

УДК: 66.074.51:66.081.2: 697.922.563

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ $CO_2$ В КОЛОННОМ АППАРАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

И.А. Повтарев, В.Н. Блиничев, О.В. Чагин

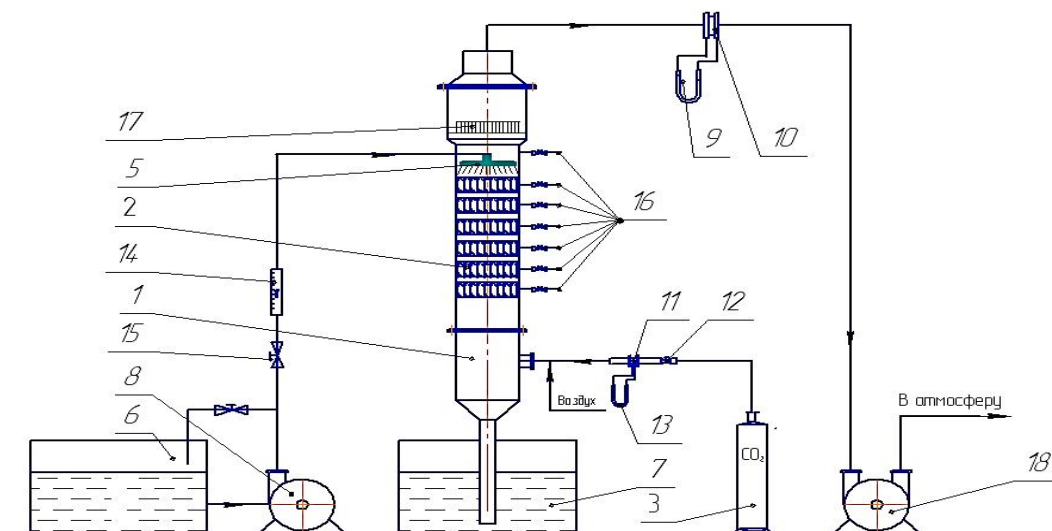
*Ивановский государственный химико-технологический университет*

В данной статье представлены сравнительные исследования массообменного устройства, надежно работающего при высоких скоростях газа, создающего как большие поверхности тепло- и массообмена, так и высокие значения коэффициентов массопередачи. Это устройство, работающее в противоточном режиме, а также хорошо сепарирующее капли жидкой фазы, образующиеся при высоких скоростях газа с другими типами массообменных устройств. Сравнительные исследования гидравлического сопротивления различных насадочных устройств свидетельствуют о том, что в отличие от других конструкций насадок, пакетная вихревая насадка работает в устойчивом эмульсионном режиме и при этом обладает существенно меньшим гидравлическим сопротивлением. Визуальные наблюдения показывают, что с увеличением скорости наблюдается не только общее увеличение количества удерживаемой жидкости, но и более интенсивное межфазное взаимодействие, протекающее также в определенной мере в межслойных пространствах насадочного комплекта.

**Ключевые слова:** абсорбция, колонные аппараты, массообменное устройство пакетная вихревая насадка.

Для проведения исследований гидродинамики процесса абсорбции углекислого газа ( $CO_2$ ) 20% раствором моноэтаноламина (МЭА) в аппарате с насадкой была собрана экспериментальная установка, позволяющая проводить ис-

следования гидравлического сопротивления насадочного слоя в аппарате с различными типами контактных устройств [1-8]. Общий вид установки схематично представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки для проведения исследований гидродинамики в различными типами насадок**

1 - абсорбционная колонна; 2 - насадка; 3 - баллон с абсорбируемым газом  $CO_2$ ; 5 - ороситель; 6 - ёмкость исходного раствора; 7 - емкость для сбора абсорбента; 8 - насос; 9, 13 - дифференциальный манометр; 10 - измерительная диафрагма; 11 - расходомерное устройство; 12 - редуктор подачи углекислого газа; 14 - расходомер жидкой фазы; 15 - вентиль; 16 - пробоотборные вентили; 17 - каплеотбойник; 18 - вакуум-насос.

Установка состоит из абсорбционной колонны (1) с насадкой (2), баллона (3) с углекислым газом, насоса (8) для подачи абсорбирующей жидкости через ороситель (5), ёмкости исходной жидкости (6), емкости для сбора насыщенной жидкости (7), вакуум-насоса (18) создающего разрежение и просос воздуха, а также систем измерения расходов воздуха и  $CO_2$  (9, 10, 11, 12, 13), расходов орошающей жидкости (14, 15) и пробоотборников (16), распределенных по высоте абсорбера.

