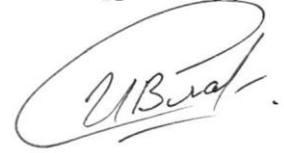


На правах рукописи



СКАЧКОВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

**УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АБСОРБЦИИ АММИАКА
И МЕТИЛАМИНОВ ИЗ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ НА РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКЕ**

Специальность 05.17.08 — Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ангарская государственная техническая академия»

Научный руководитель:

Бальчугов Алексей Валерьевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Асламова Вера Сергеевна
доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность»
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Самохвалов Николай Митрофанович
кандидат технических наук, профессор кафедры «Химическая технология неорганических веществ»,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Ведущая организация

АО «Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения»
(ИркутскНИИхиммаш), г. Иркутск

Защита состоится «08» декабря 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 2, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/915/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного
совета Д 212.269.08,
доктор технических наук, доцент



Ивашкина Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Насадочные контактные устройства широко используются в химической и нефтехимической технологии для проведения массообменных процессов между газом и жидкостью. Одним из важных назначений этих устройств является абсорбционное извлечение ценных компонентов из промышленных газов. Интенсивность массообменных процессов и, как следствие, степень очистки газов в значительной степени зависят от конструкции насадочного устройства.

Практически важным промышленным процессом, использующим абсорбционную очистку газов на насадках, является процесс получения метиламинов методом каталитического аминирования метанола в паровой фазе под давлением. В данном процессе образуются технологические газовые выбросы, которые подлежат улавливанию в абсорберах с последующей утилизацией. Газовая смесь, очищается от аммиака и метиламинов (монометиламин, диметиламин, триметиламин) в насадочном абсорбере, орошаемом водой. В настоящее время в качестве контактного устройства используются керамические кольца Рашига (50×50×5). Абсорбер с кольцевой насадкой не обеспечивает требуемую степень очистки газа, концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе на выходе с насадочной колонны превышает технологическую норму и составляет более 20 г/м³. Как показывает анализ, хордовая и трубчатая насадки также не в состоянии обеспечить требуемую степень очистки газа. Эффективность абсорбера можно повысить за счет замены кольцевой насадки на высокоэффективную регулярную ленточную насадку.

Исследование процессов массопереноса при абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей в насадочном абсорбере является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность улавливания вредных веществ перед выбросом отходящих газов в атмосферу.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ «Разработка, моделирование и испытание новых высокоэффективных регулярных насадок для тепло- и массообменных процессов в газожидкостных системах», номер государственной регистрации НИР 01201257744, а также в рамках хоздоговора №1734-13 «Расчет эффективности работы абсорберов поз. А-200, А-200а схемы утилизации хвостовых газов уст. 71/2 цеха 39/71 химического завода ОАО «АНХК».

Степень разработанности темы. Задачу интенсификации абсорбционных массообменных процессов решали В.М. Рамм, Л.В. Алекперова, Ю.В. Аксельрод, В.В. Дильман, А.В. Тимофеев, В.С. Леонтьев, А.М. Каган, Л.А. Юдина и др. По результатам их исследований получены эмпирические уравнения зависимости интенсификации процесса от различных параметров. Разработаны конструкции насадок для проведения массообменных процессов, позволяющие интенсифицировать процесс массопереноса в некоторых газожидкостных системах. Однако для абсорбции смеси аммиака и метиламинов высокоэффективная насадка не была предложена.

Цель работы заключается в увеличении интенсивности процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей за счет создания развитой поверхности контакта фаз в слое регулярной ленточной насадки.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Установить зависимость гидравлического сопротивления слоя сухой регулярной ленточной насадки от приведенной скорости газа, критерия Рейнольдса и конструктивных параметров насадки. Получить эмпирические уравнения для расчета гидравлического сопротивления сухой ленточной насадки.

2. Определить влияние плотности орошения на гидравлическое сопротивление орошаемой регулярной ленточной насадки при различных скоростях газа. Установить влияние конструкции насадки на механизм формирования развитой поверхности контакта фаз. Выполнить сравнительный анализ гидравлических характеристик ленточной насадки с насадками, используемыми в настоящее время.

3. Установить возможность интенсификации массообмена за счет увеличения удельной поверхности контакта фаз, равномерности распределения жидкости и увеличения объемных коэффициентов массопередачи при абсорбции аммиака из смеси с воздухом водой на высокоэффективной регулярной ленточной насадке.

4. Разработать адекватную математическую модель процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей с учетом основного уравнения массопередачи, уравнений теплового и материального баланса. Установить влияние коэффициента избытка жидкости на распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки.

5. На основе результатов математического моделирования и результатов экспериментов разработать практические рекомендации по интенсификации абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей и по выбору параметров технологических режимов эксплуатации абсорбционных колонн.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались с применением теории экспериментов, положений теории гидродинамики, физических и химических методов исследования и математического моделирования.

В ходе экспериментов использовались стандартные средства контроля, при обработке экспериментальных данных применялись методы математической статистики и анализа.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность полученных результатов, выводов и разработанных рекомендаций основывается на высокой надежности применяемых методов исследования, а также на результатах моделирования процесса абсорбции и согласованности результатов расчета процесса массопередачи на ленточной насадке двумя методами.

Научная новизна:

1. Установлено, что в диапазонах значений давления (0,99-1,05 ат) и температуры (20-23°C) абсорбционной колонны гидравлическое сопротивление сухой ленточной насадки существенно зависит от таких конструктивных параметров как свободный объем абсорбера, проходное сечение и регулярность компоновки элементов в слое. В связи с этим сухая ленточная насадка ($d_s=0,011$ м), созданная с учетом влияния данных параметров, обеспечивает снижение гидравлического сопротивления по сравнению с кольцами Рашига ($d_s=0,0085$ м) в среднем в 4,4-6,5 раза, а в сравнении с седлами Берля ($d_s=0,012$ м) в среднем в 1,5-2,2 раза.

2. Установлено, что в режиме орошения ленточной насадки действует механизм формирования развитой поверхности контакта фаз за счет конструктивно организованных перетоков жидкости с одного элемента насадки на другой, при этом гидравлическое сопротивление орошаемой ленточной насадки ($d_s=0,011$ м) становится ниже сопротивления орошаемых колец Рашига ($d_s=0,0085$ м) в среднем в 3,4-4,4 раза, и ниже сопротивления орошаемой регулярной листовой рифленой насадки ($d_s=0,01$ м) в среднем в 1,06-1,23 раза в исследованном диапазоне плотностей орошения.

3. Установлено, что на регулярной насадке интенсификация поглощения аммиака обеспечивается за счет увеличения удельной поверхности контакта фаз, равномерности распределения жидкости и увеличения объемных коэффициентов массопередачи, при этом объемный коэффициент массопередачи при абсорбции аммиака на регулярной ленточной насадке ($d_s=0,011$ м) в среднем в 1,11-1,28 раза выше, чем на хордовой насадке, в 1,45-1,55 раза выше, чем на кольцах Рашига ($25 \times 25 \times 3$), и в 2,61-4,49 раза выше, чем на трубчатой насадке.

4. Установлено, что учет основных параметров массопередачи (коэффициента массопередачи в жидкой фазе, коэффициента избытка расхода воды) в математической модели процесса абсорбции аммиака и метиламинов позволяет определить распределение компонентов по высоте слоя насадки и объемные коэффициенты массопередачи. Показано, что при коэффициенте избытка расхода жидкости $q=2$ на кривой распределения триметиламина возникает экстремум, объясняющийся относительным снижением скорости абсорбции в результате снижения расхода воды и увеличения ее температуры.

Теоретическая значимость работы. Получена теоретическая зависимость распределения концентрации триметиламина в газовой фазе по высоте слоя насадки от коэффициента избытка жидкости, анализ которой позволил выработать рекомендации по поддержанию коэффициента избытка жидкости не менее 3 с целью увеличения интенсивности абсорбции триметиламина. Получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления регулярной ленточной насадки, которые могут быть использованы при анализе гидродинамики насадочных аппаратов. Предложена методика расчета насадочного аппарата для абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей с новой ленточной насадкой, которая рекомендуется к использованию при разработке промышленных высокоэффективных аппаратов.

Практическая ценность. Разработана высокоэффективная регулярная ленточная насадка, предназначенная для интенсификации процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей, которая позволит на 10% снизить потери метиламинов на стадии абсорбции уст. 71/2 цеха 39/71 химического завода ОАО «АНХК» при существенном снижении материалоемкости насадки. Ожидаемый экономический эффект от внедрения насадки составит 1,213 млн. руб. в год.

