

На правах рукописи

РЫЖОВ СТАНИСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДЕСОРБЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ
РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКЕ**

Специальность 05.17.08 — Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2013

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

Научный руководитель:

Бальчугов Алексей Валерьевич доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Косинцев Виктор Иванович доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО НИ «Томский политехнический университет», профессор кафедры ОХТ

Обуздина Марина Владимировна кандидат технических наук, ассистент кафедры безопасности жизнедеятельности и экологии ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»

Ведущая организация ФГБОУ ВПО НИ «Иркутский государственный технический университет»

Защита состоится 25 июня 2013 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного Совета Д212.269.08 при ФГБОУ ВПО НИ «ТПУ» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 2, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИ «Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «24» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук, доцент



Петровская Т.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Абсорбционные и десорбционные аппараты широко используются в различных областях химической и нефтехимической технологии, в частности, для очистки промышленных газов от нежелательных компонентов. Степень очистки газов и качество получаемого продукта в значительной степени зависит от интенсивности массообменных процессов, протекающих в аппаратах.

Одним из практически важных процессов химической и нефтехимической технологии является процесс очистки синтез-газа от диоксида углерода. Процесс может проводиться двумя способами: с использованием физической абсорбции (абсорбент – вода) и хемосорбции (абсорбент – моноэтаноламин и другие амины). Второй способ, несмотря на высокую интенсивность, характеризуется повышенными энергетическими затратами, требованием к особой коррозионной стойкости оборудования, образованием побочных продуктов, высокой стоимостью абсорбента и др.

На ОАО «АНХК» процесс очистки синтез-газа от диоксида углерода происходит в две стадии: на первой стадии осуществляется абсорбция диоксида углерода водой из технологических газов при давлении около 3 МПа, на второй стадии – трехступенчатая десорбция диоксида углерода из воды. Десорбция на первой ступени осуществляется в аппаратах с каскадными тарелками за счет понижения давления с 3 МПа до 0,3 МПа, в аналогичных аппаратах второй ступени давление снижается с 0,3 МПа до 0,1 МПа, а в градирнях третьей ступени происходит десорбция диоксида углерода из воды в поток атмосферного воздуха. Концентрация диоксида углерода в воде на выходе из аппаратов второй ступени десорбции остается сравнительно высокой, что объясняется низкой интенсивностью массопередачи на каскадных тарелках вследствие слабо развитой поверхности контакта фаз и низких коэффициентов массопередачи. Это приводит к повышенным потерям диоксида углерода в атмосферный воздух в градирнях третьей ступени. Снизить потери возможно за счет применения высокоэффективных контактных устройств, способных повысить интенсивность массопередачи.

Научное изучение и интенсификация процессов массопереноса при десорбции газа из жидкости в аппаратах второй ступени 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.

Объект исследования – газожидкостная система (диоксид углерода –воздух – вода) в слое высокоэффективной регулярной насадки.

Предмет исследования – гидродинамические и массообменные процессы при десорбции диоксида углерода из воды на высокоэффективной регулярной насадке.

Цель работы заключается в увеличении интенсивности процесса десорбции диоксида углерода из водных растворов за счет использования эффективных механизмов взаимодействия газа и жидкости в слое регулярной насадки из круглозвенных цепей.

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

1. Экспериментально определить гидравлическое сопротивление слоя сухой регулярной насадки из цепей (модификаций 1 и 2) при различных приведенных скоростях газа, коэффициенты сопротивления насадки и получить эмпирические зависимости для их расчета. Сравнить полученные результаты с характеристиками используемых в настоящее время насадок.
2. Определить гидродинамические режимы течения жидкости по одиночной вертикально подвешенной круглозвенной цепи и установить границы их возникновения.
3. Экспериментально определить гидравлическое сопротивление орошаемой регулярной насадки из цепей (модификации 1 и 2) при различных плотностях орошения. Сравнить полученные результаты с характеристиками используемых в настоящее время насадок.
4. Разработать математическую модель расчета процесса десорбции диоксида углерода из воды на регулярной насадке из круглозвенных цепей.
5. Экспериментально определить интенсивность массообмена при десорбции диоксида углерода из воды на высокоэффективной регулярной насадке из круглозвенных цепей и для сравнения – на известной насадке.
6. Разработать методику расчета аппарата-десорбера с пакетом высокоэффективной регулярной насадки из цепей для осуществления процесса десорбции газа из жидкости.

Научная новизна:

1. Установлено, что в узких диапазонах значений температуры и давления целесообразно использовать высокоэффективную насадку, имеющую относительно большой свободный объем, обтекаемую форму элементов насадки, регулярную компоновку элементов в слое, расположение осей элементов вдоль линий тока газа. Это позволило снизить коэффициент сопротивления сухой насадки из цепей (модификация 1, $d_s=0,007$ м) в среднем в 4,5 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления колец Рашига ($d_s=0,014$ м), а также снизить коэффициент сопротивления регулярной насадки из цепей (модификация 2, $d_s=0,015$ м) в среднем в 20,2 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления колец Рашига ($d_s=0,014$ м), и в 4,6 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления рулонированной сетки ($d_s=0,007$ м).
2. Установлено, что характер формирования пленки жидкости на одиночной цепи насадки при неизменной скорости газа определяется значением расхода жидкости, при этом установлены границы возникновения четырех режимов: пульсационно-пленочного, пленочного с частичным смачиванием насадки, пленочного с полным смачиванием насадки и режима с избыточной подачей жидкости, из которых наибольшую поверхность контакта фаз обеспечивает пленочный режим с полным смачиванием насадки.
3. Установлено, что степень увеличения гидравлического сопротивления слоя насадки из круглозвенных цепей от подачи орошения зависит от конструктивных особенностей насадки, при этом показано, что гидравлическое сопротивление регулярной насадки из цепей (модификации 1, $d_s=0,007$ м) ниже сопротивления колец Рашига ($d_s=0,014$ м) в среднем в 3,92 раза, ниже сопротивления колец Паля ($d_s=0,025$

м) в среднем в 1,78 раза и ниже сопротивления седел Инталокс ($d_s=0,025$ м) в среднем в 2,8 раза.

4. Установлено, что интенсификация процесса массопередачи на насадке из цепей достигается путем увеличения площади поверхности контакта фаз за счет образования пленки жидкости с двумя свободными поверхностями, а также за счет эффективного перемешивания в пленке жидкости, при этом объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при десорбции диоксида углерода из водных растворов на регулярной насадке из цепей (модификация 1, $d_s=0,007$ м) выше в среднем в 1,75 раза, чем на седлах Инталокс и в среднем в 3,91 раза, чем на керамических кольцах Рашига ($d_s=0,007$ м).

Практическая ценность.

Разработана высокоэффективная регулярная насадка из цепей, предназначенная для интенсификации процесса десорбции диоксида углерода из воды, которая позволяет на 14% снизить потери диоксида углерода в атмосферу в процессе очистки синтез-газа от диоксида углерода на ОАО «АНХК» и получить экономический эффект 3,09 млн. руб. в год.

Применение насадки из цепей позволяет снизить затраты энергии на преодоление потоком газа гидравлического сопротивления слоя.

Разработана методика расчета промышленного высокоэффективного аппарата для десорбции газов из жидкостей с новой насадкой из круглозвенных цепей, обеспечивающего снижение концентрации диоксида углерода в воде на выходе с аппарата с 0,0460 до 0,0388 кмоль/м³.

Материалы диссертационной работы систематически используются в учебном процессе Ангарской государственной технической академии при преподавании дисциплин «Процессы и аппараты химических технологий», «Технологические процессы и производства», «Гидравлика».

