

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ангарская государственная техническая академия»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Бальчугов А.В.**

Ангарск – 2015

Содержание

Введение.....	4
1. Интенсификация процесса абсорбции с использованием высокоэффективных насадочных устройств.....	11
1.1. Анализ причин низкой интенсивности абсорбции в производстве метиламинов.....	11
1.2. Обоснование выбора способа интенсификации абсорбции.....	14
1.3. Способы выражения интенсивности массообмена при абсорбции...	19
1.4. Гидродинамика газожидкостных потоков на насадках.....	25
1.5. Постановка задачи исследований.....	31
2. Методология и методы исследований.....	35
2.1. Описание установки и методики проведения экспериментов по из- мерению гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки...	35
2.2. Описание установки и метода определения объемного коэффициента массопередачи.....	39
2.3. Методология математического моделировании массообменных процессов при абсорбции.....	43
3. Исследования гидравлического сопротивления и интенсивности мас- сопередачи при абсорбции на регулярной ленточной насадке.....	46
3.1. Результаты экспериментального определения гидравлического со- противления сухой насадки.....	46
3.2. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления орошаемых насадок.....	50
3.3. Условия экспериментов и результаты определения объемных коэффициентов массопередачи.....	54
3.4. Сравнение результатов экспериментов с массообменными характе- ристиками известных насадок.....	58

4. Моделирование массопереноса при абсорбции многокомпонентной газовой смеси на регулярной насадке.....	66
4.1. Описание математической модели процесса абсорбции и решение уравнений модели.....	66
4.2. Результаты расчета распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки при многокомпонентной абсорбции.....	77
4.3. Рекомендации по применению методики расчета абсорбера и по выбору параметров технологического режима.....	94
Основные выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей работы...	97
Условные обозначения.....	99
Список литературы.....	103
Приложение 1.....	123
Приложение 2.....	140
Приложение 3.....	150
Приложение 4.....	151
Приложение 5.....	152

Введение

Актуальность темы. Интенсивность массообменных процессов в абсорбционных колоннах и, как следствие, степень очистки газов в значительной степени зависят от конструкции используемого насадочного устройства [9, 106]. Для обеспечения высокой интенсивности массопереноса насадочное контактное устройство должно обладать большой удельной поверхностью и обеспечивать равномерное распределение газа и жидкости в поперечном сечении колонны с сохранением низкого гидравлического сопротивления.

Важным промышленным процессом является абсорбционная очистка технологических газов от аммиака и метиламинов на насадочном контактном устройстве в производстве метиламинов методом каталитического аминирования метанола в паровой фазе под давлением. На данном производстве образуются технологические газовые выбросы, которые подлежат улавливанию в абсорберах с последующей утилизацией. В настоящее время в качестве контактного устройства используются керамические кольца Рашига, которые не обеспечивают требуемую степень очистки газа от аммиака и метиламинов по причине низкой интенсивности массопереноса. Концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе на выходе с действующей насадочной колонны превышает технологическую норму и составляет более 20 г/м^3 . Как показывает анализ литературных данных, использование для абсорбции аммиака и метиламинов хордовой и трубчатой насадок также не в состоянии обеспечить требуемую степень очистки газа [114]. Интенсивность процесса абсорбции может быть увеличена за счет замены кольцевой насадки на высокоэффективную ленточную регулярную насадку.

В связи с этим научное изучение и интенсификация процессов массопереноса при абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентной газовой смеси в насадочном абсорбере являются актуальными.

Работа выполнена в рамках государственного задания 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 позиции А-200, А-200а схемы утилизации хвостовых газов установки 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 массопередачи 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 многокомпонентных 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 эмпири-

ческие 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 работы:

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 (25×25×3), 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 теоритическая 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 работы обусловлена тем, что 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, а так же 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.

Апробация работы. 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».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 работа, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК и получено 2 патента на изобретение РФ.

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.

1. Интенсификация процесса абсорбции с использованием высокоэффективных насадочных устройств

1.1. Анализ причин низкой интенсивности абсорбции в производстве метиламинов

В промышленности метиламины получают методом каталитического аминирования метанола в паровой фазе под давлением. В данном процессе образуются технологические побочные газовые выбросы, содержащие аммиак и метиламины, которые подлежат улавливанию в насадочных абсорберах с последующей утилизацией. В настоящее время концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе на выходе с насадочного абсорбера превышает технологическую норму и составляет более 20 г/м^3 , что свидетельствует о недостаточно высокой интенсивности массопереноса в колонне. Представляется важным установить причины низкой интенсивности абсорбции и определить пути совершенствования процесса.

Принципиальная схема стадии абсорбции и разделения продуктов ректификацией приведена на рис. 1. Газовая смесь, образующаяся в результате выбросов от предохранительных клапанов, очищается от аммиака и метиламинов (монометиламина, диметиламина, триметиламина) в насадочном абсорбере 1 (рис. 1). Давление в абсорбционной колонне составляет 1,05-1,2 ат, температура 20-30 °С. Абсорбер представляет собой насадочную колонну диаметром 2,8 м. Абсорбер заполнен керамическими кольцами Рашига размером 50×50×5. Насадка уложена «внавал» на колосниковую решетку. В качестве абсорбента используется технологическая вода. В верхней части колонны 1 имеется распределительное устройство для воды. Газовая смесь подается в нижнюю часть колонны через распределительное устройство «грибкового» типа и движется противотоком по отношению к абсорбенту. Абсорбент стекает по насадке, контактируя с газовой фазой, из которой поглощаются аммиак и метиламины.

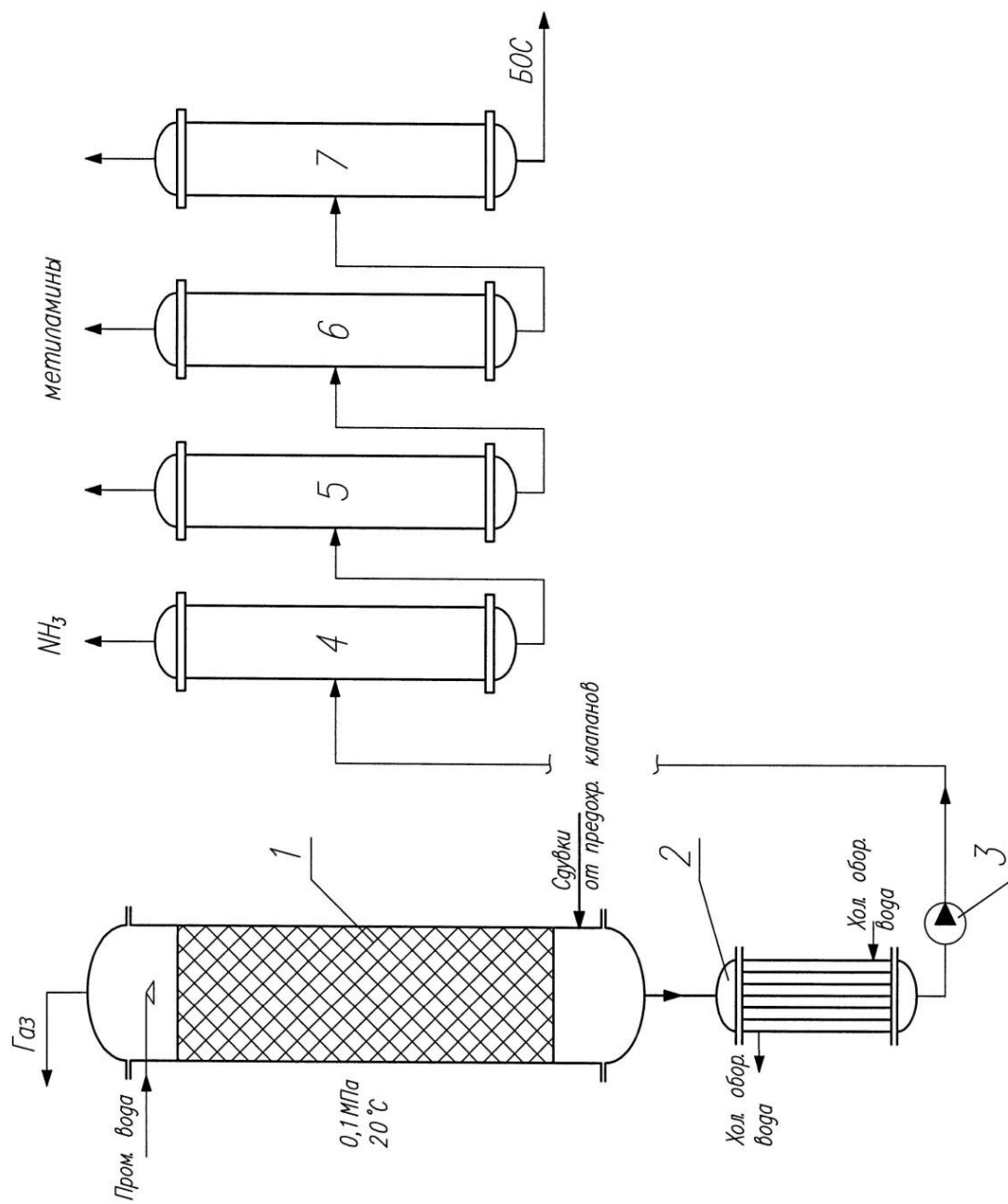


Рис. 1. Принципиальная схема стадии абсорбции и ректификации

Затем абсорбент, насыщенный газами, поступает в холодильник кожухотрубчатого типа 2, где охлаждается. Далее абсорбент направляется насосом 3 в колонны 4-7 на ректификацию и, затем, на биологическую очистку сточных вод (БОС).

Анализ показывает, что имеется несколько причин низкой интенсивности процесса, которые можно разделить на две группы: конструктивные и технологические. К первой группе причин относятся:

- низкая удельная поверхность колец Рашига ($50 \times 50 \times 5$); по данным [64] она составляет $87,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$, вследствие чего образуется низкая площадь поверхности массопередачи;

- неравномерное распределение жидкости и газа в поперечном сечении слоя насадки, что является известным недостатком используемой в настоящее время насадки – колец Рашига [31, 33], а также следствием большого диаметра колонны (2,8 м); в результате жидкость стремится к стенкам колонны, а основное количество газа проходит по центру колонны [114];

- недостаточно эффективное перемешивание газа и жидкости в слое колец Рашига, и низкие значения коэффициентов массопередачи, свойственные для кольцевой насадки большого диаметра [105, 137].

Ко второй группе причин относятся:

- недостаточно высокое давление в абсорбционной колонне (1,05-1,2 ат), поскольку известно, что увеличение давления позволяет повысить движущую силу процесса массопередачи и скорость процесса [26, 34];

- отсутствие внутреннего охлаждения в абсорбере с целью отвода теплоты и снижения температуры жидкости, что приводит к снижению скорости абсорбции;

- низкая приведенная скорость газа в абсорбере, равная 0,02-0,05 м/с.

На основе анализа приведенных причин в следующем разделе диссертации выполнен обоснованный выбор способа повышения интенсивности абсорбции аммиака и метиламинов.

1.2. Обоснование выбора способа интенсификации абсорбции

Анализ причин низкой интенсивности абсорбции аммиака и метиламинов в насадочном абсорбере с позиций теории массопередачи позволяет выделить три способа интенсификации процесса многокомпонентной абсорбции: за счет увеличения коэффициентов массопередачи (K_G), увеличения площади контакта фаз (F) и повышения движущей силы процесса (Δ) [118, 124, 143]. Это следует из основного уравнения массопередачи:

$$M = K_G \cdot F \cdot \Delta. \quad (1)$$

Известно, что такие способы интенсификации как увеличение движущей силы процесса массопередачи и коэффициентов массопередачи требуют существенных энергетических затрат. Так, увеличения движущей силы процесса можно достичь за счет изменения давления или температуры в колонне [2, 3, 52, 136]. При увеличении давления и уменьшении температуры угол наклона равновесной линии относительно оси абсцисс уменьшается, что соответствует увеличению движущей силы процесса абсорбции Δ (рис. 2).

Однако, повышение давления в абсорбционной колонне связано с существенными энергетическими затратами на компремирование газа, а снижение температуры – с затратами на получение хладагента [17, 24, 102].

Увеличение коэффициентов массопередачи в слое насадки требует создания высокоскоростных турбулентных гидродинамических режимов взаимодействия газа и жидкости [45, 48, 54], что также сопряжено с дополнительными энергетическими затратами.

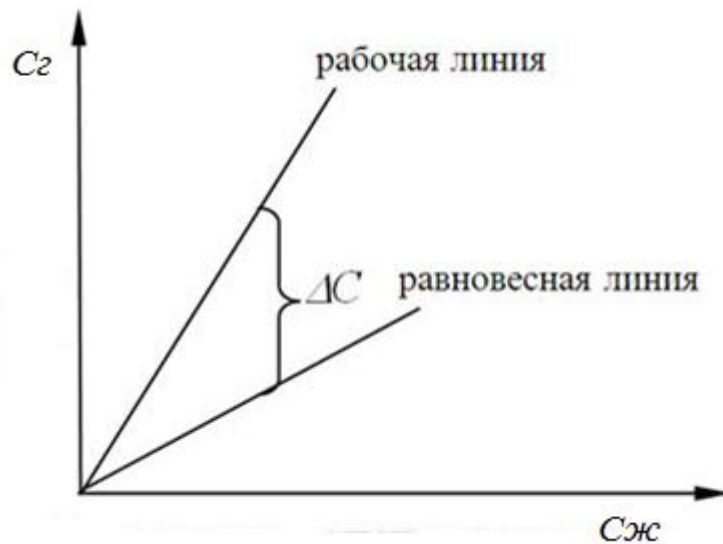


Рис. 2. Рабочая и равновесная линии при абсорбции

На основании этого можно сделать вывод, что в промышленных условиях наиболее перспективным способом интенсификации абсорбции является создание развитой поверхности контакта фаз, которую можно обеспечить за счет выбора оптимальной конструкции насадки [25].

К настоящему времени разработаны различные подходы к совершенствованию конструкций насадок с целью обеспечения развитой поверхности контакта фаз и интенсификации процессов массопередачи [38, 40, 67-93, 123, 132]. Самым распространенным подходом является формирование регулярной компоновки элементов насадки в аппарате [59, 112, 135].

Выделяют несколько способов формирования регулярной компоновки элементов в слое насадки [122]:

- 1) регулярное распределение элементов насыпных насадок;
- 2) изготовление слоя насадки из сеток;
- 3) изготовление слоя насадки из уголков, двутавров, труб и др.;
- 4) изготовление слоя насадки из перфорированных и гофрированных листов и плит.

Примером формирования регулярной структуры из элементов насыпной насадки является регулярная укладка колец Рашига. Так, имеются

данные об экспериментах по изучению влияния упорядоченного выкладывания слоя керамических колец Рашига на интенсивность массообмена [114]. При этом первый (нижний) слой колец выкладывался следующим образом: кольца Рашига устанавливаются основанием цилиндра на опорную решетку вплотную друг к другу. Второй и последующие слои колец выкладываются с небольшим сдвигом относительно нижерасположенного слоя так, чтобы избежать создания сквозных каналов от нижнего слоя колец до верхнего. В результате при таком расположении колец Рашига, по сравнению с заполнением аппарата той же насадкой «внавал», гидравлическое сопротивление снижается, а интенсивность массообмена увеличивается при одновременном условии увеличения равномерности орошения колонны и улучшении смоченности насадки [114].

Примером регулярной насадки, изготовленной из свернутой спиралью сетки, является широко известная насадка Гудлоу (или насадка Панченкова). Пакеты свернутой в рулон гофрированной проволоочной сетки (диаметр проволоки 0,1 мм) укладываются в абсорбционную колонну послойно. Гофры расположены под углом 60° к вертикали. Высота пакета насадки составляет не более 0,2 м. Другим примером регулярной сеточной насадки является контактное устройство, описанное в изобретении [97]. Данная насадка представляет собой сетку, свернутую в рулон, при этом горизонтальный ряд проволок предыдущего витка расположен ниже и смещен относительно последующего витка на 0,5 размера ячейки с образованием перевернутого конуса на верхнем срезе рулона. Регулярные насадки из сетки не получили широкого распространения ввиду того, что жидкость плохо задерживается на сетке, что не приводит к существенному увеличению площади поверхности контакта фаз и интенсификации процесса.

Насадки, изготовленные из уголков, труб и т.д. образуют отдельную группу регулярных насадок. Примером конструкции подобной насадки может служить регулярная насадка, описанная в патенте [96]. Она содер-

жит пакеты из пучка параллельно установленных вертикальных труб с изменяющейся вдоль оси площадью поперечного сечения и горизонтально расположенных треугольных решетчатых призм. Трубы в соседних по высоте рядах установлены со смещением, равным половине диаметра трубы. Сечение труб имеет форму овала Кассини, а соотношение диаметров наиболее широкого и наиболее узкого сечения труб находится в соотношении 2:1 [96].

Угловая насадка, описанная в [66], состоит из горизонтальных рядов равнобоких угловых элементов, расположенных с некоторым шагом относительно друг друга. Угловые элементы каждого последующего ряда смещены по горизонтали таким образом, чтобы размещаться между вышерасположенными элементами. Проведенные исследования показали, что использование угловой насадки позволяет повысить интенсивность массопередачи на 5-12 % в зависимости от размеров элементов и свойств системы [66].

Исследователями предлагаются также другие регулярные насадки, состоящие из гофрированных листов и пластин. Так, в патенте на изобретение [65] описан способ сборки гофрированных пластин в пакет с взаимным перекрещиванием направлений гофр в смежных пластинах. Скрепление этих пластин между собой осуществляется в местах их контакта с помощью термохимической обработки в среде углеродосодержащего газа при 800-1200 °С. Такой способ изготовления насадки позволяет увеличить прочность скрепления пластин в пакет, создать развитую поверхность контакта фаз и повысить интенсивность массообмена [65].

В патенте [73] описано контактное устройство для массообменных аппаратов, состоящее из горизонтальных рядов наклонных прямоугольных пластин с образованием щели между кромками соседних пластин. Щели, образованные пластинами вышерасположенного ряда, располагаются против щелей нижерасположенного ряда. Данное изобретение позволяет ин-

тенсифицировать процесс массопередачи для систем жидкость – жидкость (например, в процессе экстракции) путем увеличения поверхности массообмена [73].

В патенте [71] описан новый способ создания слоя регулярной насадки из пластин. На обеих поверхностях пластины выполняются неровности на равных интервалах. В месте вершины неровности выполняется отверстие, соединяющее переднюю поверхность пластины с задней поверхностью. Поскольку отверстия выполнены в направлении, перпендикулярном потоку жидкости, то по контактной пластине жидкость протекает, распределяясь не только в продольном направлении, но и в поперечном направлении. В результате такая контактная пластина имеет хорошую смачиваемость, что позволяет улучшить площадь поверхности контакта газа и жидкости и интенсифицировать массопередачу [71].

В патенте на изобретение [68] описан новый способ изготовления высокоэффективной регулярной насадки. Полотно из керамических волокон пропитывается связующим раствором и высушивается. Далее полотно пропускается в зазор между зубчатыми роликами под углом 90° , при этом образуется гофрированный лист. Затем листы собираются в пакет при перекрестном направлении гофр, и одновременно наносится клей в местах касания. После этого пакет подвергают окончательному формованию путем термообработки. Данный способ позволяет получить эффективную насадку с широкими производственными возможностями при сохранении относительно высокого срока службы [68].

Выполненный обзор известных конструкций насадок свидетельствует об актуальности и перспективности применения насадок регулярной структуры для повышения интенсивности массопереноса в газожидкостных системах.

В настоящее время в промышленности для абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей применяют как нерегулярные насадки: коль-

ца Рашига, так и регулярные: хордовую и трубчатую насадки [64, 114, 115]. Кольца Рашига не обеспечивают требуемую степень очистки газа и, кроме того, характеризуются большим гидравлическим сопротивлением [41]. Как показывают исследования, хордовая и трубчатая насадки характеризуются низким гидравлическим сопротивлением, но малой удельной поверхностью и, как следствие, низкой интенсивностью процесса массопередачи [114]. В связи с этим становится актуальной разработка и исследования новых регулярных насадок, обеспечивающих высокую интенсивность процесса массопередачи.

Оценка эффективности применения насадочного устройства в том или ином газожидкостном процессе должна осуществляться на основе количественных данных по интенсификации массопередачи [20]. Известны различные подходы к количественному выражению интенсивности массопередачи, выбор которых зависит от вида контактного устройства, типа протекающего процесса и способа получения данных по кинетике массопередачи [103]. В следующем разделе приводится описание и анализ наиболее распространенных методов количественного выражения интенсивности массопередачи и предлагается обоснованный выбор метода для описания интенсивности массопередачи при абсорбции аммиака и метиламина.

1.3. Способы выражения интенсивности массообмена при абсорбции

Математическое описание интенсивности массообмена является сложной задачей, поскольку оно должно учитывать гидродинамический характер движения газового и жидкостного потоков, процессы теплообмена между фазами и массоотдачу в каждой из фаз [60, 61, 138, 144].

Для упрощения процесс переноса компонента из газовой фазы в жидкую при абсорбции условно разделяют на три стадии: перенос компо-

нента из ядра газовой фазы к границе раздела, перенос через границу раздела и перенос от границы раздела в ядро жидкой фазы. Скорость первой и третьей стадий описывается соответственно следующими уравнениями:

$$M = \beta_z \cdot F \cdot (C_z - C_{zp}) \quad (2)$$

$$M = \beta_{жс} \cdot F \cdot (C_{zp} - C_{жс}). \quad (3)$$

В соответствии с уравнениями (2, 3) скорость массоотдачи в пределах фазы пропорциональна движущей силе и поверхности контакта фаз. Коэффициент массоотдачи в уравнениях (2, 3) является кинетической характеристикой, которая учитывает физические свойства фазы, гидродинамические характеристики потоков и геометрические параметры контактного устройства.

В соответствии с теорией подобия коэффициент массоотдачи входит в выражение для определения диффузионного критерия Нуссельта:

$$Nu_z = \frac{\beta_z \cdot d_z}{D_z}. \quad (4)$$

Общий вид эмпирического уравнения для расчета диффузионного критерия Нуссельта в газовой фазе представлен уравнением [64]:

$$Nu_z = c Re_z^m (Pr_z)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Значения коэффициентов, найденные различными исследователями, используемые в формуле (5), приведены в источнике [114]. Основным геометрическим размером при определении критериев Нуссельта и Рейнольдса является эквивалентный диаметр насадки [36, 37, 130].

Общая скорость переноса компонента из газовой фазы в жидкую при абсорбции описывается уравнением массопередачи (1).

Входящий в уравнение (1) коэффициент массопередачи определяется по уравнению:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{\beta_z} + \frac{m_{yx}}{\beta_{жс}}. \quad (6)$$

В расчетах принимается, что граница раздела фаз не создает сопротивления процессу массопередачи и на поверхности раздела устанавливается равновесие [115, 131, 134].

Коэффициенты массоотдачи и массопередачи, входящие в уравнения (2, 3, 6), отнесены к поверхности массообмена, которую в большинстве случаев трудно определить. Например, в слое насадки поверхность массообмена образована поверхностью жидкой пленки, струек, брызг, пленок и т.д. [136, 137, 143]. Поэтому в исследованиях коэффициенты массопередачи часто относят не к поверхности, а к объему насадочного слоя, который связан с поверхностью массообмена соотношением:

$$V_H = \frac{F}{a}. \quad (7)$$

Выразив F из уравнения (7) и подставив в уравнение массопередачи (1), получим:

$$M = K_G \cdot a \cdot V_H \cdot \Delta. \quad (8)$$

Параметр

$$K_{Ga} = K_G \cdot a. \quad (9)$$

называется объемным коэффициентом массопередачи, который характеризует интенсивность массопереноса в слое насадки.

Объемный коэффициент массопередачи в газовой фазе выражается эмпирическим уравнением:

$$K_{Ga} = A W_{\varepsilon}^m W_{ж}^n. \quad (10)$$

В ходе работ исследователей на разных типах насадок были определены значения коэффициентов для уравнения (10), которые представлены в источнике [114].

Исследователи отмечают, что на значение объемного коэффициента массопередачи существенное влияние оказывает гидродинамический режим взаимодействия газа и жидкости. Так, в режиме инверсии в слое насадки наблюдается рост объемного коэффициента массопередачи [55], что

объясняется увеличенной активной поверхностью контакта газовой и жидкой фаз.

В случаях, когда поверхность контакта фаз не поддается определению, для расчета интенсивности массопереноса используют понятия числа единиц переноса и высоты единицы переноса. В этом случае высота слоя насадки определяется по уравнению:

$$H = h_z \cdot N_z, \quad (11)$$

где высота единицы переноса:

$$h_z = \frac{G}{K_G \cdot a \cdot S}. \quad (12)$$

число единиц переноса:

$$N_z = \frac{C_H - C_K}{\Delta}. \quad (13)$$

Высота единиц переноса характеризует интенсивность (кинетику) массопередачи, и, как следует из уравнения (12), она обратно пропорциональна объемному коэффициенту массопередачи.

По данным исследований [114], охватывающих разнообразные типы промышленных насадок, получены эмпирические уравнения для расчета высоты единицы переноса. Так, для нерегулярных насадок высота единицы переноса может быть найдена по формуле:

$$h_z = 0,615 d_z \cdot Re_z^{0,345} (Pr_z)^{\frac{2}{3}}. \quad (14)$$

Для регулярных насадок данный параметр определяется уравнением:

$$h_z = 1,5 d_z \cdot Re_z^{0,26} (Pr_z)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{l}{d_z} \right)^{0,47}, \quad (15)$$

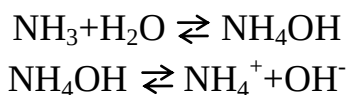
где l – высота насадочного тела, м.

Необходимо отметить, что высота единицы переноса для регулярных насадок выше, чем для насыпных, и возрастает при увеличении высоты элемента насадки [51, 142].

Коэффициент массопередачи, отнесенный к площади контакта фаз K_G , объемный коэффициент массопередачи K_{Ga} и высота единиц переноса h_z являются выражением различных количественных мер интенсивности массопередачи и связаны между собой. Связь между указанными характеристиками описывается уравнениями (9, 12). В практических расчетах можно пользоваться любой из указанных величин [14, 28, 110].

В научных работах по экспериментальному определению интенсивности массопередачи чаще других кинетических параметров применяется объемный коэффициент массопередачи [58, 111], ввиду простоты и удобства использования этого параметра. По этой причине в настоящей диссертационной работе количественной мерой экспериментально определенной интенсивности массопередачи также выбирается объемный коэффициент массопередачи K_{Ga} .

Важным вопросом является механизм взаимодействия поглощаемого компонента с абсорбентом. При растворении аммиака в воде протекают химические реакции:



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

При 25°C теплоты образования участвующих в реакциях компонентов составляют: $\Delta H_{f,298}^0(\text{NH}_3) = -45,94$ кДж/моль; $\Delta H_{f,298}^0(\text{H}_2\text{O}) = -285,83$ кДж/моль; $\Delta H_{f,298}^0(\text{NH}_4\text{OH}) = -366,65$ кДж/моль; $\Delta H_{f,298}^0(\text{NH}_4^+) = -132,80$ кДж/моль; $\Delta H_{f,298}^0(\text{OH}^-) = -230,02$ кДж/моль [39, 125].

В соответствии с законом Гесса тепловой эффект первой реакции составит:

$$\Delta H_{1\ 298}^0 = \Delta H_{f,298}^0(\text{NH}_4\text{OH}) - \Delta H_{f,298}^0(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H_{f,298}^0(\text{NH}_3) = -34,88 \text{ кДж/моль}$$

Тепловой эффект второй реакции составит:

$$\Delta H_{2,298}^{\circ} = \Delta H_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4^{+}) + \Delta H_{f,298}^{\circ}(\text{OH}^{-}) - \Delta H_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4\text{OH}) = 3,83 \text{ кДж/моль}$$

Таким образом, процесс растворения аммиака в воде протекает с выделением теплоты (экзотермический процесс).

При 25°C стандартный изобарный потенциал образования веществ (энергия Гиббса) составляет: $\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_3) = -16,43 \text{ кДж/моль}$; $\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) = -237,23 \text{ кДж/моль}$; $\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4\text{OH}) = -264,14 \text{ кДж/моль}$; $\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4^{+}) = -79,52 \text{ кДж/моль}$; $\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{OH}^{-}) = -157,35 \text{ кДж/моль}$ [39, 125].

При 25°C стандартный изобарный потенциал (энергия Гиббса) первой реакции составит:

$$\Delta G_{1,298}^{\circ} = \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4\text{OH}) - \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_3) - \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) = -10,48 \text{ кДж/моль}.$$

При 25°C стандартный изобарный потенциал (энергия Гиббса) второй реакции составит:

$$\Delta G_{2,298}^{\circ} = \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4^{+}) + \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{OH}^{-}) - \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{NH}_4\text{OH}) = 27,27 \text{ кДж/моль}.$$

Приведенные расчеты позволяют сделать вывод, что протекание первой реакции более вероятно, поскольку она обладает меньшим значением стандартной энергии Гиббса.

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

Помимо высокой интенсивности массопередачи к насадкам предъявляется ряд других требований [1, 12, 16, 35, 49]: низкое гидравлическое сопротивление; высокая пропускная способность; хорошая смачиваемость; равномерное распределение фаз в слое насадки; интенсивная турбулизация газа и жидкости.

Соблюдение перечисленных требований обеспечивается за счет выбора оптимальной конструкции насадки и соответствующего гидродинамического режима взаимодействия газа и жидкости [139, 141]. Соответствие насадки данным требованиям может быть определено только в ходе экспериментальных гидродинамических исследований. В следующем раз-

деле рассмотрены методы определения гидравлического сопротивления насадки и влияние режима взаимодействия газа и жидкости на сопротивление насадки.

1.4. Гидродинамика газожидкостных потоков на насадках

Важной характеристикой является гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки [47, 104, 128]. При заданной скорости газа оно зависит только от конструкции насадки. При анализе движения газовой фазы через слой сухой насадки одновременно учитывают обтекание отдельных элементов насадки и движение внутри каналов сложной формы [30, 109, 121]. Для определения гидравлического сопротивления сухой насадки применимо следующее уравнение [50]:

$$\Delta p_{\text{сух}} = \xi \cdot \frac{H}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{ист}}^2}{2}. \quad (16)$$

Скорость газовой фазы изменяется по высоте слоя насадки, поскольку газовая фаза движется по каналам сложной формы. Поэтому скорость газа относят ко всему сечению насадочного аппарата. Такая скорость называется приведенной и определяется по уравнению:

$$w = w_{\text{ист}} \cdot \varepsilon. \quad (17)$$

Насадка характеризуется эквивалентным диаметром, который выражается через свободный объем и удельную поверхность насадки [63, 100]:

$$d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon}{a_{\text{н}}}. \quad (18)$$

Подставив выражения (17, 18) в формулу (16), можно получить:

$$\Delta p_{\text{сух}} = \xi \frac{H \rho_{\text{г}} w^2 a_{\text{н}}}{8\varepsilon^3}. \quad (19)$$

Необходимо отметить, что в формуле (19) коэффициент сопротивления ξ зависит от конструкции насадки и отражает влияние сопротивления

трения, а также влияние местных сопротивлений, зависящих от геометрических особенностей каналов насадки [19, 116, 140].

Коэффициент сопротивления насадки ξ определяют по следующим формулам [114]:

– для насадок седлообразной формы:

$$\xi = \frac{133}{Re_z} + 2,34. \quad (20)$$

– для насадок кольцеобразной формы:

$$\xi = \begin{cases} \frac{140}{Re_z}, & Re_z < 15; \\ \frac{16}{Re_z^{0,2}}, & Re_z \geq 15. \end{cases} \quad (21)$$

Критерий Рейнольдса определяется для газовой фазы по эквивалентному диаметру канала [126, 127]:

$$Re_z = \frac{w \cdot d_g \cdot \rho_z}{\mu_z \cdot \varepsilon}. \quad (22)$$

Сопротивление орошаемой насадки зависит не только от скорости газа и конструкции насадки, но и от плотности орошения и гидродинамического режима [15, 21]. В насадочных аппаратах при противоточном движении фаз в зависимости от скорости движения газовой фазы и плотности орошения выделяют четыре характерных гидродинамических режима [46, 62, 107, 117]: пленочный режим; режим подвисяния; режим инверсии; режим уноса.

Последовательность их возникновения в массообменном аппарате можно проследить по рис. 3, на котором графически отображена логарифмическая зависимость гидравлического сопротивления слоя насадки от приведенной скорости газа.

В случае малых скоростей газа и малой плотности орошения создается пленочный режим (отрезок 1 на кривой II, рис. 3). Он характеризуется

тем, что орошающая жидкость движется по поверхности насадки в виде капель и пленок. Взаимодействие фаз происходит в основном на поверхности контактного устройства. При пленочном режиме газовая фаза, заполняя свободный объем насадки, движется сплошным потоком, а жидкая фаза является дисперсной [8, 59]. В точке «а» (рис. 3) газовая фаза начинает притормаживать движение жидкости и начинается «подвисание» жидкой фазы.

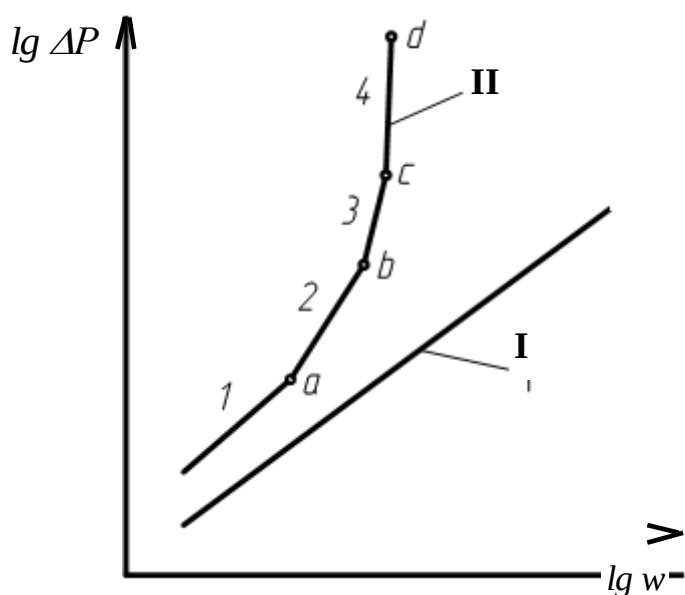


Рис. 3. Логарифмическая зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа: I – сухая насадка; II – орошаемая насадка

При большой скорости движения газовая фаза начинает тормозить жидкую фазу, при этом возникает режим подвисания (отрезок 2 на кривой II, рис. 3). Он характеризуется тем, что взаимодействие фаз происходит как на поверхности контактного устройства, так и на поверхностях свободных струй жидкости. Как и в пленочном режиме, сплошной фазой остается газовая фаза.

При дальнейшем увеличении скорости газовой фазы создается режим инверсии (отрезок 3 на кривой II, рис. 3). В точке «b» происходит инверсия фаз (газовая фаза становится дисперсной, а жидкая – сплошной). В

результате инверсии фаз образуется дисперсная система, имеющая вид газо-жидкостной эмульсии, или пены. Этот режим возникает в результате накопления в свободном объеме насадки жидкой фазы. В режиме инверсии фаз поверхность контакта фаз максимальна, это связано с интенсивным образованием струй, вихрей и пузырьков. Жидкость накапливается в слое насадки до того момента, пока сила тяжести, действующая на объем накопленной жидкости, не окажется больше силы трения между газом и жидкостью [53, 114].