Применение ленточной насадки обеспечивает снижение затрат энергии на преодоление потоком газа гидравлического сопротивления колонны в 2 раза.

Результаты исследований описанных в данной диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная техническая академия»

при изучении следующих дисциплин: «Технологические процессы и производства», «Гидравлика», «Процессы и аппараты химических технологий».

На защиту выносятся:

1. Механизм формирования развитой поверхности контакта фаз и интенсификации массообмена при абсорбции аммиака и метиламинов за счет конструктивных особенностей регулярной ленточной насадки, обеспечивающих организованный переток жидкости с одного элемента насадки на другой.

2. Математическая модель процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей на высокоэффективной регулярной ленточной насадке, позволяющая определить распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки, значение концентрации каждого компонента в газовой фазе на выходе из колонны и значение объемного коэффициента массопередачи при разных условиях абсорбции.

3. Зависимость распределения концентрации триметиламина в газовой фазе по высоте слоя насадки от коэффициента избытка жидкости, в соответствии с которой при коэффициенте избытка $q=2$ на кривой распределения возникает экстремум, объясняющийся относительным снижением скорости абсорбции триметиламина водой в результате снижения расхода воды и увеличения ее температуры.

Личный вклад состоит в том, что автор принимал участие в планировании и проведении экспериментов по определению гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки, по определению объемных коэффициентов массопередачи при абсорбции аммиака водой, проводил анализ экспериментальных данных, разработал математическую модель абсорбции многокомпонентной газовой смеси, содержащей аммиак и метиламины, разработал практические рекомендации по ведению процесса.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 21 работа, в том числе 5 статей в журналах из списка ВАК и получено 2 патента на изобретение РФ. Основные результаты по теме диссертационной работы были доложены и обсуждены на XXIV международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ - 24» (г. Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2011 г.); на V Всероссийском конкурсе молодых ученых (РАН, г. Миасс Челябинской обл., 2013); на 41, 42 и 43 научно-технической конференции аспирантов и студентов (г. Комсомольск-на-Амуре, ФГБОУ ВПО Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2011, 2012, 2013); на IV Региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» (Ангарск, 2011); на межвузовской научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс» (г. Ангарск, АГТА, 2011 г., 2014 г.).

Получено 2 патента РФ на изобретение №2467792 «Регулярная насадка для массообменных аппаратов», №2461419 «Способ изготовления регулярной насадки для массообменных аппаратов».

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, включающего 144 наименования; содержит 152 страницы машинописного текста, 18 рисунков, 27 таблиц и 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

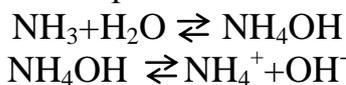
В первой главе приведен анализ научной литературы по теме диссертации. В соответствии с теорией массопередачи существует три способа интенсификации процесса многокомпонентной абсорбции: за счет увеличения коэффициентов массопередачи, увеличения площади контакта фаз или повышения движущей силы процесса. Наиболее перспективным способом интенсификации является создание развитой поверхности контакта фаз, которую можно обеспечить за счет выбора оптимальной конструкции насадки. Другие способы интенсификации требуют существенных энергетических затрат. Так, увеличения движущей силы процесса можно достичь за счет изменения давления или температуры в колонне. При увеличении давления и уменьшении температуры угол наклона равновесной линии относительно оси абсцисс уменьшается и, соответственно, увеличивается движущая сила процесса абсорбции ΔC . Однако известно, что изменение давления и температуры в колонне связано с существенными энергетическими затратами. Для увеличения коэффициентов массопередачи в слое насадки необходимо создать высокоскоростные турбулентные гидродинамические режимы взаимодействия газа и жидкости, что также повлечет за собой дополнительные энергетические затраты.

На основании этого предложен способ интенсификации процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовой смеси за счет увеличения площади контакта фаз с применением высокоэффективной регулярной ленточной насадки.

Показано, что изучение гидродинамических и массообменных процессов в газожидкостных системах на новых насадочных устройствах является актуальной задачей, так как нет универсальных методов расчета гидродинамических и массообменных характеристик насадок для работы в различных газожидкостных системах.

Далее выполнен подробный анализ достоинств и недостатков известных контактных насадочных устройств, рассмотрены основные требования производства к насадочным контактным устройствам, описаны гидродинамические и массообменные закономерности взаимодействия газа и жидкости на известных насадках, приведены описания различных методов интенсификации массообмена в насадочных колоннах.

При растворении аммиака в воде протекают химические реакции:



При 25°C константы равновесия этих реакций соответственно составляют: $K_1=0,5$; $K_2=6,5 \cdot 10^{-5}$. Из этого следует, что аммиак находится в растворе преимущественно в виде NH_4OH , лишь в очень малой степени диссоциированного на ионы.

Расчет по уравнению Гесса показал, что процесс растворения аммиака в воде экзотермичен. Расчет стандартного изобарного потенциала позволил также установить, что протекание первой реакции более вероятно, чем второй.

Таким образом, выполненный термодинамический анализ позволил установить механизм растворения аммиака в воде и его физико-химический характер.

На основании проведенного анализа были сформулированы цели и задачи исследования.

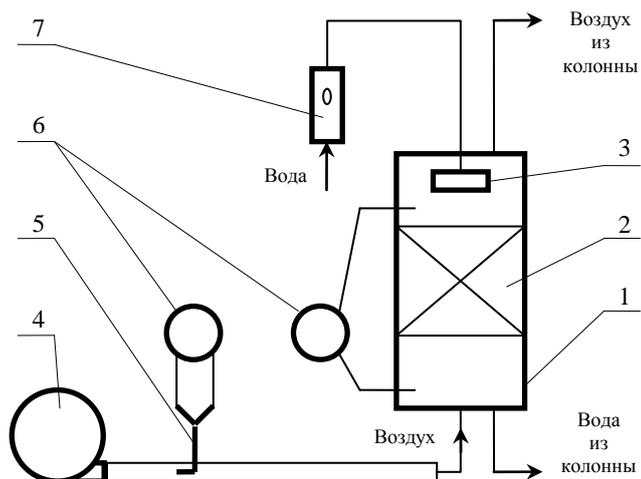


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения гидравлического сопротивления насадки: 1 – колонна; 2 – пакет насадки; 3 – распределитель жидкости; 4 – воздуходувка; 5 – трубка Пито-Прандтля; 6 – микроанометры; 7 – ротаметр

насадки представлена на рис. 2. Ленточная насадка состоит из каркаса и лент. Элементы каркаса выполнены из металлических стержней (прутьев). На каркасе закрепляются элементы насадки в виде лент. Испытаны две модификации ленточной насадки: ленты модификации 1 выполнены из армированной полиэтиленовой пленки,

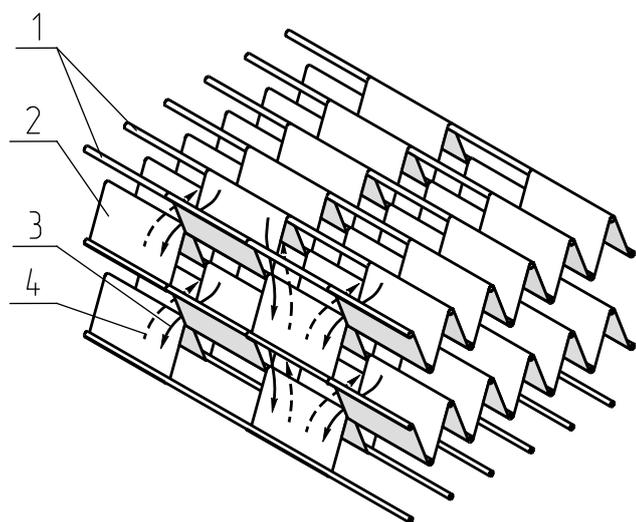


Рис. 2. Схема ленточной насадки: 1 – прутья каркаса, 2 – ленты, 3 – жидкая фаза, 4 – газовая фаза

Характеристики названных насадок приведены в табл. 1.

Вторая глава посвящена методам гидродинамических и массообменных экспериментальных исследований, а также методологии математического моделирования абсорбции многокомпонентных газовых смесей.