На защиту выносятся:

1. Механизм интенсификации процесса десорбции диоксида углерода из водных растворов за счет образования пленки жидкости с двумя свободными поверхностями и за счет эффективного перемешивания с использованием регулярно-насадочного устройства.
2. Математическая модель процесса десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке, позволяющая спрогнозировать значение концентрации диоксида углерода на выходе из слоя и значение объемного коэффициента массоотдачи при различных условиях процесса, а также проверка модели на адекватность.
3. Зависимость гидравлического сопротивления от конструктивных особенностей насадочных устройств, в соответствии с которой каналы для прохождения газа со сглаженными контурами обеспечивают снижение гидравлического сопротивления слоя насадки из цепей.
4. База экспериментальных данных по массообменным и гидродинамическим характеристикам слоя регулярной насадки из цепей.

Апробация работы.

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 5 статей в журналах из списка ВАК, 1 монография и получен 1 патент на изобретение РФ.

Основные результаты по теме диссертационной работы были доложены и обсуждены на XVII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (г. Иркутск, Институт систем энергетики СО РАН, 2012 г.); на XXV международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ - 25» (г. Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2012 г.); на третьей международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития» (Иркутск, ИрГУПС, 2012 г.); на V региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», Ангарск, 2012 г.; на межвузовской научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс» (г. Ангарск, АГТА, 2010 г., 2012 г.).

В 2012 г. получен патент РФ на изобретение №2465957 «Насадочный аппарат для массообменных процессов».

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, включающего 110 наименований; содержит 128 страниц машинописного текста, 25 рисунков, 22 таблицы и 3 приложения.

Содержание работы

В первой главе приведен анализ литературных данных по теме исследования. Проблемами интенсификации массообменных процессов и разработкой высокоэффективных насадочных контактных устройств занимались Тимофеев А.В., Леонтьев В.С., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Каган А.М., Юдина Л.А. и др. Анализ основного уравнения массопередачи показал, что интенсифицировать процесс десорбции можно за счет увеличения коэффициентов массоотдачи, площади контакта фаз или движущей силы процесса. Известно, что на величину движущей силы процесса можно повлиять за счет изменения давления и температуры. При снижении давления и увеличении температуры угол наклона равновесной линии относительно оси абсцисс возрастает и, соответственно увеличивается движущая сила процесса десорбции ΔC . Однако, изменение давления и температуры в колонне сопряжено с существенными энергетическими затратами. В связи с этим был использован другой способ интенсификации процесса десорбции, а именно за счет увеличения коэффициентов массоотдачи и площади контакта фаз с использованием высокоэффективной регулярной насадки из круглозвенных цепей.

Разработка усовершенствованных насадочных устройств остается актуальной задачей, так как нет универсальной насадки, которая удовлетворяла бы требованиям всех технологических процессов.

Далее подробно рассмотрены основные требования к насадочным контактным устройствам, предъявляемых производством, выполнен анализ работы известных устройств, определены их основные достоинства и недостатки, описаны известные подходы к проведению гидродинамических исследований насадок, определению их

гидравлического сопротивления, дана характеристика различным методам оценки интенсивности массообмена в насадочных колоннах.

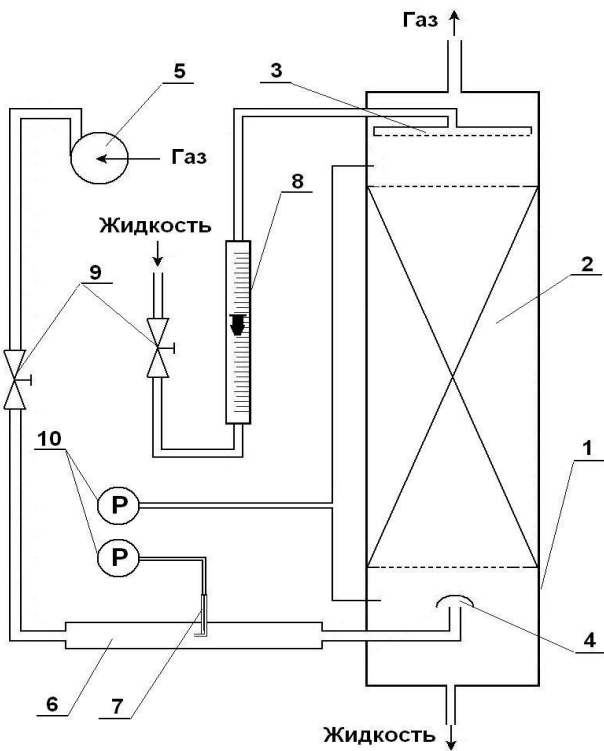


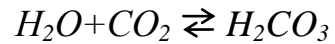
Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования гидравлического сопротивления насадки: 1 – колонна; 2 – пакет насадки; 3 – распределитель жидкости; 4 – распределитель газа; 5 – воздуходувка; 6 – измерительная труба; 7 – трубка Пито; 8 – ротаметр; 9 – вентиль; 10 – дифманометр

диаметром 2 мм с размером звена $0,015 \times 0,007$ м. Выбор геометрических параметров цепей основан на термодинамическом анализе механизмов формирования жидкостной пленки в ячейке цепи. Высота слоя насадки из цепей составляет 1,35 м.

Способ упаковки цепей в колонне (вид сверху) показан на рис. 2 (цепь обозначена крестом), где 1 – верхние звенья цепи; L – расстояние между осями цепей.

Испытания проводились для двух модификаций насадки из цепей, которые отличались друг от друга расстоянием между осями цепей (табл. 1). В насадке модификации 1 расстояние между осями ближайших цепей составляет $L=0,0064$ м (плотная упаковка), а в случае модификации 2 – $L=0,008$ м (упаковка с увеличенным свободным объемом).

На основе термодинамического и кинетического анализа показано, что процессы массопереноса в системе диоксид углерода – вода можно рассматривать как физические процессы, поскольку равновесие химической реакции



сильно смещено влево (константа равновесия при 25°C $K_p=1,7 \cdot 10^{-3}$), и преобладающая часть диоксида углерода (более 99,8%) находится в водном растворе в молекулярном виде.

На основании проведенного анализа были сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описаны выполненные гидродинамические исследования регулярной насадки из круглозвенных цепей.

В первую очередь проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления сухой регулярной насадки из цепей. Рабочей средой в экспериментах выступал воздух. Лабораторная установка представлена на рис. 1. Она состоит из колонны 1, выполненной из органического стекла, с внутренним диаметром 0,15 м и высотой 2,4 м. Внутри колонны располагается пакет насадки 2. Цепи подвешены на решетке с определенным размером ячейки. Использовались круглозвенные цепи, выполненные из проволоки

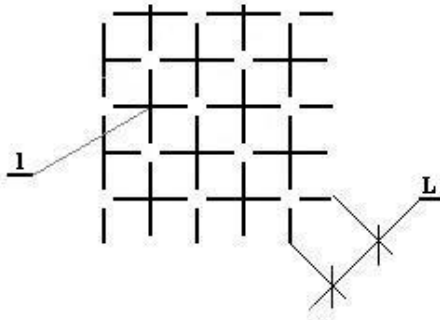


Рис. 2. Схема способа упаковки цепей (вид сверху)