При превышении скоростью газа некоторого критического значения начинается «захлебывание» слоя насадки. При этом наблюдается резкий рост гидравлического сопротивления слоя. Как показано на рис. 3, режим инверсии фаз завершается в точке «с», так называемой точке захлебывания. В данной точке скорость газа называется скоростью захлебывания [44].

Основываясь на результатах исследований по определению точки захлебывания, можно сделать следующие выводы:

- при увеличении плотности орошения жидкой фазы захлебывание наступает при более низких скоростях газовой фазы;
- чем меньше свободный объем насадки, тем ниже предел нагрузки по жидкости и газу;
- при увеличении вязкости и уменьшении плотности орошающей жидкости снижается предел нагрузки.

Режим уноса возникает при дальнейшем увеличении скорости газа. При этом жидкая фаза выносится из аппарата газовой, которая вновь становится сплошной фазой. Как правило, массообменные аппараты в режиме уноса не работают [7, 27, 119].

Исследователями Бейн и Хоуген было получено уравнение, которое позволяет определить скорость захлебывания в насадочных аппаратах [42]:

$$\lg \left(\frac{w_3^2 a_n}{g \varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{0,001} \right)^{0,16} \right) = A - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{0,125}. \quad (23)$$

В данном уравнении коэффициент A зависит от конструкции насадки и определяется экспериментально, например, для седлообразных насадок он равен 0,26, а для кольцеобразных 0,079.

Необходимо отметить, что при проектировании насадочных колонн рабочая скорость газа выбирается меньше скорости захлебывания [98, 113, 115]. Это объясняется наличием различных факторов (колебанием давления и нагрузок по жидкости и газу в аппарате и пр.).

Как правило, рабочая скорость газа определяется из следующего соотношения:

$$w_p = 0,75 \div 0,85 w_3. \quad (24)$$

Если в качестве жидкой фазы выступает сильно пенящаяся жидкость, то в качестве рабочей выбирается еще меньшая скорость:

$$w_p = 0,4 \div 0,5 w_3. \quad (25)$$

Как отмечалось ранее, одним из требований, предъявляемым к насадкам, является малое гидравлическое сопротивление слоя насадки в режиме орошения [5, 22, 29]. Для описания работы насадки в режиме орошения введено понятие плотности орошения [4, 13]:

$$q_v = \frac{L_v}{F_K}. \quad (26)$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки определяется затратами энергии для прохождения газового потока через слой насадки и на создание межфазной поверхности.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки увеличивается относительно сухой насадки за счет следующих факторов [32, 99, 108]:

– наличие стекающей жидкости уменьшает свободный объем слоя;

- из-за присутствия жидкой фазы увеличивается относительная скорость движения газовой фазы;
- часть энергии газа расходуется на преодоление силы тяжести противоточно движущейся жидкости.

Сопротивление орошаемой насадки связано с сопротивлением сухой насадки соотношением [115]:

$$\Delta p_{op} = \Delta p_{сух} \cdot 10^{b \cdot q_v} . \quad (27)$$

Значения коэффициента b для некоторых типов насадок представлены в источнике [115].

На эффективность взаимодействия газа и жидкости в слое насадки существенное влияние оказывает равномерность распределения фаз. Равномерность распределения потоков газовой и жидкой фаз зависит от условий начального распределения, конструкционных особенностей насадки и аппарата (высоты слоя насадки, размеров элементов насадки и диаметра аппарата), а также от физических свойств фаз и величины потоков [23, 129, 133]. Характер распределения может быть различным в зависимости от рассматриваемой высоты поперечного сечения аппарата.

Таким образом, помимо массообменных параметров важно учитывать гидродинамические характеристики насадки при выборе насадочного контактного устройства для проведения того или иного абсорбционного процесса [56]. При этом регулярные насадки в сравнении с нерегулярными насадками обеспечивают более высокую интенсивность абсорбции, обладают низким гидравлическим сопротивлением и более равномерным распределением фаз в поперечном сечении [101].

Анализ показывает, что используемые в настоящее время контактные устройства в процессе абсорбции аммиака (хордовая, кольца Рашига, трубчатая) не отвечают указанным требованиям [64, 115, 114]. Поэтому гидродинамические и массообменные исследования предложенной

нами регулярной ленточной насадки, предназначенной для проведения процесса аммиака и метиламинов из газовых смесей, являются актуальными.

1.5. Постановка задачи исследований

Используемые в настоящее время для проведения процесса абсорбции смеси аммиака и метиламинов насадки (кольца Рашига, хордовая насадка, трубчатая насадка) не отвечают требованиям современного производства. Они не обеспечивают достаточно высокую интенсивность процесса и, как следствие, не дают необходимую степень очистки смеси газов. Причина состоит в морально устаревших конструкциях данных насадок и их конструктивных особенностях, в частности, в недостаточно высокой удельной поверхности, в слабом перемешивании газа и жидкости в слое насадки и др.

Важным направлением совершенствования производства метиламинов является увеличение интенсивности массопереноса при абсорбции за счет использования нового высокоэффективного насадочного контактного устройства – ленточной регулярной насадки. Интенсификация массопереноса обеспечивается конструктивными особенностями ленточной насадки, такими как высокая удельная поверхность (до $351 \text{ м}^2/\text{м}^3$), регулярная структура, высокий свободный объем (до 0,98). Механизм интенсификации массопередачи состоит в создании высокой поверхности контакта фаз, в обеспечении равномерного распределения жидкости и газа в поперечном сечении колонны и в создании высокоэффективных режимов взаимодействия газа и жидкости в слое насадки.

Применение новой ленточной насадки в промышленных масштабах требует предварительного определения ее массообменных характеристик:

объемного коэффициента массопередачи, гидравлического сопротивления и наиболее эффективных режимов эксплуатации.

Объемный коэффициент массопередачи, характеризующий интенсивность массопереноса в слое насадки, определяется экспериментальными методами в лабораторных условиях. Интенсификация процесса на новой насадке относительно других насадок может быть определена путем сравнения результатов экспериментов на данной насадке с литературными данными по другим насадкам, используемым в настоящее время для абсорбции газовых смесей аммиака и метиламинов: например, по хордовой насадке и по кольцам Рашига. Необходимо отметить, что при сравнении различных видов насадок должен учитываться эквивалентный диаметр сравниваемых насадок.

Важные сведения о процессе дает математическое моделирование процесса многокомпонентной абсорбции. Математическое моделирование позволяет выбирать наилучшие технологические режимы, обеспечивающие требуемую степень очистки газов. Основу модели, как правило, составляют дифференциальные уравнения материального баланса и массопередачи. Моделирование позволит установить распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки и разработать рекомендации по ведению процесса в промышленных условиях.

Помимо высокой интенсивности массопереноса новая насадка должна соответствовать ряду других требований. Важной эксплуатационной характеристикой насадки является ее гидравлическое сопротивление. Новая насадка должна характеризоваться низким гидравлическим сопротивлением в режиме орошения при различных нагрузках по газу и жидкости. Низкое гидравлическое сопротивление обеспечит снижение затрат на компримирование газа и снизит эксплуатационные затраты.

Другой важной характеристикой насадки является ее материалоемкость (удельная масса). Насадка с низкой материалоемкостью обладает

низкой стоимостью, что скажется на снижении конечной себестоимости продукции.

Регулярная ленточная насадка позволит интенсифицировать процесс абсорбции аммиака и метиламинов за счет хороших технических характеристик: за счет регулярной структуры, высокой удельной поверхности (до $351 \text{ м}^2/\text{м}^3$), большого свободного объема (до 0,98) при малой материалоемкости ($100 \text{ кг}/\text{м}^3$). Представляет научный и практический интерес экспериментально определить гидродинамические характеристики сухой и орошаемой ленточной насадки, интенсивность массопереноса на данной насадке и оценить относительную эффективность ее применения для абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей.

В соответствии с вышеизложенным, **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 последовательно решались следующие научные и технологические **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 распреде-

ления 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.

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

2. Методология и методы исследований

2.1. Описание установки и методики проведения экспериментов по измерению гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки

Важной характеристикой любой насадки является ее гидравлическое сопротивление, которое определяет эксплуатационные затраты на компримирование газа, подаваемого в колонну. В настоящее время отсутствуют надежные методы расчета гидравлического сопротивления новых контактных устройств. В связи с этим на лабораторной установке выполнены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления предложенной нами регулярной ленточной насадки двух модификаций [94, 95] и, для сравнения, колец Рашига.

Эксперименты по определению гидравлического сопротивления насадки проведены на лабораторной установке, схема которой изображена на рис. 4. Фотография установки приведена в приложении 4. Колонна 1 имеет сечение $0,255 \times 0,255$ м, высота колонны составляет 1,32 м. Две противоположные стенки колонны выполнены из оргстекла с целью наблюдения за процессом в колонне, две другие стенки – из пластиковых панелей. Высота слоя ленточной насадки 2 в колонне составляла 0,79 м. При проведении экспериментов давление в колонне 1 составляло 0,99-1,05 ат, а температура 20-23°C.

Вид регулярной ленточной насадки представлен на рис. 5. Ленточная насадка состоит из каркаса и лент. Элементы каркаса выполнены из металлических стержней (прутьев). На каркасе закрепляются элементы насадки в виде лент. Характеристики регулярной ленточной насадки: высота волны ленты 0,01 м, шаг волны ленты 0,01 м, ширина ленты 0,02 м. 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. Технические характеристики ленточной насадки представлены в табл. 1.

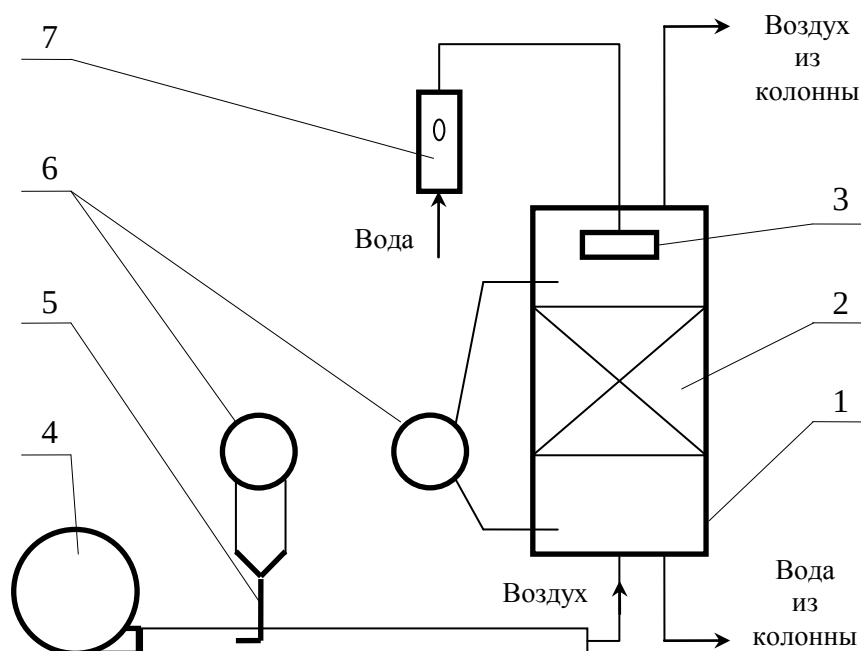


Рис. 4. Схема лабораторной установки для определения гидравлического сопротивления насадки: 1 – колонна; 2 – пакет насадки; 3 – распределитель жидкости; 4 – воздушодувка; 5 – трубка Пито-Прандтля; 6 – микроманометры; 7 – ротаметр

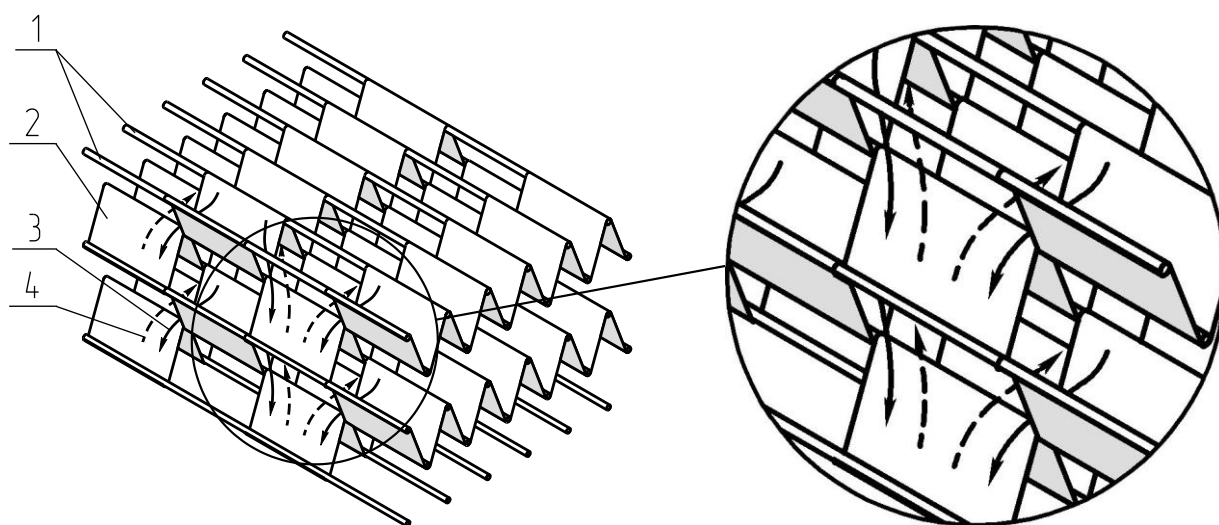


Рис. 5. Вид ленточной насадки: 1 – прутья каркаса; 2 – ленты; 3 – жидкая фаза; 4 – газовая фаза

Каркас насадки, на котором крепились ленты, выполнен из горизонтально установленных в шахматном порядке металлических стержней (прутьев) диаметром 0,001 м.

Таблица 1

Технические характеристики насадок

Тип насадки	Удельная поверхность, a_n , м ² /м ³	Свободный объем, ε	Эквивалентный диаметр, d_e , м
Ленточная насадка (модификация 1)	224	0,93	0,0161
Ленточная насадка (модификация 2)	351	0,98	0,0110
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	0,0102
Седла Берля	235	0,74	0,0121
Рулонированная сетка	524	0,95	0,0073

В экспериментах использована колонна 1 квадратного сечения (рис. 4) для удобства расположения регулярной ленточной насадки в колонне. Квадрантная форма сечения колонны не снижает достоверности результатов экспериментов. По данным справочника [43], форма сечения канала (круглая или квадратная) не оказывает влияние на коэффициент гидравлического сопротивления канала, и при условии турбулентного движения га-

за поправочный коэффициент, учитывающий влияние сечения, равен 1. При проведении экспериментов это условие выполнено, работа колонны 1 осуществлялась в турбулентном режиме: критерий Re изменялся от 101 до 1026, что выше критического значения, равного 40. Из этого следует, что полученные результаты на колонне квадратного сечения подлежат корректному сравнению с результатами определения гидравлического сопротивления насадок другими авторами в цилиндрических колоннах.

Методика проведения эксперимента на сухой насадке состоит в следующем. Включается воздуходувка 4 (рис. 4). Регулирование расхода воздуха осуществляется с помощью встроенной в воздуходувку заслонки. Значение расхода воздуха (m^3/c) определяется на основании показаний микроманометра 6, установленного на трубке Пито-Прандтля 5 по уравнению:

$$V_B = S \cdot \alpha \cdot \left(\frac{20 \cdot k_p \cdot \Delta p_{10} \cdot k_T \cdot k_{II}}{\rho_B} \right)^{0,5}. \quad (28)$$

Перепад давления, возникающий в слое насадки, определяется с помощью микроманометра 6, установленного на колонне 1. Проводится серия экспериментов, в ходе которой ступенчато изменяется расход воздуха с помощью регулирования заслонкой на воздуходувке 4, и фиксируется в журнале соответствующее значение перепада давления в слое насадки (гидравлического сопротивления).

На этой же установке (рис. 4) для сравнения проведены исследования гидродинамики на широко используемой в настоящее время насадке – керамических кольцах Рашига ($15 \times 15 \times 2$). Высота слоя колец Рашига составляет 0,475 м, диаметр колонны 0,15 м, колонна выполнена из оргстекла. Результаты экспериментов сравнены также с результатами экспериментов других авторов, выполненных на кольцах Рашига ($25 \times 25 \times 2$) [116]. Технические характеристики названных насадок приведены в табл. 1.

Критерий Рейнольдса газа в слое насадки рассчитан по уравнению:

$$Re_z = \frac{4w\rho_z}{a_n\mu_z}. \quad (29)$$

Коэффициент сопротивления сухой насадки определен по уравнению:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{сyx}} \cdot d_{\text{э}} \cdot \varepsilon^2}{H \cdot \rho_z \cdot w^2}. \quad (30)$$

Коэффициент сопротивления ξ является эффективным коэффициентом, который учитывает потерю давления при изменении направления потока газа в каналах насадки, а так же при трении газа о поверхность насадки.

Эквивалентный диаметр насадки определен по уравнению (18).

Методика проведения экспериментов на орошаемой насадке состоит в следующем. Включается подача орошения колонны 1 через распределитель жидкости 3 (рис. 4). Расход жидкости контролируется с помощью ротаметра 7. Через три минуты включается воздуходувка 4 (рис. 4) для подачи воздуха в колонну. Регулирование расхода воздуха, подаваемого в колонну 1, осуществляется с помощью заслонки, установленной на воздуходувке. Значение расхода воздуха определяется на основании показаний микроманометра 6, установленного на трубке Пито-Прандтля 5 по уравнению (28). Проводится серия экспериментов, в ходе которой расход воздуха остается постоянным, а расход жидкости изменяется ступенчато в сторону увеличения. При каждой плотности орошения измеряется гидравлическое сопротивление слоя насадки и фиксируется в журнале.

2.2. Описание установки и метода определения объемного коэффициента массопередачи

Объемный коэффициент массопередачи является важным кинетическим параметром, характеризующим интенсивность массопереноса в газо-

жидкостной системе. Эксперименты по определению объемных коэффициентов массопередачи при абсорбции аммиака из его смеси с воздухом выполнены на регулярной ленточной насадке модификации 2. Эксперименты проведены на лабораторной установке, изображенной на рис. 6. Абсорбер 2 представляет собой колонну сечением $0,255 \times 0,255$ м и высотой 1,32 м. Две противоположные стенки абсорбера 2 выполнены из органического стекла, что позволяет вести визуальные наблюдения за газожидкостной системой в слое насадки. Абсорбер 2 заполнен слоем регулярной ленточной насадки модификации 2. Конструктивные параметры ленточной насадки модификации 2 приведены в табл. 1. Высота слоя регулярной ленточной насадки в абсорбере составляет 0,79 м. Распределитель жидкости 7 распылительного типа необходим для равномерного распределения жидкости по сечению абсорбера 2. При проведении экспериментов параметры технологического режима в абсорбере 2 поддерживались близкими к промышленным условиям: давление в абсорбере составляло 1 ат, температура 20°C . В нижней части абсорбера 2 имеется пробоотборник для отбора проб жидкости, выходящей из слоя насадки.

Барботажный аппарат 1, предназначенный для получения аммиачно-воздушной газовой смеси, имеет вид вертикальной цилиндрической колонны высотой 1,1 м и диаметром 0,45 м. Барботер 8, расположенный в нижней части барботажного аппарата, представляет собой крестовину, выполненную из пластиковых труб диаметром 0,08 м. Диаметр отверстий в барботере для прохождения воздуха составляет 0,002 м. Барботер 8 предназначен для тонкого диспергирования воздуха и равномерного распределения пузырей в слое водного раствора аммиака. В стенке барботажного аппарата имеется пробоотборник для отбора проб.

Микроманометр 4 с трубкой Пито–Прандтля предназначен для измерения скорости воздушного потока, подаваемого в барботажный аппарат. На основании измеренной скорости потока рассчитан объемный расход воздуха.

Расход жидкости, подаваемый в абсорбер, измеряется с помощью поплавкового ротаметра 5. Перед проведением экспериментов ротаметр подвергается градуировке.

Для нагнетания воздуха в барботажный аппарат используется воздуходувка центробежного типа 3.

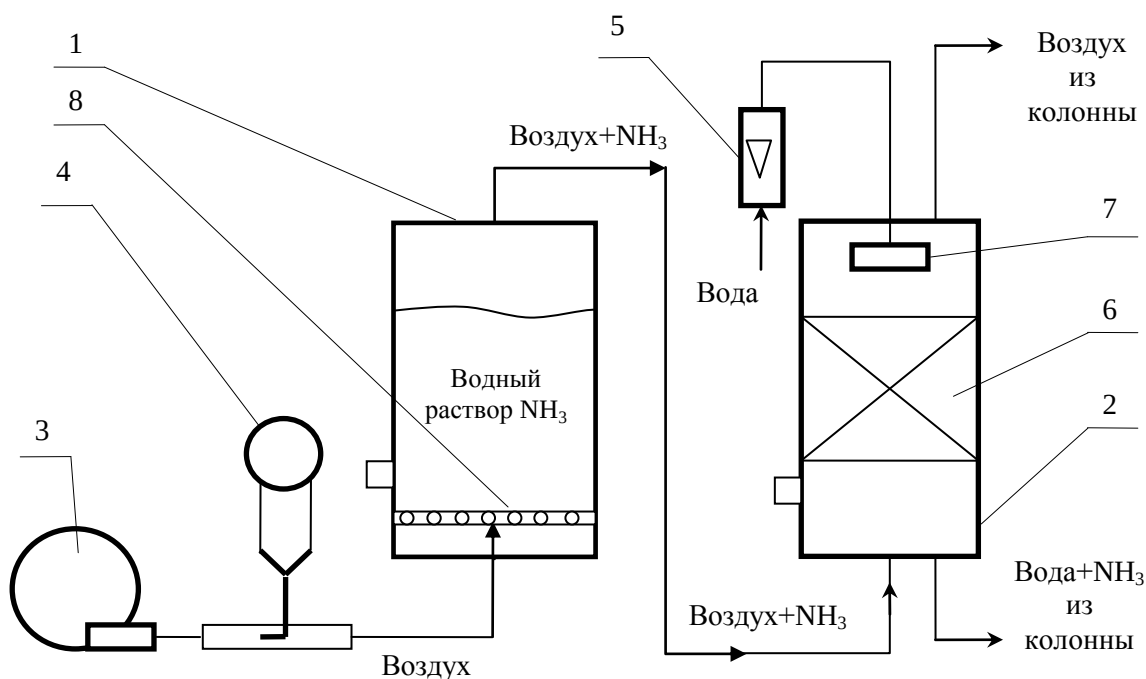


Рис. 6. Лабораторная установка для определения объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака из смеси с воздухом: 1 – барботажный аппарат; 2 – насадочный абсорбер; 3 – воздуходувка; 4 – микроманометр с трубкой Пито-Прандтля; 5 – ротаметр; 6 – слой насадки; 7 – распределитель жидкости; 8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

Целью экспериментов является установление зависимости объемного коэффициента массопередачи от плотности орошения на ленточной насадке модификации 2.

Методика проведения экспериментов состоит в следующем. Приготавливается водно-аммиачный раствор заданной концентрации и заливается в барботажный аппарат 1 до определенного уровня. Включается подача воды на орошение абсорбера 2 с заданным расходом. Расход подаваемой воды из-

меряется ротаметром 5. Через три минуты после начала подачи воды включается воздуходувка 3. С помощью микроманометра 4 и трубки Пито-Прандтля измеряется и фиксируется в журнале расход воздуха, подаваемый в барботажный аппарат 1. Регулировка расхода воздуха осуществляется с помощью заслонки на воздуходувке. В барботажном аппарате 1 происходит насыщение воздуха аммиаком. Аммиачно-воздушная смесь после барботажного аппарата поступает в нижнюю часть насадочного абсорбера 2. В слое регулярной ленточной насадки происходит контакт аммиачно-воздушной смеси с водой. В абсорбере 2 контакт газа и жидкости осуществляется по схеме противотока. Смена технологического режима выполняется за счет изменения расхода воды, подаваемой на орошение абсорбера.

При каждом технологическом режиме отобраны пробы жидкости в барботажном аппарате и на выходе из абсорбера. Концентрация аммиака в воде определена фотометрическим методом с реактивом Несслера [57]. Фотометрический метод определения массовой концентрации ионов аммония основан на взаимодействии ионов аммония с тетрамеркуратом калия в щелочной среде (реактив Несслера) с образованием коричневой, нерастворимой в воде соли основания Милона, переходящей в коллоидную форму желтого цвета при малых содержаниях иона аммония. Оптическая плотность раствора измерена при $\lambda=425$ нм в кюветах с длиной поглощающего слоя 10 и 50 мм. Определение концентрации аммиака проведено в следующих условиях: температура окружающего воздуха 20 ± 5 °С, относительная влажность не более 80 %.

Методика предъявляет строгие требования к подготовке тары для отбора проб [57]. Тара для отбора и хранения проб воды предварительно обезжирена раствором синтетических моющих средств, промыта водопроводной водой, хромовой смесью и 3–4 раза дистиллированной водой. Пробы воды должны оберегаться от воздействия прямого солнечного света.

Содержание ионов аммония в воде (мг/дм^3) вычислено по формуле:

$$X = \frac{50 \cdot C \cdot n}{V}, \quad (31)$$

где C – содержание ионов аммония, найденное по калибровочному графику, мг; V – объем пробы, взятой для анализа, см³; $n=1$ – при прямом определении ионов аммония.

Результат анализа есть среднее арифметическое значение (X_{cp}) двух параллельных определений X_1 и X_2 :

$$X_{cp} = \frac{X_1 + X_2}{2}, \quad (32)$$

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).

2.3. Методология математического моделировании массообменных процессов при абсорбции

В ряде случаев, когда проведение экспериментов по определению массообменных характеристик исследуемой системы затруднительно или требует существенных материальных затрат, плодотворным является математическое моделирование процесса.

Как правило, математическая модель сложного массообменного процесса при абсорбции включает дифференциальные уравнения материального и теплового баланса для исследуемой системы [115], например:

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

$$G_1 \cdot dY_i = L_N \cdot dX_i.$$

Адекватность математической модели определяется достоверностью входящих в него уравнений и обоснованностью принятых допущений. В математических моделях абсорбционных процессов в колонных аппаратах

в качестве допущений часто принимается, что концентрация компонента не изменяется в поперечном сечении аппарата, и, как правило, пренебрегают влиянием байпасных потоков и других незначительных факторов, если это не входит в противоречие с задачами исследования. При этом принимается, что потоки в колонне соответствуют модели идеального вытеснения.

В простых случаях полученные дифференциальные уравнения решаются аналитическим методом. Методы аналитического решения дифференциальных уравнений приведены в специальной литературе [34]. Если аналитическое решение невозможно, используют приближенные численные методы [15], например, метод конечных разностей. Данный сеточный метод основан на замене производных разностными схемами. На рассчитываемую область наносится сетка. В результате получается система алгебраических уравнений, решение которой дает приближенное решение исследуемой задачи.

Конечно-разностный метод универсален, он применяется в настоящее время для решения широкого спектра научных задач. Использование конечно-разностного метода позволяет учесть многокомпонентность и многофазность среды и решать многочисленные задачи тепло- и массообмена.

При поиске распределения концентраций по высоте аппарата полученное значение концентрации тем точнее, чем меньше выбран шаг сетки. Однако сетка с малым шагом требует большого числа вычислительных операций, которые вручную выполнить сложно. Поэтому для вычисления концентрации численным методом используют современные ЭВМ и математические компьютерные программы (*MathCad*, *Mathlab* и др), разработанные для решения подобных задач.

Схема численного расчета должна быть устойчивой, то есть для любой стадии вычислительной операции малая ошибка должна приводить к

меньшей конечной ошибке. Если метод неустойчив, то ошибка растет во времени от шага к шагу.

В настоящей работе конечно-разностный метод применен к решению стационарной задачи, решение которой зависит от граничных условий исследуемой области. Использование данного метода позволило определить распределение концентраций всех компонентов по высоте слоя насадки в газе и в жидкости в разных технологических режимах, определить распределение температуры в газожидкостной смеси, установить закономерности абсорбции многокомпонентных газовых смесей и выработать рекомендации по выбору режима процесса с целью увеличения интенсивности процесса абсорбции.

Следующая 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.

3. Исследования гидравлического сопротивления и интенсивности массопередачи при абсорбции на регулярной ленточной насадке

3.1. Результаты экспериментального определения гидравлического сопротивления сухой насадки

Результаты экспериментов по определению коэффициента сопротивления сухой ленточной насадки обеих модификаций и колец Рашига представлены в табл. 1–3 Приложения 1 и на рис. 7.

Как видно из рис. 7, коэффициент сопротивления сухой ленточной насадки модификации 1 составляет в среднем 9,98 и практически не изменяется в широком диапазоне изменения критерия Рейнольдса. Это говорит о том, что сухая ленточная насадка модификации 1 работает в автомобильном режиме. Коэффициент сопротивления колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) (кривая 2) зависит в исследованном диапазоне от критерия Рейнольдса и составляет 3,91–4,63, что ниже коэффициента сопротивления ленточной регулярной насадки модификации 1. Кольца Рашига ($25 \times 25 \times 3$) также работают в автомобильном 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.

Высокий коэффициент сопротивления ленточной насадки модификации 1 объясняется тем, что поверхность лент расположена поперек потока газа. Однако дальнейшие эксперименты показали, что гидравлическое сопротивление регулярной ленточной насадки модификации 1 ниже сопротивления колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$), что объясняется большим свободным объемом ленточной насадки и большим эквивалентным диаметром.

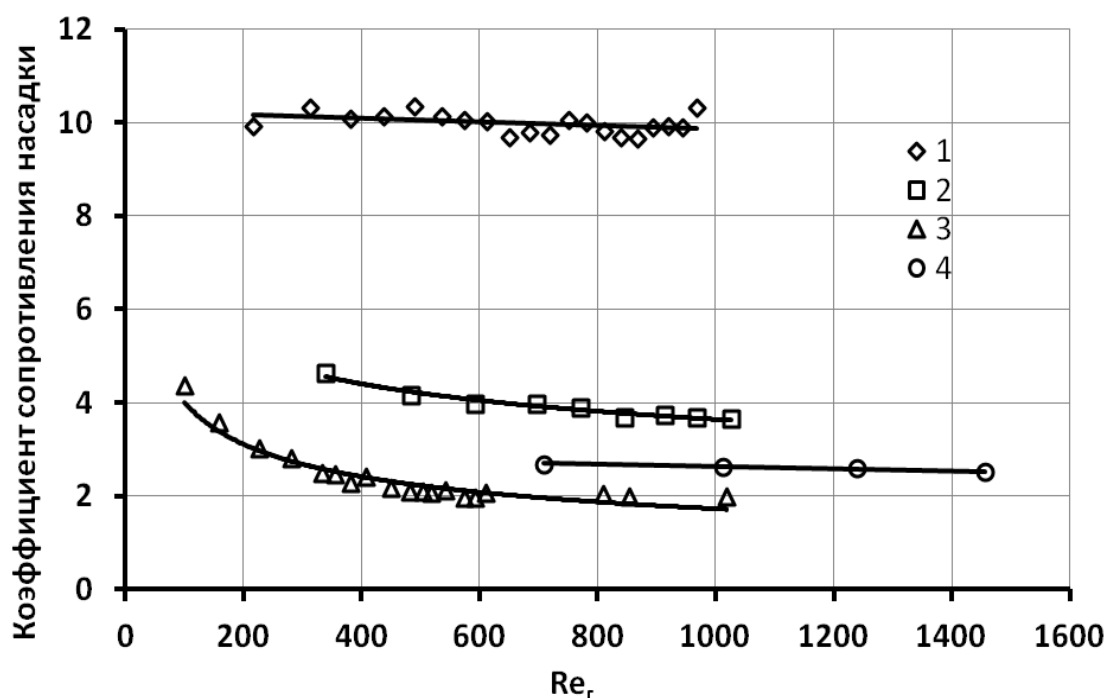


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса: 1 – ленточная насадка модификации 1; 2 – кольца Рашига (15×15×2); 3 – ленточная насадка модификации 2; 4 – кольца Рашига (25×25×3) [116]

Уравнение, описывающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ленточной насадки модификации 2 от критерия Рейнольдса (линия 3, рис. 7), имеет вид:

$$\xi = 21,6 \cdot Re_\epsilon^{-0,36}. \quad (33)$$

Уравнение (33) описывает экспериментальные данные с величиной достоверности аппроксимации 0,904.

Полученное экспериментальным путем уравнение (33) справедливо в исследованном диапазоне критерия $Re_\epsilon=101\dots1019$ и отражает классический общий вид уравнения для определения коэффициента сопротивления:

$$\xi = A \cdot Re_\epsilon^{-n}, \quad (34)$$

где A , n – коэффициенты, зависящие от вида насадки.

Таким образом, для регулярной ленточной насадки модификации 2: $A=21,6$; $n=0,36$. Уравнение (33) может быть использовано при проектировании новых абсорбционных колонн с регулярной ленточной насадкой модификации 2.

На рис. 8. представлен график зависимости гидравлического сопротивления создаваемых слоями различных насадок в отсутствии орошения от приведенной скорости газа в колонне. При проведении исследований приведенную скорость газа в колонне изменяли в пределах от 0,14 до 1,48 м/с.

Как видно из рис. 8, гидравлическое сопротивление сухой ленточной насадки модификации 1 ниже сопротивления колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) во всем исследованном диапазоне приведенных скоростей газа в среднем на 27–37%. Гидравлическое сопротивление сухой ленточной насадки модификации 2 ниже сопротивления всех рассмотренных видов насадок и соизмеримо с гидравлическим сопротивлением рулонированной сетки (кривая 5), характеризующейся низким сопротивлением [116]. В частности, сопротивление ленточной насадки модификации 2 ниже сопротивления колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) 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:

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 416 \cdot w^{1,979}. \quad (35)$$

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

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 541,1 \cdot w^{1,837}. \quad (36)$$

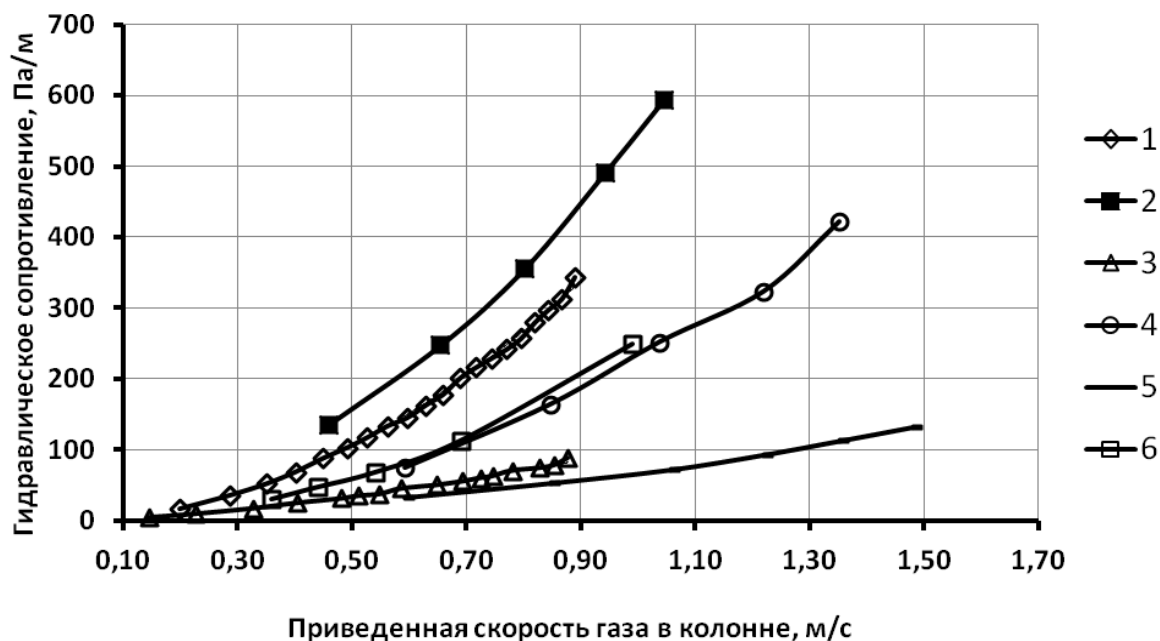


Рис. 8. Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от приведенной скорости газа: 1 – ленточная насадка (модификация 1); 2 – кольца Рашига (15×15×2); 3 – ленточная насадка (модификация 2); 4 – кольца Рашига (25×25×3); 5 – рулонированная сетка ($d_s=0,007$ м, по данным [116]); 6 – седла Берля размером 0,025 м (по данным [6])

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

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 100,6 \cdot w^{1,555}. \quad (37)$$

Уравнения (35-37) позволяют определить гидравлическое сопротивление слоя насадки при приведенных скоростях газа из следующего диапазона: для ленточной насадки модификации 1 0,2...0,89 м/с; для модификации 2 0,14...0,95 м/с; для колец Рашига (15×15×2) 0,46...1,39 м/с. Полученные уравнения (35-37) могут быть использованы при проектировании новых промышленных аппаратов с насадками.