На лабораторной установке (рис. 1) выполнены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления регулярной ленточной насадки двух модификаций и, для сравнения, сопротивления колец Рашига.

Колонна (1) имеет сечение $0,255 \times 0,255$ м, высота колонны 1,32 м. Высота слоя ленточной насадки в колонне составляла 0,79 м. При проведении экспериментов давление в колонне (1) составляло 0,99-1,05 ат, а температура $20-23^\circ\text{C}$

Конструкция регулярной ленточной насадки представлена на рис. 2. Ленточная насадка состоит из каркаса и лент. Элементы каркаса выполнены из металлических стержней (прутьев). На каркасе закрепляются элементы насадки в виде лент. Испытаны две модификации ленточной насадки: ленты модификации 1 выполнены из армированной полиэтиленовой пленки, модификации 2 – из нержавеющей металлической сетки с ячейками размером 0,2 мм. На этой же установке (рис. 1) для сравнения проводились исследования гидродинамики в системе вода-воздух на широко известной в настоящее время насадке – керамических кольцах Рашига ($15 \times 15 \times 2$). Высота слоя колец Рашига составляла 0,475 м, диаметр колонны 0,15 м, колонна была выполнена из оргстекла.

Результаты выполненных экспериментов сравнивались также с результатами экспериментов других авторов, выполненных на регулярной листовой рифленой насадке [1], на седлах Берля [2] и на кольцах Рашига ($25 \times 25 \times 2$) [3].

Таблица 1

Характеристики насадок

Тип насадки	Удельная поверхность, a_n , м ² /м ³	Свободный объем, ε	Эквивалентный диаметр, d_3 , м
Ленточная насадка (модификация 1)	224	0,93	0,016
Ленточная насадка (модификация 2)	351	0,98	0,011
Керамические кольца Рашига (15×15×2)	330	0,70	0,0085
Керамические кольца Рашига (25×25×3)	204	0,74	0,0145
Регулярная листовая рифленая насадка	335	0,83	0,010
Седла Берля	235	0,74	0,012
Рулонированная сетка	524	0,948	0,007

В первую очередь экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления сухих насадок. Коэффициент сопротивления сухой насадки определяли по уравнению:

$$\xi_0 = \frac{2\Delta P d \varepsilon^2}{h \rho W^2}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления на насадке, Па; ρ – плотность газа, кг/м³; W – приведенная скорость газа в колонне, м/с; h – высота слоя насадки, м; d – эквивалентный диаметр насадки, м; ε – свободный объем насадки. Коэффициент сопротивления ξ_0 является эффективным коэффициентом, который учитывает потерю давления при изменении направления потока газа в каналах насадки, а так же при трении газа о поверхность насадки.

Интенсивность массопереноса в газожидкостной системе характеризуется объемным коэффициентом массопередачи. Эксперименты по определению объемных коэффициентов массопередачи при абсорбции аммиака из его смеси с воздухом на регулярной ленточной насадке проводились на установке, изображенной на рис. 3. Цилиндрический барботажный аппарат (1) имеет высоту 1,1 м и диаметр 0,45 м. Абсорбер (2) представляет собой колонну сечением 0,255×0,255 м и высотой 1,32 м. Высота слоя регулярной ленточной насадки (6) в колонне составляла 0,79 м. Две противоположные стенки абсорбера выполнены из органического стекла, что позволяло выполнять визуальные наблюдения за работой абсорбера. Абсорбер заполнен регулярной ленточной насадкой модификации 2. При проведении экспериментов давление в абсорбере составляло 1 ат, температура 20 °С. Барботер (8) представлял собой крестовину, выполненную из пластиковых труб диаметром 0,08 м, диаметр отверстий для истечения воздуха составляли 0,002 м. Барботер (8) предназначен для тонкого диспергирования воздуха и равномерного распределения пузырей в барботажном слое.

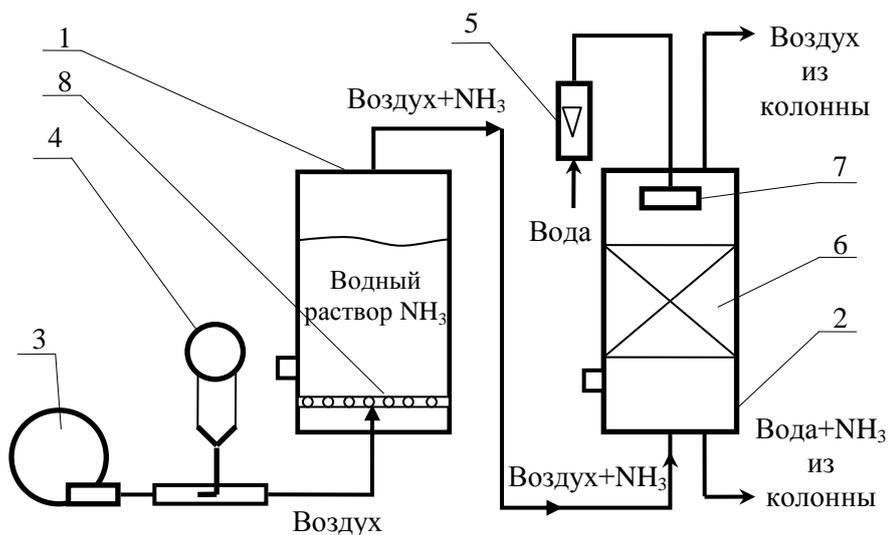


Рис. 3. Схема лабораторной установки для определения объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака из смеси с воздухом: 1 – барботажный аппарат; 2 – насадочный абсорбер; 3 – воздушодувка; 4 – микроманометр с трубкой Пито-Прандтля; 5 – ротаметр; 6 – слой насадки; 7 – распределитель жидкости; 8 – барботер

раствор заданной концентрации и заливался в барботажный аппарат (1) до определенного уровня. Включалась подача воды на орошение абсорбера (2) с заданным расходом. Расход подаваемой воды измерялся ротаметром (5). По прошествии 3-х минут после начала подачи воды в абсорбер включалась воздушодувка (3) и с помощью микроманометра (4) и трубки Пито-Прандтля измерялся расход воздуха, подаваемого в барботажный аппарат (1). Регулировка расхода воздуха осуществлялась с помощью заслонки на воздушодувке. В барботажном аппарате (1) происходило насыщение воздуха аммиаком. В стенке барботажного аппарата имелся пробоотборник для отбора проб. Аммиачно-воздушная смесь поступала в нижнюю часть насадочного абсорбера (2). В слое регулярной ленточной насадки происходил контакт аммиачно-воздушной смеси с водой. В абсорбере (2) контакт газа и жидкости осуществлялся по схеме противотока. В нижней части абсорбера (2) имелся пробоотборник для отбора проб жидкости, выходящей из слоя насадки. Смену режима осуществляли за счет изменения расхода воды, подаваемой на орошение абсорбера.

Концентрацию аммиака в воде определяли фотометрическим методом с реактивом Несслера. За результат анализа принимали среднее арифметическое значение (X_{cp}) двух параллельных определений X_1 и X_2 :

$$X_{cp} = \frac{X_1 + X_2}{2},$$

для которых выполняется следующее условие:

$$|X_1 - X_2| \leq 0,01 \cdot r \cdot X_{cp},$$

где r – предел повторяемости. Значения двух параллельных определений отличались друг от друга не более чем на $\pm 2\%$ (ошибка метода)

Микроманометр с трубкой Пито-Прандтля предназначены для измерения скорости воздушного потока, на основании которой может быть рассчитан расход подаваемого в барботажный аппарат воздуха.

Распределитель жидкости (7) распылительного типа предназначен для равномерного распределения жидкости по сечению абсорбера. Ротаметр (5) перед проведением экспериментов подвергали градуировке.

Порядок экспериментов был следующим. Приготавливался водно-аммиачный раствор

Проведение экспериментов по определению распределения концентраций в исследуемой системе затруднительно и требует существенных материальных затрат, поэтому в этом случае является плодотворным математическое моделирование процесса. Математическая модель сложного абсорбционного процесса должна включать дифференциальные уравнения материального и теплового баланса. Показано, что математическая модель процесса многокомпонентной абсорбции аммиака и метиламинов может быть решена методом конечных разностей.

Третья глава посвящена решению поставленных задач по определению гидродинамических и массообменных характеристик новой регулярной ленточной насадки, и сравнению полученных показателей с характеристиками известных насадок, применяющихся в промышленности.