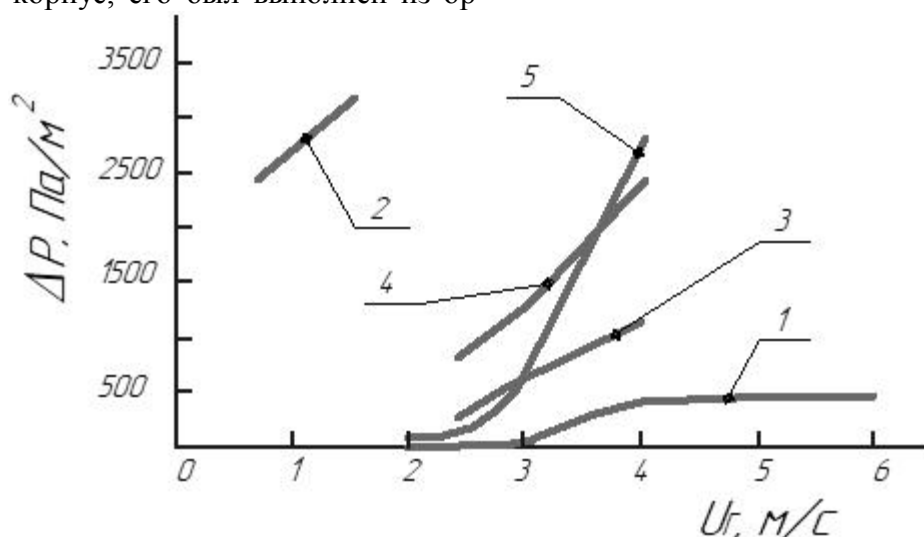
Экспериментальный абсорбер представляет собой колонный аппарат высотой 1100 мм, вверху которого расположен вихревой каплеотбойник (17). Для возможности визуального наблюдения за массообменной обстановкой внутри аппарата корпус, его был выполнен из ор-

ганического стекла. Внутренний диаметр рабочей зоны абсорбера – 130 мм.

Для контроля эффективности процесса абсорбции по высоте насадки использовались пробоотборники (16).

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования гидравлического сопротивления четырех видов насадки: пакетной вихревой насадки (ПВН) [9], разработанной на кафедре МАХП ИГХТУ; псевдооживленной шаровой насадки (ПСОН); слоя неупорядоченных колец Рашига и насадки швейцарской фирмы Mellapak X250.

На рис. 2. представлены результаты исследования гидравлического сопротивления насадочного слоя в зависимости как от расхода жидкой и газовой фаз, так и от типа контактного устройства.



**Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления насадочного слоя от скорости газа и типа контактного устройства насадочного слоя:**

1 – ПВН (плотность орошения  $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ); 2 – Кольца Рашига ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ );  
3 – ПВН ( $\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ); 4 – ПСОН ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ );  
5 – Mellapak X250 ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ).

Насадка из колец Рашига была использована как образец контактного устройства, наиболее широко встречающегося до последнего времени. Был применен неупорядоченный вид укладки насадочных элементов. Элементы насадки изготавливались из ПВХ трубы с размерами  $25 \times 25 \text{ мм}$ , с толщиной стенки 2 мм. Высота слоя насадки в лабораторной ус-

тановке составила 400 мм. Исследования проводили при рекомендуемой для данного вида насадки скорости газа не более  $U_g = 1,5 \text{ м/с}$ . Плотность орошения составила  $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ , что соответствует общепринятым соотношениям.

Из практики известно, что межфазное взаимодействие в аппарате с псевдооживленной насадкой отличается

от процессов контактирования фаз при применении неподвижного контактного слоя. Режимы работы данной насадки характеризуются, как одни из самых интенсивных, и способствуют максимально эффективному ведению процесса абсорбции, особенно в аппаратах малого диаметра. В исследованиях в качестве насадочных элементов использовались пустотелые шары диаметром 15 мм, изготовленные из ПВХ. Высота неподвижного слоя насадки составила 130 мм. Скорость газового потока изменялась в диапазоне от 2 до 4 м/с. При этих значениях скоростей газа происходило создание газожидкостного слоя общей высотой до 400 мм. Плотность орошения составила  $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .

