

ИВАН ПОВТАРЕВ, ОЛЕГ ЧАГИН¹, JANUSZ KRAWCZYK², ВАЛЕНТИН
ШАРНИН, ВАЛЕРЬЯН БЛИНИЧЕВ¹

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТНОЙ ВИХРЕВОЙ НАСАДКИ

INTENSIFICATION OF PROCESS OF ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE WITH USE OF THE PACKAGE VORTEX NOZZLE

Аннотация

В данной статье показываются преимущества массообменного процесса абсорбции в предлагаемой авторами пакетной вихревой насадки (ПВН) в сравнении с насадками в виде колец Рашига, псевдооживленной шаровой насадкой и одной из распространенных насадок швейцарской фирмы ЗультсерMellapak 250.Y.

Ключевые слова: гидродинамика, массообмен, абсорбция, плотность орошения, скорость газа, F-фактор

Abstract

In this article advantages of mass transfer process of absorption in a package vortex nozzle (PVN) offered by authors in comparison with nozzles in the form of rings of Rashig's rings, a fluidising bed and one of widespread nozzles of the Swiss firm ZultserMellapak 250.Y are shown.

Keywords: Fluid Dynamics, mass transfer, removals, density of irrigation, density of irrigation, F-factor

¹ Ст. преподаватель Иван Александрович Повtareв, к.т.н., доцент Олег Вячеславович Чагин, д.х.н., профессор Валентин Аркадьевич Шарнин, д.т.н., профессор Валерьян Николаевич Блиничев, Ивановский государственный химико-технологический университет.

² Dr hab. inż. Janusz Krawczyk, prof. PK, Politechnika Krakowska.

Исследования гидродинамики проводилось на аппарате с диаметром рабочей части 130 мм и с числом пакетов насадки, изменяющимся от 4 до 12 штук при высоте слоя насадки от 270 до 820 мм.

Гидравлическое сопротивление насадочного слоя высотой 820 мм, набранного из 12 слоев вихревой пакетной насадки в зависимости от расходов 20% раствора диэтаноламина в воде и скорости газового потока представлено на рис. 1. Так как в промышленности процесс абсорбции CO_2 ведут как правило под избыточным давлением, то для удобства пользования в дальнейшем вместо скорости газа в поперечном сечении аппарата U [м/с] нами использовался комплекс под названием F -фактор [$U_c \cdot \sqrt{\rho_c} = m/c \cdot \sqrt{\kappa z/M^3} = \Pi a^{0,5}$]. [2]

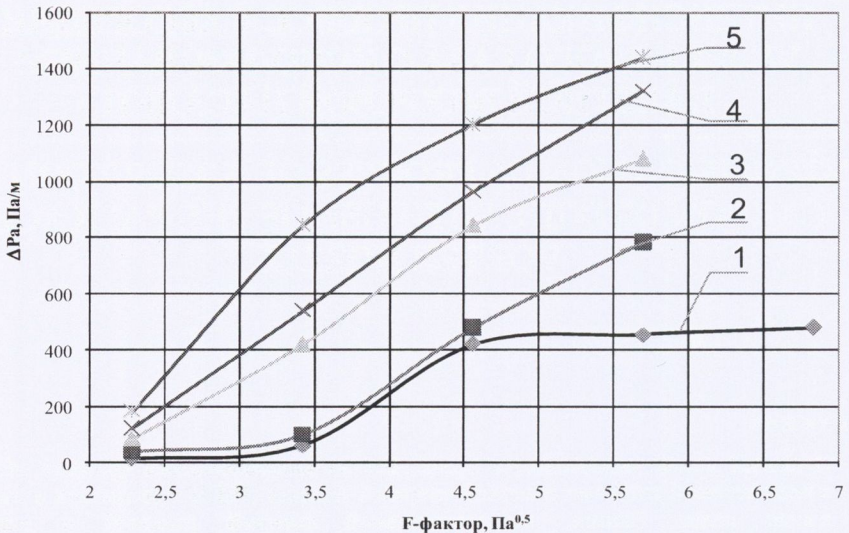


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления слоя пакетной вихревой насадки высотой 820мм. в зависимости от расхода фаз
 1 – плотность орошения 20 м³/м²ч; 2 – плотность орошения 40 м³/м²ч;
 3 – плотность орошения 60 м³/м²ч; 4 – плотность орошения 80 м³/м²ч;
 5 – плотность орошения 100 м³/м²ч.