Результаты экспериментов по определению коэффициента сопротивления сухой ленточной насадки обеих модификаций и колец Рашига представлены на рис. 4.

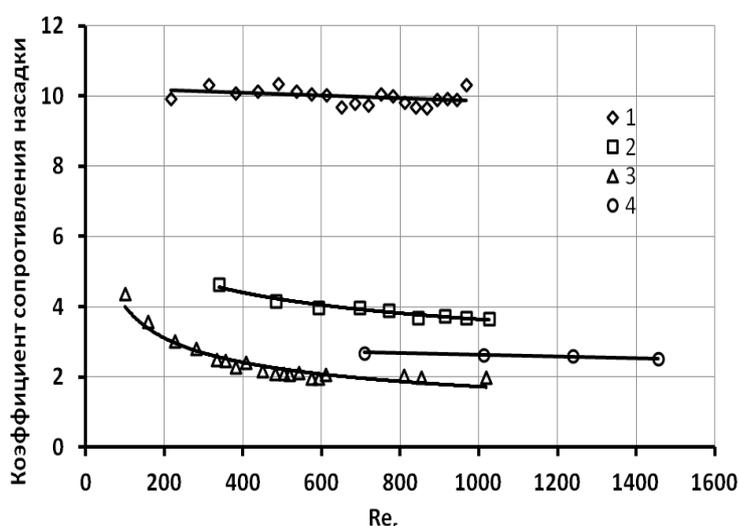


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса: 1 – ленточная насадка модификации 1; 2 – кольца Рашига (15×15×2); 3 – ленточная насадка модификации 2; 4 – кольца Рашига (25×25×3) [3]

Кольца Рашига (25×25×3) также работают в автомоделном режиме, причем средний коэффициент сопротивления в исследованном диапазоне составляет 2,62. Коэффициент сопротивления ленточной насадки модификации 2 изменяется в пределах 1,99-4,37, среднее значение составляет 2,42.

Уравнение, описывающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ленточной насадки модификации 2 от критерия Рейнольдса, имеет вид:

$$\xi = 21,6 \cdot Re_r^{-0,36} \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает экспериментальные данные с величиной достоверности аппроксимации 0,904. Оно может быть использовано при проектировании новых абсорбционных колонн с регулярной ленточной насадкой модификации 2.

Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от приведенной скорости газа в колонне представлена на рис. 5. Исследования гидравлических со-

противлений проведены в широком диапазоне приведенных скоростей газа 0,14-1,48 м/с.

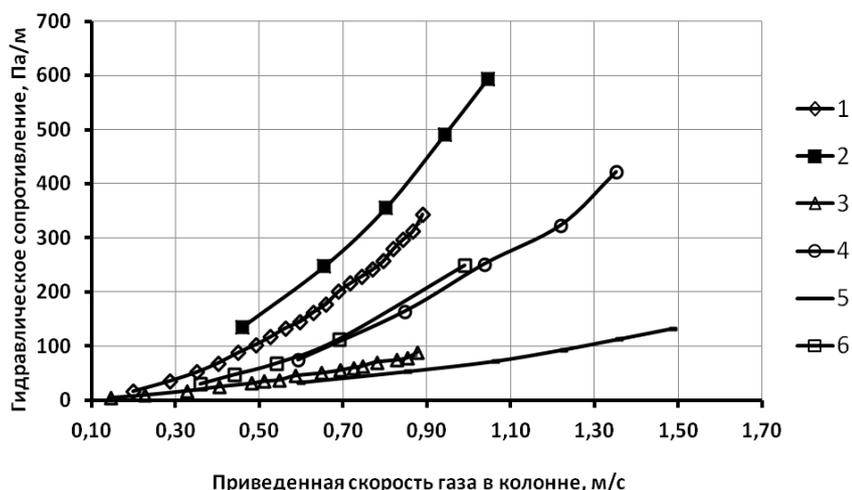


Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от приведенной скорости газа: 1 – ленточная насадка (модификация 1); 2 – кольца Рашига (15×15×2); 3 – ленточная насадка (модификация 2); 4 – кольца Рашига (25×25×3); 5 – рулонированная сетка ($d_s=0,007$ м, по данным [3]); 6 – седла Берля размером 0,025 м ($d_s=0,012$ м, по данным [2])

сопротивлением [3]. В частности, сопротивление ленточной насадки модификации 2 ниже сопротивления колец Рашига (15×15×2) в 4,5-6,5 раза. Также видно, что сопротивление регулярной ленточной насадки (модификация 2) ниже в среднем в 1,5-2,2 раза в сравнении с сопротивлением седел Берля ($d_s=0,012$ м).

Зависимость гидравлического сопротивления сухой ленточной насадки модификации 1 от приведенной скорости газа описывается следующим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,999:

$$\frac{\Delta P}{h} = 416 \cdot W^{1,979} \quad (3)$$

Аналогичная зависимость для колец Рашига (15×15×2) описывается следующим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,999:

$$\frac{\Delta P}{h} = 541,1 \cdot W^{1,837} \quad (4)$$

Зависимость гидравлического сопротивления сухой ленточной насадки модификации 2 от приведенной скорости газа описывается следующим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,998:

$$\frac{\Delta P}{h} = 100,6 \cdot W^{1,555} \quad (5)$$

Полученные уравнения (3-5) могут быть использованы при проектировании новых промышленных аппаратов с насадками.

Далее проведены эксперименты по определению гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки обеих модификаций и колец Рашига (15×15×2) при различных нагрузках по газу и жидкости.

Результаты экспериментов для ленточной насадки модификаций 1 и 2 для различных плотностей орошения представлены соответственно на рис. 6, 7, а для колец Рашига (15×15×2) представлены на рис. 8.

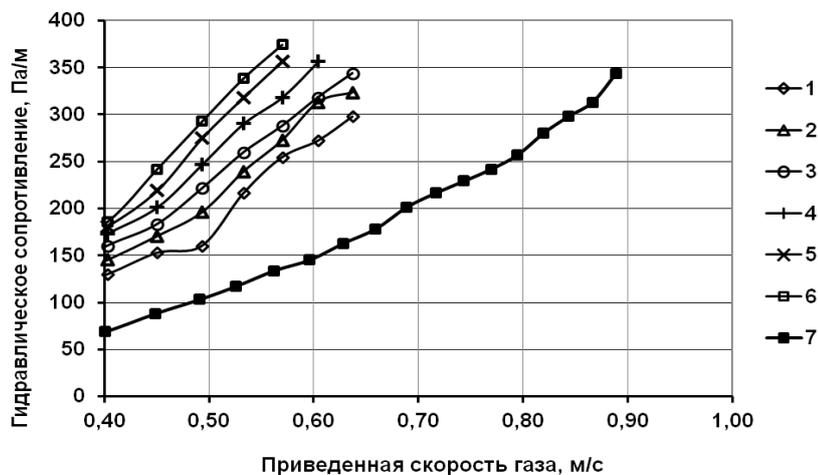


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки модификации 1 от приведенной скорости газа: 1 – плотность орошения 5,32 м³/(м²·ч); 2 – 11,00 м³/(м²·ч); 3 – 16,79 м³/(м²·ч); 4 – 23,38 м³/(м²·ч); 5 – 30,14 м³/(м²·ч); 6 – 33,63 м³/(м²·ч); 7 – 0 м³/(м²·ч)

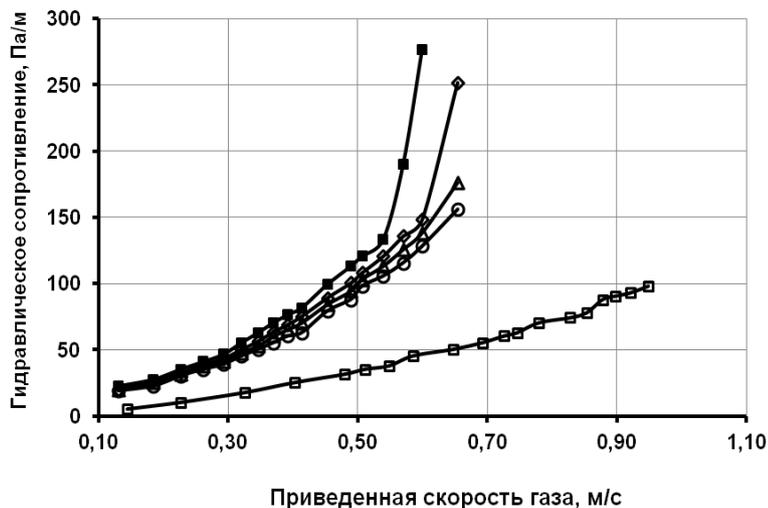


Рис. 7. Зависимость гидравлического сопротивления ленточной насадки модификации 2 от скорости газа: 1 – плотность орошения 5,54 м³/(м²·ч); 2 – 11,40 м³/(м²·ч); 3 – 17,47 м³/(м²·ч); 4 – 27,31 м³/(м²·ч); 5 – 0 м³/(м²·ч)