3.2. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления орошаемых насадок

Следующим этапом работы было проведение экспериментов по определению гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки обеих модификаций и колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) при различных нагрузках по газу и жидкости. Выполнено сравнение результатов с экспериментами других авторов на седлах Берля [6] и на регулярной листовой рифленой насадке [120] (табл. 1). В экспериментах с орошаемыми насадками расход воды изменяли в диапазоне $0,346\text{--}2,187 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало плотности орошения $5,32\text{--}33,63 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для колонны с ленточной насадкой. Плотность орошения в колонне с кольцами Рашига ($15 \times 15 \times 2$) изменялась в диапазоне $9,79\text{--}30,29 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Результаты экспериментов для ленточной насадки модификаций 1 и 2 для различных плотностей орошения представлены на рис. 9, 10 и в табл. 4-7 Приложения 1, а для колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) представлены на рис. 11 и в табл. 8, 9 Приложения 1.

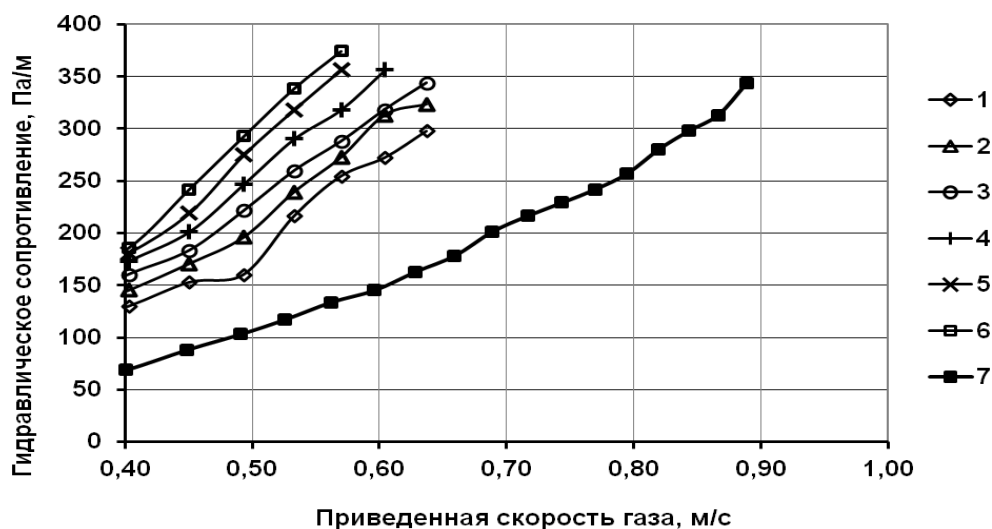


Рис. 9. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки модификации 1 от скорости газа: 1 – плотность орошения $5,32 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $11,00 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3 – $16,79 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 – $23,38 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 5 – $30,14 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 6 – $33,63 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 7 – $0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

На рис. 10 приведена зависимость гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки модификации 2 от приведенной скорости газа в колонне при плотностях орошения $5,54-27,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Сравнение гидравлического сопротивления различных видов орошаемых насадок представлено на рис. 12.

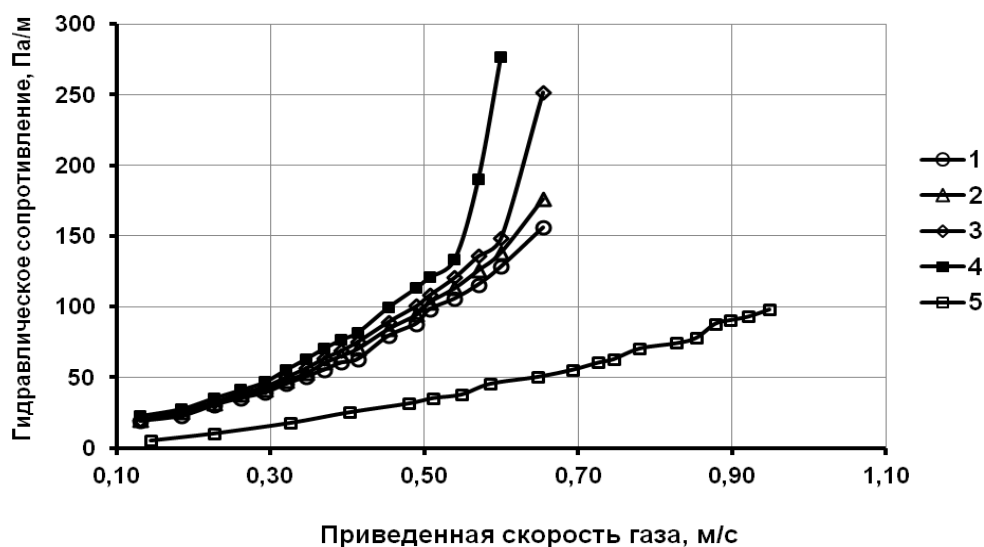


Рис. 10. Зависимость гидравлического сопротивления ленточной насадки модификации 2 от скорости газа: 1 – плотность орошения $5,54 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, кривая 2 – $11,40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, кривая 3 – $17,47 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, кривая 4 – $27,31 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, кривая 5 – $0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

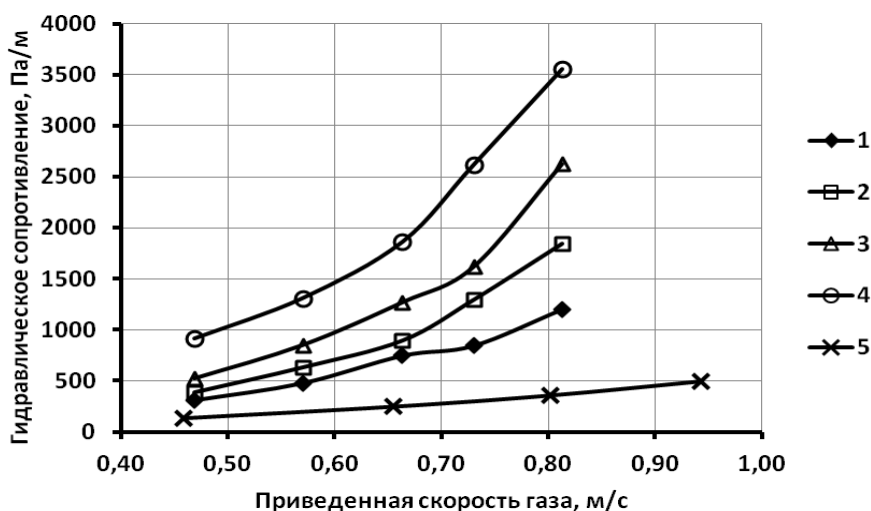


Рис. 11. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемых колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) от скорости газа: 1 – плотность орошения $9,79 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $19,59 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3 – $24,94 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 – $30,29 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 5 – $0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

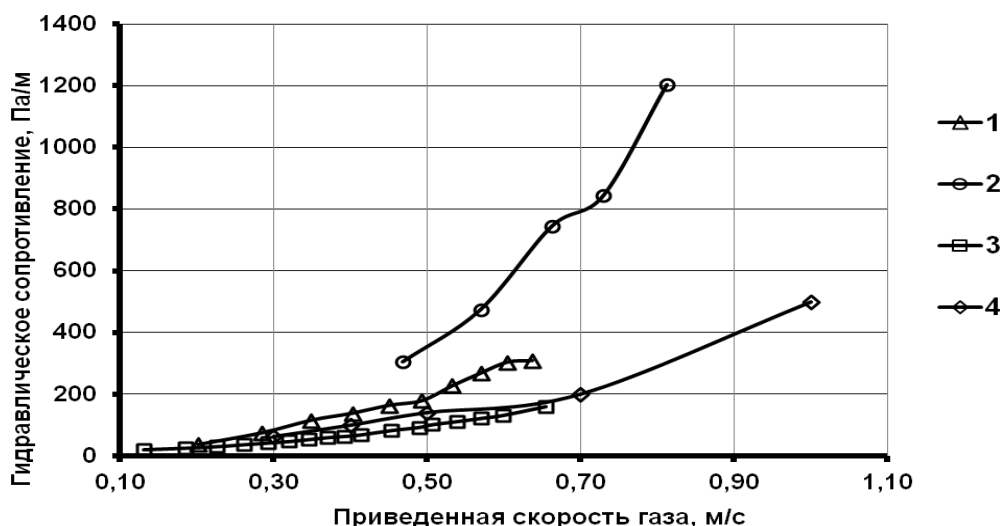


Рис. 12. Зависимость гидравлического сопротивления различных насадок от приведенной скорости газа: 1 – ленточная насадка модификации 1 (плотность орошения $8,22 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$); 2 – кольца Рашига ($15 \times 15 \times 2$, плотность орошения $9,79 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$); 3 – ленточная насадка модификации 2 (плотность орошения $8,56 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$); 4 – регулярная листовая рифленая насадка (плотность орошения $10,00 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, по данным работы [120]

Анализ рис. 9, 10, 11 показывает, что для всех исследованных типов насадок наблюдается закономерность увеличения гидравлического сопротивления орошаемой насадки с увеличением приведенной скорости газа в колонне. Как видно из данных рисунков, гидравлическое сопротивление возрастает также с увеличением плотности орошения в слое насадки.

Сравнение рис. 9 и 11 показывает, что гидравлическое сопротивление орошаемой ленточной насадки модификации 1 в 3,5–4,9 раза ниже сопротивления колец Рашига ($15 \times 15 \times 2$) при плотности орошения $33,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Рис. 10 в свою очередь подтверждает, что ленточная насадка модификации 2 позволяет снизить гидравлическое сопротивление колонны в среднем 1,8 раза в сравнении с ленточной насадкой модификации 1 при плотности орошения $27 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Данные рис. 12 убедительно 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 перспективности использования ленточной насадки модификации 2 в качестве контактного устройства для проведения массообменных процессов в газожидкостных системах, где предъявляются требования к низкому гидравлическому сопротивлению.

Представленные результаты экспериментов (рис. 9, 10, 11) могут быть использованы при проектировании новых промышленных аппаратов с целью определения гидравлического сопротивления.

Дополнительным достоинством ленточной насадки в сравнении с другими видами насадок является низкая материалоемкость. Так, удельная масса исследованных керамических колец Рашига составляет 690 кг/м³ [64], а исследованной ленточной насадки модификации 1 – 101 кг/м³, ленточной насадки модификации 2 – 138 кг/м³.

Кроме того, в регулярной ленточной насадке несущая способность переносится с элементов насадки, непосредственно участвующих в процессе массообмена и создающих удельную площадь насадки, на каркас, что позволяет делать эти элементы из тонких металлических лент, а также из пластика, или химически и механически стойкой ткани.

Итак, гидродинамические исследования показали, что регулярная ленточная насадка модификации 2 характеризуется самым низким гидравлическим сопротивлением среди исследованных насадок, применяющихся в химической промышленности. Это делает ее наиболее перспективной для использования в процессе абсорбции аммиака и метиламинов водой.

Низкое гидравлическое сопротивление насадки позволит уменьшить затраты на компримирование газа на входе в колонну.

Помимо низкого гидравлического сопротивления к насадкам предъявляется требование высокой интенсивности массопереноса. Интенсификация массопереноса позволит повысить степень очистки газа, снизить габариты промышленного абсорбера, и, следовательно, снизить капитальные затраты на абсорбер.

Известно, что интенсивность массопереноса в слое насадки характеризуется объемным коэффициентом массопередачи, который существенно зависит не только от конструкции насадки, но и от плотности орошения, подаваемого на насадку [114]. Представляет научный и практический интерес экспериментальное определение объемных коэффициентов массопередачи на регулярной ленточной насадке модификации 2 при различных плотностях орошения и сравнение полученных результатов с регулярными и насыпными насадками, применяющимися в настоящее время в химической промышленности для проведения процесса абсорбции аммиака водой.

3.3. Условия экспериментов и результаты определения объемных коэффициентов массопередачи

Условия проведения экспериментов по определению объемных экспериментов массопередачи при абсорбции аммиака водой приведены в табл. 2. В ходе экспериментов расход воздуха, подаваемый в барботажный аппарат, оставался постоянным ($93,95 \text{ м}^3/\text{ч}$). Приведенная скорость газа в абсорбере также не изменялась и составила $0,4 \text{ м/с}$. Плотность орошения абсорбера варьировалась за счет регулировки расхода воды в диапазоне от $5,32$ до $13,84 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Перечисленные технологические параметры соответствуют параметрам, при которых работают промышленные абсорберы.

Объемный коэффициент массопередачи (по газовой фазе) рассчитан с использованием экспериментально определенных величин по уравнению:

$$K_G a = \frac{M}{\Delta_{cp} \cdot V_H} . \quad (38)$$

Количество поглощенного аммиака M (кмоль/с) определено по уравнению:

$$M = \frac{(C_{x,k} - C_{x,n}) \cdot L}{\rho_{ж}} . \quad (39)$$

Средняя движущая сила процесса массопередачи в газовой фазе определена по уравнению:

$$\Delta_{cp} = \frac{\Delta_n + \Delta_k}{2} . \quad (40)$$

Движущая сила процесса массопередачи в верхней части абсорбера определена по уравнению:

$$\Delta_k = C_{z,k} - C_k^* . \quad (41)$$

Движущая сила процесса массопередачи в нижней части абсорбера:

$$\Delta_n = C_{z,n} - C_n^* . \quad (42)$$

Объем слоя насадки:

$$V_H = b^2 \cdot H . \quad (43)$$

Объем слоя ленточной насадки модификации 2 составил 0,052 м³.

Результаты определения объемного коэффициента массопередачи представлены в табл. 2. Данные результаты показывают, что с увеличением плотности орошения в 2,6 раза величина коэффициента массопередачи в системе аммиак-воздух-вода на ленточной насадке возрастает в 1,6 раза и происходит интенсификация процесса массопередачи. Это объясняется увеличением смоченной поверхности насадки и скорости течения жидкости по поверхности насадки. При увеличении скорости течения жидкости в пленке возникают вихри и пульсации, способствующие увеличению коэф-

фициентов массотдачи в жидкости и интенсификации массопереноса. На рис. 13 в графическом виде приведена зависимость объемного коэффициента массопередачи на ленточной насадке модификации 2 (кривая 1) от плотности орошения при постоянной приведенной скорости газа.

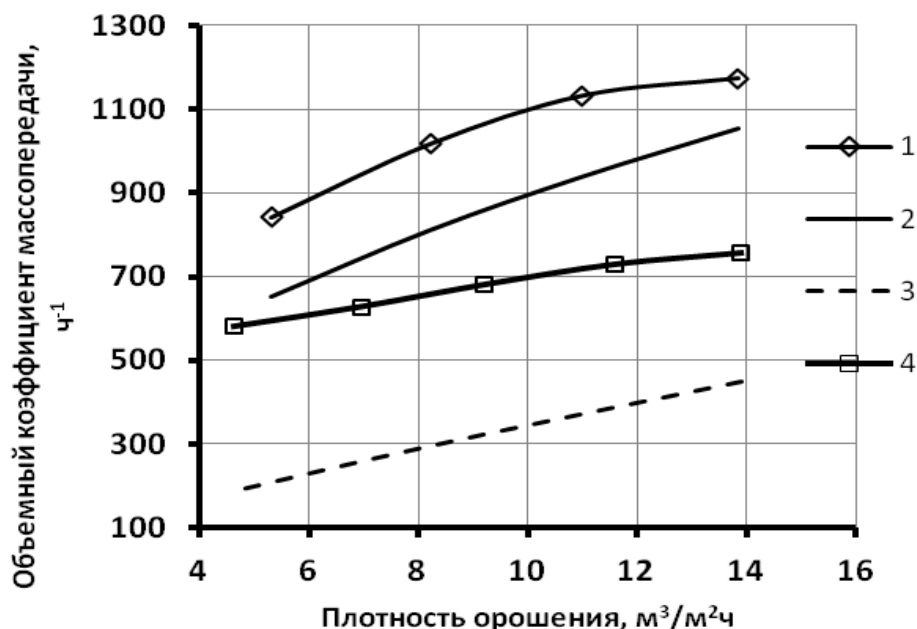


Рис. 13. Зависимость объемного коэффициента массопередачи на различных насадках от плотности орошения: 1 – ленточная насадка модификации 2; 2 – хордовая насадка ($d_s=0,022\text{м}$); 3 – трубчатая насадка; 4 – кольца Рашига ($25\times 25\times 3$)

Визуальные наблюдения за газожидкостной системой в слое регулярной ленточной насадки показали, что жидкость равномерно распределяется по сечению слоя насадки в широком диапазоне плотностей орошения, этому способствует формирование системы конструктивно организованных перетоков жидкости с одного элемента насадки на другой.

Таблица 2

Условия экспериментов и результаты определения объемного коэффициента массопередачи

№	Расход воздуха ± абсолютная погрешность, м ³ /ч	Расход воды ± абсолютная погрешность, м ³ /ч	Плотность орошения, м ³ /(м ² ч)	Начальная концентрация NH ₃ в воздухе ± среднеквадратическое отклонение, моль/м ³	Концентрация NH ₃ в воде внизу колонны, моль/м ³ ± среднеквадратическое отклонение	Равновесная концентрация NH ₃ в газе внизу колонны, моль/м ³	Концентрация NH ₃ в газе вверху колонны, моль/м ³	Движущая сила вверху колонны в газовой фазе, моль/м ³	Движущая сила внизу колонны в газовой фазе, моль/м ³	Средняя движущая сила в газовой фазе, моль/м ³	Количество перенесенного NH ₃ , моль/ч	Объемный коэффициент массопередачи на ленточной насадке, ч ⁻¹	Объемный коэффициент массопередачи на хордовой насадке, ч ⁻¹
1	93,95 ±1,0	0,900 ±0,020	13,841	0,845 ±0,011	42,410 ±0,101	0,018	0,439	0,439	0,828	0,633	38,223	1174,15	1053,73
2	93,95 ±1,0	0,715 ±0,020	11,003	0,826 ±0,009	50,608 ±0,157	0,022	0,441	0,441	0,804	0,622	36,215	1132,49	938,32
3	93,95 ±1,0	0,535 ±0,020	8,230	0,793 ±0,008	59,623 ±0,142	0,025	0,454	0,454	0,769	0,611	31,926	1017,45	812,66
4	93,95 ±1,0	0,346 ±0,020	5,324	0,727 ±0,008	72,105 ±0,161	0,032	0,461	0,461	0,695	0,578	24,940	841,12	653,73

3.4. Сравнение результатов экспериментов с массообменными характеристиками известных насадок

Сравнение результатов экспериментов по определению объемных коэффициентов массопередачи на ленточной насадке с массообменными характеристиками других известных насадок, применяющихся в настоящее время на химическом производстве для абсорбции аммиака, дает возможность оценить интенсификацию процесса, обеспечиваемую ленточной насадкой.

Для проведения процесса абсорбции аммиака на современном производстве применяют хордовую насадку, трубчатую насадку и кольца Рашига [64, 115, 114].

В работе [115] приведено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента массопередачи по газовой фазе на хордовой насадке:

$$K_G = 0,0109 w^{0,7} \cdot l^{0,5}, \quad (44)$$

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

Уравнение (44) получено авторами на основе обобщения большого количества экспериментов по абсорбции аммиака на хордовых насадках.

Преобразование уравнения (44) дает уравнение для расчета объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака на хордовой насадке:

$$K_{G,a} = 4,81 \cdot 10^{-6} \cdot a \cdot \psi \cdot R_\mu \cdot T \cdot w^{0,7} \cdot l^{0,5}, \quad (45)$$

где l – количество поглотителя в л на 1 м³ газа.

На рис. 13 приведена кривая 2, которая построена по уравнению (45) для хордовой насадки ($d_s=0,022$ м). Как видно из рис. 13, регулярная ленточная насадка модификации 2 обеспечивает интенсификацию массопереноса аммиака на 11,5–28,8 % (в зависимости от плотности орошения) в сравнении с хордовой насадкой. Это обеспечивается за счет более высокой

удельной поверхности ленточной насадки 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.

Для сравнения выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака водой на регулярной трубчатой насадке по методике из работы [114]. Данная насадка состоит из вертикального пучка труб, закрепленных в трубных решетках. В трубчатой насадке пленка жидкости стекает по внутренней поверхности вертикальных труб, а газ движется противотоком снизу вверх внутри трубок.

Исходными данными для расчета регулярной трубчатой насадки являются: $n=306$; $d=0,01$ м; $D=0,287$ м; $\mu_{жс}=0,001$ Па·с; $\rho_{жс}=998$ кг/м³; $w_2=0,433$ м/с; $\sigma_{жс}=0,07$ Н/м; $\mu_2=0,0000191$ Па·с; $\rho_2=1,14$ кг/м³; $D_2=0,000008$ м²/с; $C_{NH_3}=2,1$ об.%; $p_{0,ср}=0,099$ МПа; $l_2=0,8$ м; $D_{жс}=1,83 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

По данным работы [114] методика расчета объемных коэффициентов массопередачи при абсорбции аммиака водой в трубчатом регулярном контактном устройстве состоит в определении приведенной скорости газа, плотности орошения, критерия Рейнольдса, критерия Нуссельта, коэффициентов массоотдачи в газе и в жидкости и включает следующие уравнения.

Приведенная скорость газа в трубках насадки:

$$w = \frac{V_{\Gamma}}{0,785 \cdot n \cdot d^2} \cdot \quad (46)$$

Линейная плотность орошения:

$$\Gamma = \frac{V_{жс} \cdot \rho_{жс}}{3600 \cdot \pi \cdot d \cdot n} \cdot \quad (47)$$

Скорость пленки жидкости на внутренней поверхности трубки:

$$u = \sqrt[3]{\frac{\Gamma^2 \cdot g}{3 \cdot \mu_{жс} \cdot \rho_{жс}}} \cdot \quad (48)$$

Относительная скорость газа:

$$w_0 = w + u. \quad (49)$$

Безразмерный комплекс K :

$$K = \frac{u \cdot \mu_{ж}}{\sigma}. \quad (50)$$

Критерий Рейнольдса в газе:

$$Re_z = \frac{w_0 \cdot d \cdot \rho_z}{\mu_z}. \quad (51)$$

Критерий Прандтля в газе:

$$Pr_z = \frac{\mu_z}{\rho_z \cdot D_z}. \quad (52)$$

Среднее парциальное давление инертных газов:

$$p_0 = \frac{p_n + p_k}{2}. \quad (53)$$

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_z = 0,125 \cdot \left(0,11 + 0,9 \cdot K^{\frac{2}{3}} \right) \cdot w \cdot Re_z^{-0,16} \cdot Pr_z^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,67}. \quad (54)$$

Критерий Прандтля в жидкости:

$$Pr_{ж} = \frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} \cdot D_{ж}}. \quad (55)$$

Приведенная толщина пленки жидкости:

$$\delta = 3 \sqrt{\frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж}^2 \cdot g}}. \quad (56)$$

Критерий Нуссельта в жидкости:

$$Nu_{ж} = 0,89 \cdot Re_{ж}^{0,45} \cdot Pr_{ж}^{0,5} \left(\frac{\delta}{l} \right)^{0,5}. \quad (57)$$

Коэффициент массоотдачи в жидкости:

$$\beta_{ж} = \frac{D_{ж}}{\delta} Nu_{ж}. \quad (58)$$

Коэффициент массопередачи:

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{\beta_z} + \frac{m}{\beta_{ж}}}. \quad (59)$$

Коэффициент смачивания поверхности насадки:

$$\psi = 1,006 \cdot \left(\frac{Re_{жс}}{4} \right)^r \cdot \exp(-f), \quad (60)$$

где

$$r = 0,894 \cdot \left(\frac{H}{l_3} \cdot \frac{d_0}{d} \right)^{-9,64d}$$

$$f = 4,332 \cdot \left(\frac{H}{l_3} \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right)^{-10d}.$$

Объемный коэффициент массопередачи:

$$K_{Ga} = K_G \cdot \psi \cdot a_n. \quad (61)$$

Результаты расчета по методике (46-61) при различных расходах жидкости и плотностях орошения приведены в таблице 3.

Как видно по данным табл. 3, с уменьшением плотности орошения объемный коэффициент массопередачи K_{Ga} снижается. Это объясняется уменьшением скорости пленки жидкости и снижением коэффициента смачивания поверхности насадки.

Результаты расчетов по методике (46-61) графически представлены на рис. 13, 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. Это объясняется низкой удельной поверхностью трубчатой насадки.

Далее выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака водой на кольцах Рашига (25×25×3) по методике из работы [64] для условий, при которых проводились эксперименты по абсорбции аммиака.

В соответствии с методикой [64] критерий Нуссельта в жидкости на кольцевой насадке рассчитывается по уравнению:

$$Nu_{ж} = 0,0021 \cdot Re_{ж}^{0,75} \cdot Pr_{ж}^{0,5}. \quad (62)$$

Таблица 3

Результаты расчета объемных коэффициентов массопередачи на трубчатом контактном устройстве

Параметр	Расход жидкости, кг/ч				
	900	750	600	450	300
	Результаты расчетов				
Γ , кг/(м·с)	0,026	0,022	0,017	0,013	0,009
u_{cp} , м/с	0,13	0,12	0,11	0,08	0,06
w_0 , м/с	0,56	0,55	0,53	0,52	0,50
K	0,0019	0,0016	0,0014	0,0011	0,0009
Re_z	336,2	327,3	317,8	307,4	295,8
Pr_z	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
β_z , м/с	0,00162	0,00162	0,00161	0,00160	0,00159
$Re_{жс}$	104,1	86,7	69,4	52,3	34,7
δ , м	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$
$Pr_{жс}$	546,45	546,45	546,45	546,45	546,45
$Nu_{жс}$	1,29	1,18	1,07	0,94	0,78
$\beta_{жс}$, м/с	$5,04 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$4,20 \cdot 10^{-5}$	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$
m	0,00045	0,00045	0,00045	0,00045	0,00045
K_v , м/с	0,00160	0,00159	0,00158	0,00157	0,00155
a , м ² /м ³	148,6	148,6	148,6	148,6	148,6
d_0 , м	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
ψ	0,525	0,457	0,385	0,309	0,226
q_v , м ³ /м ² ·ч	13,91	11,60	9,28	6,92	4,64
K_{Ga} , ч ⁻¹	449,1	388,4	325,2	258,7	187,5

Коэффициент смачивания колец Рашига (25×25×3) определяется по уравнению из работы [114]:

$$\psi = 1 - 1,02 \cdot \exp(-0,16 \cdot Re_{жс}^{0,4}). \quad (63)$$

Результаты расчета объемных коэффициентов массопередачи на кольцах Рашига (25×25×3) представлены в таблице 4 и на рис.13, кривая 4.

Таблица 4

Результаты расчета объемных коэффициентов массопередачи на кольцах
Рашига (25×25×3)

Параметр	Расход жидкости, кг/ч				
	900	750	600	450	300
	Результаты расчетов				
Γ , кг/(м·с)	0,049	0,041	0,032	0,024	0,016
u_{cp} , м/с	0,20	0,18	0,15	0,12	0,10
w_0 , м/с	0,63	0,61	0,58	0,56	0,53
K	0,0028	0,0025	0,0022	0,0018	0,0014
Re_z	715,6	689,9	662,4	632,5	599,0
Pr_z	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
β_z , м/с	0,00149	0,00148	0,00147	0,00146	0,00145
$Re_{жс}$	116,6	97,2	77,8	58,3	45,4
δ , м	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$
$Pr_{жс}$	546,45	546,45	546,45	546,45	546,45
$Nu_{жс}$	7,66	7,05	6,38	5,60	5,01
$\beta_{жс}$, м/с	$6,81 \cdot 10^{-5}$	$5,94 \cdot 10^{-5}$	$5,02 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$
m	0,00045	0,00045	0,00045	0,00045	0,00045
K_y , м/с	0,00147	0,00146	0,00145	0,00144	0,00142
a , м ² /м ³	204	204	204	204	204
ψ	0,700	0,672	0,638	0,595	0,557
q_V , м ³ /м ² ·ч	13,92	11,60	9,28	6,96	4,64
K_{Ga} , ч ⁻¹	757,6	723,1	681,2	628,0	580,7

Сравнение значений объемных коэффициентов массопередачи (кривая 1 и 4 рис. 13) показывает, что на ленточной насадке в 1,45-1,55 раза интенсифицируется процесс массопередачи в сравнении с кольцами Рашига (25×25×3).

Выполненные исследования и расчеты позволили определить объемные коэффициенты массопередачи в системе аммиак-воздух-вода на регулярной ленточной насадке модификации 2 и показать, что новая насадка обеспечивает существенную (до 4,49 раза) интенсификацию процесса массопереноса в сравнении с применяющимися в промышленности насадками

для данного процесса. Интенсификация процесса массопередачи обеспечивается оптимальной конструкцией насадки, на которой достигается развитая поверхность контакта фаз за счет конструктивно организованных перетоков жидкости с одного элемента насадки на другой.

Экспериментально полученные значения объемных коэффициентов массопередачи могут быть использованы при проектировании и разработке промышленных абсорберов для поглощения аммиака из смеси с воздухом на новой регулярной ленточной насадке модификации 2.

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.

Эксперименты по определению объемного коэффициента массопередачи проведены на газовой смеси, состоящей из двух компонентов – аммиака и малорастворимого в воде воздуха (инерта). Однако в ряде важных промышленных процессов газовая смесь является многокомпонентной. Так, в производстве метиламинов газовая смесь кроме аммиака содержит другие компоненты (монометиламин, диметиламин, триметиламин), растворяющиеся в воде. Известно, что присутствие других компонентов оказывает влияние на интенсивность абсорбции, поэтому научный и практический интерес представляет исследование интенсивности массопередачи на перспективной ленточной насадке в условиях многокомпонентной абсорбции.

Проведение экспериментов по абсорбции многокомпонентной газовой смеси в лабораторных условиях представляет большие сложности. Они связаны с трудностью подготовки большого количества исходной многокомпонентной газовой смеси заданной концентрации и затруднительностью обеспечения ее непрерывной подачи в колонну со стабильным расхо-

дом, с необходимостью обеспечения безопасности при работе с несколькими ядовитыми газами, со сложностью выполнения химических анализов отбираемых многокомпонентных проб и т.д. В связи с этим перспективным методом исследования интенсивности массопередачи при абсорбции многокомпонентных газовых смесей является математическое моделирование процесса [18].

В следующей главе на основе фундаментальных закономерностей массопередачи разработана математическая модель поглощения газовой смеси на новой регулярной ленточной насадке, позволяющая установить интенсивность процесса и распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки в условиях многокомпонентной абсорбции. Исследование распределения концентраций компонентов является важной научной задачей, решаемой с помощью моделирования, поскольку характер распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки непосредственно связан с интенсивностью процессов массопереноса, и, кроме того, анализ характера распределения концентраций может служить основой для выработки рекомендаций по выбору наиболее эффективных технологических режимов эксплуатации абсорбционных колонн.

4. Моделирование массопереноса при абсорбции многокомпонентной газовой смеси на регулярной насадке

4.1. Описание математической модели процесса абсорбции и решение уравнений модели

Представляет научный и практический интерес определить распределение концентраций компонентов смеси по высоте слоя насадки. Для решения этой задачи была составлена математическая модель процесса массопередачи.

Рассмотрен процесс абсорбции многокомпонентной газовой смеси, содержащей аммиак и метиламины, в слое насадки высотой H . Площадь поверхности насадки составляет $F = a_n \cdot V_n$. Жидкость стекает по поверхности насадки сверху вниз в виде пленки, а газовая смесь поднимается противотоком в каналах, образованных элементами насадки. При контакте газа и пленки жидкости происходит массоперенос через границу раздела фаз. Принимаем допущение, что концентрации компонентов изменяются только по высоте слоя насадки, не меняясь в поперечном сечении.

Количество перенесенного через границу раздела фаз компонента i на элементарном участке насадки определяется по основному уравнению массопередачи в дифференциальной форме:

$$dM_i = -K_i \cdot (y_i - y_i^*) dF. \quad (64)$$

Это же количество компонента i можно определить по изменению концентраций компонента i в газовой и жидкой фазах:

$$dM_i = G_H \cdot dY_i \quad (65)$$

$$dM_i = L_N \cdot dX_i. \quad (66)$$

В уравнениях (65, 66) концентрации компонента в газе и жидкости Y_i и X_i отнесены к количествам поступающих в абсорбер газа и жидкости

(G_1, M_{H_2O}) . Соотношение между выраженными указанным способом концентрациями и мольными долями запишется в виде:

$$Y_i = \frac{y_i}{g} \quad (67)$$

$$X_i = \frac{x_i}{f}.$$

где 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.

Преобразовав уравнения (64-66), получили систему уравнений, представляющую собой математическую модель процесса абсорбции в многокомпонентной газожидкостной системе:

$$G_1 \cdot dY_i = -K_i \cdot (y_i - y_i^*) dF \quad (68)$$

$$G_1 \cdot dY_i = L_N \cdot dX_i.$$

Граничные условия для данной модели имеют вид:

$$\text{при } F = 0 \quad Y_i = Y_{i,H} \quad (69)$$

$$\text{при } F = a_H \cdot V \quad X_i = X_{i,H}.$$

Преобразуя уравнения (68) и выражая y_i и y_i^* через Y_i и X_i , получим:

$$dY_i = -(g \cdot Y_i - m_i \cdot f \cdot X_i) \cdot k_i \cdot dN. \quad (70)$$

Исключая Y_i , получим:

$$\frac{d^2 X_i}{dz^2} + S_i \frac{dX_i}{dz} + E_i \cdot X_i = 0, \quad (71)$$

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

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

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

Для уравнения (71) граничные условия имеют вид:

$$\text{при } z = 0 \quad Y_i = Y_{i,1};$$

при $z=1$ $X_i = X_{i,N}$.