Для сравнения выполнены также эксперименты по определению гидравлического сопротивления широко используемых в настоящее время насадок – керамических колец Рашига размером $25 \times 25 \times 3$ и рулонированной сетки из проволоки диаметром $0,4$ мм с шагом 4 мм. Высота слоя колец Рашига составляла в разных экспериментах $1,35$ м и $0,57$ м, а рулонированной сетки – $1,35$ м. Характеристики использованных видов насадок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики насадок

Насадка	Удельная поверхность, a_n , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем, ε	Эквивалентный диаметр, d_3 , м
Насадка из цепей (модификация 1)	433	0,783	0,007
Насадка из цепей (модификация 2)	277	0,860	0,015
Керамические кольца Рашига ($25 \times 25 \times 3$)	204	0,740	0,014
Рулонированная сетка	524	0,948	0,007

В ходе экспериментов по определению сопротивления сухих насадок изменяли расход воздуха от $2,8 \cdot 10^{-3}$ до $55,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Критерий Рейнольдса газа в слое насадки рассчитывали по уравнению:

$$\text{Re}_r = \frac{4w\rho}{a_n\mu}, \quad (1)$$

где a_n – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; w – приведенная скорость газа в колонне, $\text{м}/\text{с}$; μ – коэффициент динамической вязкости газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ρ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициент сопротивления сухой насадки определяли на основании результатов экспериментов по уравнению:

$$\xi_0 = \frac{2\Delta P d_3 \varepsilon}{H \rho w^2}, \quad (2)$$

где ε – свободный объем насадки; ΔP – измеренный перепад давления на насадке, Па ; H – высота слоя насадки, м .

Эквивалентный диаметр насадок определяли по уравнению:

$$d = \frac{4\varepsilon}{a_n}. \quad (3)$$

Результаты экспериментов по определению коэффициента сопротивления сухих насадок представлены на рис. 3. На этом рисунке кривая для насадки из цепей модификации 1 обозначена цифрой 1, для насадки из цепей модификации 2 – цифрой 2, для керамических колец Рашига – цифрой 3, а для рулонированной сетки – цифрой 4.

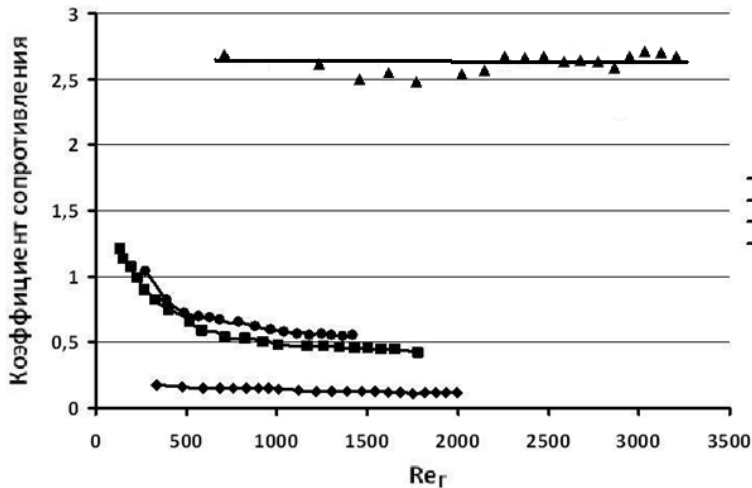


Рис. 3. Зависимость коэффициентов сопротивления насадок от критерия Re_{Γ}

Рашига и насадки из цепей модификации 2 практически не зависят от Re_{Γ} . Это говорит о том, что данные насадки в этом диапазоне работают в автомодельном режиме.

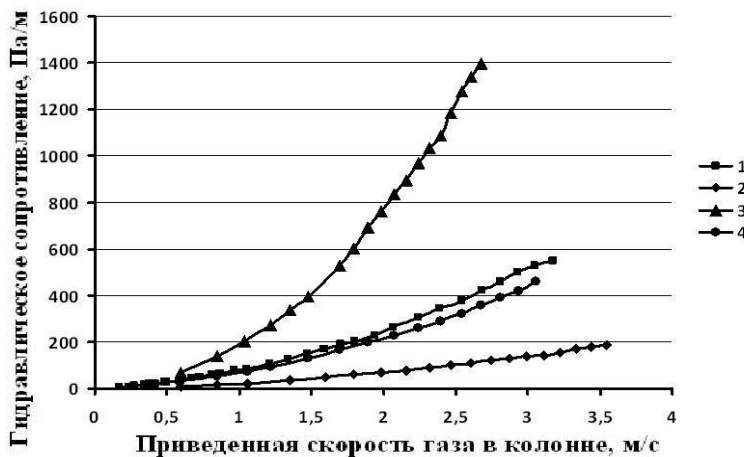


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от скорости газа

Зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки из цепей модификации 1 от критерия Re_{Γ} хорошо описывается следующим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,9835:

$$\xi_0 = 8,922 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,4127}. \quad (4)$$

Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от приведенной скорости газа в колонне представлена на рис. 4, обозначения кривых те же, что и на рис. 3. Как видно из рис. 4, гидравлическое сопротивление колец Рашига в широком

Как видно из рис. 3, коэффициент сопротивления насадки из цепей (обеих модификаций) значительно ниже коэффициента сопротивления колец Рашига, и несколько ниже коэффициента сопротивления рулонированной сетки. При этом эквивалентный диаметр цепей составляет 0,007 м, а колец Рашига в два раза больше – 0,014 м.

Также из рис. 3 видно, что в исследованном диапазоне критерия Re_{Γ} коэффициент сопротивления слоя колец

Рашига и насадки из цепей модификации 2 практически не зависит от Re_{Γ} . Это говорит о том, что данные насадки в этом диапазоне работают в автомодельном режиме. Коэффициент сопротивления насадки из цепей модификации 1 при увеличении критерия Рейнольдса сначала снижается, а затем после $Re_{\Gamma}=715$ изменяется незначительно, оставаясь равным 0,42–0,54. Это свидетельствует о том, что в диапазоне $Re_{\Gamma}=715-1783$ сухая насадка из цепей модификации 1 работает также в автомодельном режиме.

Зависимость коэффициента сопротивления сухой насадки из цепей модификации 1 от критерия Re_{Γ} хорошо описывается следующим

диапазоне скоростей газа значительно превышает сопротивление насадок из цепей. Сопротивление сухой сетки при скоростях газа более 1,3 м/с несколько ниже сопротивления цепей модификации 1, что объясняется более высоким значением свободного объема.

Зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки из цепей (модификация 1) от приведенной скорости газа описывается следующим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,9965:

$$\frac{\Delta P}{H} = 85,105 \cdot w^{1,573}, \quad (5)$$

а насадки из цепей модификации 2 – уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,9989:

$$\frac{\Delta P}{H} = 20,872 \cdot w^{1,739}. \quad (6)$$

Уравнения (5, 6) могут быть использованы при разработке промышленных аппаратов.

Далее экспериментально исследован характер формирования пленки жидкости при различных режимах стекания воды по одиночной вертикально подвешенной цепи на лабораторной установке (рис. 5). Установка состоит из стеклянной трубки 1, диаметром 0,023 м, в которой находится вертикально подвешенная металлическая круглозвенная цепь 2, выполненная из проволоки диаметром 2 мм с размером звена 0,015×0,007 м. Длина цепи – 1,35 м. Сверху, строго на верхнее звено цепи, струйкой подается вода. Для поддержания постоянного напора жидкости в качестве источника воды используется сосуд Мариотта 3. В нижнее отверстие трубки 1, навстречу потоку воды, воздуходувкой 4 подается воздух. Температура воды и воздуха в экспериментах составляет 20°С. Производится съемка видеокамерой для возможности дальнейшего изучения режимов формирования пленки жидкости.