дительно свидетельствуют о преимуществе ленточной насадки модификации 2 в сравнении с другими видами насадок (кольцами Рашига, ленточной насадкой модификации 1, листовой рифленой насадкой): при плотности орошения в диапазоне 8,22-10,00 м³/(м²·ч) гидравлическое сопротивление ленточной насадки модификации 2 ниже гидравлического сопротивления колец Рашига (15×15×2) в 2,0-5,1 раза, ниже сопротивления регулярной рифленой насадки в 1,10-1,45 раза, ниже сопротивления ленточной насадки модификации 1 в 1,75-1,91 раза. Эти данные свидетельствуют о

различных плотностей орошения представлены соответственно на рис. 6, 7, а для колец Рашига (15×15×2) представлены на рис. 8.

На рис. 7 приведена зависимость гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки модификации 2 от приведенной скорости газа в колонне при плотностях орошения 5,54-27,3 м³/(м²·ч).

Сравнение рис. 6 и 8 показывает, что гидравлическое сопротивление орошаемой ленточной насадки модификации 1 в 3,5–4,9 раза ниже сопротивления колец Рашига (15×15×2) при плотности орошения 33,6 м³/(м²·ч). Рис. 7 в свою очередь подтверждает, что ленточная насадка модификации 2 позволяет снизить гидравлическое сопротивление колонны в среднем в 1,8 раза в сравнении с ленточной насадкой модификации 1.

Сравнение гидравлического сопротивления различных видов орошаемых насадок представлено на рис. 9. Данные рис. 9 убе-

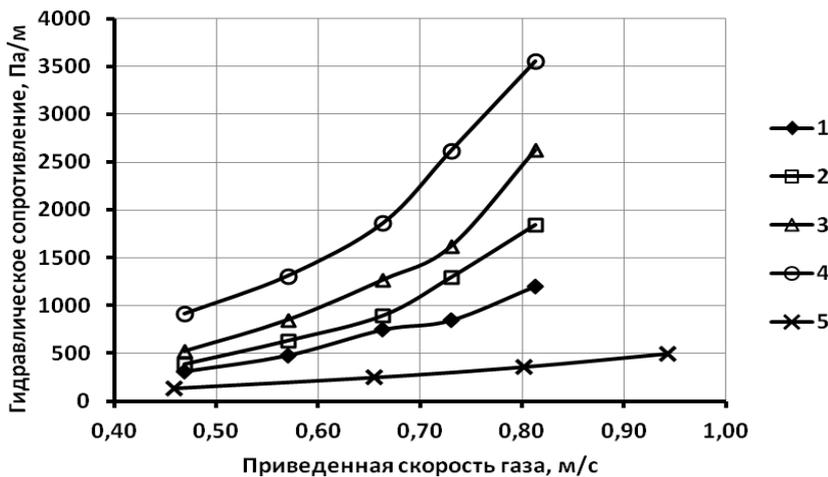


Рис. 8. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемых колец Рашига (15×15×2) от приведенной скорости газа: 1 – плотность орошения 9,79 м³/(м²·ч); 2 – 19,59 м³/(м²·ч); 3 – 24,94 м³/(м²·ч); 4 – 30,29 м³/(м²·ч); 5 – 0 м³/(м²·ч)

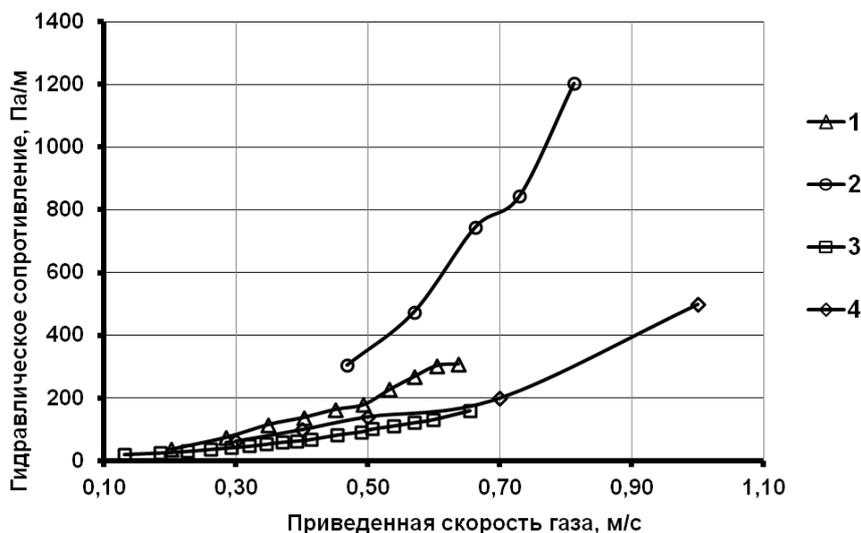


Рис. 9. Зависимость гидравлического сопротивления различных насадок от приведенной скорости газа: 1 – ленточная насадка модификации 1 (плотность орошения 8,22 м³/(м²·ч)); 2 – кольца Рашига (15×15×2, плотность орошения 9,79 м³/(м²·ч)); 3 – ленточная насадка модификации 2 (плотность орошения 8,56 м³/(м²·ч)); 4 – регулярная листовая рифленая насадка (плотность орошения 10,00 м³/(м²·ч), по данным работы [1])

что элементы насадки (ленты) не являются несущими элементами и не испытывают существенных нагрузок. Достоинство регулярной ленточной насадки состоит в том, что несущая способность переносится с элементов насадки, непосредственно участвующих в процессе массообмена и создающих удельную площадь насадки, на каркас, что разрешает делать эти элементы из тонких металлических

перспективности использования ленточной насадки модификации 2 в качестве контактного устройства для проведения массообменных процессов в газожидкостных системах, где предъявляются требования к низкому гидравлическому сопротивлению.

Визуально установлено, что ленточная насадка с конструктивно организованными перетоками жидкости с одного элемента насадки на другой обеспечивает формирование гидродинамического механизма с развитой поверхностью контакта фаз за счет равномерного распределения жидкости в поперечном сечении слоя насадки.

Дополнительным достоинством ленточной насадки в сравнении с другими видами насадок является низкая материалоемкость. Так, удельная масса исследованных керамических колец Рашига составляет 690 кг/м³, а исследованной ленточной насадки модификации 1 – 101 кг/м³, ленточной насадки модификации 2 – 138 кг/м³. Низкая удельная масса ленточной насадки обеспечивается за счет того,

лент, а также из пластика, или химически и механически стойкой ткани.

Далее приводятся результаты исследований интенсивности массообменных процессов при абсорбции аммиака из смеси с воздухом на регулярной ленточной насадке.

Объемный коэффициент массопередачи (по газовой фазе) определяли по уравнению:

$$K_{Ga} = \frac{M}{\Delta \cdot V_H} \quad (6)$$

Результаты экспериментов представлены на рис. 10. На рис. 10 приведена зависимость коэффициента массопередачи на ленточной насадке модификации 2 (кривая 1) от плотности орошения при постоянной приведенной скорости газа.