Fig. 1. Dependence of hydraulic resistance of a layer of a package vortex nozzle in height 820mm. depending on an expense of phases
 1 – density of irrigation 20 м³/м²h; 2 – density of irrigation 40 м³/м²h;
 3 – density of irrigation 60 м³/м²h; 4 – density of irrigation 80 м³/м²h;
 5 – density of irrigation 100 м³/м²h

При малых плотностях орошения до 20 м³/м²ч наблюдается три участка изменения сопротивления слоя от скорости газа. На первом участке при изменении F -фактора от 2,25 до 3 наблюдается очень медленное и плавное повышение

гидравлического сопротивления пакетного слоя. При изменении F -фактора от 3 до 5 (2-й участок) наблюдается существенное повышение (по экспоненте) гидравлического сопротивления, связанное с мощным образованием капель внутри ячеек. При изменении F -фактора от 5 до 7 (3-й участок) наблюдается очень медленное и плавное увеличение гидравлического сопротивления (до 450 Па/м), что объясняется процессом самоорганизации образования и осаждения капель внутри ячейки.

При плотности орошения $40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ наблюдается два участка. При изменении F -фактора от 2,25 до 3 наблюдается аналогичное очень медленное и плавное повышение гидравлического сопротивления пакетного слоя. При изменении F -фактора от 3 до 5,75 наблюдается повышение гидравлического сопротивления до 800 Па/м.

При увеличении плотности орошения от 60 до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ на всем диапазоне F -фактора от 2,25 до 5,75 наблюдается повышение гидравлического сопротивления до 1450 Па/м. (максимальное значение).

Визуальное наблюдение за гидродинамикой газожидкостного потока в ячейках насадки показало, что при плотностях орошения $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ и значении F -фактора от 3,5 и до 6,8 наблюдается, а при плотностях орошения $60 \div 100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ и F -факторе от 3 до 6 наблюдается резко выраженный устойчивый эмульсионный режим взаимодействия между газом и жидкостью, который в начале 70^х годов профессор Н. М. Жаворонков зафиксировал в качестве открытия, наблюдаемый им в аппарате с обычной насадкой в виде колец Рашига в узком диапазоне скоростей газа в режиме, близком к зависанию орошаемой насадки жидкости.

В нашей насадке эмульсионный режим взаимодействия наблюдался при существенно большей скорости газа более 2,5 м/с и устойчиво существовал вплоть до 6 м/с, при которой жидкая фаза сверху слоя насадки начинала диспергироваться в виде мельчайших капель, уносящихся вместе с газовым потоком в сепарационную часть аппарата.

До скорости газа 6 м/с образование мелких капель сверху слоя насадки не наблюдалось, а образующие капли внутри ячеек эффективно сепарировались на их стенках.

Проведенные авторами исследования гидравлического сопротивления вихревой пакетной насадки в широком диапазоне изменения плотностей орошения (20 до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$) и скоростей газа (от 1 до 6 м/с), а также обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показали, что полученные экспериментальные данные хорошо описываются следующей зависимостью (1).

$$Eu = A \cdot Re_z^{n_1} \cdot Re_{\infty}^{n_2} \cdot \frac{h_u}{h_{яч}} \quad (1)$$

где:

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_z \cdot v_z^2}$ - критерий Эйлера; ΔP – сопротивление слоя орошаемой насадки, Па;

ρ_z – плотность газа при рабочей температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_z – скорость газа, м/с;

A – постоянный коэффициент;

- $Re_g = \frac{v_g \cdot b \cdot \rho_g}{\mu_g}$ – критерий Рейнольдса Re по газу; где:
 b – ширина ячейки пакетной вихревой насадки;
 ρ_g и μ_g – плотность и вязкость газа, соответственно.
- $Re_{ж} = \frac{\Pi \cdot b \cdot \rho_{ж}}{\mu_{ж}}$ – критерий Рейнольдса Re по орошаемой жидкости; где:
 Π – плотность орошения жидкостью, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;
 $\rho_{ж}$ и $\mu_{ж}$ – плотность и вязкость жидкости, соответственно.
- $\frac{h_n}{h_{яч}}$ – безразмерный симплекс, отражающий влияние высоты плотного слоя пакетной вихревой насадки, где
 h_n – высота слоя насадки, м;
 $h_{яч}$ – высота одной ячейки, м.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась при варьировании основных влияющих параметров на гидравлическое сопротивление в широком диапазоне их изменения.