Установлено, что при критерии $Re_{ж}$ менее 12 на одиночной цепи формируется режим с пульсационно-пленочным течением жидкости. Жидкость стекает в виде пульсирующих струек, образующих периодически внутри звеньев цепи плоскую пленку. При данном режиме подача газа в нижнюю часть трубки 1 заметно не влияла на характер движения жидкости. При приведенной скорости газа 10,03 м/с жидкость срывалась с поверхности цепи потоком газа и уносилась вверх.

В диапазоне $Re_{ж}$ от 12 до 100 формируется пленочный режим с частичным смачиванием насадки, при котором отверстия внутри звеньев цепи оказываются затянутыми стабильной пленкой жидкости. Угол между вышележащим и нижележащим звеньями цепи составляет 90°. При этом жидкость, стекая с верхнего звена на нижнее в месте соединения звеньев, также меняет угол плоскости пленки на 90°, интенсивно перемешиваясь. При данном режиме наружная поверхность боковых ребер звеньев цепи оказывается не смоченной. При достижении приведенной скорости газа 8,68 м/с происходит периодический разрыв пленки внутри звена цепи. При приведенной скорости газа 11,34 м/с жидкость уносилась газом с поверхности цепи вверх.

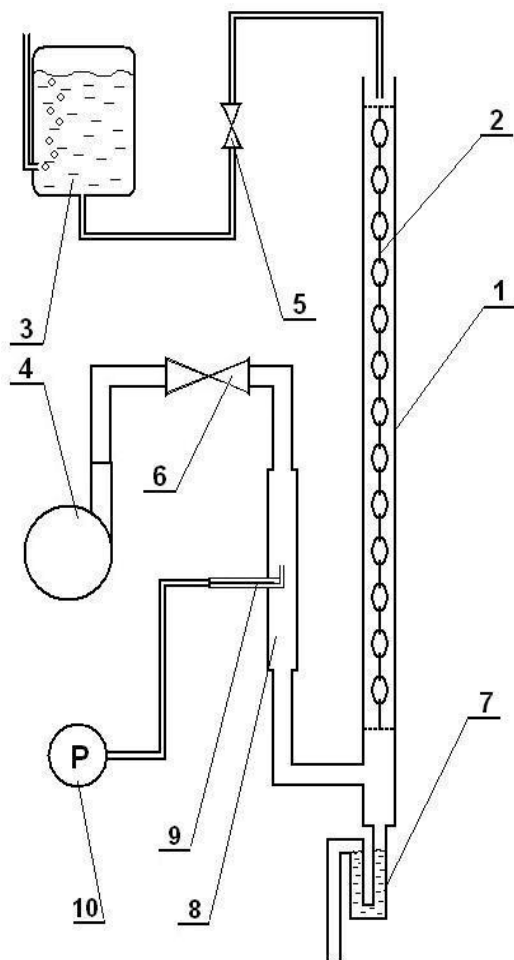


Рис. 5. Схема лабораторной установки для исследования режимов течения жидкости: 1 – трубка; 2 – круглозвенная цепь; 3 – сосуд Мариотта; 4 – воздуходувка; 5, 6 – вентиль; 7 – гидрозатвор; 8 – измерительная трубка; 9 – трубка Пито; 10 – дифманометр

При $Re_{ж}$ от 100 до 629 насадка работала в режиме с полным смачиванием насадки, при котором цепь была полностью смоченной, а в отверстиях звеньев возникала стабильная пленка жидкости с образованием двух свободных поверхностей контакта с газовой фазой. Визуально установлено, что этот режим характеризуется наибольшей поверхностью контакта фаз.

При $Re_{ж}$ более 629 формируется режим с избыточной подачей жидкости при котором цепь практически полностью погружена в струю жидкости, при этом течение струи имеет пульсационный характер.

Таким образом, наиболее предпочтительным для проведения массообменных процессов является третий режим взаимодействия, при котором обеспечивается максимальная поверхность контакта фаз. Важная особенность работы насадки из цепей в данном режиме состоит в том, что пленка жидкости, образующаяся внутри каждого звена цепи, имеет две свободных поверхности контакта с газом, это способствует увеличению общей поверхности контакта фаз и интенсификации процесса массопередачи.

Далее выполнены эксперименты по определению гидравлического сопротивления перечисленных насадок в условиях орошения водой на лабораторной установке (рис. 1).

В экспериментах с орошаемой насадкой расход воды изменяли в диапазоне $47,2 \cdot 10^{-6} - 608,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствовало плотности орошения $2,72 \cdot 10^{-3} - 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Результаты экспериментов для насадки из цепей модификации 1 для различных плотностей орошения представлены на рис. 6, для насадки из цепей модификации 2 представлены на рис. 7, для колец Рашига – на рис. 8, для рулонированной сетки – на рис. 9. Номера кривых на рис. 6 соответствуют плотностям орошения в следующем порядке: 1 – $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – $8,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – $11,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 4 – $17,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 5 – $25,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 6 – $29,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 7 – $31,93 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Кривые на рис. 7: 1 – $25,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – $29,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – $32,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.



Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемой насадки из цепей (модификация 1) от приведенной скорости газа

кривых 5, 6 и 7 являются соответственно линиями подвисяния, эмульгирования и захлебывания.

На рис. 6 и 7 можно наблюдать смену режимов взаимодействия газа и жидкости на насадке из цепей. Начальный пологий участок кривых соответствует пленочному режиму, далее последовательно следуют режимы подвисяния и эмульгирования, каждому из которых соответствует свой участок кривой с определенным углом наклона относительно оси координат. Линии I–I, II–II и III–III на рис. 6 для кривых 5, 6 и 7 являются соответственно линиями подвисяния, эмульгирования и захлебывания. Из рис. 6 видно, что при плотности орошения $31,93 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и при скорости газа 1,48 м/с на насадке из цепей возникает режим захлебывания, а при плотности орошения $29,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ данный режим возникает при приведенной скорости газа 1,6 м/с. Таким образом, увеличение плотности орошения приводит к снижению приведенной скорости газа, при которой наступает режим захлебывания.

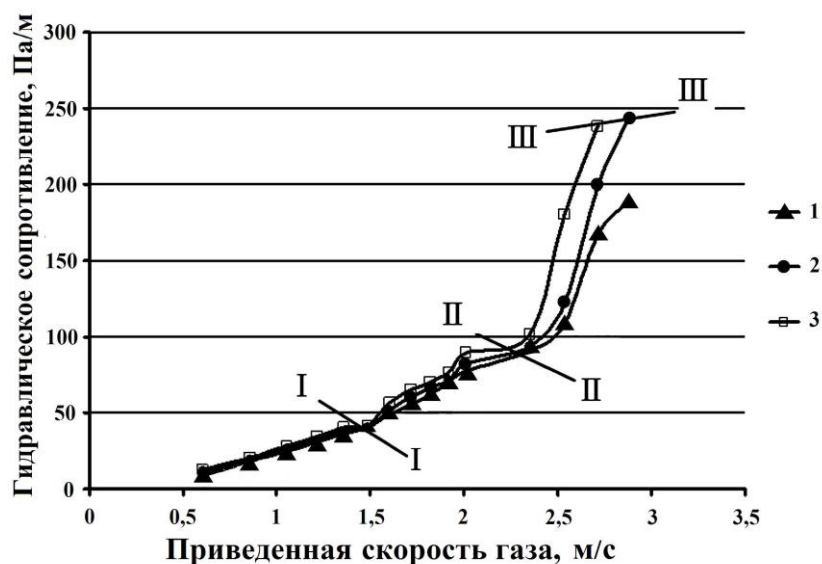


Рис. 7. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемой насадки из цепей (модификация 2) от приведенной скорости газа

На рис. 8 (кольца Рашига) кривой 1 соответствует плотность орошения $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – $5,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – $6,93 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 4 – $8,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 5 – $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 6 – $11,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 7 – $12,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Сравнение рис. 7 и 8 показывает, что сопротивление насадки из цепей (модификация 2) значительно ниже сопротивления колец Рашига при том, что их эквивалентные диаметры приблизительно равны (табл. 1).