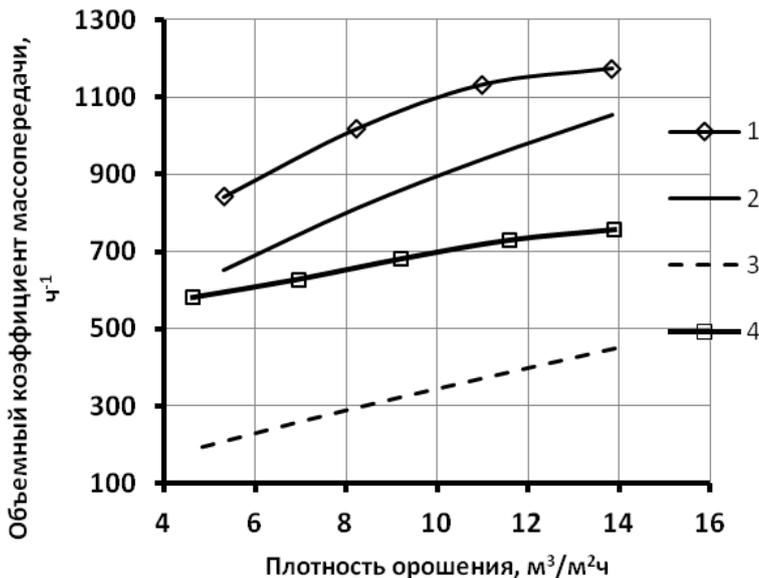


Рис. 10. Зависимость объемного коэффициента массопередачи от плотности орошения: 1 – ленточная насадка модификации 2; 2 – хордовая насадка (расчет по уравнению 7); 3 – трубчатая насадка; 4 – кольца Рашига (25×25×3)

коэффициента массопередачи (ч⁻¹) по газовой фазе на хордовой насадке, приведенного в работе [4]:

$$K_G = 0,0109w^{0,7} \cdot l^{0,5} \quad (8)$$

где K_G – коэффициент массопередачи по газовой фазе, кг/(м²·ч·мм рт. ст.).

Уравнение (8) получено авторами [4] на основе обобщения большого количества экспериментов по абсорбции аммиака на хордовых насадках.

Как показало сравнение, объемный коэффициент массопередачи на регулярной ленточной насадке на 11,5-28,8% выше объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака на хордовой насадке при тех же условиях.

Для сравнения выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака водой на регулярной трубчатой насадке ($a_H=148,6\text{ м}^2/\text{м}^3$) по методике из работы [5]. Результаты расчетов для трубчатого контактного устройства

данных экспериментах приведенная скорость газа в колонне составляла 0,4 м/с. Плотность орошения в экспериментах изменялась в диапазоне 5,32-13,84 м³/м²ч.

Для сравнения на рис. 10 приведена кривая 2, которая построена по результатам расчета объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака на хордовой насадке ($d_s=0,022\text{ м}$) по следующему эмпирическому уравнению:

$$K_{G.a} = 4,81 \cdot 10^{-6} \cdot a \cdot \psi \cdot R_\mu \cdot T \cdot w^{0,7} \cdot l^{0,5} \quad (7)$$

где w – скорость газа, м/с; l – количество поглотителя, л/(м³ газа).

Уравнение (7) получено в результате преобразования эмпирического уравнения для расчета

графически представлены на рис. 10, кривая 3. Объемные коэффициенты массопередачи на регулярной ленточной насадке в 2,61-4,49 раза превышают объемные коэффициенты массопередачи на трубчатой насадке, что свидетельствует об интенсификации процесса.

Далее выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака водой на кольцах Рашига (25×25×3) по методике из работы [5] для условий, при которых проводились эксперименты по абсорбции аммиака. Сравнение значений объемных коэффициентов массопередачи (кривая 1 и 4 рис. 10) показывает, что на ленточной насадке в 1,45-1,55 раза интенсифицируется процесс массопередачи в сравнении с кольцами Рашига (25×25×3).

Как видно из рис. 10, регулярная ленточная насадка обеспечивает существенную интенсификацию массопереноса аммиака. Это обеспечивается за счет гидродинамического механизма создания более высокой удельной поверхности контакта фаз и достижения равномерного распределения жидкости по сечению слоя насадки. Наличие организованных перетоков жидкости с одного элемента насадки на другой позволяет более равномерно распределить жидкость по сечению насадки и создать развитую поверхность контакта фаз.

Таким образом, такие достоинства регулярной ленточной насадки, как низкое гидравлическое сопротивление и высокие объемные коэффициенты массопередачи позволяют рекомендовать ленточную насадку для применения в химической промышленности для осуществления абсорбционных процессов.

В четвертой главе приводится разработанная математическая модель и методика расчета насадочного абсорбера для поглощения аммиака и метиламинов из газовой смеси. Методика позволяет рассчитать объемные коэффициенты массопередачи в слое ленточной насадки и в слое колец Рашига при абсорбции аммиака из многокомпонентных газовых смесей и определить распределение концентраций компонентов в газовой и жидкой фазах по высоте слоя насадки.

В математической модели принимается допущение, что концентрация компонентов меняется только по высоте слоя насадки и не изменяется в поперечном сечении аппарата. Модель включает дифференциальные уравнения массопередачи и материального баланса для каждого компонента i :

$$G_1 \cdot dY_i = -K_i \cdot (y_i - y_i^*) dF \quad (9)$$

$$G_1 \cdot dY_i = L_N \cdot dX_i, \quad (10)$$

где G_1 – начальный расход газа, кмоль/ч; L_N – начальный расход жидкости, кмоль/ч; X_i – концентрация компонента i в жидкости, отнесенная к количеству поступающей в абсорбер жидкости; Y_i – концентрация компонента i в газе, отнесенная к количеству поступающего в абсорбер газа; y_i – мольная доля компонента i в газе; y_i^* – равновесная мольная доля компонента i в газе; F – площадь контакта фаз, м²; K_i – коэффициент массопередачи, кмоль/(м²·ч).

Граничные условия для данной модели имеют вид:

$$\text{при } F=0 \quad Y_i = Y_{i,H}; \quad \text{при } F = a_n \cdot V \quad X_i = X_{i,H} \quad (11)$$

Уравнения (9-10) преобразуются в уравнение:

$$\frac{d^2 X_i}{dz^2} + S_i \frac{dX_i}{dz} + E_i \cdot X_i = 0, \quad (12)$$

где $z = N/N_0$; N_0 – общее число единиц переноса по ключевому компоненту; коэффициенты S_i и E_i :

$$S_i = k_i \cdot N_0 \left(g - m_i \frac{f}{l} \right) - \frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dz}; \quad E_i = \frac{k_i \cdot N_0}{l} \left(m_i \frac{f}{g} \cdot \frac{dg}{dz} - \frac{d(m_i f)}{dz} \right);$$

l – удельный расход поглотителя: $l = \frac{M_{H_2O}}{V_n / 22,4}$;

k_i – относительный коэффициент массопередачи, равный отношению коэффициента массопередачи компонента i к коэффициенту массопередачи ключевого компонента:

$$k_i = \frac{K_{i,y}}{K_{кл,y}};$$

g – отношение расхода газа на входе в колонну к расходу газа в заданном сечении слоя насадки; f – отношение расходов жидкости на входе в колонну и в заданном сечении слоя насадки.

Для уравнения (12) граничные условия имеют вид:

при $z = 0$ $Y_i = Y_{i,1}$;

при $z = 1$ $X_i = X_{i,N}$

Расчет распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки основан на численном решении дифференциального уравнения (12). Высота слоя насадки разбивалась на 20 участков, каждому из которых присваивался порядковый номер (j). Компонент, константа фазового равновесия которого близка к удельному расходу поглотителя, выбирается ключевым компонентом. Для этого компонента задаются степенью извлечения.

Исходные данные для расчета: внутренний диаметр колонны $D_{вн} = 2,8$ м; расход газа на входе в колонну при н.у. $V_n = 500$ м³/ч; температура воды на входе в колонну $t_n = 20^\circ C$; $T_n = 293^\circ K$; температура газа на входе в колонну $t_r = 20^\circ C$; $T_r = 293^\circ K$; абсолютное давление в колонне $P = 100$ кПа; концентрация аммиака и метиламинов в жидкости в верхней части аппарата, мольные доли: $x_{i,n} = 0$ кмоль/кмоль раствора; фактическое содержание аммиака и метиламинов в газе на входе в колонну 0,0246 кмоль/м³; требуемое содержание аммиака и метиламинов в газе на выходе из колонны в пересчете на диметиламин: до 20 г/м³. Состав газа на входе в колонну: аммиак – 35 об. %, монометиламин (ММА) – 10 об. %, диметиламин (ДМА) – 10 об. %, триметиламин (ТМА) – 5 об. %, азот – 30 об. %, метан – 5 об. %, оксид углерода (СО) – 5 об. %. Технические характеристики ленточной насадки для промышленного абсорбера представлены в табл. 2. Технические характеристики колец Рашига представлены в табл. 3.

В первую очередь рассчитаны коэффициенты массопередачи $K_{i,y}$ и объемные коэффициенты массопередачи по методике, приведенной в работах [4, 5]. По результатам расчета объемный коэффициент массопередачи аммиака (по газовой фазе) составил $K_{1,r,v} = 355,41$ ч⁻¹.