Обозначения в уравнении (71):

l – удельный расход поглотителя

$$l = \frac{M_{H_2O}}{V_n / 22,4},$$

k_i – относительный коэффициент массопередачи

$$k_i = \frac{K_{i,y}}{K_{кл,y}}.$$

Ключевым компонентом выбирают компонент, константа фазового равновесия которого близка к удельному расходу поглотителя.

Уравнение (71) решается численным методом с преобразованием его в конечно-разностное уравнение [114].

Промежуток от $z=0$ до $z=1$ разбивается на $n=20$ одинаковых участков, каждый участок имеет свой номер j .

В первом приближении принимается, что g_j линейно изменяется по высоте слоя насадки.

По значениям g_j рассчитываются f_j для каждого участка слоя насадки по формуле:

$$f_j = \frac{l}{l - \frac{1}{g_{j+1}} + \frac{1}{g_j}}. \quad (72)$$

В первом приближении принимается, что константа равновесия для каждого компонента m_{ij} линейно изменяется по высоте слоя насадки.

После соответствующих преобразований уравнение (71) приводится к конечно-разностному виду:

$$U_{ij} X_{i,j-1} - X_{ij} + V_{ij} X_{i,j+1} = 0, \quad (73)$$

где:

$$U_{ij} = \frac{1 - r_{ij}}{P_{ij}}$$

$$V_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{p_{ij}}$$

$$r_{ij} = \frac{k_i \cdot N_0}{2 \cdot n \cdot l} (g_j \cdot l - m_{ij} \cdot f_j) - \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{4g_j}$$

$$p_{ij} = 2 - \frac{k_i \cdot N_0}{2 \cdot n \cdot l} \left(m_{ij} \cdot f_j \cdot \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{g_j} - m_{i,j+1} \cdot f_{j+1} + m_{i,j-1} \cdot f_{j-1} \right).$$

Далее для каждого компонента на первом участке слоя насадки рассчитывается абсорбционный фактор по формуле:

$$A_{i1} = \frac{4 - 1/V_{i2}}{3 + (2 \cdot k_i \cdot N_0 / nl) m_{i1} \cdot f_1 - U_{i2} / V_{i2}} \quad (74)$$

$$\text{и } B_{i1} = \frac{(2 \cdot k_i \cdot N_0 / nl) Y_{i1}}{4 - 1/V_{i2}}.$$

Абсорбционный фактор для каждого компонента на остальных участках слоя насадки рассчитывается по формуле:

$$A_{ij} = \frac{V_{ij}}{1 - U_{ij} \cdot A_{i,j-1}} \quad (75)$$

$$B_{ij} = \frac{U_{ij} \cdot A_{i,j-1} \cdot B_{i,j-1}}{V_{ij}}. \quad (76)$$

Таким образом, в первую очередь рассчитываются A_{i1} и B_{i1} по формулам (74), затем для $j=2, 3, \dots, n+1$ определяются A_{ij} и B_{ij} (прямой ход). Далее определяются значения X_{ij} для $j=n, n-1, \dots, 2, 1$ (обратный ход):

$$X_{ij} = A_{ij} (B_{ij} + X_{i,j+1}). \quad (77)$$

Из уравнения материального баланса находим концентрации компонентов в газовой фазе на каждом участке:

$$Y_{ij} = Y_{i1} - l(X_{i1} - X_{ij}). \quad (78)$$

Температура жидкости на данном участке слоя насадки составит:

$$t_j = t_1 + \frac{\sum Q_i \cdot X_i}{c}. \quad (79)$$

Уточненная константа равновесия аммиака m_{pC} ($\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кмоль}$) на данном участке j определяется по уравнению из работы [115]:

$$\lg \frac{m_{pC,1j}}{98100} = 4,125 + 0,1 \cdot \lg C_{1j} - \frac{1750}{T_j}. \quad (80)$$

Уточненная константа равновесия аммиака $m'_{yx,1j}$ составит:

$$m'_{yx,1j} = m_{pC,1j} \frac{\rho}{P \cdot Mr_{H_2O}}. \quad (81)$$

Во втором приближении g_j определяется по значениям Y_{ij} , найденным в первом приближении:

$$g'_j = \frac{1}{1 - \sum (Y_{i1} - Y_{ij})}. \quad (82)$$

Во втором приближении f_j определяется по уравнению:

$$f'_j = \frac{l}{l - \frac{1}{g_{j+1}} + \frac{1}{g_j}}. \quad (83)$$

Определенные таким образом g_j и f_j используются для следующего расчетного цикла.

Расчет заканчивается, если для двух соседних приближений выполняется условие:

$$|g_j - g'_j| < \Delta, \quad (84)$$

где Δ – допустимое отклонение.

В математической модели (71) и ее методе решения (72-84) используются в качестве исходных (входных) параметров величины, которые определяются в следующих расчетах.

Плотность компонента при рабочих условиях рассчитывается по уравнению:

$$\rho_i = \frac{P \cdot Mr_i}{R_\mu T}. \quad (85)$$

Плотность газовой смеси:

$$\rho_\Sigma = \sum \rho_i \cdot y_i. \quad (86)$$

Молекулярная масса газовой смеси:

$$Mr_\Sigma = \sum Mr_i \cdot y_i. \quad (87)$$

Вязкость газовой смеси:

$$\mu_z = \frac{Mr_z}{\sum \frac{y_i \cdot Mr_i}{\mu_i}}. \quad (88)$$

Объемный расход компонента в исходном газе при н.у.:

$$V_{i,н} = V \cdot y_i. \quad (89)$$

Равновесная концентрация компонента в жидкости на выходе из колонны (мольные доли):

$$x_{i,к}^* = \frac{y_{i,н}}{m_{yx,i}}. \quad (90)$$

Равновесная концентрация компонента в жидкости на выходе из колонны (относительные мольные доли):

$$X_{i,к}^* = \frac{x_{i,к}^*}{1 - x_{i,к}^*}. \quad (91)$$

Объемный расход компонента в газе на выходе из колонны при н.у.:

$$V_{i,к} = V_{i,н} \cdot \gamma. \quad (92)$$

Объем поглощенного компонента в колонне при н.у.:

$$V_i = V_{i,н} - V_{i,к}. \quad (93)$$

Количество поглощенного компонента в колонне:

$$M_i = \frac{V_i \cdot P}{R_\mu \cdot T}. \quad (94)$$

Расчет минимального мольного расхода абсорбента (воды) необходимо вести по ТМА, поскольку это менее растворимый компонент:

$$m_{min} = \frac{M_4 \cdot Mr_4}{(X_{4,к}^* - X_{4,н})}. \quad (95)$$

Рабочий массовый расход воды:

$$m_{H_2O} = m_{min} \cdot q. \quad (96)$$

Конечная концентрация компонента в жидкости (мольные доли):

$$x_{i,к} = \frac{V_i \cdot P \cdot Mr_{H_2O}}{R_\mu \cdot T \cdot m_{H_2O}}. \quad (97)$$

Суммарный объемный расход газа на выходе из колонны при н. у.:

$$V_k = V_n - \sum \gamma_i \cdot V_{i,n} \cdot y_{i,n}. \quad (98)$$

Концентрация компонента в газе на выходе из колонны:

$$y_{i,k} = \frac{V_{i,k}}{V_k}. \quad (99)$$

Конечная концентрация аммиака в жидкости на выходе из колонны:

$$\overline{C_{i,k}} = \frac{M_i \cdot \rho_{H_2O}}{m_{H_2O}}. \quad (100)$$

Конечная концентрация компонента в жидкости на выходе из колонны (мольные доли):

$$x_{i,k} = \frac{\overline{C_{i,k}} \cdot Mr_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}. \quad (101)$$

Количество теплоты, выделившееся при абсорбции:

$$Q_{сумм} = \frac{\sum M_i \cdot Q_i}{3600}. \quad (102)$$

Градиент температуры жидкости в колонне:

$$\Delta t = \frac{Q_{сумм}}{c \cdot m_{H_2O}}. \quad (103)$$

Коэффициенты массопередачи определяются по методике из работы [64]. Данная методика включает в себя следующие основные уравнения.

Критерий Рейнольдса в потоке газовой фазы:

$$Re_\Gamma = \frac{w \cdot a}{\rho_z \cdot \mu_z}. \quad (104)$$

Коэффициент диффузии компонента в газовой фазе:

$$D_{i,\Gamma} = D_{i,\Gamma,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}. \quad (105)$$

Критерий Прандтля в потоке газовой фазы:

$$Pr_{i,\Gamma} = \frac{\mu_z}{\rho_n \cdot D_{i,\Gamma}}. \quad (106)$$

Критерий Нуссельта в потоке газовой фазы:

$$Nu_{i,\Gamma} = 0,407 \cdot Re_\Gamma^{0,655} Pr_{i,\Gamma}^{0,33}. \quad (107)$$

Коэффициент массоотдачи компонента в газовой фазе:

$$\beta_{i,\Gamma} = \frac{Nu_{i,\Gamma} \cdot D_{i,\Gamma}}{d_{\text{э}}} . \quad (108)$$

Коэффициент массоотдачи компонента в газовой фазе рассчитывается для верхней и нижней части колонны, а затем определяется средний коэффициент массоотдачи в газовой фазе как среднее арифметическое.

Приведенная толщина пленки жидкости:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}}^2 \cdot g}} . \quad (109)$$

Критерий Рейнольдса жидкости:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{4 \cdot \frac{m_{H_2O}}{3600}}{S \cdot a \cdot \mu_{\text{ж}} \cdot \psi} . \quad (110)$$

Критерий Прандтля жидкости:

$$Pr_{i,\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot D_{i,\text{ж}}} . \quad (111)$$

Критерий Нуссельта жидкости:

$$Nu_{i,\text{ж}} = 0,0021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,75} \cdot Pr_{i,\text{ж}}^{0,5} . \quad (112)$$

Коэффициент массоотдачи компонента в жидкости:

$$\beta_{i,\text{ж}} = \frac{Nu_{i,\text{ж}} \cdot D_{i,\text{ж}}}{\delta} . \quad (113)$$

Средний коэффициент массопередачи в колонне:

$$K_{i,y} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{i,\Gamma}} + \frac{m_{yx,i}}{\beta_{i,\text{ж}}}} . \quad (114)$$

Далее осуществляется выбор ключевого компонента. В качестве ключевого выбирается компонент, для которого отношение константы фазового равновесия к удельному расходу абсорбента $\frac{m_{yx,i}}{l}$ ближе к единице.

Расчет высоты единицы переноса выполняется по ключевому компоненту, как менее растворимому, по методике из работы [64].

Высота единицы переноса для газовой фазы:

$$h_y = 0,615 \cdot d_{\text{э}} \cdot Re_{cp,\Gamma}^{0,345} \cdot Pr_{кл,\Gamma}^{0,67} . \quad (115)$$

Высота единицы переноса для жидкой фазы:

$$h_x = 119 \cdot \delta \cdot Re_{Ж}^{0,25} \cdot Pr_{кл,Ж}^{0,5} . \quad (116)$$

Общая высота единицы переноса:

$$h_{oy} = h_y + \frac{m_{yx,кл} \cdot V_n / 22,4}{M_{H_2O}} . \quad (117)$$

Число единиц переноса и высота слоя насадки определяются по методике из работы [115], включающей в себя следующие этапы расчета.

Отношение расхода газа на входе в колонну к расходу газа на выходе из колонны:

$$g_N = \frac{V_n}{V_k} . \quad (118)$$

Отношение расходов жидкости на входе в колонну и на выходе из нее:

$$f_1 = \frac{l}{l - \frac{1}{g_N} + 1} . \quad (119)$$

Средний расход газа в колонне:

$$G_{cp} = \frac{V_n}{2 \cdot 3600 \cdot 22,4} \left(1 + \frac{1}{g_N} \right) . \quad (120)$$

Средний расход жидкости в колонне:

$$M_{cp} = \frac{M_{H_2O}}{2 \cdot 3600} \left(1 + \frac{1}{f_1} \right) . \quad (121)$$

Средний абсорбционный фактор:

$$A_{cp} = \frac{M_{cp}}{m_{yx,кл} \cdot G_{cp}} . \quad (122)$$

Параметр B :

$$B = 1 - \frac{1}{A_{cp}} . \quad (123)$$

Число единиц переноса:

$$N = \frac{1}{B} \ln \frac{1 - \gamma / A_{cp}}{1 - \gamma} . \quad (124)$$

Суммарная высота слоя насадки:

$$H = (N + 1) \cdot h_{oy} . \quad (125)$$

Объемный коэффициент массопередачи аммиака в слое насадки и конечная концентрация компонентов в газовой фазе определяются в следующей последовательности.

Количество поглощенного аммиака в колонне:

$$M_1 = M_{H_2O} \cdot (X_{1,\kappa} - X_{1,\mu}) . \quad (126)$$

Среднелогарифмическая движущая сила массопереноса аммиака в жидкой фазе:

$$\Delta C_{1,\mathcal{K}} = \frac{(C_{1,\kappa,\mathcal{K}}^* - C_{1,\kappa,\mathcal{K}}) - (C_{1,\mu,\mathcal{K}}^* - C_{1,\mu,\mathcal{K}})}{2,3 \cdot \lg \left(\frac{C_{1,\kappa,\mathcal{K}}^* - C_{1,\kappa,\mathcal{K}}}{C_{1,\mu,\mathcal{K}}^* - C_{1,\mu,\mathcal{K}}} \right)} . \quad (127)$$

Среднелогарифмическая движущая сила массопереноса аммиака в газовой фазе:

$$\Delta C_{1,\Gamma} = \frac{(C_{1,\mu,\Gamma}^* - C_{1,\mu,\Gamma}) - (C_{1,\kappa,\Gamma}^* - C_{1,\kappa,\Gamma})}{2,3 \cdot \lg \left(\frac{C_{1,\mu,\Gamma}^* - C_{1,\mu,\Gamma}}{C_{1,\kappa,\Gamma}^* - C_{1,\kappa,\Gamma}} \right)} . \quad (128)$$

Объемный коэффициент массопередачи аммиака (по жидкой фазе):

$$K_{1,\mathcal{K},V} = \frac{M_1}{\Delta C_{1,\mathcal{K}} \cdot H \cdot S \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} . \quad (129)$$

Объемный коэффициент массопередачи аммиака (по газовой фазе):

$$K_{1,G,a} = \frac{M_1}{\Delta C_{1,\Gamma} \cdot H \cdot S \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} . \quad (130)$$

Конечная концентрация аммиака и аминов в газе в расчете по ДМА:

$$C_{\Gamma,\Sigma} = \frac{1000 \cdot Mr_3 \cdot P \cdot \sum Y_i}{R_\mu \cdot T} . \quad (131)$$

Гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки:

$$\frac{\Delta p_{cyx}}{H} = 100,6 \cdot w^{1,555} . \quad (132)$$

Блок-схема методики расчета (72-132) представлена на рис. 14.

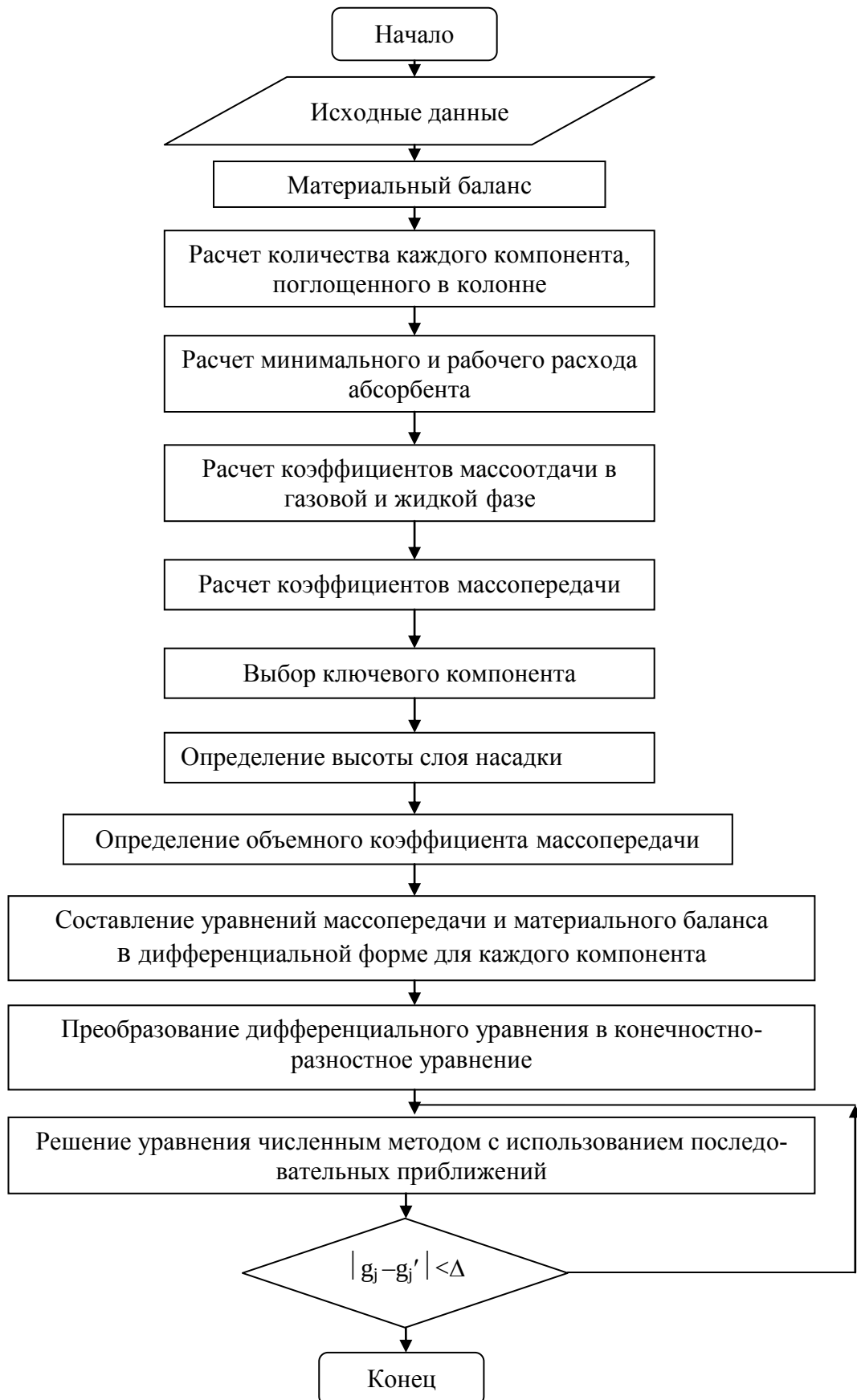


Рис. 14. Блок-схема методики расчета (72-132)

Ниже приведены результаты расчета распределения концентраций по высоте слоя ленточной насадки и по высоте слоя колец Рашига в соответствии с моделью (71) и методикой расчета (72-132) для промышленных условий.

4.1. Результаты расчета распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки при многокомпонентной абсорбции

Необходимость расчета распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки вызвана тем, что на основании распределения концентраций можно определить интенсификацию процессов массопереноса при замене насадки. Вместе с тем анализ распределения концентраций может служить основой для выработки рекомендаций по выбору наиболее эффективных технологических режимов эксплуатации абсорбционных колонн.

По описанной выше методике (72-132) выполнен расчет распределения концентраций компонентов по высоте слоя ленточной насадки модификации 2 и колец Рашига при абсорбции аммиака и метиламинов в промышленных условиях.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные для расчета распределения концентрации

Параметр	Значение
Внутренний диаметр колонны	$D_{\text{вн}} = 2,8 \text{ м}$
Расход газа на входе в колонну при н.у.	$V_n = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$
Температура воды на входе в колонну	$t_n = 20^\circ\text{C} ; T_n = 293^\circ\text{K}$
Температура газа на входе в колонну	$t_r = 20^\circ\text{C} ; T_r = 293^\circ\text{K}$
Абсолютное давление в колонне	$P = 100000 \text{ Па}$

Окончание табл. 5

Концентрация аммиака в жидкости в верхней части аппарата, мольные доли	$x_{1,n} = 0$ кмоль NH_3 /кмоль раствора
Фактическое содержание аммиака и метиламинов в газе на входе в колонну	0,0246 кмоль/м ³
Требуемое содержание аммиака и аминов в газе на выходе из колонны в пересчете на ДМА	менее 20 г/м ³

Состав газовой смеси на входе в колонну представлен в табл. 6.

Таблица 6

Состав газовой смеси на входе в колонну

Компонент	Единица измерения концентрации	Значение
Аммиак	об. %	35
Аммиак	мольная доля	0,35
Аммиак	относительная мольная доля, кмоль NH_3 /кмоль остальных газов	0,875
Монометиламин (ММА)	об. %	10
Монометиламин	мольная доля	0,10
Монометиламин	относительная мольная доля, кмоль ММА/кмоль остальных газов	0,250
Диметиламин (ДМА)	об. %	10
Диметиламин	мольная доля	0,10
Диметиламин	относительная мольная доля, кмоль ДМА/кмоль остальных газов	0,250

Окончание табл. 6

Триметиламин (ТМА)	об. %	5
Триметиламин	мольные доли	0,05
Триметиламин	относительная мольная доля, кмоль ТМА/кмоль остальных га- зов	0,125
Азот	об. %	30
Азот	относительная мольная доля, кмоль азота/кмоль остальных га- зов	0,429
Метан	об. %	5
Метан	относительная мольная доля, кмоль метана/кмоль остальных газов	0,057
Оксид углерода (СО)	об. %	5
Оксид углерода	относительная мольная доля, кмоль СО/кмоль остальных газов	0,057

Технические характеристики регулярной ленточной насадки для промышленных условий представлены в табл. 7.

Таблица 7

Технические характеристики регулярной ленточной насадки

Характеристика	Единица измерения	Значение
Параметр h	м	0,025
Ширина лент	м	0,050
Удельная поверхность насадки	$\text{м}^2/\text{м}^3$	121
Свободный объем	—	0,96
Эквивалентный диаметр	м	0,032

Для сравнения выполнены расчеты распределения концентрации компонентов по высоте слоя колец Рашига, технические характеристики которых представлены в табл. 8.

Таблица 8

Технические характеристики колец Рашига

Характеристика	Единица измерения	Значение
Удельная поверхность насадки	$\text{м}^2/\text{м}^3$	90
Свободный объем	—	0,79
Эквивалентный диаметр	м	0,035

Физико-химические свойства компонентов определены по справочной литературе [39, 115, 125].

Равновесные концентрации аммиака в воде при 25°C по данным [115] приведены в табл. 9.

Таблица 9

Равновесные концентрации аммиака в воде при 25°C

Объемная мольная концентрация аммиака в воде, $\text{кмоль}/\text{м}^3$	Концентрация аммиака в воде, мольные доли, x , $\text{кмоль NH}_3/(\text{кмоль NH}_3+\text{H}_2\text{O})$	Константа фазового равновесия $m_{pс}$, $\text{м}^3 \cdot \text{ат}/\text{кмоль}$	Константа фазового равновесия, m_{yx}	Равновесная концентрация в газе, мольные доли y^* , $\text{кмоль NH}_3/(\text{кмоль NH}_3 + \text{инерты})$	Равновесная объемная концентрация в газе $C_{г*}$, $\text{кмоль NH}_3/(\text{м}^3 \text{ NH}_3 + \text{инерты})$
0,01	0,00018	895,99	0,50	0,0001	$3,68 \cdot 10^{-6}$
0,03	0,00054	1000,04	0,55	0,0003	$1,23 \cdot 10^{-5}$
0,05	0,00090	1052,45	0,58	0,0005	$2,16 \cdot 10^{-5}$
0,07	0,00130	1088,46	0,60	0,0008	$3,13 \cdot 10^{-5}$

Окончание табл. 9

0,1	0,0018	1127,99	0,63	0,0011	$4,63 \cdot 10^{-5}$
0,3	0,0054	1258,97	0,70	0,0038	0,000155
0,5	0,0090	1324,95	0,73	0,0066	0,000272
0,7	0,0126	1370,29	0,76	0,0096	0,000394
1,0	0,0180	1420,05	0,79	0,0142	0,000583
1,5	0,0271	1478,81	0,82	0,0222	0,000911
2,0	0,0361	1521,97	0,84	0,0304	0,001250
2,5	0,0451	1556,32	0,86	0,0389	0,001598
3,0	0,0541	1584,95	0,88	0,0476	0,001953
3,5	0,0631	1609,57	0,89	0,0564	0,002314
4,0	0,0722	1631,21	0,90	0,0653	0,002680
4,5	0,0812	1650,54	0,92	0,0743	0,003051
7,0	0,1263	1725,10	0,96	0,1208	0,004960
10,0	0,1804	1787,74	0,99	0,1788	0,007342
15,0	0,2705	1861,71	1,03	0,2793	0,011470
18,0	0,3247	1895,97	1,05	0,3413	0,014020
18,5	0,3337	1901,17	1,05	0,3517	0,014452
20,0	0,3607	1916,05	1,06	0,3832	0,015741

Сведения о растворимости в воде и константах фазового равновесия ММА, ДМА и ТМА приведены в табл. 10.

В первую очередь выполнены расчеты физических свойств компонентов и технологических параметров процесса по уравнениям (85-101). Результаты расчета приведены в табл. 11.

Таблица 10

Растворимость в воде и константы фазового равновесия ММА, ДМА и ТМА

Параметр	ММА	ДМА	ТМА
Растворимость компонента в воде при 25 °С и 1 ат, г/100мл	108	163	89
Растворимость компонента в воде при 25 °С и 1 ат (относительная массовая концентрация), кг/кг	1,08	1,63	0,89
Равновесная молярная доля компонента в воде при 25 °С и парциальном давлении 1 ат, кмоль/кмоль раствора	0,3015	0,2479	0,1437
Константа фазового равновесия для компонента при 25°С и парциальном давлении 1 ат	$m_{yx,2}=3,317$	$m_{yx,3}=4,034$	$m_{yx,4}=6,961$

Далее рассчитаны средние коэффициенты массопередачи для каждого компонента по уравнениям (104-114). Результаты расчета приведены в табл. 12.

Поскольку у ТМА отношение константы фазового равновесия к удельному расходу абсорбента ($\frac{m_{yx,4}}{l} = 0,338$) ближе к единице, чем у других компонентов, то этот компонент выбран в качестве ключевого. Для других компонентов это отношение составляет: для аммиака $\frac{m_{yx,1}}{l} = 0,029$; для ММА $\frac{m_{yx,2}}{l} = 0,161$; для ДМА $\frac{m_{yx,3}}{l} = 0,196$.

Таблица 11

Результаты расчетов физических свойств компонентов и технологических параметров процесса

Параметр	Аммиак	ММА	ДМА	ТМА
Плотность компонента при рабочих условиях, кг/м ³	0,71	1,27	1,85	2,42
Плотность газовой смеси на входе в колонну, кг/м ³	1,11	1,11	1,11	1,11
Молекулярная масса газовой смеси на входе в колонну, кг/кмоль	27,1	27,1	27,1	27,1
Вязкость газовой смеси на входе в колонну, Па·с	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$
Объемный расход компонента в исходном газе при н.у., м ³ /ч	175	50	50	25
Равновесная концентрация компонента в жидкости на выходе из колонны, мольные доли	0,3320	0,0302	0,0248	0,0072
Равновесная концентрация компонента в жидкости на выходе из колонны, относительные мольные доли	0,4971	0,3110	0,0254	0,0072
Объемный расход компонента в газе на выходе из колонны при н.у., м ³ /ч	0,753	0,261	0,352	0,175
Объем поглощенного компонента в колонне при н.у., м ³ /ч	174,25	49,74	49,65	24,80
Количество поглощенного компонента в колонне, кмоль/ч	7,677	2,191	2,187	1,094
Конечная концентрация компонента в жидкости, мольные доли	0,01693	0,00483	0,00482	0,00241

Таблица 12

Результаты расчета средних коэффициентов массопередачи
компонентов

Параметр	Аммиак	ММА	ДМА	ТМА
Коэффициент диффузии в газе, м ² /с	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$
Критерий Рейнольдса в потоке газа в нижней части колонны	64,2	64,2	64,2	64,2
Критерий Прандтля в потоке газа в нижней части колонны	0,66	0,70	0,75	0,77
Критерий Нуссельта в потоке газа в нижней части колонны	5,42	5,50	5,65	5,71
Коэффициент массоотдачи в газе в нижней части колонны, м/с	0,00320	0,00307	0,00294	0,00288
Коэффициент массоотдачи в газе в нижней части колонны, кмоль/(м ² ·с)	0,000132	0,000130	0,000121	0,000118
Критерий Рейнольдса в потоке газа в верхней части колонны	25,9	25,9	25,9	25,9
Критерий Нуссельта в потоке газа в верхней части колонны	2,99	3,05	3,11	3,15
Коэффициент массоотдачи в газе в верхней части колонны, м/с	0,00177	0,00169	0,00162	0,00159
Коэффициент массоотдачи в верхней части колонны, кмоль/(м ² ·с)	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$6,66 \cdot 10^{-5}$	$6,51 \cdot 10^{-5}$

Окончание табл. 12

Средний коэффициент массоотдачи в газовой фазе, м/с	0,00248	0,00241	0,00228	0,00223
Средний коэффициент массоотдачи в газовой фазе, кмоль/(м ² ·с)	$10,20 \cdot 10^{-5}$	$9,78 \cdot 10^{-5}$	$9,37 \cdot 10^{-5}$	$9,16 \cdot 10^{-5}$
Критерий Рейнольдса жидкости	20,3	20,3	20,3	20,3
Критерий Прандтля в жидкости	556,67	589,41	626,25	642,30
Критерий Нуссельта в жидкости	0,47	0,49	0,50	0,51
Коэффициент массоотдачи в жидкости, м/с	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент массоотдачи в жидкости, кмоль/(м ² ·с)	0,00102	0,00099	0,00096	0,00096
Средний коэффициент массопередачи в колонне, кмоль/(м ² ·с)	$9,61 \cdot 10^{-5}$	$7,37 \cdot 10^{-5}$	$6,73 \cdot 10^{-5}$	$5,51 \cdot 10^{-5}$

Расчет высоты единицы переноса, числа единиц переноса, движущей силы процесса, высоты слоя насадки, конечная концентрация аммиака в газе и объемного коэффициента массопередачи осуществлен по уравнениям (115-131) для ключевого компонента – ТМА. Результаты расчета представлены в табл. 13.

Таблица 13

Результаты расчета высоты единицы переноса и объемного коэффициента массопередачи

Параметр	Значение
Высота единицы переноса для газовой фазы, м	0,06
Высота единицы переноса для жидкой фазы	0,30
Общая высота единицы переноса	0,16
Отношение расхода газа на входе в колонну к расходу газа на выходе из колонны	2,48
Отношение расходов жидкости на входе в колонну и на выходе из нее	0,97
Средний расход газа в колонне, кмоль/с	0,0043
Средний расход жидкости в колонне, кмоль/с	0,1278
Средний абсорбционный фактор	4,28
Параметр B , необходимый для расчета числа единиц переноса	0,766
Число единиц переноса	6
Суммарная высота слоя насадки, м	1,16
Относительный коэффициент массопередачи для аммиака	1,723
Относительный коэффициент массопередачи для ММА	1,754
Относительный коэффициент массопередачи для ДМА	1,205
Относительный коэффициент массопередачи для ТМА	1
Среднелогарифмическая движущая сила массопереноса аммиака в жидкой фазе, кмоль/м ³	4,251
Среднелогарифмическая движущая сила массопереноса аммиака в газовой фазе, кмоль/м ³	0,003
Объемный коэффициент массопередачи аммиака (по жидкой фазе), ч ⁻¹	0,254
Объемный коэффициент массопередачи аммиака (по газовой фазе), ч ⁻¹	355,412
Конечная концентрация аммиака и аминов в газе в пересчете на ДМА, г/м ³	6,12

Полученные результаты (табл. 11-13) использованы для расчета распределения концентраций компонентов по высоте слоя ленточной насадки и по высоте слоя колец Рашига в соответствии с моделью (71) и методикой расчета (72-84). Для расчета распределения концентраций компонентов потребовалось 5 приближений. Результаты расчета для регулярной ленточной насадки представлены в табл. 1–5 Приложения 2. Помимо распределения концентраций компонентов в газе и жидкости в табл. 5 приложения 2 приведены также результаты расчетов изменения температуры и константы фазового равновесия по высоте слоя насадки.

В графическом виде распределение концентрации аммиака в газовой фазе по высоте ленточной насадки (кривая 1) и колец Рашига (кривая 2) наглядно представлены на рис. 15.

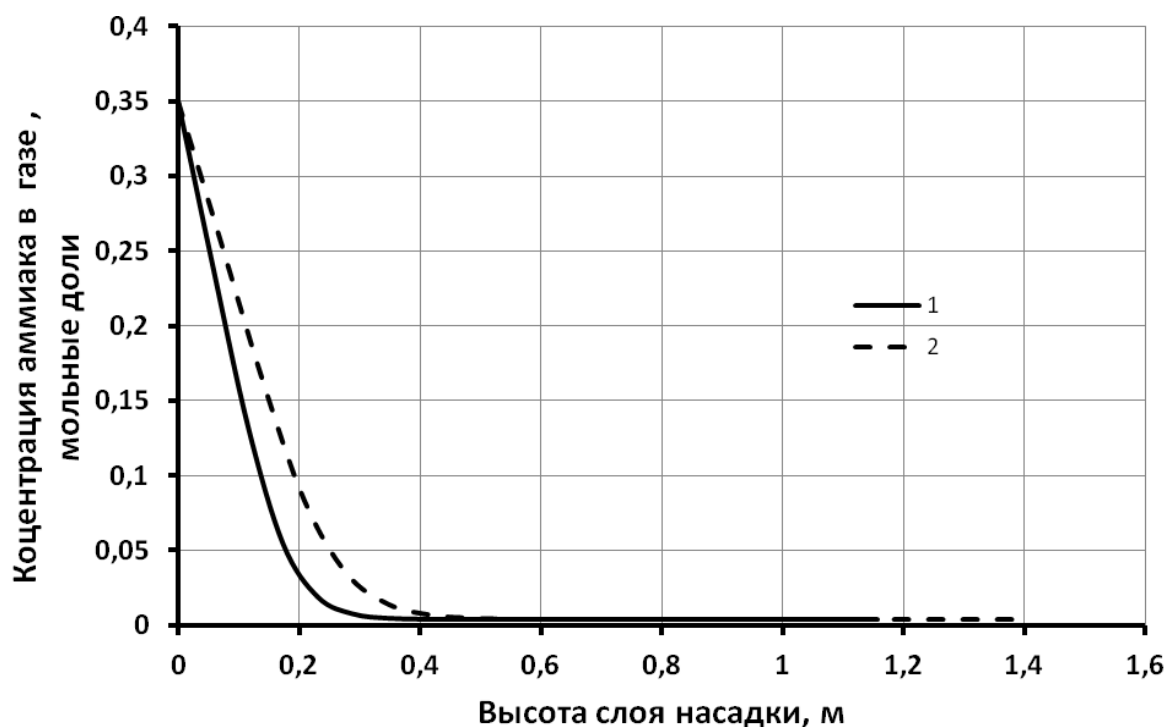


Рис. 15. Распределение концентрации аммиака в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

Наклон кривых распределения концентраций компонентов (рис. 15) позволяет судить об относительной интенсивности процесса массопереда-

чи на насадке. Чем больше угол наклона кривой по отношению к оси абсцисс, тем выше интенсивность процесса. Как видно из рис. 15, угол между осью абсцисс и касательной к кривой (1) выше, чем к кривой (2), приблизительно на 7° . Следовательно, скорость снижения концентрации аммиака в газе на ленточной насадке выше скорости снижения концентрации аммиака на кольцах Рашига. На основании этого можно сделать вывод, что ленточная насадка обеспечивает интенсификацию процесса массопередачи по сравнению с кольцами Рашига.