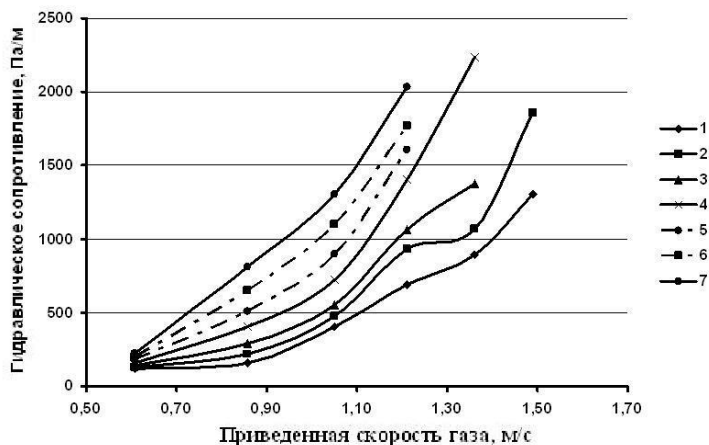


Рис. 8. Зависимость гидравлического сопротивления орошаемых колец Рашига от приведенной скорости газа

орошения $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); 3 – насадке из цепей (модификация 2, плотность орошения $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); 4 – рулонированной сетке, ($2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); 5 – кольцам Паля с эквивалентным диаметром 0,0253 м ($2,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) – по данным [1]; 6 – седлам Инталокс с эквивалентным диаметром 0,025 м ($2,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) – по данным [2].



Рис. 9. Зависимость гидравлического сопротивления рулонированной сетки от приведенной скорости газа

Сопротивление рулонированной сетки обусловлено низкой удерживающей способностью сетки.

По нашему мнению, установленное в результате экспериментов низкое гидравлическое сопротивление насадки из цепей объясняется следующим рядом факторов: большим свободным объемом насадки (табл. 1), обтекаемой формой звеньев цепей, регулярной компоновкой цепей в слое, а также расположением осей цепей вдоль линий тока газа, образованием каналов со сглаженными контурами.

На рис. 9 приведены результаты экспериментов для рулонированной сетки при следующих плотностях орошения: 1 – $5,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, 2 – $20,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, 3 – $25,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, 4 – $32,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Для сравнения на рис. 10 приведены гидравлические сопротивления различных насадок, исследованных нами и другими исследователями. Кривая 1 соответствует кольцам Рашига и плотности орошения $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – насадке из цепей (модификация 1, плотность

Сравнение гидравлических сопротивлений различных видов насадок (рис. 10) показывает, что гидравлическое сопротивление предложенной регулярной насадки из цепей (обеих модификаций) значительно ниже сопротивления колец Рашига, колец Паля и седел Инталокс. Гидравлические сопротивления насадки из цепей и рулонированной сетки соизмеримы, но визуальные наблюдения показали, что низкое гидравлическое сопротивление

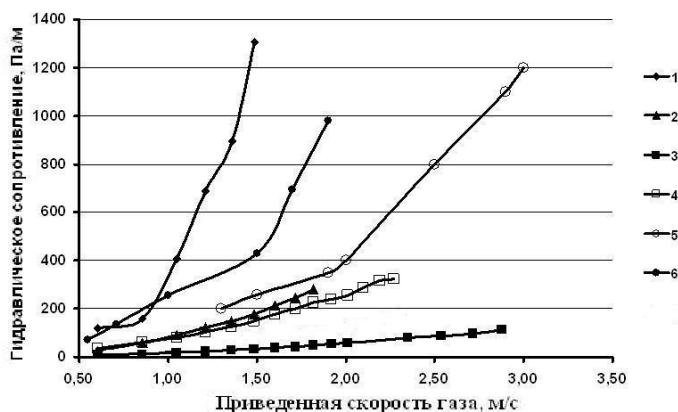


Рис. 10. Зависимость гидравлического сопротивления различных орошаемых насадок от приведенной скорости газа

слоя насадки коэффициент массоотдачи в жидкой фазе не изменяется. Массопередача между жидкой и газовой фазами лимитируется массоотдачей в жидкости. В этом случае массообмен между газовой и жидкой фазами в аппарате описывается уравнением:

$$w_{ж}v_{ж} \frac{dC}{dH} - \beta_L a_n \Delta = 0, \quad (7)$$

где $w_{ж}$ — истинная средняя скорость жидкости в аппарате, м/с; $v_{ж}$ — содержание жидкости в слое насадки, м³/м³; C — концентрация диоксида углерода в жидкости, кмоль/м³; H — высота слоя насадки, м; β_L — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с; a_n — удельная поверхность контакта фаз в слое насадки, м²/м³; Δ — движущая сила массоотдачи в жидкости, кмоль/м³. Для верхнего сечения слоя насадки справедливо: при $H=0$ $C=C^B$.

Движущая сила массоотдачи в жидкой фазе при десорбции:

$$\Delta = C - C^*, \quad (8)$$

где C^* — равновесная концентрация диоксида углерода в жидкости, кмоль/м³.

Равновесная концентрация диоксида углерода в жидкости связана с концентрацией в газе соотношением:

$$C^* = \gamma C_G \quad (9)$$

где $\gamma=0,94$ — коэффициент распределения; C_G — концентрация в газе, кмоль/м³.

В любом сечении аппарата концентрация диоксида углерода в жидкости связана с его концентрацией в газе соотношением, полученным из материального баланса аппарата:

$$C_G = C_G^H + \frac{w_{ж} \cdot v_{ж} (C - C^H)}{w_G \cdot v_G}, \quad (10)$$

где C^H — концентрация диоксида углерода в жидкости в нижнем сечении слоя насадки, кмоль/м³; C_G^H — концентрация диоксида углерода в газе в нижнем сечении слоя насадки, кмоль/м³; w_G — истинная средняя скорость газа в аппарате, м/с; v_G — содержание газа в слое насадки, м³/м³.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности и о возможности дальнейшего использования цепей в качестве насадки на предприятиях химической технологии для проведения десорбционных массообменных процессов.

В третьей главе исследуется интенсивность массообменных процессов при десорбции газа из жидкости на регулярной насадке из цепей.

Разработана математическая модель массопереноса при десорбции диоксида углерода из воды на насадке из цепей. Принимается, что по высоте

Подстановка уравнений (8-10) в уравнение (7) дает:

$$k \frac{dC}{dH} - mC + n = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } k = w_{ж} \cdot v_{ж}, \quad m = \beta_L a_n \left(1 - \gamma \frac{w_{ж} v_{ж}}{w_{г} v_{г}} \right), \quad n = \beta_L a_n \gamma \left(C^H - C^H \frac{w_{ж} v_{ж}}{w_{г} v_{г}} \right).$$

Уравнение (11) является уравнением с разделяющимися переменными, после интегрирования получаем:

$$H = \frac{k}{m} \ln \left(\frac{mC^B - n}{mC^H - n} \right), \quad (12)$$

где C^B и C^H – концентрация диоксида углерода в жидкости соответственно в верхней и нижней части аппарата, кмоль/м³.