Таблица 2
Технические характеристики ленточной насадки для промышленного абсорбера

Характеристика	Единица измерения	Значение
Параметр h (высота волны)	м	0,025
Ширина лент	м	0,05
Удельная поверхность насадки	м ² /м ³	121
Свободный объем	—	0,96
Эквивалентный диаметр	м	0,032

Таблица 3
Технические характеристики колец Рашига (50×50×5)

Характеристика	Единица измерения	Значение
Удельная поверхность насадки	м ² /м ³	90
Свободный объем	—	0,785
Эквивалентный диаметр	м	0,035

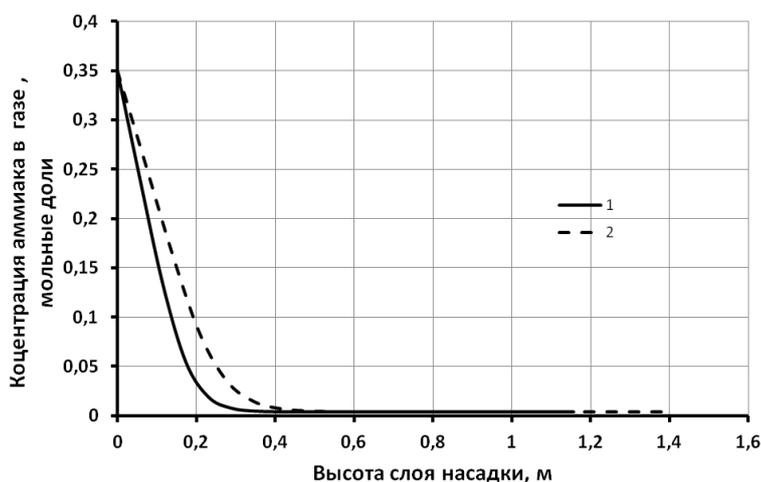


Рис. 11. Распределение концентрации аммиака в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

трации аммиака на ленточной насадке выше скорости снижения концентрации аммиака в газе на кольцах Рашига, что свидетельствует об интенсификации процесса массопередачи при использовании ленточной насадки вместо кольцевой.

Аналогичный расчет для насадки из колец Рашига (50×50×5), параметры которой приведены в табл. 3, дает значение объемного коэффициента массопередачи аммиака (по газовой фазе): $K_{1,г,в} = 295,6 \text{ ч}^{-1}$, что в 1,2 раза ниже, чем на ленточной насадке. Расчеты также показали, что при одинаковых технологических условиях и одинаковой высоте слоя насадки концентрация аминов в газе на выходе с колонны понижается на 10% при замене кольцевой насадки на ленточную.

По уравнению (8) выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи аммиака для хордовой насадки. Объемный коэффициент массопередачи для хордовой насадки при тех же условиях составил $206,5 \text{ ч}^{-1}$, что в 1,72 раза ниже, чем на ленточной насадке. Таким образом, использование ленточной насадки позволит интенсифицировать процесс массопереноса при абсорбции аммиака водой из газовых смесей и повысить эффективность очистки газов.

Результаты расчета распределения концентрации аммиака и ТМА в газовой фазе по высоте ленточной насадки (кривая 1) и колец Рашига (кривая 2) представлены на рис. 11, 12. Как видно из рис. 11, скорость снижения концен-

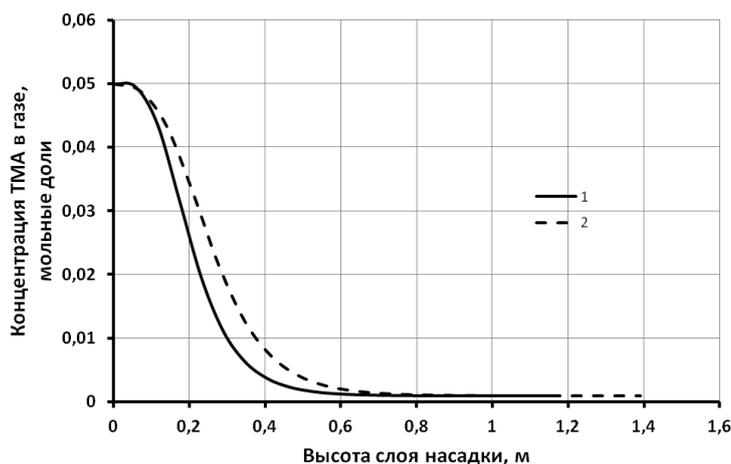


Рис. 12. Распределение концентрации ТМА в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

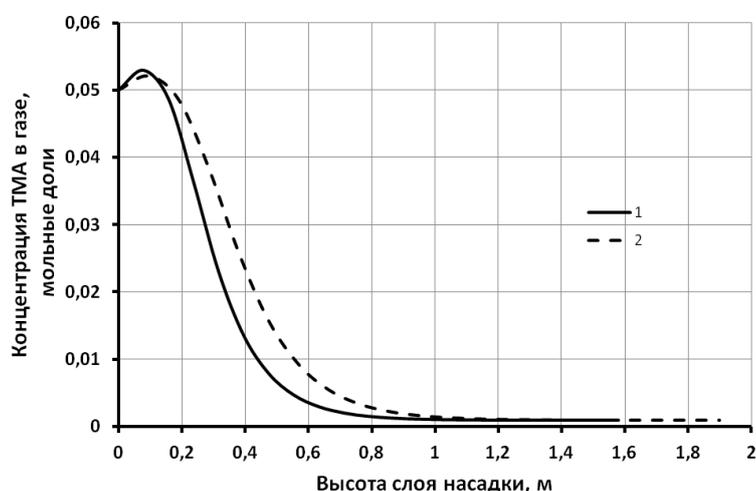


Рис. 13. Распределение концентрации ТМА в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2) при снижении коэффициента избытка расхода жидкости

снижение суммарного расхода газовой фазы на начальном участке насадки при относительном снижении скорости абсорбции ТМА приводит к росту концентрации ТМА в газовой фазе. Этот эффект нежелателен, поскольку может привести к проскоку ТМА с газовой фазой через слой насадки и снижает общую эффективность абсорбции. В связи с этим рекомендуется в расчетах по абсорбции аммиака из многокомпонентных газовых смесей использовать коэффициент избытка расхода воды не менее 3 ($q \geq 3$).

Достоверность математической модели (12) подтверждается согласованностью результатов расчета интенсификации процесса массопередачи на ленточной насадке двумя методами: по отношению изменения концентраций в слоях насадки и по отношению объемных коэффициентов массопередачи. Первый метод дал значение интенсификации процесса массопередачи в 1,18 раза, а второй — в 1,2 раза, что свидетельствует об адекватности математической модели (12).

Начальный горизонтальный (пологий) короткий участок на кривой распределения концентрации ТМА в газе (рис. 12) объясняется тем, что интенсивное поглощение аммиака на начальном участке слоя насадки приводит к резкому снижению объема газовой фазы, что вызывает некоторую задержку снижения концентрации ТМА.

В расчетах, результаты которых представлены на рис. 11, 12, рабочий расход воды, подаваемый на орошение колонны, превосходил значение минимального требуемого расхода воды в три раза. Расчеты показали, что в случае снижения коэффициента избытка расхода воды с 3 до 2 характер кривой распределения концентрации ТМА в газовой фазе меняется. На начальном участке кривой появляется экстремум (рис. 13). Возникновение экстремума объясняется относительным снижением скорости абсорбции ТМА водой в результате снижения расхода воды и увеличения ее температуры. Резкое