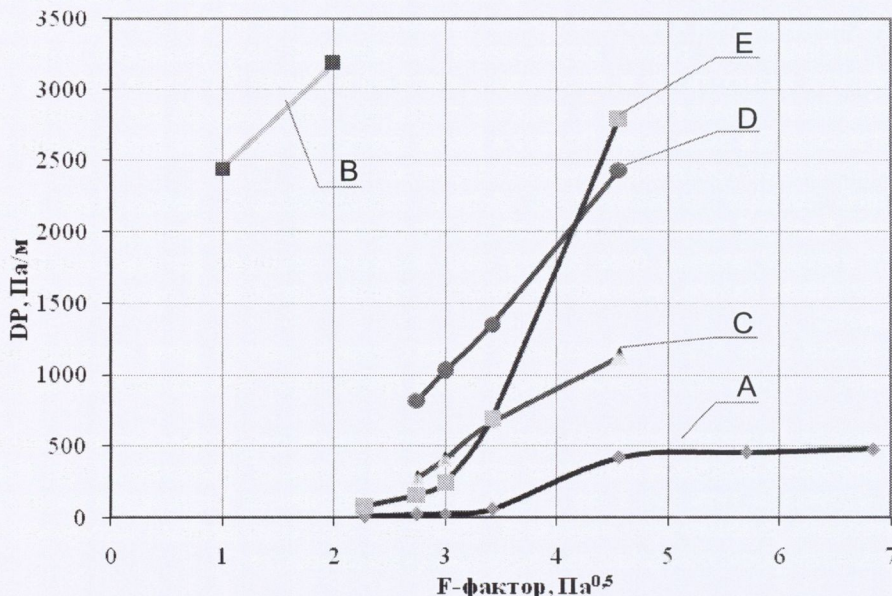


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления насадочного слоя в зависимости от расхода газовой фазы и типа контактного устройства насадочного слоя:

А – ПВН (плотность орошения $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$); В – Кольца Рашига ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$);

С – ПВН ($\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$); D – ПСОН ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$); E – Mellapak 250.Y ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$)

Fig. 2. Dependence of hydraulic resistance of a bed layer depending on an expense of a gas phase and type of the contact device of a bed layer

A – PVN (density of irrigation $\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{h}$); B – Rashig's rings ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{h}$);

C – PVN ($\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{h}$); D – Fludising bed ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{h}$); E – Mellapak 250.Y ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{h}$)

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила получить нам явный вид выражения (2).

$$Eu = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot Re_z^{1,1} \cdot Re_{\infty}^{1,2} \cdot \frac{h_n}{h_{жч}} \quad (2)$$

в котором критерий Рельнольса Re по газу изменялся в пределах его значений от 205 до 615, соответственно скорость газа от 2 до 5,5 м/с. Критерий Рельнольса Re по жидкости изменялся в пределах от 68,1 до 340,6, т.е. плотность орошения жидкостью от 20 до 100 м³/м²·ч или, соответственно от $5,6 \cdot 10^{-6}$ до $3,4 \cdot 10^{-2}$ м³/м²·с. Значение симплекса $h_n/h_{жч}$ изменялось от 7 до 18.

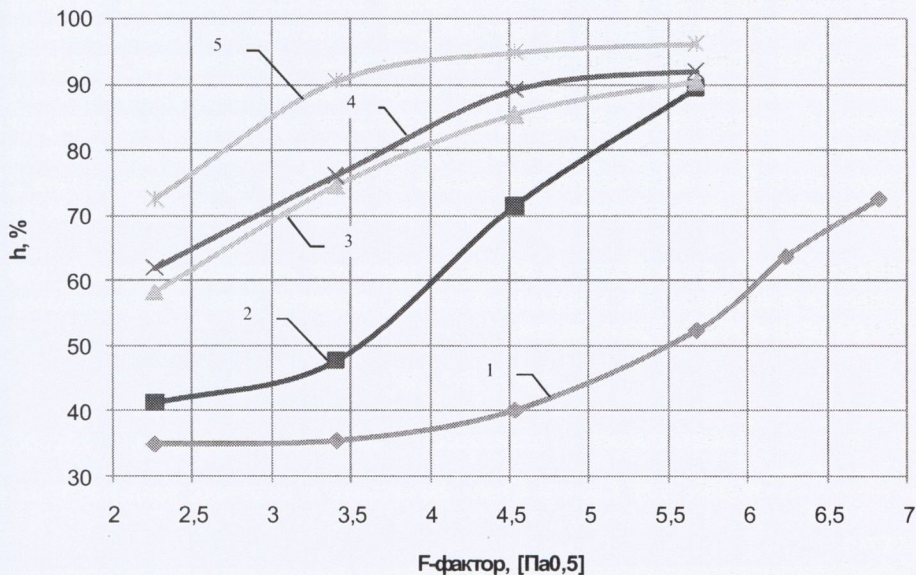


Рис. 3. Зависимость КПД процесса абсорбции CO₂ 25% раствором диэтанолamina от расходов жидкой и газовой фаз