По уравнению (12), задавшись концентрацией диоксида углерода в жидкости в верхнем и нижнем сечении аппарата, можно определить требуемую высоту слоя насадки H , м.

Преобразовав уравнение (12), получаем зависимость для определения концентрации диоксида углерода в любом сечении аппарата:

$$C = \frac{n}{m} + \frac{mC^B - n}{m \cdot \exp\left(\frac{H \cdot m}{k}\right)}. \quad (13)$$

По математической модели (7-13) выполнены расчеты распределения концентрации диоксида углерода по высоте слоя насадки из цепей для следующих условий: расход жидкости 4 м³/ч, внутренний диаметр аппарата 0,15 м, удельная поверхность насадки 433 м²/м³. Результаты расчетов представлены на рис. 11.

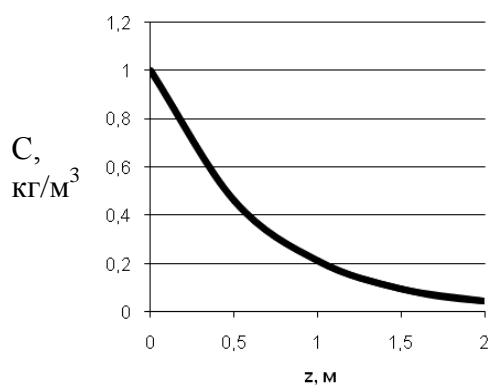


Рис. 11. Распределение концентрации диоксида углерода в во-

Далее выполнены экспериментальные исследования интенсивности массопереноса на насадке из цепей и, для сравнения, на кольцах Рашига. Исследования проводились при десорбции диоксида углерода из водных растворов в поток воздуха. Для осуществления данных экспериментов была создана лабораторная установка, изображенная на рис. 12.

Десорбционная колонна 1 с внутренним диаметром 147 мм и высотой 2,3 м заполнена насадкой 2 (модификации 1), состоящей из вертикально подвешенных круглозвенных цепей, выполненных из проволоки диаметром 2 мм. Высота слоя насадки – 1,35 м.

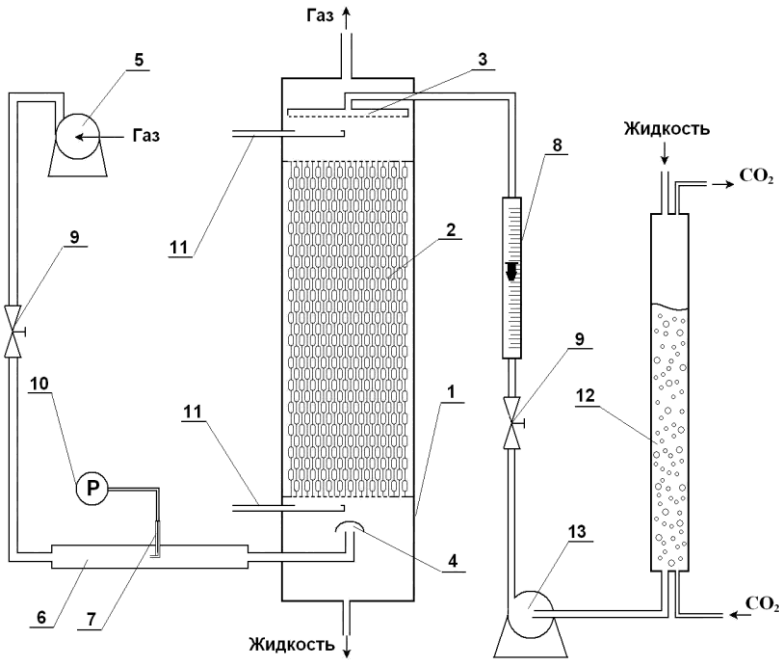


Рис. 12. Схема лабораторной установки для исследования массообмена

Дистиллированная вода, применяемая в качестве абсорбента, подается сверху в абсорбер 12, представляющий собой колонну диаметром 0,1 м и высотой 2 м. В нижнюю часть абсорбера 12 подается углекислый газ. Абсорбент из нижней части абсорбера подается насосом 13 в десорбционную колонну 1 через распределительное устройство 3. Количество абсорбента регулируется с помощью вентилей 9, а измеряется ротаметром 8. В нижнюю часть колонны 1 подается воздух с помощью воздушной подушки 5. Количество воздуха определяется с помощью

измерительной трубки 6, трубки Пито 7 и микроманометра 10. Расход газа регулируется вентилем 9. Распределитель газа 4 служит для более равномерного распределения газа по сечению колонны. Отбор проб абсорбента осуществляется с помощью пробоотборников 11. Параметры режима в колонне (температура, давление) соответствуют параметрам технологического режима в десорберах второй ступени очистки воды от диоксида углерода на ОАО «АНХК».

Интенсивность массоотдачи (объемные коэффициенты массоотдачи) определяли по изменению концентрации диоксида углерода в водном растворе при прохождении через насадку. Концентрация определялась путем прямого титрования проб, отобранных из пробоотборников.

В исследуемой газожидкостной системе (диоксид углерода–воздух–вода) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяли по уравнению:

$$\beta_{La} = \frac{M}{\Delta_{cp} \cdot V_H}, \quad (14)$$

где β_{La} – объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $\text{ч}^{-1} (\text{с}^{-1})$; M – количество вещества, перешедшего через границу раздела фаз, моль/ч (моль/с); Δ_{cp} – средняя движущая сила процесса, моль/м³; V_H – объем насадки, м³.

Результаты экспериментов по определению объемных коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе представлены на рис. 13, 14 и 15. На рис. 13 приведена зависимость объемного коэффициента массоотдачи от F-фактора ($F = W\sqrt{\rho_T}$) при плотности орошения 111 м³/(м²·ч), кривая 1 соответствует коэффициенту массоотдачи на насадке Инталокс (50 мм) (построена по данным [3]), кривая 2 соответствует насадке из цепей (модификация 1), кривая 3 соответствует результатам наших экспериментов на керамических кольцах Рашига ($d_s=0,007$ м, $15 \times 15 \times 2$, $a=330$ м²/м³).

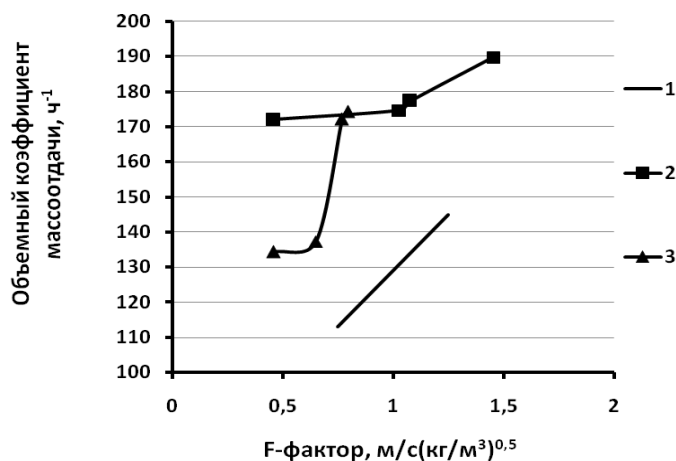


Рис. 13. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от F-фактора диоксида углерода в воде определяли требуемую высоту слоя насадки по уравнению (12), рассчитывали объем слоя насадки, а объемный коэффициент массоотдачи (ч^{-1} , с^{-1}) рассчитывали по уравнению:

$$\beta_L a = \frac{L_V (C^B - C^H)}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot H \cdot \Delta_{cp}}, \quad (15)$$

где D – диаметр аппарата, м; L_V – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$ ($\text{м}^3/\text{с}$).