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Конструктивные параметры регулярной ленточной насадки ($d_s=0,011$ м), созданной на основе положений гидродинамической теории, обеспечивают снижение гидравлического сопротивления по сравнению с кольцами Рашига ($15\times 15\times 2$) в 4,5–6,5 раза, а по сравнению с седлами Берля в среднем в 1,5–2,2 раза в исследованном диапазоне приведенных скоростей газа и критерия Рейнольдса. Полученные эмпирические уравнения для расчета гидравлического сопротивления сухой ленточной насадки рекомендуются к использованию при разработке промышленных абсорберов.
2. Конструкция предложенной ленточной насадки ($d_s=0,011$ м), отличающаяся большим свободным объемом, позволяет в режиме орошения снизить гидравлическое сопротивление по сравнению с кольцами Рашига ($d_s=0,0085$ м) в 3,4–4,4 раза, а по сравнению с регулярной листовой рифленой насадкой ($d_s=0,01$ м) в 1,06–1,23 раза в исследованном диапазоне плотностей орошения. Внедрение регулярной ленточной насадки обеспечит снижение затрат энергии на преодоление гидравлического сопротивления слоя ленточной насадки.
3. Использование предложенной высокоэффективной регулярной ленточной насадки обеспечивает интенсификацию процесса абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей и повышение степени очистки газа за счет создания развитой поверхности контакта фаз. Интенсификация процесса позволяет на 10% повысить степень очистки газа и, соответственно, снизить концентрацию аммиака и метиламинов на выходе с колонны, при существенном снижении материалоемкости насадки. Ожидаемый экономический эффект от внедрения насадки на ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» составит 1,213 млн. руб. в год.
4. Интенсификация процесса абсорбции аммиака и метиламинов в абсорберах с регулярной ленточной насадкой достигается путем создания гидродинамического механизма с развитой поверхностью контакта фаз за счет высокой удельной поверхности насадки и равномерного распределения жидкости, обеспечиваемого конструктивно организованными перетоками жидкости с одного элемента насадки на другой, при этом объемный коэффициент массопередачи в жидкой фазе на регулярной ленточной насадке (модификация 2, $d_s=0,011$ м) в среднем в 1,11–1,28 раза выше, чем на хордовой насадке, в 1,45–1,55 раза выше, чем на кольцах Рашига ($25\times 25\times 3$), и в 2,61–4,49 раза выше, чем на трубчатой насадке.
5. Математическая модель процесса абсорбции, предложенная на основе учета многокомпонентности газовой смеси, позволяет установить характер распределения концентрации триметиламина по высоте слоя насадки, который зависит от коэффициента избытка расхода жидкости. При коэффициенте избытка $q=2$ на кривой распределения возникает экстремум, объясняющийся относительным снижением скорости абсорбции триметиламина водой в результате снижения расхода воды и увеличения ее температуры. Это позволяет рекомендовать в расчетах по абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей использовать коэффициент избытка расхода воды не менее 3 ($q\geq 3$).
6. Методика расчета промышленного абсорбера с регулярной ленточной насадкой, разработанная на основе математической модели процесса и учета влияния конструктивных особенностей ленточной насадки на скорость абсорбции, является адекватной и позволяет определить основные параметры слоя насадки (высоту, диаметр), а также объемный коэффициент массопередачи и распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки.

Список цитируемой литературы:

1. Тимофеев, А.В. Влияние структуры поверхности регулярной насадки на ее гидравлическое сопротивление и массообменную способность. / Тимофеев А.В., Гурский М.М., Романченко Л.Я., Извин Е.А. // Химическая промышленность. – 1980. – № 6. – С. 51-52.
2. Алекперова, Л.В. Гидродинамические исследования седловидных насадок и колец Паля. / Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Струнина А.В., Морозов А.И. // Химическая промышленность. – 1974. – № 5. – С. 60-64.
3. Рыжов, С.О. Гидродинамические исследования цепной насадки. / Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. // Химическая промышленность сегодня. – №2. – 2013. – С. 34-42.
4. Рамм, В.М. Абсорбционные процессы в химической промышленности. / Рамм В.М. / М. – 1981. – 359 с.
5. Рамм, В.М. Абсорбция газов. М.: РГБ. – 2009. – 655 с.

Публикации по теме работы:

Статьи в центральной печати (перечень ВАК)

1. Скачков, И.В. Определение гидравлического сопротивления ленточной насадки. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Кузора И.Е., Коробочкин В.В. // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 11. – С. 45-50.
2. Скачков, И.В. Моделирование процесса десорбции на насадке. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3 (31) . – 2011. – Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения. – С. 102-104.
3. Скачков, И.В. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3 (35) . – 2012. – Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения. – С. 147-150.
4. Скачков, И.В. Сравнительный анализ массообменной эффективности абсорбции многокомпонентной смеси на регулярной и кольцевой насадках. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Мусева Т.Н. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1 (45) . – 2015. – Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения. – С. 63-68.
5. Андреевко, М.В. Моделирование процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой на новой регулярной насадке. / Андреевко М.В., Скачков И.В., Бальчугов А.В., Коробочкин В.В. // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 6. – С. 69-78.

Патенты

6. Патент на изобретение РФ №2461419, МПК В01J19/32. Способ изготовления регулярной насадки для массообменных аппаратов / Бальчугов А.В., Скачков И.В., Кузора И.Е.; заявитель и патентообладатель: Бальчугов А.В., Скачков И.В., Кузора И.Е. – 2011112700/05, заявл. 01.04.2011, опубл. 20.09.2012.
7. Патент на изобретение РФ №2467792, МПК В01J19/32. Регулярная насадка для массообменных аппаратов / Бальчугов А.В., Скачков И.В., Кузора И.Е.; заявитель и патентообладатель: Бальчугов А.В., Скачков И.В., Кузора И.Е. – 2011112698/05, заявл. 01.04.2011, опубл. 27.11.2012.

Другие публикации

8. Скачков, И.В. Математическое моделирование массопереноса при десорбции газа из жидкости на ленточной насадке. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Материалы докладов 41-й научно-технической конференции аспирантов и студентов. Часть 2.

Издание ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». – 2011. – С. 168-170.

9. Скачков, И.В. Разработка регулярной каркасно-ленточной насадки для массообменных процессов. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Тезисы докладов конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс». – Ангарск. – АГТА. – 2011. – С. 21.

10. Васильев, А.В. Моделирование кинетики тепло-и массообмена при абсорбции газа жидкостью в насадочном аппарате. / Васильев А.В., Скачков И.В., Бальчугов А.В. // XXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях». – Саратов. – 2011. – С. 114-116.

11. Андрееенко, М.В. Массоперенос при десорбции сероводорода из воды на регулярной насадке. / Андрееенко М.В., Распутин И.С., Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Материалы IV Региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО "АНХК". – Ангарск. – 2011. – С. 7-11.

12. Скачков, И.В. Новые высокоэффективные регулярные насадки для тепло- и массообменных процессов в газожидкостных системах. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Материалы докладов 42-й научно-технической конференции аспирантов и студентов. Часть 4. . – Издание ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». – 2012. – С. 48-50.

13. Скачков, И.В. Методология разработки новых конструкций регулярных насадок. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Материалы докладов 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов. Часть 2. – Издание ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». – 2013. – С. 308-310.

14. Скачков, И.В. Разработка и испытание высокоэффективной регулярной насадки для тепло- и массообменных процессов. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // В сб. Итоги диссертационных исследований. Том 2. Материалы Всероссийского конкурса молодых ученых. М. – РАН. – 2013. – С. 78-85.

15. Скачков, И.В. Принципы конструирования элементов регулярной насадки для массообменных процессов. / Скачков И.В., Бальчугов А.В. // Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. Ангарск. – АГТА. – 2013. – С. 122-124.

16. Скачков, И.В. Исследование гидравлического сопротивления новой регулярной ленточной насадки. / Скачков И.В., Рьжов С.О., Андрееенко М.В. // Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. Ангарск. – АГТА. – 2012. – С. 40-45.

17. Скачков, И.В. Гидродинамические исследования двух модификаций регулярной насадки. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Андрееенко М.В., Султанов С.М. // Тезисы докладов межвузовской научной конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс». Ангарск. – АГТА. – 2014. – С. 27.

18. Скачков, И.В. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления орошаемой ленточной регулярной насадки. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Андрееенко М.В., Султанов С.М. // Тезисы докладов межвузовской научной конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс», Ангарск. – АГТА. – 2014. – С. 28.

19. Скачков, И.В. Экспериментальное сравнение гидравлического сопротивления газожидкостной системы в слое регулярной и кольцевой насадок. Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. АГТА. – Ангарск. – 2014. – С. 94-98.

20. Скачков, И.В. Эффективность массообмена при абсорбции многокомпонентной смеси на регулярной насадке. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Андрееенко М.В., Бадеников В.Я. // Вестник АГТА. Ангарск. – 2014. – С. 126-129.

21. Скачков, И.В. Распределение концентраций по высоте слоя насадки при абсорбции многокомпонентной газовой смеси. / Скачков И.В., Бальчугов А.В., Мусева Т.Н., Бадеников В.Я. // Вестник АГТА. Ангарск. – 2014. – С.130-133.