Ярким представителем современных пакетных насадок является Швейцарская насадка фирмы «Зульцер» типа Mellapak X250. Данный тип насадки широко применяется в современной промышленности для ведения массообменных процессов при малых плотностях орошения. Массообменные процессы идут между газовым потоком, движущимся по наклонным каналам, и пленкой жидкости, стекающей по стенкам данных каналов. Скорости газового потока не превышают, как правило, 3 м/с, а плотности орошения лежат в пределах  $5 \div 25 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ . Данный тип насадки требует применения оросителя сложной конструкции и не менее сложного перераспределителя жидкости. В лабораторной установке применялась пакетная насадка Mellapak 250, выполненная из полипропилена с высотой насадочного слоя 800 мм.

Из приведенных данных (Рис.2.) видно, что при одинаковой плотности орошения ( $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ) гидравлическое сопротивление различных типов насадок отличается друг от друга существенно.

Насадочный слой, выполненный из колец Рашига, отличается самым минимальным диапазоном изменений скоростей газовой фазы, не превышающим 1,5 м/с, и самым высоким, по сравнению с другими насадками, гидравлическим

сопротивлением, равным  $3182 \text{ Па/м}$  при данной скорости газа.

Режим работы псевдооживленной насадки характеризуется также достаточно высокими значениями гидравлического сопротивления слоя. Например, при скорости газа, равной 4 м/с, сопротивление псевдооживленного слоя составило –  $2440 \text{ Па/м}$ .

Экспериментальные исследования насадочного слоя с пакетной насадкой Mellapak 250 показали, что она обладает достаточно малым гидравлическим сопротивлением ( $\sim 700 \text{ Па/м}$ ) при скоростях газа, не превышающих 3 м/с. При больших скоростях газа сопротивление насадочного слоя возрастает существенно и уже при скорости газа 4 м/с достигает  $2800 \text{ Па/м}$ , т.е. становятся существенно большим по сравнению с сопротивлением пакетной вихревой насадки.

Пакетная вихревая насадка отличается высокой долей свободного сечения, за счет использования тонкостенных образующих элементов и особым регулярным расположением вихревых ячеек.

Из рис. 2 наглядно видно, что кольца Рашига уже при  $U_2 = 1,5 \text{ м/с}$  имеют в сотни раз большее гидравлическое сопротивление, чем насадки ПВН (пакетные вихревые насадки) и в то же время уже не работают при скорости более  $U_2 = 2 \text{ м/с}$ .

Гидравлическое сопротивление насадок с псевдооживленным слоем (ПСОН) при равной скорости газа примерно в 30 раз выше, чем сопротивление пакетной вихревой насадки.

Даже насадки Mellapak 250, рекламируемые фирмой Зульцер, имеют в 6 раз большее сопротивление, нежели пакетная вихревая насадка при одной и той же плотности орошения.

Пакетная вихревая насадка, исследованная нами (Рис. 3) [9,10], состоит из множества одинаковых ячеек прямоугольной формы, соединенных между собой в единый пакет, стенки каждой ячейки смещены относительно друг друга по вертикали, перекрывая фронтальную

щель на входе в ячейку за счет удлиненных, загнутых внутрь окончаний, образующих завихритель. На выходе из ячейки, окончания обеих стенок также выполнены удлиненными и загнутыми

внутри, перекрывая фронтальную щель и образуя второй завихритель. Поверхность каждой ячейки полностью или частично покрыта регулярной шероховатостью или перфорацией любой формы.