1 – плотность орошения 20 м³/м²·ч; 2 – плотность орошения 40 м³/м²·ч; 3 – плотность орошения 60 м³/м²·ч; 4 – плотность орошения 80 м³/м²·ч; 5 – плотность орошения 100 м³/м²·ч

Fig. 3. Dependence of efficiency of process of absorption of CO₂ of 25 % solution MDAM from expenses of liquid and gas phases

1 – density of irrigation 20 м³/м²·ч; 2 – density of irrigation 40 м³/м²·ч; 3 – density of irrigation 60 м³/м²·ч; 4 – density of irrigation 80 м³/м²·ч; 5 – density of irrigation 100 м³/м²·ч

Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями сопротивления слоя орошаемой пакетной вихревой насадки составляет ± 22%. Необходимо отметить, что наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями сопротивлений слоя насадки наблюдается при скоростях газа от 1,5 до 2,5 м/с при которых не наблюдается еще эмульсионного

режима взаимодействия между газом и жидкостью, а реализуется только турбулентное пленочное течение жидкости по стенкам каждой ячейки.

Из рис. 2. наглядно видно, что гидравлическое сопротивление пакетной вихревой насадки (ПВН) при одинаковой плотности орошения в несколько раз ниже по сравнению со всеми насадками, такими как Кольца Рашига, превдоожженным слоем (ПСОН) ишвейцарской насадки фирмы «Зульцер» типа Mellapak 250.Y.

На рис. 3. представлены изменения к.п.д. процесса абсорбции углекислого газа 20% раствором диэтанолamina в воде в аппарате с пакетной вихревой насадкой высотой 820 мм при различных плотностях орошения и скоростях газа.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 3., показывает, что скорость газовой среды (F -фактор) оказывает очень большое влияние на интенсивность массообмена в вихревой насадке. При всех плотностях орошения от 20 до 100 м³/м²ч интенсивность массообмена возрастает по экспоненциальному закону, причем характер повышения к.п.д. процесса с увеличением скорости газа аналогичен изменению гидравлического сопротивления, как функция этого же параметра. С увеличением скорости газа происходит возрастание как поверхности массообмена, так и коэффициента массопередачи. Например, при малой плотности орошения абсорбирующей жидкости, равной 20 м³/м²ч, и при скорости газа 2 м/с к.п.д. процесса абсорбции равно 35%, а уже при скорости 6 м/с КПД возрастает до 70%.

Эффективность абсорбции в аппарате с пакетной вихревой насадкой хорошо описывается уравнением (3), в котором Re_z и $Re_{ж}$ является теми же параметрами, что и при гидравлическом сопротивлении.

$$\eta = A \cdot Re_z^{n_1} \cdot Re_{ж}^{n_2} \quad (3)$$

где: η – коэффициент полезного действия процесса абсорбции;

$$\eta = \frac{C_{нач} - C_{кон}}{C_{нач}} \times 100\% \quad \text{где } C_{нач} \text{ и } C_{кон} - \text{ начальная и конечная концентрация } CO_2$$

в воздухе.

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила получить расчетную зависимость для нахождения к.п.д. абсорбции CO_2 раствором диэтоноламина:

$$\eta = 7,8 \cdot 10^{-4} \cdot Re_z^{1,3} \cdot Re_{ж}^{0,8} \quad (4)$$

Данная зависимость хорошо описывает процесс абсорбции CO_2 при изменении Re_z в диапазоне (130 ± 500), $Re_{ж}$ в диапазоне (50 ± 200).

Средняя погрешность между расчетными и экспериментальными данными составляет ±12%.

На рис. 4. представлена зависимость эффективности абсорбции с различными типами контактного устройства. Из данного рисунка наглядно видно, что эффективность процесса абсорбции CO_2 в аппарате с пакетной вихревой насадкой существенно выше, чем с насадкой одной из лучшей швейцарской насадкой фирмы «Зульцер» типа Mellapak 250.Y.

