .

В пятой главе были проанализированы технологические процессы, в которых может использоваться разработанная и исследованная нами коаксиальная регулярная структурированная насадка. Установлено, что таковыми являются процессы очистки выхлопных газов от вредных примесей. Этими примесями могут быть оксиды углерода, серы, азота и сероводород.

Наиболее простым и экономически выгодным методом комплексной очистки газа от оксидов серы и азота является карбамидный. При его реализации получаемый сульфатсодержащий раствор может использоваться как жидкое удобрение. Данный метод был использован при проведении промышленных испытаний коаксиальной регулярной структурированной насадки на стадии очистки пиролизного газа от вышеуказанных соединений на ООО «РТС групп». Полученные результаты показали высокую эффективность извлечения диоксида серы, которая составила 90–95%. Итогом работы стала предпроектная подготовка и проект абсорбционного аппарата с регулярной структурированной насадкой для установки пиролиза автомобильных шин.

В последнее время в нашей стране появились технологические установки по получению биогаза с последующим его использованием для генерирования электроэнергии. По данным компании ООО «МВПак-Групп», основным компонентом биогаза является метан ($\text{CH}_4 = 65,8\%$). Одновременно в нем присутствует определенная доля сероводорода ($\text{H}_2\text{S} = 0,014\%$), которая в таком количестве недопустима для установленного после биореактора двигателя внутреннего сгорания. Очистка газа от сероводорода в настоящее время проводится адсорбционным методом, который снижает экономические показатели всей установки. Анализ способов очистки газа от сероводорода показал, что дорогую экономически невыгодную адсорбционную очистку можно заменить на абсорбционную, причем в качестве абсорбента лучше использовать карбонат натрия. Для проверки этого предположения были проведены экспериментальные исследования очистки биогаза разбавленными растворами карбоната натрия от сероводорода с использованием коаксиальной регулярной

структурированной насадки. Эти исследования показали высокую эффективность массопередачи коаксиальной насадки (98–100%) и подтвердили преимущества карбонатного метода. По результатам исследований проведен технико-экономический расчет и разработан проект абсорбера для очистки биогаза от сероводорода [16–А].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основании анализа различных направлений в разработке насадочных массообменных аппаратов установлено, что наиболее перспективной является регулярная структурированная насадка. В качестве объектов для сравнительных исследований выбрана насадка в виде колец Рашига (эталонная) и три регулярных структурированных: зигзагообразная, сотовая и коаксиальная. Скорректированная методика технико-экономического обоснования, базирующаяся на использовании экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению и эффективности массопередачи, позволила на основе удельных затрат на единицу эффективности выбрать наиболее рациональный вариант насадки, в качестве которой оказалась коаксиальная. Она обладает низким гидравлическим сопротивлением и стабильно высокой эффективностью массопередачи во всем диапазоне скоростей газа [1–А, 2–А, 3–А, 9–А, 10–А].

2. Для коаксиальной насадки изучены закономерности изменения гидравлического сопротивления, брызгоуноса и эффективности массопередачи на двух системах с основным сопротивлением в жидкой и газовой фазах в зависимости от конструктивных и технологических параметров, позволяющие оптимизировать ее геометрические размеры, установить границы гидродинамических режимов по скорости газа: пленочного – 0,5–1,5 м/с, подвисяния – 1,5–2,0 м/с, уноса – 2,5–3,0 м/с. Предложен и реализован метод масштабирования при переходе к промышленным образцам аппаратов, основанный на теории подобия [4–А, 5–А, 6–А, 11–А, 12–А, 13–А].

3. С использованием компьютерного моделирования изучено пленочное течение жидкости в треугольных каналах коаксиальной насадки, определены условия полного смачивания стенок при ее свободном стекании и противоточном движении с газом. Установлены режимы пленочного течения и связанное с этим изменение эффективности массопередачи, гидравлического сопротивления и брызгоуноса за счет полноты смачивания стенок и возможности перетока части жидкости со стенок в углы каналов [7–А, 14–А, 15–А].

4. Результаты моделирования пленочного течения дали возможность определить основные направления интенсификации массопередачи и связанное с этим совершенствование коаксиальной насадки, заключающееся в перфорации стенок каналов и дополнительной закрутке газового потока. Использование математической модели движения пленки жидкости по воздействию закрученного газового потока в перфорированном канале позволило рассчитать изменение ее толщины и скорости по длине канала [8–А]. Эти данные послужили импульсом для создания новой более эффективной конструкции коаксиальной насадки, защищенной патентом на полезную модель [17–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты работы могут быть использованы при проектировании и разработке новых регулярных структурированных насадок. При этом для достижения высокой эффективности массопередачи и создания конструкций с относительно низким гидравлическим сопротивлением необходимо выполнение следующих условий:

- создание развитой поверхности контакта фаз с высоким свободным удельным объемом;
- конструктивное исполнение каналов насадки и ее ориентация в аппарате должны иметь осесимметричную направленность для избежания повышенного гидравлического сопротивления;
- оптимальный диапазон размеров канала 15–20 мм способствует высокой эффективности массопередачи между распределяемыми фазами и снижению относительной величины брызгоуноса.