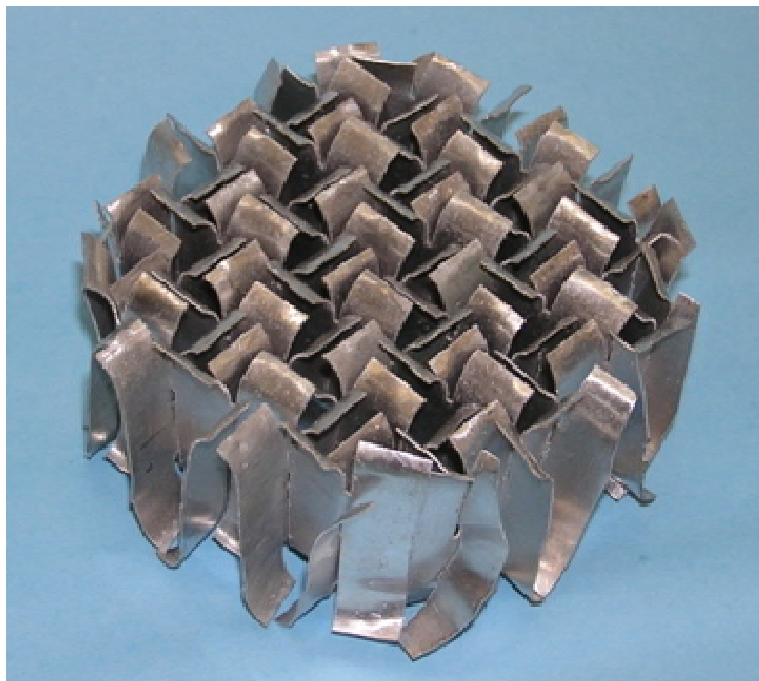
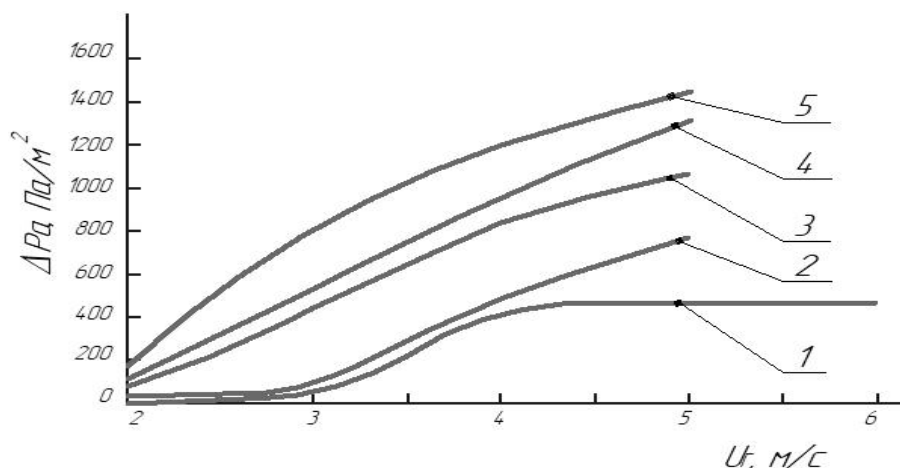


Рис. 3. Общий вид пакетной вихревой насадки

В связи с тем, что ячейки идентичны по размерам и форме, а также расположены симметрично, происходит равномерное распределение и перераспределение, за счет выброса газового потока из каждой ячейки, и повернутого на  $90^0$  положения одной ячейки относительно другой, между соседними элементами насадки, как объемного расхода газа, так и объемного расхода орошающей жидкости. Такое конструктивное решение позволяет проводить массообменный процесс на более высоких скоростях движения газового потока, в условиях противоточного режима движения взаимодействующих фаз, по сравнению с вышеописанными видами насадок.

Как показали лабораторные исследования гидравлического сопротивле-

ния, испытываемая насадка может работать вплоть до скорости  $U_z=6$  м/с. Однако наиболее устойчивый режим развитой эмульсии находится в диапазоне скоростей газа  $U_z=3,0\div 5,5$  м/с. При скорости более 6 м/с наблюдается частичное подвешивание жидкости в слое насадки и брызгоунос в каплеотбойник. Рост гидравлического сопротивления слоя пакетной вихревой насадки при скорости газа свыше 4,5 м/с незначителен. Так, например, при  $U_z=4,5$  м/с гидравлическое сопротивление составляет 430 Па/м, а при  $U_z=6$  м/с – 480 Па/м при плотности орошения  $20$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, т.е. наблюдается рост сопротивления в несколько раз меньшим, по сравнению с другими насадками.

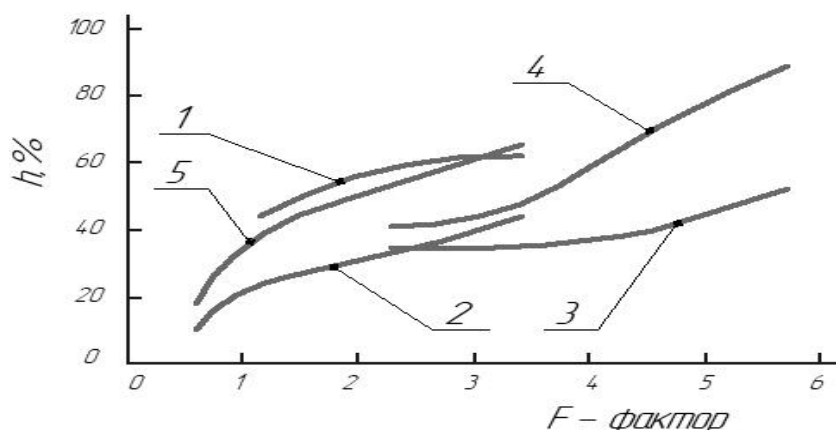


**Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления слоя пакетной вихревой насадки в зависимости от расхода фаз**