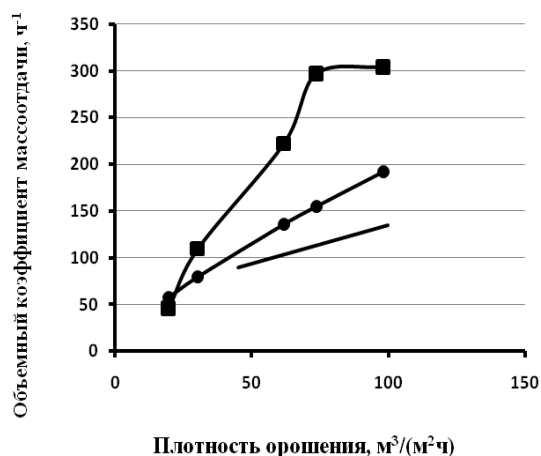


Рис. 14. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи на насадке из цепей (модификация 1) от плотности орошения

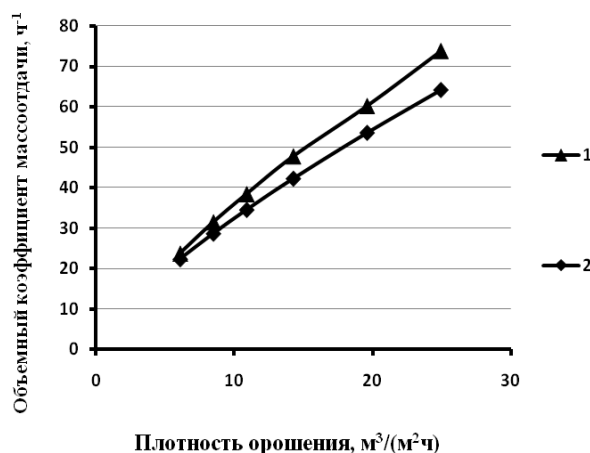


Рис. 15. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи на кольцах Рашига от плотности орошения

Результаты расчетов по уравнению (15) и экспериментальных исследований для системы диоксид углерода–воздух–вода для различных видов насадок представлены на рис. 14 и 15. Кривая 1 на рис. 14 соответствует экспериментам на насадке Инталокс ($d_s=0,05$ м), работающей при F-факторе, равном $1,45 \text{ м/с(кг/м}^3)^{0,5}$, кривая 1 построена по данным [3]. Кривая 2 на рис. 14 соответствует нашим собственным экспериментам на насадке из цепей (модификация 1), высота слоя $1,35$ м. Для кривой 2 F-фактор составляет $1,03 \text{ м/с(кг/м}^3)^{0,5}$. Кривая 1 на рис. 15 соответствует нашим экспериментам на слое керамических колец Рашига ($d_s=0,007$ м), высотой $0,45$ м, $a_n=330 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (F-фактор равен $1,45 \text{ м/с(кг/м}^3)^{0,5}$). Кривая 3 на рис. 14 – это ре-

Видно, что в значительном диапазоне изменения F-фактора объемный коэффициент массоотдачи в жидкости на насадке из цепей превышает коэффициент массоотдачи на насадке Инталокс и на кольцах Рашига.

Далее с использованием математической модели (7-13) выполнены расчеты объемных коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе при десорбции диоксида углерода из воды для колец Рашига и насадки из цепей.

На основе заданных значений начальной и конечной концентрации диоксида

зультаты расчетов по модели (7-13) и уравнению (15) для насадки из цепей, параметры которой указаны в табл. 1 (модификация 1) (F-фактор равен $1,03 \text{ м/с}(\text{кг/м}^3)^{0,5}$); кривая 2 на рис. 15 – результаты расчетов по модели (7-13, 15) для колец Рашига ($d_p=0,007 \text{ м}$) (F-фактор равен $1,45 \text{ м/с}(\text{кг/м}^3)^{0,5}$).

Из рис. 14 и 15 видно, что, во-первых, интенсивность массоотдачи в жидкой фазе на насадке из цепей выше, чем на седлах Инталокс и кольцах Рашига; во-

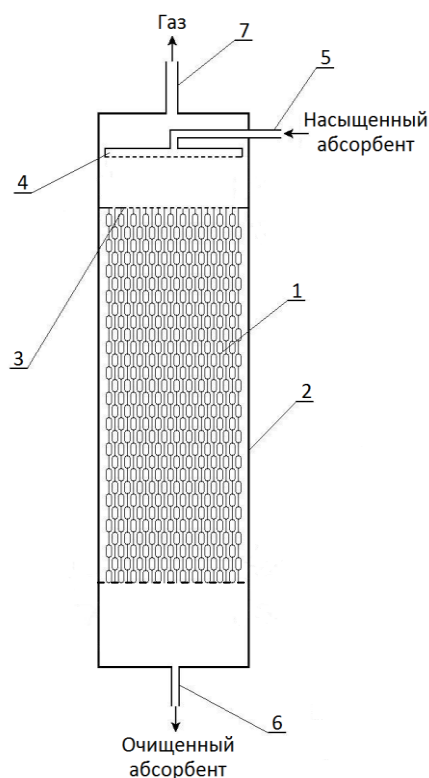


Рис. 16. Схема

аппарата-десорбера: 1 – насадка; 2 – колонна; 3 – решетка; 4 – распределитель жидкости; 5 – штуцер подачи жидкости; 6 – штуцер для вывода жидкости из аппарата; 7 – штуцер для вывода

вторых, результаты экспериментов (кривая 1 рис. 15) и результаты расчетов по модели (7-13, 15) (кривая 2, рис. 15) для колец Рашига хорошо согласуются. Отклонение экспериментальных данных от расчетных данных составляет не более 10%. Это подтверждает адекватность разработанной модели (7-13, 15). В случае насадки из цепей можно видеть, что реальные объемные коэффициенты массоотдачи значительно выше значений, рассчитанных по модели (7-13, 15). Это можно объяснить тем, что в модели (7-13, 15) за поверхность массопередачи принимается удельная поверхность насадки. На кольцах Рашига удельная поверхность насадки близка смоченной поверхности, на насадке из цепей – поверхность пленки оказывается выше удельной поверхности насадки за счет механизма образования внутри звеньев цепи пленки с двумя свободными поверхностями, в результате чего интенсивность массоотдачи растет. При стекании жидкости с одного звена цепи на другое происходит интенсивное перемешивание пленки жидкости, ускоряющее процесс массоотдачи. Этот механизм объясняет явление интенсификации массопереноса на насадке из цепей.

Кроме того, из рис. 14 и 15 видно, что насадка из цепей работает в более широком диапазоне плотностей орошения. Так, на кольцах Рашига уже при плотности орошения $22 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ наступает режим захлебывания.

В четвертой главе приведена методика расчета аппарата-десорбера с регулярной насадкой из цепей, предназначенного для выделения диоксида углерода из воды. Конструкция аппарата иллюстрируется рис. 16. Жидкость стекает пленкой сверху вниз по звеньям цепей. Газ поднимается снизу вверх по криволинейным каналам, образованным цепями. Методика расчета аппарата включает в себя разработанную математическую модель (7-13). Методика позволяет рассчитать диаметр аппарата с насадкой из цепей, высоту слоя насадки, среднюю движущую силу процесса массопередачи и гидравлическое сопротивление десорбера.