2. Результаты работы были использованы для промышленных испытаний и экспериментальных исследований по запросу компаний ООО «РТС групп» и ООО «МВПак-Групп». Применение регулярных структурированных насадок в совокупности с карбамидным методом, а также очистки газов растворами карбоната натрия позволило снизить концентрации диоксида серы и сероводорода в отходящих газах после пиролизной и биогазовой установок до предельно допустимых. Следовательно, данные конструкции могут быть рекомендованы к использованию в установках для очистки газов от серосодержащих соединений, а также после проведения испытаний и для других процессов абсорбции, как отмечалось в работе [16–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 33–38.

2–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 44–49.

3–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Техничко-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1. – С. 69–73.

4–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю., Волк А.М. Влияние геометрических параметров регулярной структурированной насадки на гидродинамику и массообмен // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 2. – С. 67–71.

5–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Исследование относительного брызгоуноса в массообменном аппарате с зигзагообразной регулярно-структурированной насадкой // Вестн. Витебск. гос. техн. ун-та. Химическая технология и экология. – 2021. – № 2. – С. 132–140.

6–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Подobie процессов гидродинамики и массопередачи в регулярной структурированной насадке // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 3. – С. 114–119.

7–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Моделирование пленочного течения жидкости в канале регулярно-структурированной насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2022. – № 8. – С. 14–17.

(Mytsko D.Y., Vaitekhovich P.E. Simulation of Liquid Film Flow in the Channels of a Regularly Structured Packing // Chemical and petroleum engineering. – 2022. – Vol. 58, No. 8. – P. 642–648.)

8–А. Волк А.М., Мытько Д.Ю. Исследование пленочного течения жидкости в перфорированном цилиндрическом канале регулярно-структурированной насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2022. – № 6. – С. 3–6.

(Volk A.M., Mytsco D.Y. Investigation of Film Fluid Flow in Perforated Cylindrical Channel of Regularly Structured Packing // Chemical and petroleum engineering. – 2022. – Vol. 58, No. 6. – P. 441–448.)

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Регулярные насадки для массообменных аппаратов // Химическая технология и техника: материалы 84-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск: БГТУ, 2020. – С. 167–169.

10–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Техничко-экономическое сравнение регулярно-структурированных насадок // Нефтехимия – 2020: материалы III Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск: БГТУ, 2020. – С. 231–234.

11–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Гидродинамика и эффективность регулярно-структурированных зигзагообразных насадок // Химическая технология и техника: материалы 85-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск: БГТУ, 2021. – С. 56–58.

12–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Исследование величины относительного брызгоуноса в массообменной колонне с регулярно-структурированной насадкой // Нефтегазохимия – 2022: материалы V Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 217–220.

13–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Влияние геометрических параметров зигзагообразной регулярной структурированной насадки на величину относительного брызгоуноса в массообменных аппаратах // Нефтехимия – 2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск: БГТУ, 2021. – С. 205–208.

14–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Компьютерное моделирование движения жидкой пленки в канале треугольного сечения // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск: БГТУ, 2022. – С. 142–145.

15–А. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Моделирование пленочного течения на поверхности канала насадки из кислотоупорной керамики // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. им. Д.И. Менделеева: сб. ст. В 3 т. Т. 1. – Тюмень: ТИУ, 2023. – С. 258–261.

16–А. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Анализ способов очистки биогаза от сероводорода // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск: БГТУ, 2022. – С. 134–135.

Патенты и заявки на изобретения

17–А. ВУ 12802 U, 2022.

A handwritten signature in black ink, appearing to be a stylized representation of the author's name, located to the right of the patent information.

РЭЗІЮМЭ

Мыцько Дзмітрый Юр'евіч

Гідрадынаміка і масаперадача ў апаратах з рэгулярнай структураванай насадкай

Ключавыя словы: насадачны масаабменны апарат, рэгулярная структураваная насадка, гідрадынаміка, эфектыўнасць масаперадачы, вышыня адзінкі пераносу, пырскаўнос, мадэляванне

Мэта работы: распрацоўка навукова абгрунтаванай методыкі вызначэння аптымальных геаметрычных параметраў новай рэгулярнай структураванай насадкі па выніках даследаванняў гідрадынамічных і масаабменных характарыстык.

Аб'ект даследавання – працэсы, якія праходзяць у насадачных масаабменных апаратах, і рэгулярныя структураваныя насадкі.