Интенсификацию процесса в этом случае можно количественно оценить на основании отношения изменения концентраций аммиака на одинаковом участке ленточной насадки и колец Рашига:

$$\frac{\Delta y_{\text{лент},j}}{\Delta y_{\text{Раши},j}} = 1,18. \quad (133)$$

Для вычислений по уравнению (133) принято изменение концентраций на начальном (нижнем) участке высотой 0,2 м, на котором происходит существенное изменение концентраций (рис. 15).

Таким образом, по распределению концентрации аммиака (рис. 15) можно установить, что ленточная насадка обеспечивает интенсификацию процесса массопередачи в сравнении с кольцами Рашига в 1,18 раза, т.е. на 18 %.

Характер распределения концентрации ТМА по высоте слоя насадки отличается от характера распределения аммиака наличием начального горизонтального участка. Результаты расчета распределения концентрации ТМА по высоте слоя насадки представлены в графическом виде на рис. 16. Начальный короткий участок кривой распределения ТМА расположен параллельно оси абсцисс, т.е. концентрация ТМА в газовой фазе на данном участке практически не снижается. Наличие начального горизонтального короткого участка на кривой распределения концентрации ТМА в газе (рис. 16) объясняется тем, что интенсивное поглощение аммиака на на-

чальном участке слоя насадки приводит к резкому снижению объема газовой фазы, что вызывает некоторую задержку снижения концентрации ТМА.

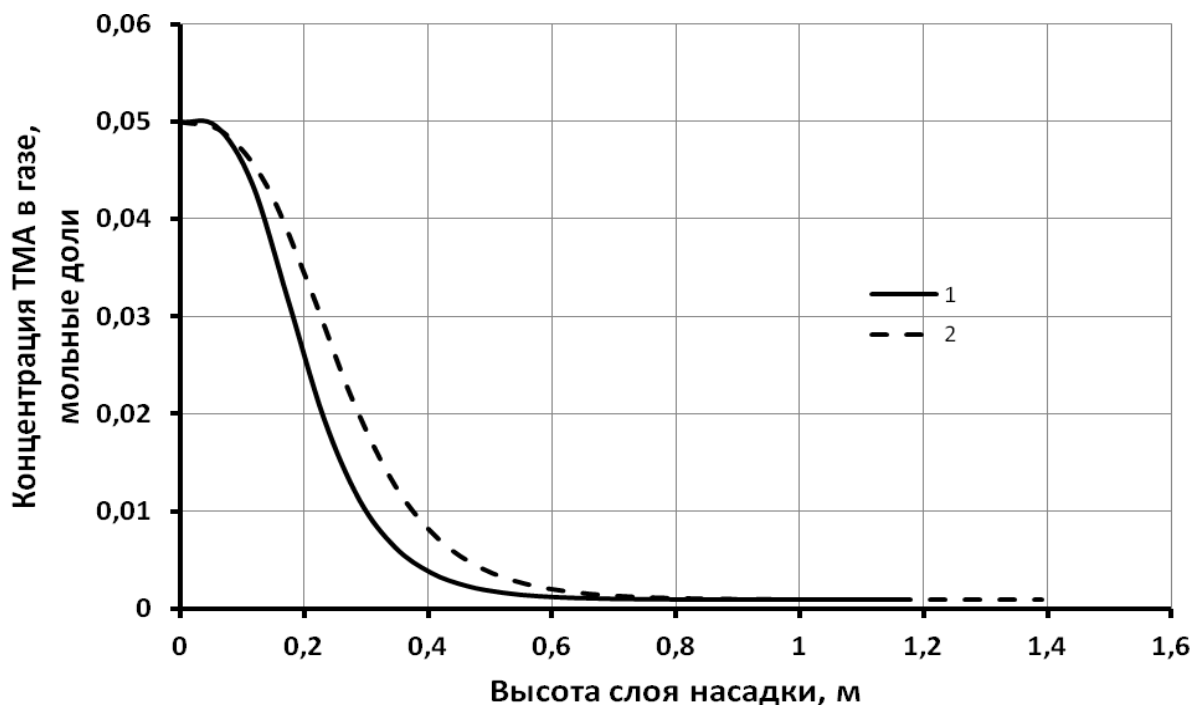


Рис. 16. Распределение концентрации ТМА в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

Об интенсификации процесса массопередачи на ленточной насадке позволяет сделать вывод также анализ характера распределения температуры жидкости по высоте слоя насадки. На рис. 17 представлены результаты расчета по уравнениям (79,102,103) распределения температуры жидкости по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2), полученные в 5-м приближении. При этом суммарный градиент температуры жидкости в слое насадки составил $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как видно из рис. 17, в одном и том же сечении насадки жидкость в кольцах Рашига имеет более высокую температуру, чем на ленточной насадке, разница составляет до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это объясняется тем, что вследствие низкой интенсивности массопереноса аммиак в слое колец Рашига поднимается на большую высоту, и следовательно, сте-

кающая сверху жидкость начинается нагреваться раньше, чем на ленточной насадке.

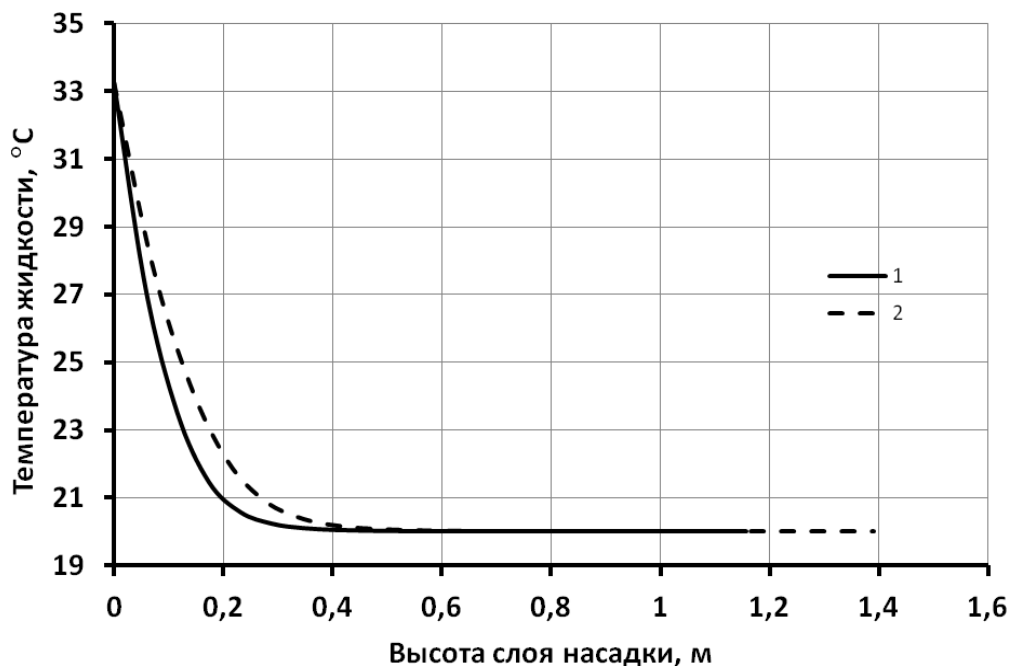


Рис. 17. Распределение температуры жидкости по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

Существенное влияние на процесс абсорбции оказывает расход жидкости, подаваемый на орошение насадки. В предыдущих расчетах, результаты которых представлены на рис. 15-17, рабочий расход воды, подаваемый на орошение колонны, превосходил значение минимального требуемого расхода воды в три раза, т.е. коэффициент избытка расхода жидкости составлял $q=3$. Расчеты показывают, что в случае снижения коэффициента избытка расхода воды с 3 до 2 характер кривой изменения концентрации ТМА в газовой фазе меняется. На начальном участке кривой появляется экстремум (рис. 18), т.е. концентрация ТМА в газовой фазе, не снижается на начальном участке, а начинает возрастать. Возникновение экстремума объясняется относительным снижением скорости абсорбции ТМА водой в результате снижения расхода воды и увеличения температуры в слое насадки. Резкое 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. При $q=2$ экстремум характерен как для ленточной насадки, так и для колец Рашига (рис. 18).

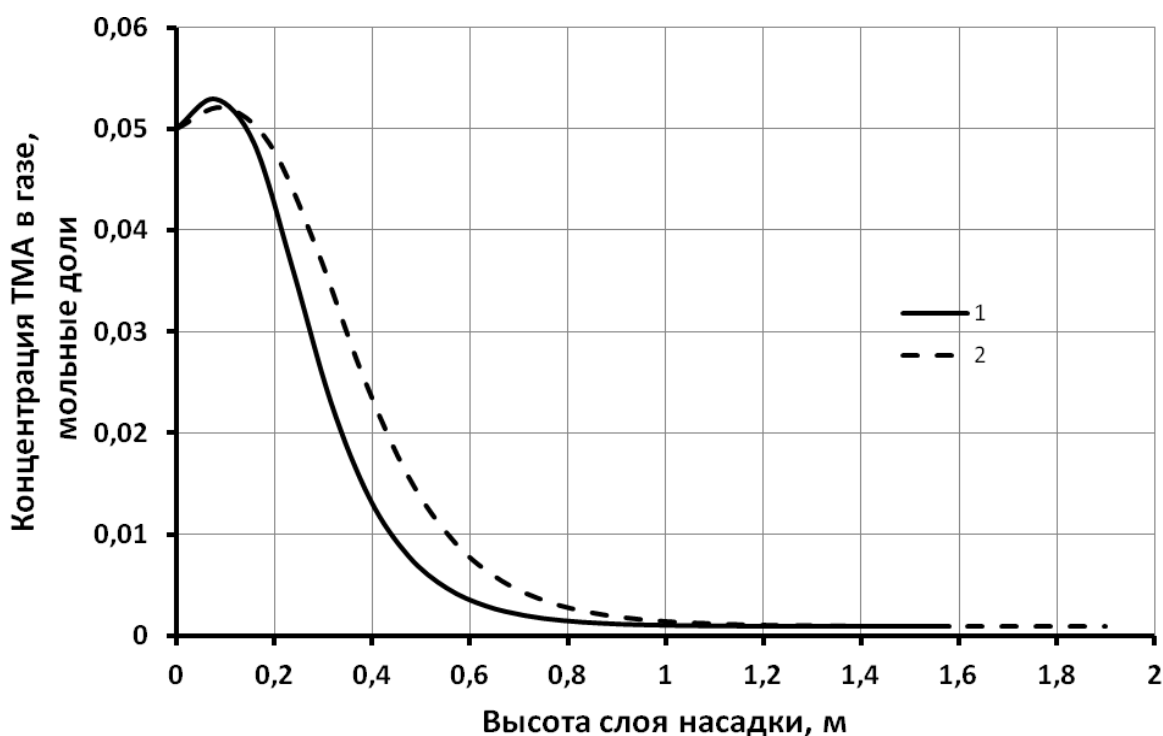


Рис. 18. Распределение концентрации ТМА в газе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2) при снижении коэффициента избытка расхода жидкости

Полученные результаты (рис. 18) позволяют рекомендовать к применению в промышленных абсорберах технологические режимы, при которых коэффициент избытка жидкости q составляет не менее 3, поскольку уже при $q=3$ начальному участку насадки соответствует горизонтальный участок кривой распределения ТМА (рис. 16). При $q \geq 3$ будет обеспечено эффективное поглощение ТМА из многокомпонентной смеси, исключаящее проскок ТМА через слой насадки. Кроме того, избыток жидкости не-

обходим для отвода теплоты абсорбции. Так, при $q=3$ величина нагрева жидкости в слое насадки составляет 13°C , а при $q=2$ $19,9^{\circ}\text{C}$. Известно, что при увеличении температуры интенсивность абсорбции снижается. Следовательно, увеличение избытка жидкости позволяет увеличить интенсивность абсорбции за счет снижения температуры жидкости в слое насадки. На основании результатов расчета распределения концентрации ТМА по высоте слоя насадки (рис. 18) можно рекомендовать также и в проекторочных расчетах промышленных абсорберов аммиака из многокомпонентных газовых смесей закладывать коэффициент избытка расхода воды не менее 3 ($q \geq 3$).

Интенсификацию процесса массопередачи на ленточной насадке можно оценить не только по отношению изменения концентраций в слое ленточной насадки и колец Рашига (уравнение 133), но и по отношению объемных коэффициентов массопередачи. Как показали расчеты по уравнению (130), объемный коэффициент массопередачи в слое ленточной насадки (табл. 13) составил $355,4 \text{ ч}^{-1}$, что в 1,2 раза превышает объемный коэффициент массопередачи в слое колец Рашига ($295,6 \text{ ч}^{-1}$). Для сравнения полученных результатов с хордовой насадкой выполнен расчет по эмпирическому уравнению (45) объемного коэффициента массопередачи аммиака для хордовой насадки при сходных условиях. Объемный коэффициент массопередачи для хордовой насадки составил $206,5 \text{ ч}^{-1}$, что в 1,72 раза ниже, чем на ленточной насадке. Из этого следует, что ленточная насадка обеспечивает интенсификацию массопереноса в 1,2 раза в сравнении с кольцами Рашига и в 1,72 раза в сравнении с хордовой насадкой за счет более развитой поверхности контакта фаз и эффективного режима взаимодействия газа и жидкости, при котором организуется система перетоков жидкости с одного элемента насадки на другой.

По уравнениям методики (85-125) выполнен также обратный расчет, который позволил определить степень очистки газа и конечную концен-

трацию компонентов при заданной высоте слоя ленточной насадки и колец Рашига. Расчет показал, что при одинаковых технологических условиях и одинаковой высоте слоя насадки концентрация аммиака и метиламинов в газе на выходе с колонны понижается на 10 % при замене кольцевой насадки на регулярную ленточную.

Достоверность математической модели (71) подтверждается согласованностью результатов расчета интенсификации процесса массопередачи на ленточной насадке двумя методами. Во-первых, методом расчета интенсификации по отношению изменения концентраций в слоях насадки (уравнение 133). Изменение концентраций при этом было получено путем численного решения дифференциальных уравнений модели (71). Во-вторых, методом расчета интенсификации по отношению объемных коэффициентов массопередачи в слое ленточной насадки и в слое колец Рашига, которые были рассчитаны известным методом (126-130). Первый метод дал значение интенсификации процесса массопередачи в 1,18 раза, а второй – в 1,2 раза, что говорит о согласованности и надежности двух методов, а также об адекватности математической модели (71), положенной в основу расчета распределения концентраций.

Достоверность математической модели (71) подтверждается также надежностью фундаментальных уравнений массопередачи, положенных в основу модели, и обоснованностью принятых допущений, а также результатами исследований многокомпонентной абсорбции других авторов [114], в которых показана возможность возникновения экстремумов на кривой распределения компонентов в слое насадки.

Приведенная математическая модель (71) совместно с методикой расчета (72-132) и рекомендации по выбору коэффициента избытка жидкости могут быть использованы при проектировании промышленных абсорберов аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей, а

также при разработке рекомендаций по улучшению технологических режимов процесса.

4.2. Рекомендации по применению методики расчета абсорбера и по выбору параметров технологического режима

Математическая модель (71) и методика расчета (72-132), разработанные на основе фундаментальных закономерностей массопередачи, учитывают многокомпонентность состава газовой смеси и конструктивные особенности насадок. Необходимость разработки такой модели и методики обусловлена тем, что проведение экспериментов по абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей и оценка массообменной эффективности насадок в лабораторных условиях представляет большие сложности.

Модель (71) и методика (72-132) позволяют рассчитать основные параметры слоя регулярной ленточной насадки: его высоту, конечную концентрацию аммиака в газовой фазе, объемный коэффициент массопередачи и гидравлическое сопротивление. Данная методика в первую очередь рекомендуется к применению при выполнении проектировочных расчетов высокоэффективных абсорберов для поглощения аммиака и метиламинов, когда требуется определить высоту слоя насадки при заданных технических характеристиках насадки, степени очистки газа и конечной концентрации компонентов в газовой смеси. Проектировочные расчеты позволят не только определить основные параметры слоя насадки (высоту, диаметр), но и выполнить сравнение с известными насадками, а также оценить интенсификацию процесса массопередачи по величине объема слоя насадки и сделать обоснованный выбор типа контактного устройства.

Методика (72-132) позволяет также выполнить обратный расчет, когда задается высота слоя насадки и ставится задача определения конечной концентрации компонентов в газовой смеси и степени очистки. Данный

расчет позволяет оценить массообменную эффективность той или иной насадки и спрогнозировать целесообразность применения насадки в заданных условиях.

Значимые сведения о процессе абсорбции аммиака и метиламинов можно получить на основе расчета распределения температур по высоте слоя насадки, поскольку температура оказывает влияние на движущую силу процесса массопередачи. Данные о распределении температур также свидетельствуют об интенсивности массопереноса в слое насадки.

Важным этапом работы является расчет распределения концентрации компонентов в газе и жидкости по высоте слоя насадки в результате численного решения дифференциальных уравнений модели (71). Информация о распределении компонентов дает возможность выработать рекомендации по ведению технологического процесса и выбору технологических параметров. Кроме того, распределение концентрации по высоте слоя насадки позволяет оценить относительную интенсивность массообмена и определить интенсификацию процесса на насадке.

Расчеты показали, что высокий коэффициент избытка жидкости необходим не только для отвода теплоты абсорбции и снижения температуры жидкости, но и для предотвращения образования экстремумов на кривой распределения концентраций компонентов. Для режима $V_T=500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $q=2$ показано, что распределение концентрации ТМА по высоте слоя насадки имеет экстремальный характер, что увеличивает вероятность проскока ТМА через слой насадки с газовой фазой. Это позволяет рекомендовать при $V_T=500 \text{ м}^3/\text{ч}$ поддерживать коэффициент избытка жидкости не менее 3. Рекомендуется аналогичные расчеты выполнять для каждого конкретного технологического режимов и получать данные о требуемом значении коэффициента избытка жидкости. При этом необходимо учитывать, что увеличение коэффициента избытка жидкости приведет не только к увеличению интенсивности массопередачи, но и к увеличению затрат на подачу жидкости насосом в верхнюю часть колонны.

По результатам расчета по методике (72-132) для действующего производства метиламинов на ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» (рис. 1) разработаны рекомендации по ведению процесса абсорбции аммиака и метиламинов, в соответствии с которыми предложено в абсорбере кольца Рашига (50×50×5) заменить на новую регулярную ленточную насадку и работать с коэффициентом избытка жидкости $q \geq 3$. Эти меры обеспечат интенсификацию процесса массопередачи при абсорбции за счет создания развитой поверхности контакта фаз и эффективного режима взаимодействия газа и жидкости в слое ленточной насадки. Как показывают расчеты, внедрение новой ленточной насадки позволит снизить концентрацию аммиака и метиламинов на выходе с абсорбера на 10% и соответственно увеличить выход целевых продуктов производства метиламинов. Кроме того, применение ленточной насадки позволит уменьшить затраты на компремирование газа перед входом в колонну за счет снижения гидравлического сопротивления в 2 раза и снижения удельного веса насадки в 5 раз. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных рекомендаций в условиях производства ОАО «АНХК» составит 1213,1 тыс. руб. в год (Приложение 5).

Относительно высокие технико-экономические показатели регулярной ленточной насадки позволяют рекомендовать ее для применения в других абсорбционных процессах, а также газожидкостных теплообменных процессах, например, для охлаждения воды в градирнях.

Основные выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей работы

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 абсорбции 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.

Условные обозначения

- A – коэффициент, зависящий от конструкции насадки;
 a – удельная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
 a_n – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
 B – коэффициент, зависящий от свойств насадки;
 b – ширина стороны колонны квадратного сечения, м;
 C_x – объемная мольная концентрация компонента в жидкости, $\text{кмоль}/\text{м}^3$;
 c – теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$;
 D – внутренний диаметр колонны, м;
 D_2 – коэффициент молекулярной диффузии в газовой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$;
 $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр аппарата, м;
 $D_{\text{жс}}$ – коэффициент молекулярной диффузии в жидкой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$;
 d_3 – эквивалентный диаметр, м;
 d – внутренний диаметр трубки, м;
 d_0 – диаметр эквивалентного шара, м;
 F – площадь массопереноса, м^2 ;
 F_K – свободное сечение колоны, м^2 ;
 G – массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$;
 g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
 H – высота слоя насадки, м;
 h_2 – высота единицы переноса по газовой фазе, м;
 $h_{\text{ж}}$ – высота единицы переноса по жидкой фазе, м;
 I – интенсивность источников орошения всего слоя насадки;
 K – безразмерный комплекс;
 K_G – коэффициент массопередачи, отнесенный к газовой фазе, $\text{м}/\text{с}$;
 $K_{\text{ж}}$ – коэффициент массопередачи, отнесенный к жидкой фазе, $\text{м}/\text{с}$;
 K_{Ga} – объемный коэффициент массопередачи по газовой фазе, с^{-1} ;
 k_p – коэффициент учета плотности спирта в микроманометре;
 k_T – поправочный коэффициент в формуле расчета расхода воздуха по показаниям микроманометра на трубке Пито-Прандтля;

k_{II} – коэффициент наклона трубки спиртового микроманометра;
 L – массовый расход жидкости, кг/с;
 L_V – объемный расход жидкости, м³/с;
 l – удельный расход поглотителя;
 $l_{\text{э}}$ – высота элемента насадки, м;
 M – количество перенесенного вещества, кмоль/с;
 Mr – молекулярная масса, кг/кмоль;
 m – массовый расход абсорбента (воды), кг/с;
 m_{yx}, m_{pC} – константы фазового равновесия;
 N – число единиц переноса;
 n – число трубок;
 Nu'_z – диффузионный критерий Нуссельта в газовой фазе;
 P – давление, Па;
 p – парциальное давление газа, Па;
 Pr – критерий Прандтля;
 ΔP – перепад давления, Па;
 Δp_{op} – гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па;
 $\Delta p_{сух}$ – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па;
 Δp_{10} – показания микроманометра на трубке Пито-Прандтля при расстоянии от оси трубы до точки измерения, равном 10 мм, мм. спирт. ст.;
 Q – количество теплоты, кДж/с;
 q_V – объемная плотность орошения жидкости, м³/(м·с);
 R_{μ} – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);
 Re – критерий Рейнольдса;
 $Re_{ж}$ – критерий Рейнольдса в жидкости;
 Re_z – критерий Рейнольдса в газе;
 S – площадь поперечного сечения, м²;
 t_z – температура газа на входе в колонну, °С;
 T_z – температура газа на входе в колонну, К;
 t_n – температура воды на входе в колонну, °С;

- T_n – температура воды на входе в колонну, К;
 u – скорость пленки жидкости на внутренней поверхности трубки, м/с;
 V – объем, м³;
 $V_{ж}$ – объемный расход жидкости, м³/ч;
 V_H – объем слоя насадки, м³;
 V_G – объемный расход газа, м³/ч;
 W_G – массовая скорость газа, кг/(м²·ч);
 $W_{ж}$ – массовая скорость жидкости, кг/(м²·ч);
 w – приведенная скорость газа в аппарате, м/с;
 $w_{ист}$ – истинная скорость газа в аппарате, м/с;
 w_p – рабочая скорость газа в аппарате, м/с;
 w_3 – скорость захлебывания, м/с;
 w_0 – относительная скорость газа, м/с;
 x_i – концентрация компонента i в жидкости, мол. доля;
 x_i^* – равновесная концентрация компонента i в жидкости, мол. доля;
 y_i – концентрация компонента i в газе, мол. доля;
 y_i^* – равновесная концентрация компонента в газе, мол. доли;
 Φ – коэффициент формы;
 α – коэффициент поля скоростей;
 β – коэффициент массоотдачи, м/с;
 $\beta_{ж}$ – коэффициент массоотдачи в жидкости, м/с;
 β_g – коэффициент массоотдачи в газе, м/с;
 $\beta_L a$ – объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, ч⁻¹;
 γ – степень извлечения;
 Δ – движущая сила массопередачи в газе, кмоль/м³;
 δ – приведенная толщина жидкостной пленки, м;
 ε – свободный объем насадки;
 θ_0 – краевой угол смачивания;
 λ – коэффициент трения;
 μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

ξ – коэффициент сопротивления;

ρ_g – плотность газа, кг/м³;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

τ – время контакта, с;

ψ – коэффициент смачивания поверхности насадки;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;

Γ – линейная плотность орошения, кг/(м·с).

Нижние индексы:

i – номер компонента смеси (1 – аммиак; 2 – монометиламин; 3 – диметиламин; 4 – триметиламин);

j – номер участка слоя насадки;

min – минимальный;

H_2O – вода;

B – воздух;

g – газ;

gr – граница раздела фаз;

k – конечный;

$ж$ – жидкость;

$кл$ – ключевой компонент;

$лент$ – ленточная насадка;

n – начальный;

$Раш$ – кольца Рашига;

$ср$ – средний;

$сумм$ – суммарный.

0 – при нормальных условиях (н.у.);

Сокращения:

ММА – монометиламин;

ДМА – диметиламин;

ТМА – триметиламин

Список литературы

1. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. / Айнштейн В.Г. и др. Кн. 2. – М.: Химия. – 2000. – 850 с.
2. Абдулрахман Р. Влияние температуры абсорбента на процесс аминной очистки газа: ситуационное исследование и моделирование. / Абдулрахман Р., Себастин И. // Химия и технология топлив и масел. № 4 (578) – 2013. – с. 10-12.
3. Абрамкин, С.Е. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в технологическом комплексе систем «абсорбция-десорбция» / Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Кузьмин Н.Н. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. – № 6 (119). – С. 255-264.
4. Алексеев, В.В. Исследования гидродинамических характеристик насадочных колонн. / Алексеев В.В., Рачковский С.В. – Казань. 2004. – 25 с.
5. Абрамкин, С.Е. Разработка математической модели технологического комплекса «абсорбция - десорбция» / Абрамкин С.Е., Душин С.Е. // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2011. – № 1. – С. 29-33.
6. Алекперова, Л.В. Гидродинамические исследования седловидных насадок и колец Палля. / Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Струнина А.В., Морозов А.И. // Химическая промышленность, 1974, №5, 60-64 с.
7. Анкова, Л.В. Абсорбция кислых компонентов топочных газов дистиллерной жидкостью содового производства / Анкова Л.В. // автореф. дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук / Харьков, 1993.

8. Абызгильдин, А.Ю. Графический анализ технологических схем процессов химической абсорбции / Абызгильдин А.Ю. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 2. – С. 93-100.
9. Архаров, И.А. Моделирование процессов тепломассообмена на регулярных насадках колонн дистиляционных установок // И.А. Архаров, Е.С. Навасардян // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №9, с. 22-25.
10. Бальчугов, А.В. Гидродинамика и массообмен на насадках в газожидкостных системах. / Бальчугов А.В., Рыжов С.О., Кузора И.Е. – Монография. – Ангарск: АГТА, 2012. – 107 с.
11. Бальчугов, А.В. Разработка регулярной каркасно-ленточной насадки для массообменных процессов / Бальчугов А.В., Скачков И.В. // Современные технологии и научно-технический прогресс. – Ангарск: АГТА, 2011. – с. 21.
12. Бажайкин А.Н. Особенности абсорбции газов во вращающейся пористой среде. / Бажайкин А.Н. // Письма в журнал технической физики. Том 40. № 2 – 2014. – с. 82-89.
13. Балыбердин, А.С. Интенсификация абсорбции смеси аммиака и диоксида углерода после колонн дистиляции в производстве кальцинированной соды / Балыбердин А.С. // автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Казанский государственный технологический университет. Казань, 2008
14. Безверхий, П.П. Нестационарная абсорбция метана неподвижной водной фазой / Безверхий П.П., Мартынец В.Г., Матизен Э.В. // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38. – № 4. – С. 372-377.
15. Беккер, В.Ф. Математическое моделирование абсорбции аммиака в колонне с вращающейся подвижной насадкой / Беккер В.Ф., Киссель-

- ман И.Ф. // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. – № 1. – С. 76-85.
16. Бусыгина, Н.В. Оптимизация процесса низкотемпературной абсорбции / Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. // Технологии нефти и газа. 2004. – № 4 (33). – С. 7-9.
 17. Буфетов, Н.С. Абсорбция газов, сопровождающаяся значительным выделением тепла. / Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 53-56.
 18. 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.
 19. Врагов, А.П. Оптимизационное проектирование абсорбционных колонн с использованием ПЭВМ. / Врагов А.П., Михайловский Я.Э. – Сумы. 2007. – 98 с.
 20. Гафарова, З.Р. Пособие по выполнению экономического раздела проектов. / Гафарова З.Р. – Уфа: УГНТУ, 2000. – 12 с.
 21. Голованчиков, А.Б. Моделирование и расчет вентиляторной градирни с проволочной насадкой и капельным орошением. / Голованчиков, А.Б., Меренцов Н.А., Балашов В.А. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – №10. – 2012. – с. 3-6.
 22. Городилов, А.А. Совершенствование конструкции хордовой насадки. / Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №2, 2014, с. 10-13.
 23. Галимова, Л.В. Научно-практические основы процесса абсорбции с применением к действующей абсорбционной водоаммиачной холодильной машины. / Галимова Л.В., Веднеева А.И. // Научный журнал

НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. №1 – 2014. – с. 4.

24. Галимова, Л.В. Совершенствование процесса абсорбции водоаммиачной холодильной машины в системе синтеза аммиака. / Галимова Л.В., Веднеева А.И. // Холодильная техника. №12 – 2013. – с. 18-25.
25. Гордеев, Л.С. Исследование применения высокопористых ячеистых материалов в насадочных ректификационных колоннах. / Гордеев Л.С., Козлов А.И., Глебов М.Б., Хитров Н.В. // Теоретические основы химической технологии, т. 43 (№5) – 2009. – с. 567–574.
26. Ганижева, Л.Л. Экспресс-метод подбора селективного абсорбента для процессов сероочистки. / Ганижева Л.Л., Пономаренко Д.Б. // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). № 3. – 2013. – с. 11-16.
27. Галимова, Л.В. Совершенствование процесса абсорбции водоаммиачной холодильной машины в системе синтеза аммиака. / Галимова Л.В., Веднеева А.И. // Холодильная техника. – 2013. – № 12. – С. 18-25.
28. Джонова–Атанасова, Д.Б. Коэффициент массопередачи в жидкой фазе для регулярно уложенных насадок. / Джонова–Атанасова Д.Б., Св.Ц. Наков, Н.Н. Колев. // Теоретические основы химической технологии, т. 30 (№3) – 1996. – с. 265–267.
29. Дмитриев, А.В. Распределение жидкой фазы в колонных массообменных аппаратах с регулярной насадкой / Дмитриев А.В., Дмитриева К.В., Николаев А.Н. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №2, 2011, с. 3-5.
30. Дмитриева, Г.Б. Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок. / Дмитриева Г.Б. и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение (№12) – 2005 – с. 5-8.

31. Дмитриев, А.В. Контактные массообменные устройства для увеличения производительности действующих колонных аппаратов / Дмитриев А.В., Макушева О.С., Дмитриева К.В., Николаев А.Н. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – №5. – 2011. – с. 19-21.
32. Дмитриева, Г.Д. Гидродинамика и массообмен в структурированных насадках из гофрированных листьев: диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. М.: 2007. – 255 с.
33. Диденко, В.Г. Оптимизация условий сепарации дисперсной фазы неоднородных выбросов при аппаратном совмещении с абсорбцией газовых примесей / Диденко В.Г., Беломутенко С.В. // В сб.: Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы III Международной научной конференции. 2005. С. 34-39.
34. Дудаков, В.П. Математическая модель абсорбции многокомпонентной газовой смеси на примере углеводородов / Дудаков В.П., Рубцова Е.А. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2008. – Т. 13. – № 2-3. – С. 223-226.
35. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов: изд. 2-е. – М: Химия. – 1995. – 400 с.
36. Евтюхин, Н.А. Промышленные тепломассообменные процессы и установки в примерах и задачах. / Евтюхин Н.А., Бурдыгина Е.В. – Уфа; Изд-во УГНТУ, 2000. – 202 с.
37. Закгейм, А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. 2-е изд., перераб. и доп. / Закгейм А.Ю. – М.: Химия. – 1982. – 288 с.
38. Зуев, А.В. К теории многокомпонентной адсорбции и абсорбции / Зуев А.В., Твардовский А.В. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – № 6. – С. 34-42.
39. Зефиоров, Н.С. Химическая энциклопедия. Том 4. – М.: «Большая Российская энциклопедия» – 1995. – 642 с.

40. Зиберт, Г.К. Новые структурированные насадки для установок абсорбционной осушки газа. / Зиберт Г.К и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №9, 2002. – с. 8-10.
41. Зиберт, Г.К. Тенденции развития технологического оборудования абсорбционной осушки газа / Г.К. Зиберт, С.М. Дмитриев, В.В. Ключко, Т.М. Феоктистова // «Нефть. Газ. Промышленность», №1, 2006.
42. Иваньков, С.В. Гидродинамика насадочных аппаратов. / Иваньков С.В., Коньгин С.Б. – Самара, 2009. – 44 с.
43. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И.Е. // М.: Машиностроение.– 1992. – С. 672.
44. Каган, А.М. О повышении предельно допустимых нагрузок при работе массообменных аппаратов с насадочными устройствами. / Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. // Химическая промышленность, №4 – 2001. – с. 46-48.
45. Камаев А.С. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс абсорбции. / Камаев А.С., Ульянов Б.А. // Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. Том 1. – 2014. – с. 140-141.
46. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия – 1973 – с. 752.
47. Ключенкова, М.И. Гидродинамика насыпных винтовых полимерных насадок. / Ключенкова М.И., Кузнецова Н.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г., Мокроусова Е.А. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – №8. – 2014. – с. 22-24.
48. Кузнецова Н.А. Интенсификация абсорбционной очистки газовых выбросов в аппаратах с объемной сетчатой псевдоожиженной насадкой: диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. М.: 2007. – 169 с.
49. Кузнецова, Е.В. Изучение показателей массопередачи комплексных абсорбентов и выбор параметров массообмена. / Кузнецова Е.В., Бу-

- сыгина Н.В., Бусыгин И.Г. // Технология нефти и газа. № 2 (67) – 2010. – с 11-14.
50. Коган, В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. / Коган В.Б. – Л.: Химия. – 1977. – 592 с.
51. Каган, А.М. Сравнительные характеристики промышленных нерегулярных насадок из полимерного материала для осуществления процессов абсорбции и ректификации / Каган А.М., Пушнов А.С. // Химическая промышленность сегодня. 2006. – № 11. – С. 30-36.
52. Кичатов, К.Г. Абсорбция ацетилена из этан-этиленовой фракции селективными растворителями / Кичатов К.Г. // Дисс. на соиск. Уч. ст. канд. хим. наук / Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2011
53. Лаптев, А.Г. Оценка длины входного участка в проточном неупорядоченном насадочном слое при турбулентном режиме. / Лаптев А.Г. // Химическая промышленность сегодня. – №4. – 2014. – с. 48-52.
54. Леонтьев, В.К. Расчет газожидкостного эжекционного аппарата для проведения процесса абсорбции. / Леонтьев В.К., Барашева М.А. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. Том 55, №12 – 2012. – с. 98-100.
55. Лаптев, А.Г. Массообменная и энергетическая эффективность колонн с насадками / Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. // Химическая техника, №9, 2010. – с. 38-40.
56. Лаптев, А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та. 2007. – 500 с.
57. Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. ПНД Ф 14.1:2.4.262-10. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору – М, 2010.