Предложенный аппарат позволяет интенсифицировать процесс массопереноса и понизить концентрацию диоксида углерода в воде на выходе с $0,0460$ до $0,0388 \text{ кмоль/м}^3$ при нагрузке по жидкости $250 \text{ м}^3/\text{ч}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Оптимальным способом интенсификации процесса десорбции диоксида углерода из воды является увеличение коэффициентов массоотдачи и площади контакта фаз с использованием высокоэффективной регулярной насадки из круглозвенных цепей.
2. Учет положений теории гидродинамики при конструировании регулярной насадки из цепей и при выборе схемы компоновки элементов насадки позволил снизить коэффициент сопротивления сухой насадки из цепей (модификация 1, $d_3=0,007$ м) в среднем в 4,5 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления колец Рашига ($d_3=0,014$ м), а также снизить коэффициент сопротивления регулярной насадки из цепей (модификация 2, $d_3=0,015$ м) в среднем в 20,2 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления колец Рашига ($d_3=0,014$ м), и в 4,6 раза в сравнении с коэффициентом сопротивления рулонированной сетки ($d_3=0,007$ м).
3. Взаимодействие жидкости и газа на одиночной цепи насадки при неизменной скорости газа определяется значением расхода жидкости. Экспериментально установлены границы возникновения четырех гидродинамических режимов: пульсационно-пленочного, пленочного с частичным смачиванием насадки, пленочного с полным смачиванием насадки и режима с избыточным орошением, отличающихся величиной поверхности контакта фаз.
4. Гидравлическое сопротивление регулярной насадки из цепей (модификации 1, $d_3=0,007$ м) ниже сопротивления колец Рашига ($d_3=0,014$ м) в среднем в 3,92 раза, ниже сопротивления колец Паля ($d_3=0,025$ м) в среднем в 1,78 раза и ниже сопротивления седел Инталокс ($d_3=0,025$ м) в среднем в 2,8 раза. Использование насадки из цепей позволит существенно затратить энергии на преодоление потоком газа гидравлического сопротивления слоя насадки в сравнении с кольцами Рашига и седлами Инталокс.
5. Разработанная математическая модель процесса десорбции диоксида углерода из воды на высокоэффективной регулярной насадке, описывающая распределение концентрации диоксида углерода по высоте слоя насадки из цепей позволяет определить концентрацию диоксида углерода в воде на выходе из слоя насадки и значение объемного коэффициента массоотдачи.
6. Интенсификация процесса десорбции диоксида углерода из водных растворов на регулярной насадке из цепей достигается за счет механизма взаимодействия газа и жидкости, при котором образуется пленка жидкости с двумя свободными поверхностями, а также обеспечивается эффективное перемешивание в пленке, при этом объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе на регулярной насадке из цепей (модификация 1, $d_3=0,007$ м) выше в среднем в 1,75 раза, чем на седлах Инталокс и в среднем в 3,91 раза, чем на керамических кольцах Рашига ($d_3=0,007$ м). Интенсификация процесса десорбции позволяет на 14% снизить потери диоксида углерода в атмосферу в процессе очистки синтез-газа от диоксида углерода, в результате чего ожидаемый экономический эффект составит 3,09 млн. руб. в год.

7. Учет конструктивных особенностей насадки и механизма интенсификации массообмена позволил разработать надежную методику расчета промышленного аппарата-десорбера с регулярной насадкой из цепей, позволяющую определить основные параметры слоя насадки из цепей: его высоту, диаметр, а также распределение концентраций диоксида углерода по высоте слоя насадки.

Список цитируемой литературы:

1. Мокин В.А., Молоканов Ю.К. Оценка гидродинамических и массообменных характеристик угольковых насадок и колец Паля. // Химическая промышленность, 1988, №11, с. 46-48.
2. Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Струнина А.В., Морозов А.И. Гидродинамические исследования седловидных насадок и колец Паля. // Химическая промышленность, 1974, №5, с. 60-64.
3. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. О повышении предельно допустимых нагрузок при работе массообменных аппаратов с насадочными устройствами. // Химическая промышленность, 2001, №4, с. 46-48.

Публикации по теме работы:

Статьи в центральной печати (перечень ВАК)

1. Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Гидродинамические исследования цепной насадки. // Химическая промышленность сегодня, №2, 2013, с. 34-42.
2. Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Технология газожидкостных процессов на цепной насадке. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. №1 (33), 2012, с. 64-68.
3. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Разработка технологии процесса десорбции газа из жидкости на насадке в электромагнитном поле. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3 (27), 2010, с. 120-124.
4. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3 (35), 2012, с. 147-150.
5. Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Массообмен в десорбере с новой цепной насадкой. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 4 (36), 2012, с. 215-217.

Патент

6. Патент на изобретение РФ №2465957 (2012 г.). Насадочный аппарат для массообменных процессов. Авторы: Бальчугов А.В., Рыжов С.О., Кузора И.Е.

Монография

7. Бальчугов А.В., Рыжов С.О., Кузора И.Е. Гидродинамика и массообмен на насадках в газожидкостных системах. Монография, Ангарск, АГТА, 2012 г., 107 с.

Другие публикации:

8. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Математическое моделирование гидродинамики и массопереноса в газожидкостной системе на цепной насадке. // Труды XVII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические

технологии в науке и управлении», Иркутск, Институт систем энергетики СО РАН, 2012, том 1, с. 168-175.

9. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Моделирование массоотдачи при десорбции углекислого газа из жидкости на цепной насадке. // Сборник трудов XXV международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–25», том 7, секция 11, Саратов, 2012, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

10. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Массообмен на цепной насадке для очистки технологических газов. // Материалы третьей международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития», Иркутск, ИрГУПС, 2012, с. 172-174

11. Рыжов С.О., Васильев А.В., Бальчугов А.В. Интенсификация процесса десорбции углекислого газа из жидкости с помощью электромагнитного поля. // Вестник АГТА. Ангарск, 2010, с. 30-33

12. Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Васильев А.В. Экспериментальное исследование кинетики десорбции газов из жидкостей. Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. Ангарск, АГТА, 2010, с. 57-59.

13. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Способы интенсификации десорбции газов из жидкостей. // Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс», Ангарск, АГТА, 2010, с.26.

14. Скачков И.В., Рыжов С.О., Андреев М.В., Бальчугов А.В. Исследование гидравлического сопротивления новой регулярной ленточной насадки. Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. Ангарск, АГТА, 2012 г. с. 40-46.

15. Рыжов С.О. Исследование гидродинамики взаимодействия воздуха и воды на регулярной насадке. // Сборник научных трудов АГТА, Ангарск, 2012, с. 96-98.

16. Рыжов С.О., Парахонько Н.Н., Бальчугов А.В. Исследование эффективности массообмена на цепной насадке. // Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. Ангарск, АГТА, 2012 г., с. 33-36.

17. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Экспериментальное определение коэффициента сопротивления сухой насадки. // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс», Ангарск, АГТА, 2012 г., с. 24-25.

18. Бархатова С.С., Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Разработка, моделирование и испытание новой высокоэффективной регулярной насадки для тепло- и массообменных процессов в газожидкостных системах. // Материалы V региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «АНХК», Ангарск, 2012 г., с. 19-26.

19. Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Исследование массообменных характеристик новой регулярной насадки. // Вестник АГТА, №5, 2012 г., с. 5-7.

20. Рыжов С.О., Бальчугов А.В. Экспериментальное сравнение характеристик насадок в газожидкостных средах. // Вестник АГТА, №5, 2012 г., с. 26-30.