У дадзенай працы прааналізаваны эксперыментальныя даследаванні рэгулярна-структураваных насадак і разгледжаны напрамкі іх удасканалення. Выкананы агляд літаратуры дазволіў зрабіць высновы аб недахопах зігзагападобнай формы каналаў насадкі і перавагах іх восевага размяшчэння. Праведзены эксперыментальныя даследаванні гідраўлічнага супраціўлення і эфектыўнасці масаперадачы распрацаваных насадак. Вызначана найбольш эфектыўная канструкцыя – кааксіяльная. Гэтая насадка была распрацавана ў трох варыянтах, для якіх праведзены тыя ж эксперыментальныя даследаванні, а таксама дадатковая серыя вопытаў па пырскаўносе. Па атрыманых звестках устаноўлены межы гідрадынамічных рэжымаў, дыяпазоны нагрузак па газе, а таксама разлічана вышыня адзінкі пераносу. Для маштабавання атрыманых даных выкарыстоўваўся інжынерны метада разліку, заснаваны на тэорыі падабенства, які дазволіў вызначыць каэфіцыенты крытэрыяльных ураўненняў.

Эксперыментальныя даныя і зробленыя па іх высновы ўдакладняліся даследаваннямі з выкарыстаннем камп'ютарнага мадэлявання гідрадынамікі плёначнага цячэння ў каналах насадкі.

Практычная рэалізацыя выкананай працы пацверджана актамі прамысловых выпрабаванняў і эксперыментальных даследаванняў кааксіяльнай насадкі ва ўстаноўках для ачысткі тэхналагічных газаў кампаній ТАА «РТС груп» і ТАА «МВПак-Груп».

РЕЗЮМЕ

Мытько Дмитрий Юрьевич

Гидродинамика и массопередача в аппаратах с регулярной структурированной насадкой

Ключевые слова: насадочный массообменный аппарат, регулярная структурированная насадка, гидродинамика, эффективность массопередачи, высота единицы переноса, брызгоунос, моделирование

Цель работы: разработка научно обоснованной методики определения оптимальных геометрических параметров новой регулярной структурированной насадки по результатам исследований гидродинамических и массообменных характеристик.

Объект исследования – процессы, протекающие в насадочных массообменных аппаратах, и регулярные структурированные насадки.

В данной работе проанализированы экспериментальные исследования регулярных структурированных насадок и рассмотрены направления их совершенствования. Выполненный обзор литературы позволил сделать выводы о недостатках зигзагообразной формы каналов и преимуществах их осевого расположения. Проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления и эффективности массопередачи разработанных насадок. Определена наиболее эффективная конструкция – коаксиальная. Эта насадка была разработана в трех вариантах, для которых проведены те же экспериментальные исследования, а также дополнительная серия опытов по брызгоуносу. По полученным данным установлены границы гидродинамических режимов, диапазоны нагрузок по газу, а также рассчитана высота единицы переноса. Для масштабирования полученных данных использовался инженерный метод расчета, основанный на теории подобия, который позволил определить коэффициенты критериальных уравнений.

Экспериментальные данные и сделанные по ним выводы уточнялись исследованиями с использованием компьютерного моделирования гидродинамики пленочного течения в каналах насадки.

Практическая реализация выполненной работы подтверждена актами промышленных испытаний и экспериментальных исследований коаксиальной насадки в установках для очистки технологических газов компаний ООО «РТС групп» и ООО «МВПак-Групп».

RESUME

Mytsko Dzmitry Yur'evich

Hydrodynamics and mass transfer in apparatuses with regular structured packing

Key words: packed mass transfer apparatus, regular-structured packing, hydrodynamics, mass transfer efficiency, transfer unit height, spray entrainment, modeling

Objective: the development of a scientifically based method of determination of optimal geometric parameters of a new regular-structured attachment based on the results of studies of hydrodynamic and mass exchange characteristics.

Object of study: processes taking place in packing mass exchange machines, and regular-structured packings.

In this paper experimental results of regularly-structured attachments were analyzed and directions of their improvement were considered. The conducted review of the literature allowed to draw conclusions about the disadvantages of zigzag channel shape and the advantages of their axial location. Experimental studies of hydraulic resistance and mass transfer efficiency of developed attachments were conducted. The most effective construction – coaxial, has been determined. This packing was developed in three variants, for which the same experimental studies were carried out, as well as a pre-complete series of experiments on spray. According to the obtained data, the boundaries of hydrodynamic regimes, the ranges of gas loads have been established, and transfer unit height has been calculated. The engineering method of calculation based on the theory of similarity was used to scale the obtained data, which allowed determination of the coefficient of the criterion equations.

The experimental data and the conclusions drawn from them were refined by studies using computer simulation of the film flow hydrodynamics in the packing channels.

The practical implementation of the work performed is confirmed by acts of industrial testing and experimental studies of the coaxial packing in equipments for the purification of process gases of the companies LLC "RTS GROUP" и LLC "MVPACK GROUP".

Научное издание

Мытько Дмитрий Юрьевич

**ГИДРОДИНАМИКА И МАССОПЕРЕДАЧА В АППАРАТАХ
С РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических
технологий

Ответственный за выпуск Д.Ю. Мытько

Подписано в печать 13.11.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 60 экз. Заказ 385 .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006. г. Минск.