- 1 – плотность орошения  $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ; 2 – плотность орошения  $40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ;  
 3 – плотность орошения  $60 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ; 4 – плотность орошения  $80 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ;  
 5 – плотность орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при всех плотностях орошения пакетная вихревая насадка обладает значительно более низким гидравлическим сопротивлением по сравнению с другими исследуемыми насадками при равных расходах жидкой и газовой фаз, а также поддерживает устойчивый эмульсионный режим работы при более высоких скоростях газовой фазы ( $3\div 6 \text{ м/с}$ ) при незначительном гидравлическом сопротивлении.

Даже при плотности орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и скорости газа  $U_2=5 \text{ м/с}$  сопротивление насадочного слоя не превышало  $1400 \text{ Па/м}$ , что свидетельствует о низких затратах энергии на ведение процесса массообмена с участием насадки ПВН. На ранее описанной экспериментальной установке нами были проведены исследование процесса абсорбции  $\text{CO}_2$  раствором моноэтаноламина (МЭА) в аппарате, снабженном массообменными устройствами различных конструкций, результаты которых представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Сравнение эффективности процесса абсорбции  $\text{CO}_2$  раствором моноэтаноламина в аппарате с различными типами массообменных устройств**

- 1 – ПСОН ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ); 2 – Кольца Рашига ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ );  
 3 – ПВН ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ); 4 – ПВН ( $\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ); 5 – Mellapak 250 ( $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ).

Сравнительные исследования проводились с использованием различных видов насадок:

1. пакетная вихревая насадка (ПВН), разработанная нами;
2. насадка Mellapak X250 – Швейцарской фирмы «Зульцер»;
3. сравнительно широко еще используемая насадка с кольцами Рашига навалом;
4. насадка с псевдооживленном слое пустотельных шаров, сравнительно неплохо зарекомендовавшая себя в аппаратах малых диаметров.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис.5, показывает, что эффективность процесса абсорбции  $CO_2$  20% раствором моноэтонолами на существенно зависит от конструктивного оформления насадок.

Из рис.5 наглядно видно, что при малой плотности орошения  $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и малых скоростях газа до  $2,5 \text{ м/с}$ , когда в насадке типа колец Рашига, насадке Mellapak 250, в вихревой пакетной насадке наблюдается чисто пленочный характер взаимодействия между газом и жидкостью при равномерном орошении их абсорбентом в аппарате малого диаметра. К.п.д. процесса абсорбции в насадках, имеющих большую смоченную поверхность, естественно, имеют и более высокий к.п.д. Даже кольца Рашига в исследованиях имели более высокую удельную поверхность массопередачи (на 30%), чем исследованная нами насадка ПВН, не говоря уже о насадке Mellapak.

В сравнении с насадкой Mellapak X250 удельная поверхность нашей насадки составила  $180 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

То же самое можно сказать и о псевдооживленной насадке, когда при малой скорости газа  $U_c = 1,5 \div 2,8 \text{ м/с}$  легкие пустотелые шары уже «кипели» и в псевдооживленном слое наблюдался сложный характер взаимодействия между газом и жидкостью: струйный внизу слоя у распределительной решетки и сложный в самом слое, когда движущиеся шары имели хорошо смоченную поверхность и

за счет их хаотичного движения в слое образовывался большой спектр капель.

Однако при скорости более  $2,8 \text{ м/с}$  происходил большой унос капель абсорбента с поверхности псевдооживленного слоя, поэтому далее проводить исследования с псевдооживленной насадкой не имело смысла.

Отсюда можно сделать вывод, что при малых плотностях орошения до  $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и при малых скоростях газа (до  $2,5 \text{ м/с}$ ) более эффективно работают насадки, имеющие большую удельную смоченную поверхность.