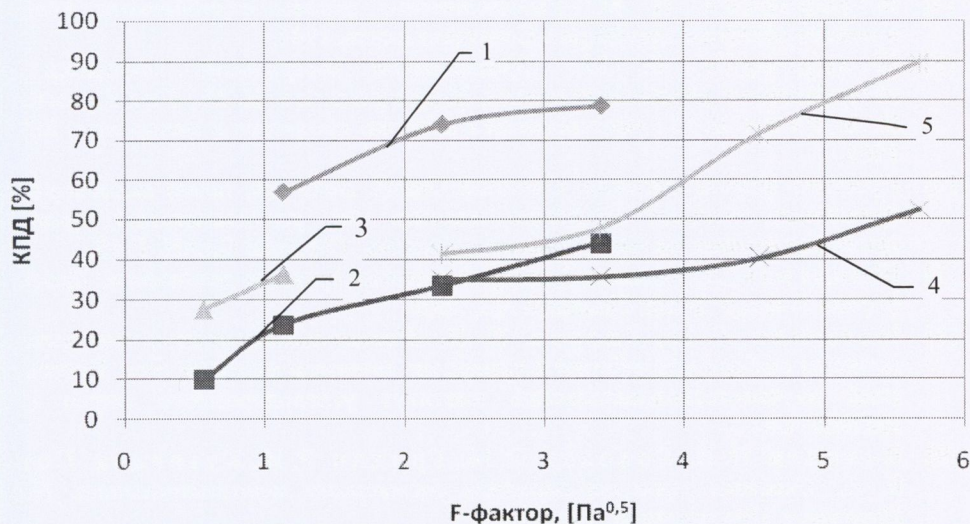


Рис. 4. Зависимость КПД процесса абсорбции CO_2 25% раствором диэтанолamina от расхода газовой фазы и типа контактного устройства насадочного слоя:

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

Fig. 4. Dependence of efficiency of process of absorption of CO_2 of 25 % solution di ethanolamine from an expense of a gas phase and type of the contact device of a nasadochny layer:

1 – Fludising bed (density of irrigation $\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{h}$); 2 – Rashig's rings ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{h}$);
3 – Rashig's rings ($\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{h}$); 4 – PVN ($\Pi = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{h}$); 5 – PVN ($\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{h}$)

Сравнительный анализ гидравлического сопротивления и массообмена при абсорбции CO_2 в колонном аппарате с различными насадками: кольцами Рашига, псевдооживленными шаровыми насадками и Mellapak 250.Y. показал большие преимущества пакетной вихревой насадки.

Литература

- [1] Дудов А. Н., Кульков А. Н., Ставицкий В. А., Зиберт Г. К., Ключко В., Феоктистова Т. М.: *Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов*, Патент РФ № 2192305, 2002.
- [2] Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кравчик Я., Купепов А. М.: *Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных аппаратов*, Патент РФ №2205063, 2003.
- [3] Дудов А. Н., Кульков А. Н., Ставицкий В. А., Зиберт Г. К., Ключко В., Феоктистова Т. М.: *Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов*, Патент РФ № 2192305, 2002.

- [4] Жаворонков Н. М.: *Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах*, Советская наука, 1944.
- [5] Жаворонков Н. М.: *Эффективная поверхность контакта фаз абсорбционных насадочных колонн*, Жаворонков Н. М., Гильденблат И. А., Рамм В. М.: *Исследования в области процессов и аппаратов*, МХТИ, 1963.
- [6] Проспект фирмы Germania Chemnitz GmbH: *Ваку-пак, новая высокопроизводительная колонная пакетная насадка для разделительных процессов ориентированных на высоконагружаемость*, Chemnitz GmbH, 1992.
- [7] Шпингель Л. *Колонны Зульцер для любых проблем разделения. Проспект фирмы Зульцер*, Sulzer Chemtech AG, 2003.
- [8] Матюшко Б. Н., Дияров И. И.: *Научно-технические и практические аспекты выбора абсорбента в процессах аминовой очистки газа*, Всероссийский научно-исследовательский институт углеводородного сырья (ГУП «ВНИИУС»).
- [9] Володин Н. И., Соколов Э. М., Гридин Р. И., Кузнецов, Сокол Б. А.: *Очистка газов от диоксида растворами моноэтаноламина. Наука. Практика. Перспективы*, Тула, 2002.
- [10] Рамм В. М.: *Абсорбция газов*, Химия, 1976.