58. Неумоина, Н.Г. Построение модели кинетического метода расчета многокомпонентной неизотермической абсорбции газов. / Неумоина Н.Г., Белов А.В. // Современные проблемы науки и образования. №6 – 2014. – с. 26.
59. Неумоина, Н.Г. Апробация модели кинетического метода расчета многокомпонентной неизотермической абсорбции газов. / Неумоина Н.Г., Белов А.В. // Современные проблемы науки и образования. №6 – 2014. – с. 27.
60. Накоряков, В.Е. Тепломассоперенос на начальном участке свободно стекающей пленки: абсорбция, десорбция, конденсация, испарение / Накоряков В.Е., Григорьева Н.И., Барташевич М.В. // В сб.: Теплофизические основы энергетических технологий. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск. – 2011. – С. 68-71.
61. Никандров, М.И. Абсорбция пентаоксида фосфора из отходящих газов в распылительной колонне / Никандров М.И., Никандров И.С. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 220.
62. Маряхин, Н.Н. Влияние геометрии регулярной гофрированной насадки на ее гидродинамические характеристики: дисс. канд. техн. наук / Маряхин Н.Н. Казань, 2003. – 185 с.
63. Олевский, В.М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / В.М. Олевский, В.Р. Ручинский, А.М. Кашников, В.И. Чернышев, под ред. В.М. Олевского // М.: Химия, 1988. – 240 с.
64. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, 14-е изд. / Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. – М.: Альянс. – 2007. – 576 с.
65. Патент на изобретение РФ № 2077379, МПК В01J19/32. Способ изготовления насадки / Пелевин А.Ф., Пантелеймонов Е.Н., Дубовцев

- В.М.; заявитель и патентообладатель: Пелевин А.Ф., Пантелеймонов Е.Н. – 95101819/25, заявл. 07.02.1995, опубл. 20.04.1997.
66. Патент на изобретение РФ № 2094113, МПК В01J19/32. Уголко́вая насадка для массообменных аппаратов / Фетисов В.И., Абдуллин А.З., Панов А.К., Бакиев А.В.; заявитель и патентообладатель: Стерлитамакское акционерное общество «Каустик». – 5067982/25, заявл. 20.05.1992, опубл. 27.10.1997.
67. Патент на изобретение РФ №2114693, МПК В01J19/32. Многослойная проволочная насадка для тепломассообменных аппаратов и способ ее изготовления / Выборнов В.Г., Лебедев Ю.Н.; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество открытого типа «ВНИИнефтемаш», Выборнов В. Г. – 93007455/25, заявл. 05.02.1993, опубл. 10.07.1998.
68. Патент на изобретение РФ № 2138327, МПК В01J19/32, В32В31/26, В01D3/28, В01D53/18. Регулярная насадка и способ ее изготовления / Бушуев В.М. и др.; заявитель и патентообладатель: Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов. – 96112373/12, заявл. 14.06.1996, опубл. 27.09.1999.
69. Патент на изобретение РФ № 2198727, МПК В01J19/32. Регулярная насадка для противоточного аппарата / Зиберт Г.К., Кащицкий Ю.А., Феоктистова Т.М.; патентообладатель: Зиберт Г.К., Кащицкий Ю.А., Феоктистова Т.М.; заявитель: Дочернее ОАО «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры» ОАО «Газпром» – 2001128469/12, заявл. 23.10.2001, опубл. 20.02.2003.
70. Патент на изобретение РФ № 2208752, МПК F28C3/06, F24H1/10. Способ изготовления насадки для колонн, насадка и объемная сетчатая структура / Нагаока Тадайоси, Мантейфель Рольф П.К.; заявитель и патентообладатель: Нагаока Тадайоси, Мантейфель Рольф П.К. – 2001113685/06, заявл. 18.05.2001, опубл. 20.07.2003.

71. Патент на изобретение РФ №2209664, МПК В01J019/32, В01D053/18. Контактная пластина газа-жидкости и контактное устройство газа-жидкости / Мимура Томио и др.; заявитель и патентообладатель: ТЕКАНСАЙ ЭЛЕКТРИК ПАУЭР КО., ИНК., МИЦУБИСИ ХЕВИ ИНДАСТРИЗ, ЛТД. – 2002106735/12, заявл. 14.03.2002, опубл. 10.08.2003.
72. Патент на изобретение РФ № 2225753, МПК В01J019/32. Насадка для массообменных аппаратов / Арнаутов Ю.А., Сковпень М.С.; заявитель и патентообладатель: ОАО «НИПИгазпереработка» – 2002110697/15, заявл. 22.04.2002, опубл. 20.03.2004.
73. Патент на изобретение РФ № 2226125, МПК В01J19/32. Контактное устройство для массообменных аппаратов / Фетисов В.И. и др.; заявитель и патентообладатель: ЗАО «Каустик». – 2002132540/15, заявл. 28.02.2003, опубл. 27.03.2004.
74. Патент на изобретение РФ № 2229928, МПК В01J19/32, В01D3/28, В01D11/04. Контактное устройство для массообменных аппаратов / Фетисов В.И. и др.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – 2002134886/15, заявл. 23.12.2002, опубл. 10.06.2004.
75. Патент на изобретение РФ № 2257950, МПК В01J19/32. Массообменная насадка для колонных аппаратов / Теляшев Г.Г., Сахаров В.Д., Теляшев Э.Г., Сахаров И.В.; заявитель и патентообладатель: ООО «Инженерная фирма «ПНЭК» – 2004107733/15, заявл. 15.03.2004, опубл. 10.08.2005.
76. Патент на изобретение РФ № 2278728, МПК В01J19/32, В01D45/06. Регулярная насадка для тепломассообменных и сепарационных аппаратов / Зиберт Г.К., Зиберт Р.Г.; заявитель и патентообладатель: Зиберт Г.К., Зиберт Р.Г. – 2004132567/15, заявл. 11.11.2004, опубл. 27.06.2006.

77. Патент на изобретение РФ № 2281156, МПК В01J19/30. Керамический элемент насадки и способ образования слоя элементов насадки / Никнафс Хасан С. и др.; заявитель и патентообладатель: СЭНТ-ГОБЭН КЕРАМИКС энд ПЛАСТИКС, ИНК. – 2005100753/15, заявл. 09.06.2003, опубл. 10.08.2006.
78. Патент на изобретение РФ № 2288778, МПК В01J19/30. Керамический элемент насадки / Никнафс Хасан С., Миллер Роберт Л.; заявитель и патентообладатель: СЭНТ-ГОБЭН КЕРАМИКС энд ПЛАСТИКС, ИНК. – 2004127680/15, заявл. 28.02.2003, опубл. 20.02.2006.
79. Патент на изобретение РФ № 2289472, МПК В01J19/30, В01D53/18. Насадка для теплообменных аппаратов / Кузнецова Н.А., Беренгартен М.Г., Ключенкова М.И.; заявитель и патентообладатель: Московский государственный университет инженерной экологии. – 2005121229/15, заявл. 07.07.2005, опубл. 20.12.2006.
80. Патент на изобретение РФ № 2289473, МПК В01J19/32, В01D3/00, В01F3/04. Спиральная насадка для теплообменных и совмещенных с ними реакционных процессов / Богатырёв В.Ф.; заявитель и патентообладатель: Богатырёв В.Ф. – 2004115769/15, заявл. 24.05.2004, опубл. 20.12.2006.
81. Патент на изобретение РФ № 2290992, МПК В01J19/30, В01D53/18. Элемент насадки для теплообменных аппаратов / Ахметзянов Н. М. и др.; заявитель и патентообладатель: ООО «Инженерно-внедренческий центр «ИНЖЕХИМ» – 2005122751/15, заявл. 18.07.2005, опубл. 10.01.2007.
82. Патент на изобретение РФ № 2291365, МПК F28F25/08. Насадка для теплообменного аппарата / Калатузов В.А.; заявитель и патентообладатель: Калатузов В.А. – 2005119600/06, заявл. 24.06.2005, опубл. 10.01.2007.

83. Патент на изобретение РФ № 2292947, МПК В01J19/32, В01D47/14, В01D53/18. Регулярная переточная насадка и массообменная колонна с этой насадкой / Ахметшин Б.С. и д.р.; заявитель и патентообладатель: ООО «Ямбурггаздобыча» – 2005129279/15, заявл. 21.09.2005, опубл. 10.02.2007.
84. Патент на изобретение РФ № 2300419, МПК В01J19/32, В01D53/18. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Пушнов А.С., Поплавский В.Ю.; заявитель и патентообладатель: Московский государственный университет инженерной экологии – 2005132756/15, заявл. 25.10.2005, опубл. 10.06.2007.
85. Патент на изобретение РФ № 2305596, МПК В01J19/32. Регулярная насадка для сепарационных и тепломассообменных аппаратов / Зиберт Г.К., Дмитриев С.М., Канюка В.П.; заявитель и патентообладатель: Зиберт Г.К. – 2006105737/15, заявл. 27.02.2006, опубл. 10.09.2007.
86. Патент на изобретение РФ № 2336943, МПК В01J19/32, F25J1/00. Чередующаяся насадка большой емкости в одной и той же секции обменной колонны / Сундер Свамианатхан; заявитель и патентообладатель: ЭР ПРОДАКТС ЭНД КЕМИКАЛЗ, ИНК. – 2007103259/15, заявл. 26.01.2007, опубл. 27.10.2008.
87. Патент на изобретение РФ № 2338586, МПК В01J19/32, F28F25/08. Регулярная структурированная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Пушнов А.С., Беренгартен М.Г., Рябушенко А.С.; заявитель и патентообладатель: Московский государственный университет инженерной экологии – 2007121573/15, заявл. 09.06.2007, опубл. 20.11.2008.
88. Патент на изобретение РФ № 2339442, МПК В01J19/32, В01D53/18. Насадка ректификационной колонны / Козлов А.В., Ярошенко М.В.,

- Бадур А.Ш.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО «Воронежское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт)» – 2006135063/15, заявл. 03.10.2006, опубл. 27.11.2008.
89. Патент на изобретение РФ № 2359749, МПК В01J19/32. Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов / Беренгартен М.Г., Пушнов А.С., Рябушенко А.С.; заявитель и патентообладатель: Московский государственный университет инженерной экологии – 2007121574/15, заявл. 09.06.2007, опубл. 27.06.2009.
90. Патент на изобретение РФ № 2360199, МПК F28F25/08. Насадка для тепломассообменного аппарата / Арефьев Ю.И. и др.; заявитель и патентообладатель: ООО «ТЕХВОДПОЛИМЕР» – 2007146346/06, заявл. 13.12.2007, опубл. 27.06.2009.
91. Патент на изобретение РФ № 2370311, МПК В01J19/30. Насадка для массообменных аппаратов / Муравьев Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель: ООО «ГИПРОХИМ» – 2008107736/15, заявл. 03.03.2008, опубл. 20.10.2009.
92. Патент на изобретение РФ № 2384362, МПК В01J19/32. Регулярная насадка / Тютюник Г.Г., Аджиев А.Ю., Бойко С.И., Литвиненко А.В.; заявитель и патентообладатель: ОАО «НИПИгазпереработка» – 2008151482/15, заявл. 24.12.2008, опубл. 20.03.2010.
93. Патент на изобретение РФ № 2398627, МПК В01J19/30. Насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Пушнов А.С., Чиж К.В., Тимошин А.С.; заявитель и патентообладатель: Московский государственный университет инженерной экологии – 2009108189/15, заявл. 10.03.2009, опубл. 10.09.2010.
94. 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.
95. 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.
 96. Патент на изобретение РФ №2480275, МПК В01J19/32, В01D53/18. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Пушнов А.С., Харитонов А.А., Лагуткин М.Г.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет» – 2011123436/05, заявл. 09.06.2011, опубл. 27.04.2013.
 97. Патент на изобретение SU 1375303 A1, МПК В01D53/20. Массообменный аппарат / Любченков П.П. и др.; патентообладатель: СССР; заявитель: Краснодарский политехнический институт – 4129821, заявл. 17.06.1986, опубл. 23.02.1988.
 98. Пушнов, А.С. Влияние взаимного расположения смежных каналов между соседними гофрированными листами регулярной насадки на эффективность процесса испарительного охлаждения. / Пушнов А.С., Лозовая Н.П. // Химическая технология. №1. – 2012. – с. 59-62.
 99. Пушнов, А.С. Влияние гидравлического сопротивления и геометрических параметров насыпных насадок на эффективность осуществления процессов тепло и массообмена. / Пушнов А.С., Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г. // Химическая промышленность сегодня. – №4. – 2012. – с. 29-32.
 100. Протоdjяконов, И.О. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость. / Протоdjяконов И.О., Люблинская – Л. : Наука, 1990. – 352 с.
 101. Пушнов, А.С. Влияние геометрии каналов регулярной керамической насадки на гидродинамику тепломассообменных процессов./ Пушнов

А.С и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №6 – 2008. – с. 3-4.

102. Повтарев, И.А. Абсорбция CO_2 раствором диэтаноламина в колонном аппарате с высокоэффективной пакетной вихревой насадкой / Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. – № 1. – С. 15-16.
103. Поройко, Т.А. О времени выхода в неустойчивый конвективный режим нестационарного процесса абсорбции газа / Поройко Т.А., Скурыгин Е.Ф.// Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 4. – № 4 (62). – С. 37-41.
104. Пушнов, А.С. Гидродинамика миникольцевых насадок из полимерного материала. / Пушнов А.С., Соколов А.С., Сидельников И.И., Курбатова Е.А., Митрофанова Е.Г. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – № 5. – 2014. – с. 40-42.
105. Пушнов, А.С. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена. / Пушнов А.С., Микуленок И.О., Севрюков А.С., Беренгартен М.Г. // Химическая технология. – №4. – 2014. – с. 244-250.
106. Поройко, Т.А. Влияние толщины слоя жидкости на неустойчивость процесса абсорбции / Поройко Т.А., Скурыгин Е.Ф.// Теоретические основы химической технологии. 2013. – Т. 47. – № 6. – С. 618.
107. Погодаева, С.Д. О выборе оптимальной температуры процесса абсорбции / Погодаева С.Д. // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова. – 2013. – С. 783-785.
108. Петров, В.И. Разработка, внедрение и испытание промышленной установки для абсорбции аммиака в производстве минеральных удобрений.

- ний на ОАО «Салаватнефтеоргсинтез», г. Салават / Петров В.И., Махоткин А.Ф. // Башкирский химический журнал. 2007. – Т. 14. – № 4. – С. 54-56.
109. Пушнов, А.С. Гидродинамика растекания струи жидкости по гофрированной поверхности регулярной насадки с просечными элементами. / Пушнов А.С., Городилов А.А., Беренгартен М.Г. // Химическая технология, №6. – 2014. – с. 364-370.
110. Пушнов, А.С. О влиянии высоты ярусов регулярной насадки на эффективность процессов тепло- и массоотдачи. / Пушнов А.С., Цурикова Н.П., Лагуткин М.Г. // Энергосбережение и водоподготовка. №1 – 2012. – с. 42-46.
111. Пятничко, А.И. Сравнительный анализ эффективности способов извлечения диоксида углерода из технологических газов. / Пятничко А.И., Иванов Ю.В., Жук Г.В., Онопа Л.Р. // Технические газы. № 4 (2014) – 2014. – с. 58-66.
112. Повтарев, И.А. Гидродинамика и массообмен в колонном аппарате с пакетной вихревой насадкой: автореферат дисс. канд. техн. наук / Повтарев И.А. Иваново, 2013. – 16 с.
113. Петров, В.И. Оптимизация конструкции и режимов работы вихревых контактных устройств. Часть 2. ВКУ со сферическим контактным патрубком. / Петров В.И. // Вестник казанского технологического университета. №12 – 2010. – с. 459-463.
114. Рамм, В.М. Абсорбция газов. М.: РГБ. – 2009. – с. 655.
115. Рамм, В.М. Абсорбционные процессы в химической промышленности. М.-Л., Госхимиздат, 1981, 353 с.
116. Рыжов, С.О. Гидродинамические исследования цепной насадки. / Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. – Химическая промышленность сегодня, 2013, №2, с. 34-42.

117. Соболев А.Ю. Абсорбция оксидов углерода на установках с насадочным абсорбером. / Соболев А.Ю., Музипов Х.Н. // Нефтепромысловое дело. №1 – 2014. – с. 42-45.
118. Сокол, Б.А. Насадка массообменных колонн / Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В.// ИНФОХИМ, М. – 2009. – 358 с.
119. Степыкин, А.В. Экспериментальное исследование гидродинамических режимов работы блочно-модульной тепло-массообменной насадки. / Степыкин А.В., Сидягин А.А. // Современные проблемы науки и образования. №5 – 2014. – с.224.
120. Тимофеев, А.В. Влияние структуры поверхности регулярной насадки на ее гидравлическое сопротивление и массообменную способность / Тимофеев А.В., Гурский М.М., Романченко Л.Я. // Химическая промышленность, 1980, №6, 51-52 с.
121. Ульянов, Б.А. Процессы и аппараты химической технологии. / Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г. – Ангарск.: АГТА. – 2006. – 744 с.
122. Хафизов, Ф.Ш. Конструкции регулярных насадок для массообменных процессов в колонных аппаратах. / Хафизов Ф.Ш. и др. // Химическая промышленность, т. 81 (№5) – 2004. – с. 236-241.
123. Хафизов, Ф.Ш. Новая конструкция регулярной двутавровой насадки. / Хафизов Ф.Ш., Фаткуллин Р.Н., Фетисов В.И. // Химическое и нефтегазовое машиностроение (№6) – 2005. – с. 11-12.
124. Хмелёв, В.Н. Исследование процесса взаимодействия кавитационной области с границей раздела фаз для выявления эффективных режимов ультразвуковой интенсификации физико-химических процессов. / Хмелёв В.Н. и др. // Южно-Сибирский научный вестник. № 3 (7) – 2014. – с. 92-96.

125. Химическая энциклопедия. Под ред. И.Л. Кнунянца. Т. 3. – М.: Советская энциклопедия, 1992. – с. 106.
126. Atchariyawut S. Mass transfer study and modeling of gas-liquid membrane contacting process by multistage cascade model for CO₂ absorption. / Atchariyawut S., Jiraratananon R., Wang R. // Separation and purification technology. Volume 63, Number 1 – 2008. – p. 15-22.
127. Bravo, J. L. Mass Transfer in Gauze Packings / J. L. Bravo, J. A. Rocha, J. R. Fair // Hydrocarbon Process. 1985. V. 64, No.1. p. 91-100.
128. Bravo, J. L. Pressure Drop in Structured Packings / J. L. Bravo, J. A. Rocha, J. R. Fair // Hydrocarbon Process. 1986. V. 56, No 3. p. 45-53.
129. Brinkmann U. Hydrodynamic analogy approach for modelling reactive absorption. / Brinkmann U., Janzen A., Kenig E.Y. // Chemical engineering journal. Volume 250 – 2014. – p. 342-353.
130. Carpani, R. Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas-Absorption / R. Carpani, M.T. Roxburgh // Canad J. Chem. Eng. 1958. – V.36. – p.73-81.
131. Danckwerts, P.V. Significance of liquid film coefficients in gas absorption / P.V. Danckwerts // Ind. Eng. Chem. 1951. V. 43, No. 6. p. 1460-1467.
132. Cheremisinoff, N.P. Handbook of chemical processing equipment. / Cheremisinoff N.P. – 2000 – 535 p.
133. Favre E. Membrane contactors for intensified post-combustion carbon dioxide capture by gas-liquid absorption processes. / Favre E., Svendsen H.F. // Journal of membrane science. Volume 407-408 – 2012. – p. 1-7.
134. Haroun Y. Direct numerical simulation of reactive absorption in gas-liquid flow on structured packing using interface capturing method. / Haroun Y., Legendre D., Raynal L. // Chemical engineering science. Volume 65, Number 1 – 2010. – p. 351-356.

135. Jia Z. Preparation of nanoparticles with a continuous gas-liquid membrane contactor: absorption process. / Jia Z., Chang Q., Qin J., Sun H. // Journal of membrane science. Volume 352, Number 1-2 – 2010. – p. 50-54.
136. Linek V. Mechanism of gas absorption enhancement in presence of fine solid particles in mechanically agitated gas-liquid dispersion effect of molecular diffusivity. / Linek V., Korda M., Soni M. // Chemical engineering science. Volume 63, Number 21. – 2008. – p. 5120-5128.
137. Maceiras R. Effect of bubble contamination on gas-liquid mass transfer coefficient on CO₂ absorption in amine solutions. / Maceiras R., Alves S.S., Cancela M.A., Álvarez E. // Chemical engineering journal. Volume 137, Number 2 – 2008. – p. 422-427.
138. Marocco L. Modeling of the fluid dynamics and SO₂ absorption in a gas-liquid reactor. / Marocco L. // Chemical engineering journal. – 2010.
139. Nakov, Sv. Ts. Pressure drop of high performance random Intalox Metal Tower Packing. / Sv.Ts. Nakov, D.B. Dzhonova-Atanasova, N.N. Kolev // Bulgarian Chemical Communications, Volume 44, Number 4 – 2012. – p. 283-288.
140. Nguyen P.T. A dense membrane contactor for intensified CO₂ gas/liquid absorption in post-combustion capture. / Nguyen P.T. and others // Journal of membrane science. Volume 377, Number 1-2 – 2011. – p. 261-272.
141. Olujic, Z. Stretching the Capacity of Structured Packings / Z. Olujic, H. Jansen, B. Kaibel, T. Rietfort, E. Zieh // Ind. Eng. Chem. Res. 2001. V. 40, p. 6172-6180.
142. Park H.H. Absorption of SO₂ from flue gas using PVDF hollow fiber membranes in a gas-liquid contactor. / Park H.H., Deshwal B.R., Kim I.W., Lee H.K. // Journal of membrane science. Volume 319, Number 1-2 – 2008. – p. 29-37.

143. Westerterp, K.R. Interfacial areas in agitated gas-liquid contactors / K.R. Westerterp, L.L. van Dierendonck, J.A. de Kraa// Chem. Engng. Sci. 18, 1963, p. 157-176.
144. Zhang H.-Y. Theoretical and experimental studies of membrane wetting in the membrane gas-liquid contacting process for CO₂ absorption. / Zhang H.-Y., Wang R., Liang D.T., Tay J.H. // Journal of membrane science. Volume 308, Number 1-2 – 2008. – p. 162-170.

Приложение 1
Таблица 1

Результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления сухих колец Рашига (15×15×2)

№ эксперимента	Средняя скорость воздуха в подводящей трубе, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Коэффициент наклона микроманометра	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, относенное к 1 м высоты, Па/м	Коэффициент сопротивления сухой насадки	Re _г
1	1,94	29,18	0,46	0,20	64,4	135,55	4,63	339
2	2,77	41,64	0,65	0,20	117,7	247,79	4,16	484
3	3,39	51,00	0,80	0,20	169,1	355,81	3,98	592
4	3,98	59,95	0,94	0,20	233,4	491,35	3,98	696
5	4,41	66,44	1,04	0,20	281,7	593,01	3,91	772
6	4,83	72,78	1,14	0,20	317,9	669,25	3,68	845
7	5,22	78,61	1,24	0,20	376,2	792,09	3,73	913
8	5,53	83,28	1,31	0,20	416,5	876,81	3,68	968
9	5,87	88,33	1,39	0,20	464,8	978,47	3,65	1026

Таблица 2

Результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления сухой регулярной ленточной насадки
(модификация 1)

№ экс- пери- мента	Средняя ско- рость воздуха в подводящей трубе, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведен- ная скорость газа в ко- лонне, м/с	Коэффици- ент накло- на микро- манометра	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па	Гидравличе- ское сопротив- ление сухой насадки, отне- сенное к 1 м высоты, Па/м	Коэффициент сопротивле- ния сухой на- садки	Re _г
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,09	46,51	0,20	0,2	13,08	16,55	9,9	217
2	4,45	66,97	0,29	0,2	28,17	35,66	10,3	312
3	5,45	82,02	0,35	0,2	41,25	52,21	10,1	382
4	6,23	93,87	0,40	0,2	54,32	68,77	10,1	437
5	6,97	104,95	0,45	0,2	69,41	87,87	10,4	489
6	7,63	114,97	0,49	0,2	81,49	103,15	10,1	535
7	8,17	123,06	0,53	0,2	92,55	117,15	10,0	573
8	8,74	131,56	0,56	0,2	105,61	133,71	10,0	613
9	9,27	139,54	0,60	0,2	114,72	145,17	9,7	650
10	9,77	147,09	0,63	0,2	128,81	163,11	9,8	685
11	10,24	154,27	0,66	0,2	140,80	178,28	9,7	718
12	10,70	161,13	0,69	0,2	158,92	201,20	10,1	750
13	11,14	167,71	0,72	0,2	171,13	216,48	10,0	781
14	11,56	174,04	0,74	0,2	181,12	229,22	9,8	811
15	11,96	180,15	0,77	0,2	191,12	241,95	9,7	839

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	12,35	186,06	0,79	0,2	203,2	257,23	9,7	867
17	12,73	191,78	0,82	0,2	221,3	280,15	9,9	893
18	13,10	197,34	0,84	0,2	235,4	297,98	9,9	919
19	13,46	202,75	0,87	0,2	247,5	313,26	9,9	944
20	13,81	208,02	0,89	0,2	271,6	343,82	10,3	969

Таблица 3

Результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления сухой регулярной ленточной насадки
(модификация 2)

№ эксперимента	Средняя скорость воздуха в подводящей трубе, м/с	Диаметр трубы, м	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Коэффициент наклона микроманометра	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, отнесенное к 1 м высоты, Па/м	Коэффициент сопротивления сухой насадки	Re _г
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2,17	0,073	32,62	0,14	0,2	4,02	5,03	4,37	101
2	3,39	0,073	51,00	0,23	0,2	8,05	10,06	3,57	157
3	4,88	0,073	73,42	0,33	0,2	14,08	17,61	3,02	227
4	6,03	0,073	90,75	0,40	0,2	20,12	25,15	2,82	280
5	7,18	0,073	108,08	0,48	0,2	25,15	31,44	2,49	334
6	7,64	0,073	115,07	0,51	0,2	28,17	35,21	2,46	355
7	8,19	0,073	123,40	0,55	0,2	30,18	37,76	2,29	381
8	8,74	0,073	131,68	0,59	0,2	36,22	45,27	2,41	406
9	9,68	0,073	145,74	0,65	0,2	40,24	50,31	2,19	450
10	10,35	0,073	155,81	0,69	0,2	44,26	55,33	2,11	481
11	10,84	0,073	163,28	0,73	0,2	48,29	60,36	2,09	504
12	11,15	0,073	167,86	0,75	0,2	50,30	62,88	2,06	518
13	11,65	0,073	175,44	0,78	0,2	56,34	70,42	2,11	542
14	12,37	0,073	186,22	0,83	0,2	59,35	74,19	1,98	575
15	12,75	0,073	191,95	0,85	0,2	62,37	77,97	1,95	593

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	13,12	0,073	197,52	0,88	0,2	70,42	88,03	2,08	610
17	13,41	0,073	201,86	0,89	0,2	72,43	90,54	2,05	810
18	13,76	0,073	207,16	0,92	0,2	74,44	93,06	2,00	853
19	14,17	0,073	213,35	0,95	0,2	78,47	98,09	1,99	1019

Таблица 4

Гидравлическое сопротивление орошаемой ленточной насадки (модификация 1) (Па/м)

Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)					
	5,32	10,99	16,79	23,37	30,14	33,63
0,20	30,5	39,4	44,5	49,6	53,9	56,5
0,28	68,7	77,6	82,7	94,2	103,1	112,0
0,35	109,5	119,7	129,8	140,0	150,2	155,3
0,40	129,8	145,1	160,4	173,1	180,8	185,9
0,45	152,8	170,6	183,3	201,2	219,0	241,9
0,49	160,4	196,1	221,5	247,0	275,0	292,8
0,53	216,4	239,4	259,7	290,3	318,3	338,7
0,57	254,6	272,5	287,7	318,3	356,5	374,3
0,60	272,5	313,2	318,3	356,5	—	—
0,64	297,9	323,4	343,8	—	—	—

Таблица 5

Результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки
(модификация 1)

№ экс-перимента	Средняя скорость воздуха в подводящей трубе, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Расход жидкости, м ³ /ч	Коэф-фициент наклона трубки микроманометра	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, отнесенное к 1м высоты, Па/м	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·с)	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3,13	47,17	0,20	0,346	0,2	24,1	30,5	0,0014	5,32
2	3,13	47,17	0,20	0,715	0,2	31,1	39,4	0,0030	10,99
3	3,13	47,17	0,20	1,092	0,2	35,2	44,5	0,0046	16,79
4	3,13	47,17	0,20	1,521	0,2	39,2	49,6	0,0064	23,37
5	3,13	47,17	0,20	1,960	0,2	42,6	53,9	0,0083	30,14
6	3,13	47,17	0,20	2,187	0,2	44,6	56,5	0,0093	33,63
7	4,43	66,71	0,28	0,346	0,2	54,3	68,7	0,0014	5,32
8	4,43	66,71	0,28	0,715	0,2	61,3	77,6	0,0030	10,99
9	4,43	66,71	0,28	1,092	0,2	65,3	82,7	0,0046	16,79
10	4,43	66,71	0,28	1,521	0,2	74,4	94,2	0,0064	23,37
11	4,43	66,71	0,28	1,960	0,2	81,4	103,1	0,0083	30,14
12	4,43	66,71	0,28	2,187	0,2	88,5	112,0	0,0093	33,63
13	5,42	81,70	0,35	0,346	0,2	86,5	109,5	0,0014	5,32
14	5,42	81,70	0,35	0,715	0,2	94,5	119,7	0,0030	10,99

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	5,42	81,70	0,35	1,092	0,2	102,6	129,8	0,0046	16,79
16	5,42	81,70	0,35	1,521	0,2	110,6	140,0	0,0064	23,37
17	5,42	81,70	0,35	1,960	0,2	118,7	150,2	0,0083	30,14
18	5,42	81,70	0,35	2,187	0,2	122,7	155,3	0,0093	33,63
19	6,26	94,34	0,40	0,346	0,2	102,6	129,8	0,0014	5,32
20	6,26	94,34	0,40	0,715	0,2	114,6	145,1	0,0030	10,99
21	6,26	94,34	0,40	1,092	0,2	126,7	160,4	0,0046	16,79
22	6,26	94,34	0,40	1,521	0,2	136,8	173,1	0,0064	23,37
23	6,26	94,34	0,40	1,960	0,2	142,8	180,8	0,0083	30,14
24	6,26	94,34	0,40	2,187	0,2	146,8	185,9	0,0093	33,63
25	7,00	105,47	0,45	0,346	0,2	120,7	152,8	0,0014	5,32
26	7,00	105,47	0,45	0,715	0,2	134,8	170,6	0,0030	10,99
27	7,00	105,47	0,45	1,092	0,2	144,8	183,3	0,0046	16,79
28	7,00	105,47	0,45	1,521	0,2	158,9	201,2	0,0064	23,37
29	7,00	105,47	0,45	1,960	0,2	173,0	219,0	0,0083	30,14
30	7,00	105,47	0,45	2,187	0,2	191,1	241,9	0,0093	33,63
31	7,67	115,54	0,49	0,346	0,2	126,7	160,4	0,0014	5,32
32	7,67	115,54	0,49	0,715	0,2	154,9	196,1	0,0030	10,99
33	7,67	115,54	0,49	1,092	0,2	175,0	221,5	0,0046	16,79
34	7,67	115,54	0,49	1,521	0,2	195,1	247,0	0,0064	23,37
35	7,67	115,54	0,49	1,960	0,2	217,2	275,0	0,0083	30,14
36	7,67	115,54	0,49	2,187	0,2	231,3	292,8	0,0093	33,63
37	8,29	124,80	0,53	0,346	0,2	171,0	216,4	0,0014	5,32

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	8,29	124,80	0,53	0,715	0,2	189,1	239,4	0,0030	10,99
39	8,29	124,80	0,53	1,092	0,2	205,2	259,7	0,0046	16,79
40	8,29	124,80	0,53	1,521	0,2	229,3	290,3	0,0064	23,37
41	8,29	124,80	0,53	1,960	0,2	251,5	318,3	0,0083	30,14
42	8,29	124,80	0,53	2,187	0,2	267,5	338,7	0,0093	33,63
43	8,86	133,41	0,57	0,346	0,2	201,2	254,6	0,0014	5,32
44	8,86	133,41	0,57	0,715	0,2	215,2	272,5	0,0030	10,99
45	8,86	133,41	0,57	1,092	0,2	227,3	287,7	0,0046	16,79
46	8,86	133,41	0,57	1,521	0,2	251,5	318,3	0,0064	23,37
47	8,86	133,41	0,57	1,960	0,2	281,6	356,5	0,0083	30,14
48	8,86	133,41	0,57	2,187	0,2	295,7	374,3	0,0093	33,63
49	9,40	141,50	0,60	0,346	0,2	215,2	272,5	0,0014	5,32
50	9,40	141,50	0,60	0,715	0,2	247,4	313,2	0,0030	10,99
51	9,40	141,50	0,60	1,092	0,2	251,5	318,3	0,0046	16,79
52	9,40	141,50	0,60	1,521	0,2	281,6	356,5	0,0064	23,37
53	9,90	149,16	0,64	0,346	0,2	235,4	297,9	0,0014	5,32
54	9,90	149,16	0,64	0,715	0,2	255,5	323,4	0,0030	10,99
55	9,90	149,16	0,64	1,092	0,2	271,6	343,8	0,0046	16,79

Таблица 6

Гидравлическое сопротивление орошаемой ленточной насадки (модификация 2) (Па/м)

Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)			
	5,54	11,40	17,47	27,30
0,13	18,9	20,1	20,1	22,6
0,19	22,6	25,1	26,4	27,6
0,23	30,2	31,4	32,7	35,2
0,26	35,2	37,7	38,9	40,9
0,29	39,0	41,5	43,5	46,5
0,32	45,3	47,7	50,3	55,3
0,35	50,3	52,8	56,5	62,8
0,37	55,3	60,3	63,6	70,4
0,39	60,4	65,3	69,1	76,7
0,41	62,9	70,4	75,4	81,7
0,45	79,2	84,2	89,2	99,3
0,49	88,0	94,3	100,6	113,2
0,51	98,1	103,1	108,1	120,7
0,54	106,1	113,2	120,7	133,3
0,57	116,2	125,8	135,8	190,0
0,60	128,1	138,3	148,4	276,7
0,65	156,0	176,1	251,5	–

Таблица 7

Результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления орошаемой ленточной насадки
(модификация 2)