Эффективность насадки ПВН начинает резко возрастать при наступлении эмульсионного режима газожидкостного взаимодействия в каждой ячейке и насадка имеет высокую эффективность массопередачи при скоростях газа от  $2,5$  до  $5,5 \text{ м/с}$ , когда другие насадки уже не работают.

При плотностях орошения  $40$  и более  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и скоростях газа более  $2,5 \text{ м/с}$  пакетная вихревая насадка имеет значительно меньшую высоту единицы переноса, по сравнению с лучшей насадкой фирмы Зульцер, не говоря уже о других типах насадок.

Учитывая, что ПВН хорошо работает при высоких скоростях газа (в  $1,5 \div 2$  больших по сравнению с лучшими российскими и зарубежными насадками), то кроме малой высоты насадки и, соответственно, малой высоте аппарата в целом, аппараты с ее использованием имеют существенно меньший диаметр. Это приводит к резкому снижению металлоемкости оборудования и, пропорционально ему, уменьшению стоимости оборудования в целом.

Сравнительные исследования гидравлического сопротивления различных насадочных устройств показали, что, в отличие от других конструкций насадок, пакетная вихревая насадка работает в устойчивом эмульсионном режиме, обеспечивающим большие поверхности массообмена и высокие относительные скорости движения фаз, в диапазоне скоростей

газа от 2,5-5,5 м/с в широком диапазоне плотностей орошения от 20 до 120 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч и при этом обладает существенно меньшим гидравлическим сопротивлением.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что (при применении пакетной вихревой насадки) на эффективность процесса абсорбции существенную роль оказывает как расход газовой фазы, так и плотность орошения по причине не только турбулизации взаимодействующих потоков, но и резкого роста межфазной поверхности. Пространственная форма пакетной вихревой насадки способствует развитию в объеме насадочного слоя интенсивного взаимодействия газового и жидкостного потоков, причем межфазная поверхность контакта в несколько раз превосходит физическую поверхность насадки. Визуальные наблюдения показывают, что с увеличением скорости наблюдается не только общее увеличение количества удерживаемой жидкости, но и более интенсивное межфазное взаимодействие, протекающее также в определенной мере в межслойных пространствах насадочного комплекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Повтарев И.А., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Влияние типа контактного устройства колонного оборудования на гидравлическое сопротивление насадочного слоя // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №3. 2008г. С.12-13.
2. Володин Н.И. Очистка газов от диоксида растворами моноэтаноламина. Наука. Практика. Перспективы: Монография. Тульский государственный университет / Н.И.Володин, Э.М.Соколов, Р.И.Гридин, И.О. Кузнецов, Б.А. Сокол. Тула. 2002. 414 с.
3. Повтарев И.А., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Исследование гидравлического сопротивления насадочного слоя колонного оборудования // Химия и химическая технология. Иваново. 2006. Т. 49. Вып. 12. С. 109-110.
4. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос. 2010. 478 с.
5. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и нано (под ред. Ю.А. Кузма-Кичты). М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ». 2008. 531 с.
6. Ганз С.Н. Очистка промышленных газов. Справочное пособие. Харьков: НПП МКП Домна. 2006. 118 с.
7. Мираламов Г.Ф. Каталитическая очистка природного газа и углеводородных газовых выбросов нефтехимической промышленности от сероводорода // Нефтехимия. Том 45. 2005. № 5. С. 397-399.
8. Жаворонков Н.М. Теоретические основы химической технологии: избранные труды. Научный совет программы фундаментальных исследований Президиума РАН. «Изд. тр. выдающихся ученых»; Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН. М. Наука. 2007. 351с.
9. Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я., Купепов А.М. Патент РФ № 2205063 Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных аппаратов. 27.05.2003 г.
10. Повтарев И.А., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Абсорбция углекислого газа раствором диэтиламина в колонном аппарате с высокоэффективной пакетной вихревой насадкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №12. 2007 г.
11. Электронное учебное пособие «Метод наименьших квадратов и его применение» / Петрова Е.А, Зуева Г.А, Кулакова С.В, Иваново: ИГХТУ. 2009 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.isuct.ru/testlip/taxonomy/term/19>.
12. Гартман Т.Н, Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. Учебное пособие для вузов. М.: ИКУ «Академкнига», 2006. 416с.
13. Холоднов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов: Практическое руководство / В.А. Холоднов, В.П. Дьяконов, Е.Н.Иванова, Л.С.Кириянова. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2003. 480с.

*Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.*

*Рукопись поступила в редакцию 22.10.2018*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF CO<sub>2</sub> ABSORPTION IN THE COLUMN APPARATUS WITH THE USE OF VARIOUS TYPES OF CONTACT DEVICES**

*I. Povtarev, V. Blinichev, O. Chagin*

In given article comparative researches of the mass transfer device reliably working at high speeds of gas, creating both the big surfaces of heat and mass transfer and high values of mass transfer coefficients are presented. This device working in a counterflow mode, and also well separating the drops of a liquid phase formed at high speeds of gas with other types of mass transfer devices. Comparative studies of the hydraulic resistance of various nozzle devices have shown that, unlike other designs of nozzles, the package vortex nozzle operates in a stable emulsion mode and at the same time has significantly lower hydraulic resistance. Visual supervision show, that with increase in speed is observed not only the general increase in quantity of a kept liquid, but also more intensive interphase interaction proceeding also in a certain measure in interlaminar spaces of nozzle set.

Key words: absorption, column apparatus, nozzle.

## References

1. Povtarev I.A., CHagin O.V., Blinichev V.N. Vliyanie tipa kontaktного устройства kolonnogo oborudovaniya na gidravlichesкое soprotivlenie nasadochnogo sloya. Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. №3. 2008g. S.12-13.
2. Volodin N.I. Ochistka gazov ot dioksida rastvorami monoetanolamina. Nauka. Praktika. Perspektivy: Monografiya. Tul'skiy gosudarstvennyy universitet / N.I.Volodin, E.H.M. Sokolov, R.I.Gridin, I.O. Kuznecov, B.A. Sokol. Tula. 2002. 414 s.
3. Povtarev I.A., CHagin O.V., Blinichev V.N. Issledovanie gidravlichesкого soprotivleniya nasadochnogo sloya kolonnogo oborudovaniya. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. Ivanovo. 2006. T. 49. Vyp. 12. S. 109-110.
4. Rudobashta S.P., Kartashov E.H.M. Diffuziya v himiko-tekhnologicheskikh processah. M.: Kolos. 2010. 478 s.
5. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta YU.A. Intensifikaciya teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nano (pod red. YU.A. Kuzma-Kichty). M.: FGUP «CNIATOMINFORM». 2008. 531 s.
6. Ganz S.N. Ochistka promyshlennyh gazov. Spravochnoe posobie. Har'kov: NPP MKP Domna. 2006. 118 s.
7. Miralamov G.F. Kataliticheskaya ochistka prirodnogo gaza i uglevodorodnyh gazovyh vybrosov neftekhimicheskoy promyshlennosti ot serovodoroda. Neftekhimiya. Tom 45. 2005. № 5. S. 397–399.
8. ZHavoronkov N.M. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii: izbrannye trudy. Nauchnyy sovet programmy fundamental'nyh issledovaniy Prezidiuma RAN. «Izd. tr. vydavushchihsya uchenykh»; Institut obshchey i neorganicheskoy himii im. N.S. Kurnakova RAN. M. Nauka. 2007. 351s.
9. Blinichev V.N., CHagin O.V., Kravchik YA., Kupepov A.M. Patent RF № 2205063 Paketnaya vihrevaya nasadka dlya teplo- i massoobmennyyh apparatov. 27.05.2003 g.
10. Povtarev I.A., CHagin O.V., Blinichev V.N. Absorbciya uglekislogo gaza rastvorom diehtanolamina v kolonnom apparate s vysokoehffektivnoy paketnoy vihrevoj nasadkoj. Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. №12. 2007 g.
11. EHelektronnoe uchebnoe posobie «Metod naimen'shih kvadratov i ego primeneniye» / Petrova E.A, Zueva G.A, Kulakova S.V, Ivanovo: IGHTU. 2009 [EHelektronnyj resurs] - Rezhim dostupa: <http://www.isuct.ru/testlip/taxonomy/term/19>.
12. Gartman T.N, Klushin D.V. Osnovy komp'yuternogo modelirovaniya himiko-tekhnologicheskikh processov. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: IKU «Akademkniga», 2006.416s.
13. Holodnov V.A. Matematicheskoe modelirovaniye i optimizaciya himiko-tekhnologicheskikh processov: Prakticheskoe rukovodstvo / V.A. Holodnov, V.P. D'yakonov, E.N.Ivanova, L.S.Kir'yanova. SPb.: ANO NPO «Professional», 2003. 480s.