№ эксперимента	Средняя скорость воздуха в подводящей трубе, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Расход жидкости, м ³ /ч	Коэффициент наклона трубки микроманометра	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, отнесенное к 1 м высоты, Па/м	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·с)	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11
1	1,96	29,44	0,13	0,346	0,2	15,1	18,8	0,0015	5,53
2	1,96	29,44	0,13	0,715	0,2	16,1	20,1	0,0032	11,44
3	1,96	29,44	0,13	1,092	0,2	16,1	20,1	0,0049	17,47
4	1,96	29,44	0,13	1,704	0,2	18,1	22,6	0,0076	27,26
5	2,77	41,64	0,19	0,346	0,2	18,1	22,6	0,0015	5,53
6	2,77	41,64	0,19	0,715	0,2	20,1	25,1	0,0032	11,44
7	2,77	41,64	0,19	1,092	0,2	21,1	26,4	0,0049	17,47
8	2,77	41,64	0,19	1,704	0,2	22,1	27,6	0,0076	27,26
9	3,39	51,00	0,23	0,346	0,2	24,1	30,1	0,0015	5,53
10	3,39	51,00	0,23	0,715	0,2	25,1	31,4	0,0032	11,44

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	3,39	51,00	0,23	1,092	0,2	26,1	32,7	0,0049	17,47
12	3,39	51,00	0,23	1,704	0,2	28,1	35,2	0,0076	27,26
13	3,91	58,89	0,26	0,346	0,2	28,1	35,2	0,0015	5,53
14	3,91	58,89	0,26	0,715	0,2	30,1	37,7	0,0032	11,44
15	3,91	58,89	0,26	1,092	0,2	31,1	38,9	0,0049	17,47
16	3,91	58,89	0,26	1,704	0,2	32,8	40,9	0,0076	27,26
17	4,37	65,84	0,29	0,346	0,2	31,1	38,9	0,0015	5,53
18	4,37	65,84	0,29	0,715	0,2	33,2	41,5	0,0032	11,44
19	4,37	65,84	0,29	1,092	0,2	34,8	43,5	0,0049	17,47
20	4,37	65,84	0,29	1,704	0,2	37,2	46,5	0,0076	27,26
21	4,79	72,12	0,32	0,346	0,2	36,2	45,2	0,0015	5,53
22	4,79	72,12	0,32	0,715	0,2	38,2	47,7	0,0032	11,44
23	4,79	72,12	0,32	1,092	0,2	40,2	50,3	0,0049	17,47
24	4,79	72,12	0,32	1,704	0,2	44,2	55,3	0,0076	27,26
25	5,17	77,90	0,35	0,346	0,2	40,2	50,3	0,0015	5,53
26	5,17	77,90	0,35	0,715	0,2	42,2	52,8	0,0032	11,44
27	5,17	77,90	0,35	1,092	0,2	45,2	56,5	0,0049	17,47
28	5,17	77,90	0,35	1,704	0,2	50,3	62,8	0,0076	27,26
29	5,53	83,28	0,37	0,346	0,2	44,2	55,3	0,0015	5,53

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	5,53	83,28	0,37	0,715	0,2	48,2	60,3	0,0032	11,44
31	5,53	83,28	0,37	1,092	0,2	50,9	63,6	0,0049	17,47
32	5,53	83,28	0,37	1,704	0,2	56,3	70,4	0,0076	27,26
33	5,87	88,33	0,39	0,346	0,2	48,2	60,3	0,0015	5,53
34	5,87	88,33	0,39	0,715	0,2	52,3	65,3	0,0032	11,44
35	5,87	88,33	0,39	1,092	0,2	55,3	69,1	0,0049	17,47
36	5,87	88,33	0,39	1,704	0,2	61,3	76,7	0,0076	27,26
37	6,18	93,11	0,41	0,346	0,2	50,3	62,8	0,0015	5,53
38	6,18	93,11	0,41	0,715	0,2	56,3	70,4	0,0032	11,44
39	6,18	93,11	0,41	1,092	0,2	60,3	75,4	0,0049	17,47
40	6,18	93,11	0,41	1,704	0,2	65,3	81,7	0,0076	27,26
41	6,77	102,00	0,45	0,346	0,2	63,3	79,2	0,0015	5,53
42	6,77	102,00	0,45	0,715	0,2	67,4	84,2	0,0032	11,44
43	6,77	102,00	0,45	1,092	0,2	71,4	89,2	0,0049	17,47
44	6,77	102,00	0,45	1,704	0,2	79,4	99,3	0,0076	27,26

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	7,32	110,17	0,49	0,346	0,2	70,4	88,0	0,0015	5,53
31	7,32	110,17	0,49	0,715	0,2	75,4	94,3	0,0032	11,44
32	7,32	110,17	0,49	1,092	0,2	80,4	100,6	0,0049	17,47
33	7,32	110,17	0,49	1,704	0,2	90,5	113,2	0,0076	27,26
34	7,57	114,04	0,51	0,346	0,2	78,4	98,0	0,0015	5,53
35	7,57	114,04	0,51	0,715	0,2	82,4	103,1	0,0032	11,44
36	7,57	114,04	0,51	1,092	0,2	86,5	108,1	0,0049	17,47
37	7,57	114,04	0,51	1,704	0,2	96,5	120,7	0,0076	27,26
38	8,06	121,40	0,54	0,346	0,2	84,5	105,6	0,0015	5,53
39	8,06	121,40	0,54	0,715	0,2	90,5	113,2	0,0032	11,44
40	8,06	121,40	0,54	1,092	0,2	96,5	120,7	0,0049	17,47
41	8,06	121,40	0,54	1,704	0,2	106,6	133,3	0,00757	27,26
42	8,52	128,35	0,57	0,346	0,2	92,5	115,6	0,0015	5,53
43	8,52	128,35	0,57	0,715	0,2	100,6	125,7	0,0031	11,44
44	8,52	128,35	0,57	1,092	0,2	108,6	135,8	0,0048	17,47

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	8,52	128,35	0,57	1,520	0,2	130,7	163,4	0,0067	24,32
31	8,96	134,93	0,60	0,346	0,2	102,6	128,2	0,0015	5,53
32	8,96	134,93	0,60	0,715	0,2	110,6	138,3	0,0031	11,44
33	8,96	134,93	0,60	1,092	0,2	118,7	148,3	0,0048	17,47
34	8,96	134,93	0,60	1,74	0,2	221,3	276,6	0,0077	27,84
35	9,78	147,22	0,65	0,346	0,2	124,7	155,9	0,0015	5,53
36	9,78	147,22	0,65	0,715	0,2	140,8	176,0	0,0031	11,44
37	9,78	147,22	0,65	1,092	0,2	201,2	251,5	0,0048	17,47
38	9,78	147,22	0,65	1,740	0,2	352,1	440,1	0,0077	27,84

Таблица 8

Гидравлическое сопротивление орошаемых колец Рашига (15×15×2) (Па/м)

Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)			
	9,794	19,589	24,939	30,290
0,47	304,97	389,69	525,23	914,93
0,57	473,45	633,98	850,78	1310,12
0,66	745,49	897,98	1270,73	1863,74
0,73	843,71	1296,91	1619,26	2619,84
0,81	1202,96	1846,80	2626,18	3558,06

Таблица 9

Результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления орошаемых колец Рашига (15×15×2)
(Па/м)

№ эксперимента	Средняя скорость воздуха в подводящей трубе, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Приведенная скорость газа в колонне, м/с	Расход жидкости, м ³ /ч	Коэффициент наклона трубки микроманометра	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, относенное к 1 м высоты, Па/м	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·с)	Плотность орошения, м ³ /(м ² ·ч)
1	1,98	29,83	0,47	0,173	0,8	144,8	304,9	0,0027	9,794
2	1,98	29,83	0,47	0,346	0,8	185,1	389,6	0,0054	19,589
3	1,98	29,83	0,47	0,440	0,8	249,4	525,2	0,0069	24,939
4	1,98	29,83	0,47	0,535	0,8	434,5	914,9	0,0084	30,290
5	2,80	42,19	0,66	0,173	0,8	354,1	745,4	0,0027	9,794
6	2,80	42,19	0,66	0,346	0,8	426,5	897,9	0,0054	19,589
7	2,80	42,19	0,66	0,440	0,8	603,6	1270,7	0,0069	24,939
8	2,80	42,19	0,66	0,535	0,8	885,2	1863,7	0,0084	30,290
9	3,43	51,67	0,81	0,173	0,8	571,4	1202,9	0,0027	9,794
10	3,43	51,67	0,81	0,346	0,8	877,2	1846,8	0,0054	19,589
11	3,43	51,67	0,81	0,440	0,8	1247,4	2626,1	0,0069	24,939
12	3,43	51,67	0,81	0,535	0,8	1690,0	3558,0	0,0084	30,290

Приложение 2

Таблица 1

Результаты расчета распределения концентрации компонентов по высоте слоя ленточной насадки (приближение 1)

компонент	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	g _j	1	1,07	1,15	1,22	1,30	1,37	1,44	1,52	1,59	1,67	1,74	1,81	1,89	1,96	2,04	2,11	2,18	2,26	2,33	2,41	2,48
	f _j	0,972	0,975	0,978	0,980	0,982	0,984	0,986	0,988	0,989	0,991	0,992	0,993	0,994	0,995	0,996	0,997	0,997	0,998	0,999	0,999	1
	t _j	33,27	28,56	25,32	23,24	21,94	21,15	20,68	20,40	20,23	20,14	20,08	20,05	20,03	20,02	20,01	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Аммиак	m _{1,j}	0,735	0,722	0,710	0,698	0,686	0,673	0,661	0,649	0,637	0,625	0,612	0,600	0,588	0,576	0,563	0,551	0,539	0,527	0,514	0,502	0,490
	r _j	0,231	0,234	0,256	0,277	0,298	0,319	0,339	0,360	0,380	0,401	0,400	0,441	0,461	0,481	0,501	0,521	0,541	0,561	0,581	0,600	0,628
	p _j	1,9992	1,9985	1,9986	1,9987	1,9988	1,9988	1,9989	1,9989	1,9990	1,9990	1,9991	1,9991	1,9991	1,9992	1,9992	1,9992	1,9992	1,9993	1,9993	1,9993	1,9997
	U _j	0,385	0,383	0,372	0,362	0,351	0,341	0,330	0,320	0,310	0,300	0,300	0,280	0,270	0,259	0,249	0,240	0,230	0,220	0,210	0,200	0,186
	V _j	0,616	0,618	0,628	0,639	0,649	0,660	0,670	0,680	0,691	0,701	0,700	0,721	0,731	0,741	0,751	0,761	0,771	0,781	0,791	0,800	0,814
	A _j	0,98565	0,99234	0,99657	0,99908	1,00045	1,00112	1,00139	1,00144	1,00138	1,00129	1,00122	1,00110	1,00100	1,00091	1,00084	1,00078	1,00072	1,00067	1,00063	1,00059	1,00034
	B _j	0,00738	0,00451	0,00265	0,00150	0,00081	0,00042	0,00021	9,73 · 10 ⁻⁵	4,37 · 10 ⁻⁵	1,87 · 10 ⁻⁵	8,04 · 10 ⁻⁶	3,12 · 10 ⁻⁶	1,15 · 10 ⁻⁶	4,04 · 10 ⁻⁷	1,34 · 10 ⁻⁷	4,24 · 10 ⁻⁸	1,26 · 10 ⁻⁸	3,55 · 10 ⁻⁹	9,44 · 10 ⁻¹⁰	2,36 · 10 ⁻¹⁰	5,40 · 10 ⁻¹¹
	X _j	0,01693	0,01017	0,00574	0,00310	0,00161	0,00080	0,00038	0,00017	7,554 · 10 ⁻⁵	3,171 · 10 ⁻⁵	1,294 · 10 ⁻⁵	4,882 · 10 ⁻⁶	1,754 · 10 ⁻⁶	5,991 · 10 ⁻⁷	1,944 · 10 ⁻⁷	5,98 · 10 ⁻⁸	1,74 · 10 ⁻⁸	4,74 · 10 ⁻⁹	1,18 · 10 ⁻⁹	2,36 · 10 ⁻¹⁰	0
	Y _j	0,35	0,21097	0,11966	0,06541	0,03463	0,01796	0,00933	0,00507	0,00306	0,00216	0,00177	0,00161	0,00154	0,00152	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151
	x _j	0,01645	0,00992	0,00561	0,00304	0,00158	0,00079	0,00037	0,00017	7,47 · 10 ⁻⁵	3,14 · 10 ⁻⁵	1,28 · 10 ⁻⁵	4,85 · 10 ⁻⁶	1,74 · 10 ⁻⁶	5,96 · 10 ⁻⁷	1,94 · 10 ⁻⁷	5,96 · 10 ⁻⁸	1,73 · 10 ⁻⁸	4,73 · 10 ⁻⁹	1,18 · 10 ⁻⁹	2,36 · 10 ⁻¹⁰	0
	C _j	0,9121	0,5500	0,3111	0,1687	0,0877	0,0436	0,0208	0,0095	0,0041	0,0017	0,0007	0,0003	0,0001	0,000033	1,07 · 10 ⁻⁵	3,30 · 10 ⁻⁶	9,61 · 10 ⁻⁷	2,62 · 10 ⁻⁷	6,54 · 10 ⁻⁸	1,31 · 10 ⁻⁸	0
	m _{ср,1j}	2552,9	1976,7	1614,6	1381,4	1218,7	1095,6	995,1	908,0	829,5	757,2	690,5	625,4	564,1	506,4	452,4	402,1	355,3	312,0	271,5	231,2	250
	m _{1,j} '	1,415	1,096	0,895	0,766	0,676	0,607	0,552	0,503	0,460	0,420	0,383	0,347	0,313	0,281	0,251	0,223	0,197	0,173	0,151	0,128	0,139
ММА	m _{2j}	3,317	3,261	3,261	3,205	3,149	3,093	3,038	2,982	2,926	2,870	2,814	2,758	2,703	2,647	2,591	2,535	2,479	2,423	2,368	2,312	2,200
	r _j	0,203	0,207	0,229	0,251	0,273	0,295	0,316	0,337	0,359	0,380	0,401	0,422	0,443	0,464	0,485	0,506	0,526	0,547	0,568	0,588	0,617
	p _j	1,996	1,994	1,994	1,994	1,994	1,995	1,995	1,995	1,995	1,995	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,997	1,997	1,996	1,998
	U _j	0,399	0,397	0,387	0,376	0,365	0,354	0,343	0,332	0,321	0,311	0,300	0,290	0,279	0,269	0,258	0,248	0,237	0,227	0,217	0,206	0,192
	V _j	0,603	0,606	0,616	0,627	0,638	0,649	0,660	0,670	0,681	0,692	0,702	0,713	0,723	0,733	0,744	0,754	0,764	0,775	0,785	0,796	0,810
	A _j	0,936	0,965	0,983	0,995	1,001	1,005	1,007	1,007	1,007	1,006	1,006	1,005	1,005	1,004	1,004	1,004	1,003	1,003	1,003	1,003	1,002
	B _j	0,00218	0,00134	0,00081	0,00048	0,00027	1,48 · 10 ⁻⁴	7,71 · 10 ⁻⁵	3,84 · 10 ⁻⁵	1,83 · 10 ⁻⁵	8,26 · 10 ⁻⁶	3,56 · 10 ⁻⁶	1,45 · 10 ⁻⁶	5,64 · 10 ⁻⁷	2,08 · 10 ⁻⁷	7,24 · 10 ⁻⁸	2,39 · 10 ⁻⁸	7,44 · 10 ⁻⁹	2,18 · 10 ⁻⁹	6,04 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁰	3,7 · 10 ⁻¹¹
	X _j	0,00483	0,00304	0,00182	0,00104	0,00057	0,00030	0,00015	7,17 · 10 ⁻⁵	3,28 · 10 ⁻⁵	1,43 · 10 ⁻⁵	5,94 · 10 ⁻⁶	2,35 · 10 ⁻⁶	8,85 · 10 ⁻⁷	3,16 · 10 ⁻⁷	1,07 · 10 ⁻⁷	3,44 · 10 ⁻⁸	1,04 · 10 ⁻⁸	2,96 · 10 ⁻⁹	7,64 · 10 ⁻¹⁰	1,58 · 10 ⁻¹⁰	0
	Y _j	0,1	0,063	0,038	0,022	0,012	0,007	0,0036	0,0020	0,0012	0,0008	0,00065	0,00058	0,00055	0,00054	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053

Продолжение таблицы 1

DMA	m_{3j}	4,03	3,95	3,87	3,78	3,70	3,61	3,53	3,44	3,36	3,28	3,19	3,11	3,02	2,94	2,86	2,77	2,69	2,60	2,52	2,43	2,35
	r_j	0,128	0,126	0,142	0,158	0,174	0,189	0,205	0,220	0,235	0,251	0,266	0,280	0,295	0,310	0,325	0,340	0,354	0,369	0,384	0,398	0,420
	p_j	1,997	1,994	1,994	1,995	1,995	1,995	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,999
	U_j	0,437	0,438	0,430	0,422	0,414	0,406	0,398	0,391	0,383	0,375	0,368	0,360	0,353	0,345	0,338	0,331	0,323	0,316	0,309	0,301	0,290
	V_j	0,565	0,565	0,573	0,581	0,588	0,596	0,604	0,611	0,619	0,626	0,634	0,641	0,649	0,656	0,664	0,671	0,678	0,686	0,693	0,700	0,711
	A_j	0,94391	0,96310	0,97765	0,98841	0,99609	1,00130	1,00460	1,00649	1,00739	1,00762	1,00745	1,00706	1,00658	1,00606	1,00557	1,00511	1,00470	1,00433	1,00400	1,00371	1,00247
	B_j	0,00158	0,00115	0,00084	0,00059	0,00041	0,00028	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$8,11 \cdot 10^{-6}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$5,23 \cdot 10^{-7}$	$2,42 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	$4,68 \cdot 10^{-8}$	$1,92 \cdot 10^{-8}$
	X_j	0,00482	0,00355	0,00253	0,00175	0,00118	0,00077	0,00049	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$8,61 \cdot 10^{-6}$	$4,26 \cdot 10^{-6}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$9,27 \cdot 10^{-7}$	$4,00 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$4,70 \cdot 10^{-8}$	0
	Y_j	0,1	0,074	0,053	0,037	0,025	0,017	0,011	0,0069	0,0044	0,0028	0,0019	0,0014	0,0010	0,00088	0,00079	0,00074	0,00072	0,00071	0,00070	0,00070	0,0007
TMA	m_{4j}	6,961	6,868	6,775	6,682	6,589	6,496	6,402	6,309	6,216	6,123	6,030	5,937	5,844	5,751	5,658	5,565	5,472	5,379	5,286	5,193	5,100
	r_j	0,082	0,078	0,092	0,105	0,119	0,132	0,145	0,158	0,171	0,184	0,196	0,209	0,221	0,234	0,246	0,259	0,271	0,283	0,296	0,308	0,335
	p_j	1,996	1,992	1,993	1,993	1,993	1,994	1,994	1,994	1,995	1,995	1,995	1,995	1,995	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,996	1,998
	U_j	0,460	0,463	0,456	0,449	0,442	0,435	0,429	0,422	0,416	0,409	0,403	0,397	0,390	0,384	0,378	0,371	0,365	0,359	0,353	0,347	0,333
	V_j	0,542	0,541	0,548	0,555	0,561	0,568	0,574	0,581	0,587	0,593	0,600	0,606	0,612	0,618	0,624	0,631	0,637	0,643	0,649	0,655	0,668
	A_j	0,9195	0,9419	0,9600	0,9745	0,9859	0,9947	1,0012	1,0058	1,0088	1,0105	1,0113	1,0115	1,0112	1,0106	1,0100	1,0092	1,0085	1,0078	1,0072	1,0066	1,0046
	B_j	0,000677	0,000533	0,000418	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$3,43 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$9,19 \cdot 10^{-6}$	$5,62 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$5,97 \cdot 10^{-7}$	$3,18 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$
	X_j	0,00241	0,001948	0,001535	0,00118	0,00089	0,000652	0,000467	0,000327	0,000229	0,0001484	$9,636 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$3,762 \cdot 10^{-5}$	$2,257 \cdot 10^{-5}$	$1,31 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2,028 \cdot 10^{-6}$	$9,24 \cdot 10^{-7}$	$3,202 \cdot 10^{-7}$	0
	Y_j	0,05	0,040	0,032	0,025	0,019	0,0138	0,0100	0,0071	0,0049	0,0034	0,0023	0,00161	0,00112	0,00081	0,00062	0,00050	0,00043	0,00039	0,00037	0,00036	0,00035
	g_j'	1	1,268	1,557	1,822	2,039	2,198	2,306	2,375	2,418	2,444	2,459	2,468	2,474	2,477	2,479	2,480	2,480	2,481	2,481	2,481	2,481
	f_j'	0,9898	0,9930	0,9955	0,9972	0,9983	0,9990	0,9994	0,99964	0,99979	0,99988	0,99993	0,99996	0,9999750	0,9999856	0,9999918	0,9999954	0,9999975	0,9999986	0,9999993	0,9999996	1

Таблица 2

Расчет распределения концентрации компонентов по высоте слоя ленточной насадки (приближение 2)

компонент	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	g _j	1	1,27	1,56	1,82	2,04	2,20	2,31	2,38	2,42	2,44	2,46	2,47	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
	f _j	0,972	0,982	0,989	0,993	0,996	0,997	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1
	t _j	33,27	27,67	24,08	21,95	20,86	20,37	20,16	20,07	20,03	20,02	20,007	20,004	20,002	20,001	20,000	20,0002	20,0001	20,0000	20,0000	20,0000	20
Аммиак	m _{ij}	1,415	1,096	0,895	0,766	0,676	0,607	0,552	0,503	0,460	0,420	0,383	0,347	0,313	0,281	0,251	0,223	0,197	0,173	0,151	0,128	0,139
	r _j	0,174	0,205	0,302	0,395	0,472	0,530	0,570	0,596	0,612	0,622	0,625	0,632	0,635	0,636	0,637	0,638	0,639	0,639	0,639	0,640	0,640
	p _j	1,9916	1,9879	1,9921	1,9948	1,9965	1,9975	1,9982	1,9986	1,9988	1,9989	1,9990	1,9991	1,9992	1,9992	1,9993	1,9993	1,9994	1,9994	1,9994	1,9998	2,0001
	U _j	0,415	0,400	0,350	0,303	0,264	0,235	0,215	0,202	0,194	0,189	0,188	0,184	0,183	0,182	0,181	0,181	0,181	0,181	0,180	0,180	0,180
	V _j	0,590	0,606	0,654	0,699	0,738	0,766	0,786	0,798	0,807	0,811	0,813	0,816	0,818	0,818	0,819	0,819	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820
	A _j	0,97549	0,99389	1,00281	1,00496	1,00417	1,00289	1,00196	1,00140	1,00109	1,00090	1,00080	1,00074	1,00068	1,00063	1,00059	1,00054	1,00050	1,00047	1,00045	1,00019	0,99996
	B _j	0,00748	0,00482	0,00257	0,00111	0,00040	0,00012	0,00003	8,63 · 10 ⁻⁶	2,08 · 10 ⁻⁶	4,85 · 10 ⁻⁷	1,12 · 10 ⁻⁷	2,52 · 10 ⁻⁸	5,65 · 10 ⁻⁹	1,26 · 10 ⁻⁹	2,79 · 10 ⁻¹⁰	6,16 · 10 ⁻¹¹	1,36 · 10 ⁻¹¹	3,00 · 10 ⁻¹²	6,60 · 10 ⁻¹³	1,45 · 10 ⁻¹³	3,10 · 10 ⁻¹⁴
	X _j	0,01693	0,00904	0,00427	0,00170	0,00057	0,00017	0,00005	0,00001	2,711 · 10 ⁻⁶	6,298 · 10 ⁻⁷	1,445 · 10 ⁻⁷	3,253 · 10 ⁻⁸	7,266 · 10 ⁻⁹	1,615 · 10 ⁻⁹	3,578 · 10 ⁻¹⁰	7,90 · 10 ⁻¹¹	1,74 · 10 ⁻¹¹	3,80 · 10 ⁻¹²	8,05 · 10 ⁻¹³	1,451 · 10 ⁻¹³	0
	Y _j	0,35	0,18753	0,08948	0,03643	0,01331	0,00500	0,00244	0,00174	0,00156	0,00152	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151
	x _j	0,01645	0,00887	0,00422	0,00168	0,00057	0,00017	0,00005	0,00001	2,71 · 10 ⁻⁶	6,30 · 10 ⁻⁷	1,45 · 10 ⁻⁷	3,25 · 10 ⁻⁸	7,27 · 10 ⁻⁹	1,62 · 10 ⁻⁹	3,58 · 10 ⁻¹⁰	7,90 · 10 ⁻¹¹	1,74 · 10 ⁻¹¹	3,80 · 10 ⁻¹²	8,05 · 10 ⁻¹³	1,45 · 10 ⁻¹³	0
	C _j	0,9121	0,4918	0,2342	0,0934	0,0317	0,0094	0,0025	0,0006	0,0002	0,000035	0,000008	0,000002	0,0000004	0,0000001	1,98 · 10 ⁻⁸	4,38 · 10 ⁻⁹	9,65 · 10 ⁻¹⁰	2,11 · 10 ⁻¹⁰	4,46 · 10 ⁻¹¹	8,04 · 10 ⁻¹²	0
	m _{ср,ij}	2552,9	1879,7	1485,0	1227,3	1047,0	906,0	786,5	681,8	589,7	509,2	439,4	378,4	325,7	280,2	241,0	207,2	178,1	153,0	131,0	110,4	250,0
	m _{ij} '	1,415	1,042	0,823	0,680	0,581	0,502	0,436	0,378	0,327	0,282	0,244	0,210	0,181	0,155	0,134	0,115	0,099	0,085	0,073	0,061	0,139
ММА	m _{2j}	3,317	3,261	3,261	3,205	3,149	3,093	3,038	2,982	2,926	2,870	2,814	2,758	2,703	2,647	2,591	2,535	2,479	2,423	2,368	2,312	2,200
	r _j	0,155	0,183	0,280	0,373	0,450	0,509	0,549	0,575	0,592	0,602	0,609	0,613	0,615	0,617	0,619	0,620	0,621	0,622	0,622	0,623	0,625
	p _j	1,989	1,982	1,985	1,988	1,991	1,994	1,996	1,997	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,998	1,999
	U _j	0,425	0,412	0,363	0,316	0,276	0,246	0,226	0,213	0,204	0,199	0,196	0,194	0,192	0,191	0,191	0,190	0,190	0,189	0,189	0,189	0,188
	V _j	0,581	0,597	0,645	0,690	0,728	0,757	0,776	0,789	0,797	0,802	0,805	0,807	0,808	0,809	0,810	0,811	0,811	0,811	0,812	0,812	0,813
	A _j	0,940	0,974	0,997	1,007	1,009	1,007	1,005	1,003	1,002	1,002	1,002	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001
	B _j	0,00220	0,00143	0,00078	0,00036	0,00014	4,47 · 10 ⁻⁵	1,31 · 10 ⁻⁵	3,56 · 10 ⁻⁶	9,16 · 10 ⁻⁷	2,28 · 10 ⁻⁷	5,56 · 10 ⁻⁸	1,34 · 10 ⁻⁸	3,19 · 10 ⁻⁹	7,55 · 10 ⁻¹⁰	1,78 · 10 ⁻¹⁰	4,18 · 10 ⁻¹¹	9,80 · 10 ⁻¹²	2,29 · 10 ⁻¹²	5,33 · 10 ⁻¹³	1,2 · 10 ⁻¹³	2,9 · 10 ⁻¹⁴
	X _j	0,00483	0,00270	0,00134	0,00056	0,00020	0,00006	0,00002	4,79 · 10 ⁻⁶	1,22 · 10 ⁻⁶	3,02 · 10 ⁻⁷	7,33 · 10 ⁻⁸	1,76 · 10 ⁻⁸	4,18 · 10 ⁻⁹	9,89 · 10 ⁻¹⁰	2,33 · 10 ⁻¹⁰	5,46 · 10 ⁻¹¹	1,28 · 10 ⁻¹¹	2,95 · 10 ⁻¹²	6,58 · 10 ⁻¹³	1,24 · 10 ⁻¹³	0
	Y _j	0,1	0,056	0,028	0,012	0,005	0,002	0,0009	0,0006	0,0006	0,0005	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053

Продолжение таблицы 2

DMA	m_{ij}	4,03	3,95	3,87	3,78	3,70	3,61	3,53	3,44	3,36	3,28	3,19	3,11	3,02	2,94	2,86	2,77	2,69	2,60	2,52	2,43	2,35
	r_j	0,079	0,086	0,159	0,230	0,290	0,335	0,367	0,387	0,400	0,409	0,414	0,417	0,420	0,421	0,423	0,424	0,425	0,425	0,426	0,427	0,428
	p_j	1,990	1,984	1,987	1,990	1,993	1,995	1,996	1,997	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,463	0,461	0,423	0,387	0,356	0,333	0,317	0,307	0,300	0,296	0,293	0,292	0,290	0,290	0,289	0,288	0,288	0,287	0,287	0,287	0,286
	V_j	0,542	0,547	0,583	0,618	0,647	0,669	0,685	0,695	0,701	0,705	0,708	0,709	0,710	0,711	0,712	0,712	0,713	0,713	0,714	0,714	0,714
	A_j	0,94636	0,97029	0,98977	1,00169	1,00662	1,00727	1,00619	1,00482	1,00372	1,00296	1,00247	1,00217	1,00200	1,00189	1,00183	1,00179	1,00177	1,00176	1,00175	1,00174	1,00122
	B_j	0,00162	0,00129	0,00091	0,00056	0,00031	0,000155	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$	9,99E-07	$4,09 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$6,79 \cdot 10^{-8}$	$2,75 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$4,49 \cdot 10^{-9}$	$1,81 \cdot 10^{-9}$	$7,28 \cdot 10^{-10}$	$2,92 \cdot 10^{-10}$
	X_j	0,00482	0,00324	0,00205	0,00116	0,00060	0,00029	0,00013	$5,64 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$6,92 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$4,58 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$	$7,05 \cdot 10^{-9}$	$2,55 \cdot 10^{-9}$	$7,30 \cdot 10^{-10}$	0
	Y_j	0,1	0,067	0,043	0,025	0,013	0,007	0,003	0,0019	0,0012	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,00071	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,0007
TMA	m_{ij}	6,961	6,868	6,775	6,682	6,589	6,496	6,402	6,309	6,216	6,123	6,030	5,937	5,844	5,751	5,658	5,565	5,472	5,379	5,286	5,193	5,100
	r_j	0,034	0,031	0,096	0,159	0,212	0,252	0,280	0,299	0,310	0,318	0,322	0,326	0,328	0,329	0,330	0,331	0,332	0,333	0,334	0,334	0,335
	p_j	1,987	1,978	1,982	1,986	1,990	1,993	1,995	1,997	1,997	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,486	0,490	0,456	0,423	0,396	0,375	0,361	0,351	0,345	0,341	0,339	0,338	0,336	0,336	0,335	0,335	0,334	0,334	0,333	0,333	0,333
	V_j	0,520	0,521	0,553	0,583	0,609	0,628	0,642	0,650	0,656	0,660	0,662	0,663	0,664	0,665	0,666	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668	0,668
	A_j	0,9239	0,9523	0,9777	0,9957	1,0054	1,0089	1,0089	1,0075	1,0060	1,0047	1,0038	1,0031	1,0027	1,0025	1,0023	1,0022	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0015
	B_j	0,00070	0,000607	0,000477	$3,39 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$7,47 \cdot 10^{-5}$	$4,07 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-6}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$7,60 \cdot 10^{-7}$	$3,84 \cdot 10^{-7}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$9,71 \cdot 10^{-8}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$	$6,09 \cdot 10^{-9}$
	X_j	0,00241	0,001817	0,001301	0,00085	0,00052	0,000297	0,000162	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$4,504 \cdot 10^{-5}$	$2,319 \cdot 10^{-5}$	$1,184 \cdot 10^{-5}$	$6,011 \cdot 10^{-6}$	$3,036 \cdot 10^{-6}$	$1,526 \cdot 10^{-6}$	$7,62 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-7}$	$8,555 \cdot 10^{-8}$	$3,67 \cdot 10^{-8}$	$1,222 \cdot 10^{-8}$	0
	Y_j	0,05	0,038	0,027	0,018	0,011	0,0065	0,0037	0,0021	0,0013	0,0008	0,0006	0,00047	0,00041	0,00038	0,00037	0,00036	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
	g'_j	1	1,337	1,704	2,038	2,263	2,382	2,437	2,461	2,472	2,477	2,479	2,480	2,480	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481
	f'_j	0,9879	0,9922	0,9954	0,9976	0,9989	0,9995	0,9998	0,99991	0,99996	0,99998	0,99999	0,999996	0,999998	0,9999991	0,9999995	0,9999998	0,9999999	0,9999999	1,0	1,0	1,0

Таблица 3

Расчет распределения концентрации компонентов по высоте слоя ленточной насадки (приближение 3)

КОМПОНЕНТ	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	g _j	1	1,34	1,70	2,04	2,26	2,38	2,44	2,46	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	
	f _j	0,972	0,984	0,991	0,996	0,998	0,999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	t _j	33,27	27,36	23,70	21,60	20,64	20,26	20,11	20,05	20,02	20,01	20,005	20,002	20,001	20,001	20,0001	20,0001	20,0001	20	20	20	20	
	m _{1j}	1,415	1,042	0,823	0,680	0,581	0,502	0,436	0,378	0,327	0,282	0,244	0,210	0,181	0,155	0,134	0,115	0,099	0,085	0,073	0,061	0,139	
Аммиак	r _j	0,157	0,201	0,327	0,449	0,539	0,591	0,616	0,628	0,633	0,636	0,637	0,638	0,639	0,639	0,640	0,640	0,640	0,640	0,640	0,640	0,640	
	p _j	1,9898	1,9862	1,9914	1,9947	1,9967	1,9977	1,9983	1,9986	1,9988	1,9989	1,9991	1,9992	1,9993	1,9994	1,9995	1,9996	1,9996	1,9997	1,9997	2,0008	2,0010	
	U _j	0,424	0,402	0,338	0,276	0,231	0,205	0,192	0,186	0,184	0,182	0,182	0,181	0,181	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	
	V _j	0,582	0,605	0,666	0,726	0,771	0,796	0,809	0,814	0,817	0,818	0,819	0,819	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,819	
	A _j	0,97604	0,99556	1,00423	1,00530	1,00376	1,00239	1,00164	1,00126	1,00103	1,00088	1,00075	1,00065	1,00056	1,00048	1,00042	1,00036	1,00031	1,00027	1,00024	0,99955	0,99931	
	B _j	0,00749	0,00486	0,00246	0,00094	0,00028	0,00007	0,00002	3,97 · 10 ⁻⁶	8,94 · 10 ⁻⁷	1,99 · 10 ⁻⁷	4,42 · 10 ⁻⁸	9,77 · 10 ⁻⁹	2,16 · 10 ⁻⁹	4,75 · 10 ⁻¹⁰	1,04 · 10 ⁻¹⁰	2,30 · 10 ⁻¹¹	5,04 · 10 ⁻¹²	1,11 · 10 ⁻¹²	2,43 · 10 ⁻¹³	5,32 · 10 ⁻¹⁴	1,17 · 10 ⁻¹⁴	
	X _j	0,01693	0,00863	0,00380	0,00133	0,00038	0,00010	0,00002	0,00001	1,151 · 10 ⁻⁶	2,562 · 10 ⁻⁷	5,682 · 10 ⁻⁸	1,255 · 10 ⁻⁸	2,766 · 10 ⁻⁹	6,09 · 10 ⁻¹⁰	1,339 · 10 ⁻¹⁰	2,94 · 10 ⁻¹¹	6,44 · 10 ⁻¹²	1,40 · 10 ⁻¹²	2,96 · 10 ⁻¹³	5,314 · 10 ⁻¹⁴	0	
	Y _j	0,35	0,17907	0,07972	0,02879	0,00932	0,00347	0,00197	0,00161	0,00153	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	
	x _j	0,01645	0,00848	0,00377	0,00132	0,00038	0,00010	0,00002	0,00001	1,15 · 10 ⁻⁶	2,56 · 10 ⁻⁷	5,68 · 10 ⁻⁸	1,25 · 10 ⁻⁸	2,77 · 10 ⁻⁹	6,09 · 10 ⁻¹⁰	1,34 · 10 ⁻¹⁰	2,94 · 10 ⁻¹¹	6,44 · 10 ⁻¹²	1,40 · 10 ⁻¹²	2,96 · 10 ⁻¹³	5,31 · 10 ⁻¹⁴	0	
	C _j	0,9121	0,4703	0,2088	0,0732	0,0210	0,0053	0,0012	0,0003	0,0001	0,0000142	0,0000032	0,0000007	0,0000002	3 · 10 ⁻⁸	7,42 · 10 ⁻⁹	1,63 · 10 ⁻⁹	3,57 · 10 ⁻¹⁰	7,77 · 10 ⁻¹¹	1,64 · 10 ⁻¹¹	2,95 · 10 ⁻¹²	0	
	m _{срj}	2552,9	1845,4	1442,2	1178,7	994,6	851,1	731,4	629,1	541,1	465,3	400,2	344,0	295,7	254,2	218,5	187,7	161,3	138,5	118,5	99,8	250	
	m _j [*]	1,415	1,023	0,800	0,654	0,551	0,472	0,406	0,349	0,300	0,258	0,222	0,191	0,164	0,141	0,121	0,104	0,089	0,077	0,066	0,055	0,139	
	ММА	m _{2j}	3,317	3,261	3,261	3,205	3,149	3,093	3,038	2,982	2,926	2,870	2,814	2,758	2,703	2,647	2,591	2,535	2,479	2,423	2,368	2,312	2,200
		r _j	0,138	0,179	0,304	0,427	0,517	0,569	0,594	0,606	0,611	0,614	0,616	0,617	0,618	0,619	0,620	0,620	0,621	0,622	0,623	0,623	0,625
		p _j	1,986	1,979	1,983	1,988	1,993	1,996	1,997	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,998	1,999
U _j		0,434	0,415	0,351	0,288	0,242	0,216	0,203	0,197	0,194	0,193	0,192	0,192	0,191	0,191	0,190	0,190	0,190	0,189	0,189	0,189	0,188	
V _j		0,573	0,596	0,658	0,718	0,761	0,786	0,798	0,804	0,806	0,808	0,809	0,809	0,810	0,810	0,810	0,811	0,811	0,811	0,812	0,812	0,813	
A _j		0,941	0,977	1,001	1,009	1,008	1,005	1,003	1,002	1,002	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001	
B _j		0,00220	0,00144	0,00075	0,00030	0,00010	2,69 · 10 ⁻⁵	6,88 · 10 ⁻⁶	1,69 · 10 ⁻⁶	4,09 · 10 ⁻⁷	9,79 · 10 ⁻⁸	2,33 · 10 ⁻⁸	5,52 · 10 ⁻⁹	1,31 · 10 ⁻⁹	3,08 · 10 ⁻¹⁰	7,24 · 10 ⁻¹¹	1,70 · 10 ⁻¹¹	3,97 · 10 ⁻¹²	9,28 · 10 ⁻¹³	2,16 · 10 ⁻¹³	5,0 · 10 ⁻¹⁴	1,2 · 10 ⁻¹⁴	
X _j		0,00483	0,00258	0,00119	0,00044	0,00013	0,00004	0,00001	2,24 · 10 ⁻⁶	5,38 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	3,06 · 10 ⁻⁸	7,24 · 10 ⁻⁹	1,71 · 10 ⁻⁹	4,03 · 10 ⁻¹⁰	9,46 · 10 ⁻¹¹	2,22 · 10 ⁻¹¹	5,17 · 10 ⁻¹²	1,20 · 10 ⁻¹²	2,67 · 10 ⁻¹³	5,03 · 10 ⁻¹⁴	0	
Y _j		0,1	0,054	0,025	0,010	0,003	0,001	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	

Продолжение таблицы 3

DMA	m_{3j}	4,03	3,95	3,87	3,78	3,70	3,61	3,53	3,44	3,36	3,28	3,19	3,11	3,02	2,94	2,86	2,77	2,69	2,60	2,52	2,43	2,35
	r_j	0,062	0,076	0,172	0,267	0,339	0,381	0,401	0,411	0,416	0,418	0,420	0,421	0,422	0,423	0,423	0,424	0,425	0,426	0,426	0,427	0,428
	p_j	1,988	1,981	1,985	1,990	1,994	1,996	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,472	0,466	0,417	0,368	0,332	0,310	0,300	0,295	0,292	0,291	0,290	0,290	0,289	0,289	0,289	0,288	0,288	0,287	0,287	0,287	0,286
	V_j	0,534	0,543	0,590	0,637	0,671	0,692	0,702	0,706	0,708	0,710	0,710	0,711	0,711	0,712	0,712	0,713	0,713	0,713	0,714	0,714	0,714
	A_j	0,94723	0,97285	0,99355	1,00442	1,00693	1,00585	1,00428	1,00314	1,00248	1,00212	1,00194	1,00185	1,00180	1,00178	1,00176	1,00175	1,00175	1,00174	1,00174	1,00174	1,00122
	B_j	0,00163	0,00132	0,00091	0,00052	0,00026	0,000117	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$6,02 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$9,98 \cdot 10^{-8}$	$4,05 \cdot 10^{-8}$	$1,64 \cdot 10^{-8}$	$6,64 \cdot 10^{-9}$	$2,68 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$	$4,34 \cdot 10^{-10}$	$1,74 \cdot 10^{-10}$
	X_j	0,00482	0,00313	0,00190	0,00100	0,00047	0,00021	0,00009	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$4,14 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	$6,80 \cdot 10^{-8}$	$2,73 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$	$4,20 \cdot 10^{-9}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$4,35 \cdot 10^{-10}$	0
	Y_j	0,1	0,065	0,040	0,021	0,010	0,005	0,002	0,0014	0,0010	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,0007
TMA	m_{4j}	6,961	6,868	6,775	6,682	6,589	6,496	6,402	6,309	6,216	6,123	6,030	5,937	5,844	5,751	5,658	5,565	5,472	5,379	5,286	5,193	5,100
	r_j	0,017	0,020	0,104	0,189	0,254	0,292	0,311	0,320	0,324	0,326	0,328	0,329	0,329	0,330	0,331	0,332	0,332	0,333	0,334	0,334	0,335
	p_j	1,983	1,974	1,979	1,986	1,992	1,995	1,997	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,496	0,497	0,453	0,409	0,375	0,355	0,345	0,341	0,338	0,337	0,336	0,336	0,336	0,335	0,335	0,334	0,334	0,334	0,333	0,333	0,333
	V_j	0,513	0,517	0,558	0,599	0,629	0,647	0,656	0,660	0,662	0,664	0,664	0,665	0,665	0,666	0,666	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668	0,668
	A_j	0,9253	0,9560	0,9834	1,0007	1,0072	1,0077	1,0062	1,0048	1,0037	1,0030	1,0026	1,0024	1,0022	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0020	1,0020	1,0015
	B_j	0,000706	0,000628	0,000487	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$5,71 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$6,48 \cdot 10^{-8}$	$3,25 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$8,13 \cdot 10^{-9}$	$4,06 \cdot 10^{-9}$
	X_j	0,00241	0,001768	0,001221	0,00075	0,00043	0,000228	0,000119	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$3,109 \cdot 10^{-5}$	$1,579 \cdot 10^{-5}$	$7,994 \cdot 10^{-6}$	$4,037 \cdot 10^{-6}$	$2,033 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$	$5,708 \cdot 10^{-8}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$8,15 \cdot 10^{-9}$	0
	Y_j	0,05	0,037	0,025	0,016	0,009	0,0050	0,0028	0,0016	0,0010	0,0007	0,0005	0,00043	0,00039	0,00037	0,00036	0,00036	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
	g_j'	1	1,362	1,756	2,104	2,315	2,411	2,451	2,468	2,475	2,478	2,480	2,480	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481
	f_j'	0,9873	0,9921	0,9954	0,9979	0,9992	0,9997	0,9999	0,99994	0,99997	0,99999	0,99999	0,999997	0,9999987	0,9999994	0,9999997	0,9999999	0,9999999	1	1	1	1

Таблица 4

Расчет распределения концентрации компонентов по высоте слоя ленточной насадки (приближение 4)

компонент	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	g _j	1	1,36	1,76	2,10	2,31	2,41	2,45	2,47	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
	f _j	0,972	0,984	0,992	0,997	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1
	t _j	33,27	27,24	23,56	21,50	20,59	20,23	20,10	20,04	20,02	20,01	20,004	20,002	20,001	20,000	20,000	20,0001	20,0001	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000
Аммиак	m _{ij}	1,415	1,023	0,800	0,654	0,551	0,472	0,406	0,349	0,300	0,258	0,222	0,191	0,164	0,141	0,121	0,104	0,089	0,077	0,066	0,055	0,139
	r _j	0,151	0,201	0,338	0,469	0,558	0,603	0,623	0,631	0,635	0,637	0,638	0,639	0,639	0,639	0,640	0,640	0,640	0,640	0,640	0,641	0,640
	p _j	1,9891	1,9857	1,9913	1,9948	1,9968	1,9978	1,9983	1,9986	1,9988	1,9990	1,9992	1,9993	1,9994	1,9995	1,9995	1,9996	1,9997	1,9997	1,9997	2,0009	2,0010
	U _j	0,427	0,403	0,333	0,266	0,221	0,199	0,189	0,185	0,183	0,182	0,181	0,181	0,181	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180
	V _j	0,579	0,605	0,672	0,736	0,780	0,802	0,812	0,816	0,818	0,819	0,819	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,819
	A _j	0,97622	0,99610	1,00458	1,00524	1,00354	1,00223	1,00154	1,00119	1,00097	1,00082	1,00070	1,00060	1,00051	1,00044	1,00038	1,00033	1,00028	1,00024	1,00022	0,99949	0,99925
	B _j	0,00749	0,00487	0,00240	0,00087	0,00025	0,00006	0,00001	3,27 · 10 ⁻⁶	7,30 · 10 ⁻⁷	1,62 · 10 ⁻⁷	3,59 · 10 ⁻⁸	7,93 · 10 ⁻⁹	1,75 · 10 ⁻⁹	3,84 · 10 ⁻¹⁰	8,45 · 10 ⁻¹¹	1,86 · 10 ⁻¹¹	4,07 · 10 ⁻¹²	8,94 · 10 ⁻¹³	1,96 · 10 ⁻¹³	4,29 · 10 ⁻¹⁴	9,44 · 10 ⁻¹⁵
	X _j	0,01693	0,00846	0,00363	0,00121	0,00033	0,00008	0,00002	0,00000	9,394 · 10 ⁻⁷	2,084 · 10 ⁻⁷	4,61 · 10 ⁻⁸	1,018 · 10 ⁻⁸	2,241 · 10 ⁻⁹	4,929 · 10 ⁻¹⁰	1,08 · 10 ⁻¹⁰	2,38 · 10 ⁻¹¹	5,21 · 10 ⁻¹²	1,13 · 10 ⁻¹²	2,39 · 10 ⁻¹³	4,291 · 10 ⁻¹⁴	0
	Y _j	0,35	0,17572	0,07618	0,02641	0,00831	0,00317	0,00189	0,00159	0,00152	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151
	x _j	0,01645	0,00833	0,00360	0,00121	0,00033	0,00008	0,00002	0,00000	9,39 · 10 ⁻⁷	2,08 · 10 ⁻⁷	4,61 · 10 ⁻⁸	1,02 · 10 ⁻⁸	2,24 · 10 ⁻⁹	4,93 · 10 ⁻¹⁰	1,08 · 10 ⁻¹⁰	2,38 · 10 ⁻¹¹	5,21 · 10 ⁻¹²	1,13 · 10 ⁻¹²	2,39 · 10 ⁻¹³	4,29 · 10 ⁻¹⁴	0
	C _j	0,9121	0,4618	0,1995	0,0668	0,0183	0,0045	0,0010	0,0002	0,0001	0,000012	0,000003	0,000001	0,00000012	0,00000003	6,01 · 10 ⁻⁹	1,32 · 10 ⁻⁹	2,89 · 10 ⁻¹⁰	6,28 · 10 ⁻¹¹	1,32 · 10 ⁻¹¹	2,38 · 10 ⁻¹²	0
	m _{срj}	2552,9	1831,7	1426,3	1162,1	978,4	835,8	717,4	616,6	530,1	455,8	391,9	336,9	289,6	248,9	213,9	183,8	157,9	135,6	116,0	97,7	250
	m _j '	1,415	1,016	0,791	0,644	0,542	0,463	0,398	0,342	0,294	0,253	0,217	0,187	0,161	0,138	0,119	0,102	0,088	0,075	0,064	0,054	0,139
	ММА	m _{2j}	3,317	3,261	3,261	3,205	3,149	3,093	3,038	2,982	2,926	2,870	2,814	2,758	2,703	2,647	2,591	2,535	2,479	2,423	2,368	2,312
r _j		0,131	0,179	0,315	0,447	0,536	0,581	0,600	0,609	0,613	0,615	0,616	0,617	0,618	0,619	0,620	0,620	0,621	0,622	0,623	0,623	0,625
p _j		1,985	1,977	1,982	1,988	1,993	1,996	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,998	1,999
U _j		0,438	0,415	0,346	0,278	0,233	0,210	0,200	0,196	0,194	0,193	0,192	0,192	0,191	0,191	0,190	0,190	0,190	0,189	0,189	0,189	0,188
V _k		0,570	0,596	0,663	0,728	0,770	0,792	0,801	0,805	0,807	0,808	0,809	0,809	0,810	0,810	0,810	0,811	0,811	0,811	0,812	0,812	0,813
A _j		0,941	0,979	1,002	1,009	1,007	1,004	1,002	1,002	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001
B _j		0,00220	0,00144	0,00074	0,00028	0,00009	2,30·10 ⁻⁵	5,77 · 10 ⁻⁶	1,41 · 10 ⁻⁶	3,38 · 10 ⁻⁷	8,08 · 10 ⁻⁸	1,92 · 10 ⁻⁸	4,55 · 10 ⁻⁹	1,08 · 10 ⁻⁹	2,53·10 ⁻¹⁰	5,96 · 10 ⁻¹¹	1,40 · 10 ⁻¹¹	3,27 · 10 ⁻¹²	7,64 · 10 ⁻¹³	1,78 · 10 ⁻¹³	4,1 · 10 ⁻¹⁴	9,6 · 10 ⁻¹⁵
X _j		0,00483	0,00253	0,00114	0,00040	0,00012	0,00003	0,00001	1,85 · 10 ⁻⁶	4,45 · 10 ⁻⁷	1,06 · 10 ⁻⁷	2,52 · 10 ⁻⁸	5,97 · 10 ⁻⁹	1,41 · 10 ⁻⁹	3,32·10 ⁻¹⁰	7,79 · 10 ⁻¹¹	1,83 · 10 ⁻¹¹	4,26 · 10 ⁻¹²	9,84 · 10 ⁻¹³	2,20 · 10 ⁻¹³	4,14 · 10 ⁻¹⁴	0
Y _j		0,1	0,053	0,024	0,009	0,003	0,001	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053

Продолжение таблицы 4

DMA	m_{3j}	4,03	3,95	3,87	3,78	3,70	3,61	3,53	3,44	3,36	3,28	3,19	3,11	3,02	2,94	2,86	2,77	2,69	2,60	2,52	2,43	2,35
	r_j	0,056	0,073	0,178	0,281	0,353	0,390	0,406	0,413	0,417	0,419	0,420	0,421	0,422	0,423	0,423	0,424	0,425	0,426	0,426	0,427	0,428
	p_j	1,987	1,980	1,985	1,990	1,994	1,997	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,475	0,468	0,414	0,361	0,324	0,305	0,297	0,294	0,292	0,291	0,290	0,290	0,289	0,289	0,289	0,288	0,288	0,287	0,287	0,287	0,286
	V_j	0,531	0,542	0,594	0,644	0,678	0,696	0,704	0,707	0,709	0,710	0,711	0,711	0,711	0,712	0,712	0,713	0,713	0,713	0,714	0,714	0,714
	A_j	0,94753	0,97376	0,99469	1,00487	1,00657	1,00524	1,00377	1,00282	1,00230	1,00202	1,00189	1,00182	1,00179	1,00177	1,00176	1,00175	1,00175	1,00174	1,00174	1,00174	1,00122
	B_j	0,00163	0,00133	0,00091	0,00051	0,00024	0,000107	$4,56 \cdot 10^{-5}$	$1,90 \cdot 10^{-5}$	$7,84 \cdot 10^{-6}$	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$5,38 \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{-7}$	$8,91 \cdot 10^{-8}$	$3,62 \cdot 10^{-8}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$	$5,92 \cdot 10^{-9}$	$2,39 \cdot 10^{-9}$	$9,63 \cdot 10^{-10}$	$3,87 \cdot 10^{-10}$	$1,56 \cdot 10^{-10}$
	X_j	0,00482	0,00309	0,00184	0,00094	0,00043	0,00019	0,00008	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$5,46 \cdot 10^{-6}$	$2,23 \cdot 10^{-6}$	$9,09 \cdot 10^{-7}$	$3,70 \cdot 10^{-7}$	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$6,06 \cdot 10^{-8}$	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$3,75 \cdot 10^{-9}$	$1,35 \cdot 10^{-9}$	$3,88 \cdot 10^{-10}$	0
	Y_j	0,1	0,064	0,039	0,020	0,010	0,005	0,002	0,0014	0,0010	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
TMA	m_{4j}	6,961	6,868	6,775	6,682	6,589	6,496	6,402	6,309	6,216	6,123	6,030	5,937	5,844	5,751	5,658	5,565	5,472	5,379	5,286	5,193	5,100
	r_j	0,010	0,016	0,109	0,201	0,266	0,300	0,315	0,322	0,325	0,327	0,328	0,329	0,329	0,330	0,331	0,332	0,332	0,333	0,334	0,334	0,335
	p_j	1,982	1,972	1,979	1,986	1,992	1,996	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,499	0,499	0,450	0,402	0,368	0,351	0,343	0,339	0,338	0,337	0,336	0,336	0,336	0,335	0,335	0,334	0,334	0,334	0,333	0,333	0,333
	V_j	0,510	0,515	0,560	0,605	0,635	0,651	0,658	0,661	0,663	0,664	0,664	0,665	0,665	0,666	0,666	0,666	0,667	0,667	0,667	0,668	0,668
	A_j	0,9257	0,9572	0,9852	1,0017	1,0070	1,0069	1,0054	1,0042	1,0033	1,0028	1,0025	1,0023	1,0022	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0020	1,0020	1,0015
	B_j	0,000708	0,000634	0,000488	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$5,28 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$7,09 \cdot 10^{-6}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$	$9,22 \cdot 10^{-7}$	$4,65 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-7}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$5,92 \cdot 10^{-8}$	$2,97 \cdot 10^{-8}$	$1,49 \cdot 10^{-8}$	$7,44 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-9}$
	X_j	0,00241	0,001747	0,001191	0,00072	0,0004	0,000211	0,000109	$5,59 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$1,444 \cdot 10^{-5}$	$7,311 \cdot 10^{-6}$	$3,691 \cdot 10^{-6}$	$1,859 \cdot 10^{-6}$	$9,328 \cdot 10^{-7}$	$4,66 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	$5,218 \cdot 10^{-8}$	$2,24 \cdot 10^{-8}$	$7,451 \cdot 10^{-9}$	0
	Y_j	0,05	0,036	0,025	0,015	0,009	0,0047	0,0026	0,0015	0,0009	0,0006	0,0005	0,00043	0,00039	0,00037	0,00036	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
	g_j'	1	1,372	1,776	2,126	2,329	2,418	2,454	2,469	2,475	2,478	2,480	2,480	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481
	f_j'	0,9870	0,9920	0,9955	0,9980	0,9992	0,9997	0,9999	0,99995	0,99998	0,99999	0,999995	0,999998	0,9999989	0,9999994	0,9999997	0,9999999	0,9999999	1	1	1	1

Таблица 5

Расчет распределения концентрации компонентов по высоте слоя ленточной насадки (приближение 5)

компонент	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	g _j	1	1,37	1,78	2,13	2,33	2,42	2,45	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	
	f _j	0,972	0,984	0,992	0,997	0,999	0,999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	t _j	33,27	27,19	23,50	21,46	20,57	20,23	20,09	20,04	20,02	20,01	20,004	20,002	20,001	20,000	20,000	20,0001	20,0001	20,0000	20,0000	20,0000	20,0	
Аммиак	m _{3j}	1,415	1,016	0,791	0,644	0,542	0,463	0,398	0,342	0,294	0,253	0,217	0,187	0,161	0,138	0,119	0,102	0,088	0,075	0,064	0,054	0,043	
	r _j	0,148	0,201	0,343	0,476	0,564	0,606	0,624	0,632	0,635	0,637	0,638	0,639	0,639	0,639	0,640	0,640	0,640	0,640	0,640	0,641	0,640	
	p _j	1,9889	1,9855	1,9913	1,9948	1,9969	1,9979	1,9984	1,9987	1,9989	1,9990	1,9992	1,9993	1,9994	1,9995	1,9995	1,9996	1,9997	1,9997	1,9997	2,0009	2,0011	
	U _j	0,428	0,402	0,330	0,263	0,219	0,197	0,188	0,184	0,183	0,182	0,181	0,181	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	
	V _j	0,577	0,605	0,674	0,740	0,783	0,804	0,813	0,816	0,818	0,819	0,819	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,819	
	A _j	0,97628	0,99631	1,00467	1,00518	1,00344	1,00216	1,00151	1,00116	1,00095	1,00080	1,00068	1,00059	1,00050	1,00043	1,00037	1,00032	1,00027	1,00024	1,00021	0,99948	0,99924	
	B _j	0,00749	0,00487	0,00237	0,00085	0,00024	0,00006	0,00001	3,07 · 10 ⁻⁶	6,85 · 10 ⁻⁷	1,52 · 10 ⁻⁷	3,36 · 10 ⁻⁸	7,42 · 10 ⁻⁹	1,64 · 10 ⁻⁹	3,60 · 10 ⁻¹⁰	7,91 · 10 ⁻¹¹	1,74 · 10 ⁻¹¹	3,81 · 10 ⁻¹²	8,36 · 10 ⁻¹³	1,83 · 10 ⁻¹³	4,02 · 10 ⁻¹⁴	8,83 · 10 ⁻¹⁵	
	X _j	0,01693	0,00839	0,00356	0,00117	0,00031	0,00008	0,00002	0,00000	8,809 · 10 ⁻⁷	1,953 · 10 ⁻⁷	4,321 · 10 ⁻⁸	9,529 · 10 ⁻⁹	2,098 · 10 ⁻⁹	4,615 · 10 ⁻¹⁰	1,014 · 10 ⁻¹⁰	2,23 · 10 ⁻¹¹	4,87 · 10 ⁻¹²	1,06 · 10 ⁻¹²	2,24 · 10 ⁻¹³	4,016 · 10 ⁻¹⁴	0	
	Y _j	0,35	0,17428	0,07476	0,02555	0,00799	0,00307	0,00187	0,00159	0,00152	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	0,00151	
	y _j	0,35	0,239058	0,13261	0,05428	0,0186	0,007431	0,004579	0,003917	0,0037704	0,0037398	0,0037341	0,0037333	0,0037334	0,0037335	0,003734	0,003734	0,003734	0,0037337	0,003734	0,0037337	0,0037337	
	x _j	0,01645	0,00826	0,00353	0,00116	0,00031	0,00008	0,00002	0,00000	8,81 · 10 ⁻⁷	1,95 · 10 ⁻⁷	4,32 · 10 ⁻⁸	9,53 · 10 ⁻⁹	2,10 · 10 ⁻⁹	4,61 · 10 ⁻¹⁰	1,01 · 10 ⁻¹⁰	2,23 · 10 ⁻¹¹	4,87 · 10 ⁻¹²	1,06 · 10 ⁻¹²	2,24 · 10 ⁻¹³	4,02 · 10 ⁻¹⁴	0	
	C _j	0,9121	0,4581	0,1958	0,0645	0,0174	0,0042	0,0010	0,0002	0,000049	0,000011	0,000002	5 · 10 ⁻⁷	1,2 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁸	5,62 · 10 ⁻⁹	1,23 · 10 ⁻⁹	2,70 · 10 ⁻¹⁰	5,88 · 10 ⁻¹¹	1,24 · 10 ⁻¹¹	2,23 · 10 ⁻¹²	0	
	m _{срj}	2552,9	1825,8	1419,9	1155,9	972,7	830,7	712,9	612,6	526,7	452,8	389,3	334,7	287,7	247,2	212,5	182,6	156,8	134,7	115,2	97,1	250,0	
	m _j [']	1,415	1,012	0,787	0,641	0,539	0,461	0,395	0,340	0,292	0,251	0,216	0,186	0,159	0,137	0,118	0,101	0,087	0,075	0,064	0,054	0,139	
	ММА	m _{2j}	3,317	3,261	3,261	3,205	3,149	3,093	3,038	2,982	2,926	2,870	2,814	2,758	2,703	2,647	2,591	2,535	2,479	2,423	2,368	2,312	2,200
		r _j	0,129	0,179	0,320	0,454	0,541	0,584	0,602	0,609	0,613	0,615	0,616	0,617	0,618	0,619	0,620	0,620	0,621	0,622	0,623	0,623	0,625
p _j		1,985	1,977	1,982	1,988	1,994	1,997	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,998	1,999	
U _j		0,439	0,415	0,343	0,275	0,230	0,208	0,199	0,195	0,194	0,193	0,192	0,192	0,191	0,191	0,190	0,190	0,190	0,189	0,189	0,189	0,188	
V _j		0,569	0,596	0,666	0,731	0,773	0,793	0,802	0,805	0,807	0,808	0,809	0,809	0,810	0,810	0,810	0,811	0,811	0,811	0,812	0,812	0,813	
A _j		0,941	0,979	1,003	1,009	1,007	1,004	1,002	1,002	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001	
B _j		0,00220	0,00144	0,00073	0,00027	0,00008	2,18 · 10 ⁻⁵	5,45 · 10 ⁻⁶	1,33 · 10 ⁻⁶	3,19 · 10 ⁻⁷	7,61 · 10 ⁻⁸	1,81 · 10 ⁻⁸	4,29 · 10 ⁻⁹	1,01 · 10 ⁻⁹	2,39 · 10 ⁻¹⁰	5,61 · 10 ⁻¹¹	1,32 · 10 ⁻¹¹	3,08 · 10 ⁻¹²	7,19E-13	1,68E-13	3,9E-14	9,0E-15	
X _j		0,00483	0,00251	0,00112	0,00039	0,00011	0,00003	0,00001	1,75 · 10 ⁻⁶	4,19 · 10 ⁻⁷	1,00 · 10 ⁻⁷	2,37 · 10 ⁻⁸	5,62 · 10 ⁻⁹	1,33 · 10 ⁻⁹	3,12 · 10 ⁻¹⁰	7,34 · 10 ⁻¹¹	1,72 · 10 ⁻¹¹	4,01 · 10 ⁻¹²	9,27E-13	2,07E-13	3,90E-14	0	
Y _j		0,1	0,052	0,024	0,009	0,003	0,001	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	0,00053	

Продолжение таблицы 5

ДМА	$m_{\text{ж}}$	4,03	3,95	3,87	3,78	3,70	3,61	3,53	3,44	3,36	3,28	3,19	3,11	3,02	2,94	2,86	2,77	2,69	2,60	2,52	2,43	2,35
	r_j	0,053	0,073	0,181	0,286	0,357	0,392	0,407	0,414	0,417	0,419	0,420	0,421	0,422	0,423	0,423	0,424	0,425	0,426	0,426	0,427	0,428
	p_j	1,987	1,980	1,985	1,990	1,995	1,997	1,998	1,998	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,476	0,468	0,413	0,359	0,322	0,304	0,297	0,293	0,292	0,291	0,290	0,290	0,289	0,289	0,289	0,288	0,288	0,287	0,287	0,287	0,286
	V_j	0,530	0,542	0,595	0,646	0,680	0,697	0,704	0,708	0,709	0,710	0,711	0,711	0,711	0,712	0,712	0,713	0,713	0,713	0,714	0,714	0,714
	A_j	0,94765	0,97411	0,99506	1,00496	1,00640	1,00504	1,00363	1,00274	1,00225	1,00200	1,00188	1,00182	1,00178	1,00177	1,00176	1,00175	1,00175	1,00174	1,00174	1,00174	1,00122
	B_j	0,00163	0,00134	0,00090	0,00050	0,00024	0,000104	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$7,56 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$	$8,60 \cdot 10^{-8}$	$3,49 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$5,71 \cdot 10^{-9}$	$2,31 \cdot 10^{-9}$	$9,29 \cdot 10^{-10}$	$3,74 \cdot 10^{-10}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$
	X_j	0,00482	0,00307	0,00182	0,00092	0,00042	0,00018	0,00008	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$5,27 \cdot 10^{-6}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$8,77 \cdot 10^{-7}$	$3,57 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$5,85 \cdot 10^{-8}$	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$9,35 \cdot 10^{-9}$	$3,62 \cdot 10^{-9}$	$1,31 \cdot 10^{-9}$	$3,74 \cdot 10^{-10}$	0
	Y_j	0,1	0,064	0,038	0,020	0,009	0,004	0,002	0,0013	0,0010	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,00070	0,0007
ТМА	$m_{\text{ж}}$	6,961	6,868	6,775	6,682	6,589	6,496	6,402	6,309	6,216	6,123	6,030	5,937	5,844	5,751	5,658	5,565	5,472	5,379	5,286	5,193	5,100
	r_j	0,008	0,015	0,111	0,205	0,270	0,302	0,316	0,322	0,325	0,327	0,328	0,329	0,329	0,330	0,331	0,332	0,332	0,333	0,334	0,334	0,335
	p_j	1,982	1,972	1,978	1,986	1,993	1,996	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
	U_j	0,501	0,499	0,449	0,400	0,366	0,349	0,342	0,339	0,338	0,337	0,336	0,336	0,335	0,335	0,335	0,334	0,334	0,334	0,333	0,333	0,333
	V_j	0,509	0,515	0,562	0,607	0,637	0,652	0,659	0,662	0,663	0,664	0,664	0,665	0,665	0,666	0,666	0,666	0,667	0,667	0,667	0,668	0,668
	A_j	0,9258	0,9577	0,9857	1,0019	1,0068	1,0066	1,0052	1,0040	1,0032	1,0027	1,0024	1,0023	1,0022	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0021	1,0020	1,0020	1,0015
	B_j	0,000708	0,00064	0,00049	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$9,83 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$6,90 \cdot 10^{-6}$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	$1,77 \cdot 10^{-6}$	$8,96 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	$5,76 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-8}$	$1,45 \cdot 10^{-8}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$	$3,61 \cdot 10^{-9}$
	X_j	0,00241	0,00174	0,00118	0,00071	0,00039	0,000206	0,00011	$5,44 \cdot 10^{-5}$	$2,767 \cdot 10^{-5}$	$1,404 \cdot 10^{-5}$	$7,106 \cdot 10^{-6}$	$3,588 \cdot 10^{-6}$	$1,807 \cdot 10^{-6}$	$9,066 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-7}$	$2,24 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$5,072 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$7,242 \cdot 10^{-9}$	0
	Y_j	0,05	0,036	0,025	0,015	0,008	0,0046	0,0025	0,0015	0,0009	0,0006	0,0005	0,00042	0,00039	0,00037	0,00036	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
	y_j	0,05	0,04958	0,04372	0,03177	0,01956	0,0111	0,00623	0,003628	0,0022767	0,0015837	0,0012306	0,0010513	0,0009605	0,0009146	0,000891	0,00088	0,000874	0,0008709	0,000869	0,0008687	0,0008683
	g_j'	1	1,376	1,783	2,134	2,333	2,420	2,455	2,469	2,476	2,478	2,480	2,480	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481	2,481
	f_j'	0,9869	0,9920	0,9955	0,9981	0,9993	0,9997	0,9999	0,99995	0,99998	0,99999	0,999995	0,999998	0,9999989	0,9999995	0,9999997	0,9999999	0,9999999	1	1	1	1

Приложение 3

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Автомобильная государственная техническая
академия»



Баденцов Артём Викторович

« 09 » 06 2015 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

об использовании результатов исследований в учебном процессе
на кафедре «Машины и аппараты химических производств»,
на кафедре «Технология электрохимических производств»

В диссертационной работе «Увеличение интенсивности абсорбции аммиака и метиламинов из газовых смесей на регулярной насадке» аспиранта кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВПО АГТА Скачкова И.В., выполненной под руководством доктора технических наук, доцента Бальчугова А.В., исследованы гидродинамика и массообмен на новой высокоэффективной регулярной ленточной насадке.

В работе выполнены экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик новой регулярной ленточной насадки двух модификаций, а также, для сравнения, известных насадок.

В ходе выполнения работы получены:

- математическая модель массопереноса при абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей.
- уравнения зависимости коэффициента сопротивления регулярной ленточной насадки от критерия Рейнольдса газа и зависимости гидравлического сопротивления регулярной ленточной насадки от приведенной скорости газа.

На основании полученных данных была разработана методика расчета аппарата-абсорбера с регулярной насадкой из цепей для поглощения аммиака и метиламинов, позволяющая определить диаметр аппарата с ленточной насадкой, высоту слоя насадки, среднюю движущую силу процесса массопередачи.

Полученные результаты используются при чтении лекций, проведения лабораторных работ и выполнении курсовых проектов по дисциплинам «Процессы и аппараты химических производств», «Машины и аппараты химических производств», «Технологические процессы и оборудование».

Зав. кафедрой МАХП, к.т.н., доцент

Подоплелов Е.В.

Зав. кафедрой ТЭП, к.т.н., доцент

Сосновская Н.Г.



Фотография лабораторной установки

УТВЕРЖДАЮ:

и.о. первого заместителя генерального

директора ОАО «АНХК» –

директора технического

Замятин М.В.



**Ожидаемый экономический эффект при замене насадки в
абсорберах цеха 39\71 химического завода на новую ленточную
насадку, разработанную в диссертационной работе
Скачкова Ильи Владимировича**

Расход газа на входе в абсорберы при н.у., м ³ /ч	2000
Цена диметиламина, руб./т	28081
Концентрация аммиака и метиламинов в газе на выходе из абсорбера до реконструкции в пересчете на диметиламин, г/м ³	23
Концентрация аммиака и метиламинов в газе на выходе из абсорбера после замены насадки в пересчете на диметиламин, г/м ³	20
Дополнительное количество аммиака и метиламинов, полученное после замены насадки в пересчете на диметиламин, т/год	43,2
Ожидаемый экономический эффект в результате замены насадки, тыс. руб./год	1213,1

Ведущий инженер технического отдела

Татаринов С.Л.