

С. Ф. Дебердеева, Г. Х. Гумерова

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ОЧИСТКЕ ВОЗДУХА ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПОЛЫХ ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ С ПОРИСТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ

Ключевые слова: полый вихревой аппарат, массоперенос, пленка жидкости, двуокись углерода, окружная скорость.

Проведенное в аппарате с ПВР исследование процесса очистки воздуха от двуокиси углерода и оценка механизма массопереноса в каплях жидкости выявили соответствие его модели Ньюмена. Систематическое же превышение опытных данных над рассчитанными подтверждают влияние массоотдачи в пленке жидкости на процесс массопереноса.

Keywords: hollow vortex device, mass transfer, a liquid film, carbon dioxide, peripheral speed.

Conducted in the office of the TRF research of the process of air purification from carbon dioxide and evaluation of the mechanism of mass transfer in the droplets of fluid revealed its compliance model Newman. The systematic excess of experimental data on calculated prove the influence of mass transfer in liquid film on the mass transfer process.

Остро стоящая в настоящее время проблема загрязнение атмосферы «парниковыми газами», в частности – диоксидом углерода, требует полноценной очистки многотонных газовых выбросов промышленных предприятий.

Рядом исследований [1] показана перспективность для этих целей полых вихревых аппаратов с пористыми вращающимися распылителями (ПВР), обеспечивающих высокую скорость газа при низких материало- и энергозатратах [2].

ПВР выполнены в виде цилиндрических стаканов из пористого материала с минимальным разбросом частиц по размерам. Каплеобразования на поверхности ПВР происходит на границе материала [9].

Размер капель определяется размерами частиц и окружной скоростью вращения распылителя. ПВР обеспечивает равномерный по высоте аппарата факел распыливаемой жидкости с высокой степенью монодисперсности [2].

Схема полого вихревого аппарата с пористыми вращающимися представлена на рис. 1.

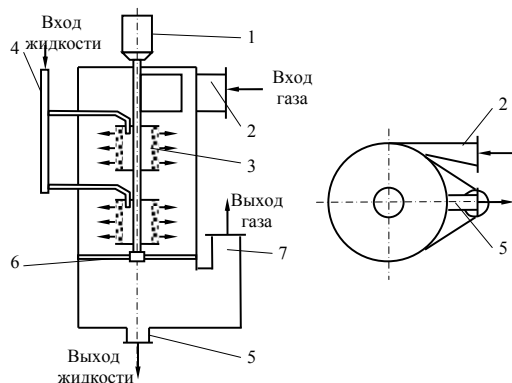


Рис. 1 - Вихревой аппарат с пористым вращающимся распылителем: 1 – двигатель; 2 – штуцер для входа газа; 3 – пористые вращающиеся распылители; 4 – узел распределения жидкости; 5 – штуцер для выхода жидкости; 6 – опора подвешенного вала; 7 – штуцер для выхода газа

Исследование эффективности массопереноса при очистке воздуха от двуокиси углерода проводилось в аппарате с ПВР:

Диаметр аппарата 250 мм;

Диаметр ПВР 51,5 мм;

Размер гранул 250 мкм;

При следующих условиях:

Расход воздуха 5-15 м³/с;

Расход воды 0,7-3,5 м³/ч;

Скорость вращения ПВР 9-14 м/с;

Температура воздуха и воды 20±0,5 °С.

Пробы жидкости в объеме аппарата отбирались изокинетическим зондом, а их анализ на содержание двуокиси углерода проводились стандартными газоанализаторами.

Исследование показало, наличие в полом вихревом аппарате с ПВР две последовательных стадий массопереноса: при движении капель к периферии аппарата и при стекании жидкости по его внутренней стенке. Изменение концентрации двуокиси углерода в жидкости по радиусу аппарата показано на рис. 2.

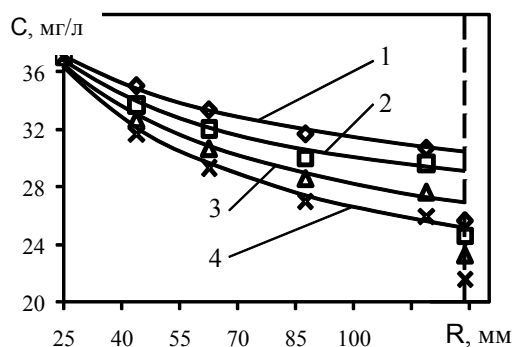


Рис. 2 - Изменение концентрации диоксида углерода по радиусу аппарата при расходе жидкости 2,12 м³/ч и расходах воздуха м/с: 1 – 5,1; 2 – 8,12; 3 – 12,7; 4 – 15,2

Оценка механизма массопереноса в каплях жидкости осуществлялась по двум моделям [4, 5]: 1. Модель Ньюмена, предполагающая отсутствие конвективного массопереноса внутри капель.

$$A_t = 1 - \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{4Dt}{a_{32}^2}\right) \quad (1)$$

2. Модель Кронига-Бринка, учитывающая как молекулярный перенос вещества в капле, так и конвективный перенос вдоль линий тока.

$$A_t = 1 - \frac{6}{8} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-64\lambda_n \frac{Dt}{a_{32}^2}\right) \quad (2)$$

где $A_t = \frac{C_0 - C}{C_0 - C_p}$ – степень извлечения; C_0 , C , C_p –

начальная, текущая и равновесная концентрации двуокиси углерода в каплях, мг/л; D – коэффициент молекулярной диффузии капли, м/с²; t – время контакта, с; a_{32} – среднестатистический диаметр капли, B_n и λ_n – собственные коэффициенты уравнений.

Коэффициенты массопереноса в каплях рассчитывались по уравнению Геддеса [6]:

$$\beta = \frac{a_{32}}{6t} \ln(1 - A_t) \quad (3)$$

Экспериментальные значения коэффициентов массопереноса в каплях и рассчитанные по уравнениям 1-3 приведены на рис. 3.

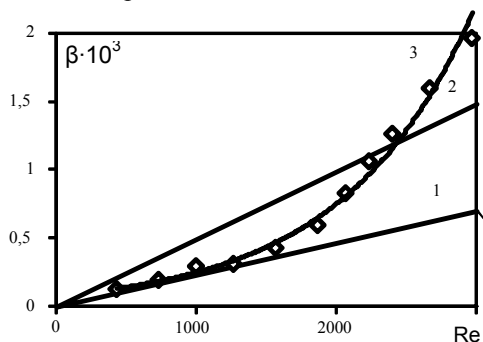


Рис. 3 – Зависимость коэффициента массопереноса в каплях жидкости от числа Рейнольдса: 1 – модель Ньюмена; 2 – модель Кронига-Бринка; 3 – экспериментальные данные

Поскольку значения чисел Re капель жидкости в исследованной области нагрузок по газу и скорости вращения ПВР не превышают 2000, в каплях имеет место исключительно диффузионный механизм переноса массы, соответствующий модели Ньюмена.

Сопоставление опытных данных и рассчитанных по соотношению [7] значений коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости (табл. 1) показывает систематическое превышение первых (на 15-20%).

Очевидно, это вызвано дополнительной интенсификацией массообмена за счет ударов капель о поверхность пленки жидкости. Для оценки эффекта была использована математическая модель [8], учитывающая взаимодействие капель с поверхностью пленки.

Таблица 1 – Сопоставление значений коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости

Расход жидкости, м³/час	Коэффициенты массоотдачи, $\beta \times 10^{-3}$ м/с	
	Опыт	Расчет
0,72	0,19	0,175
1,36	0,22	0,185
2,12	0,226	0,191
2,83	0,230	0,194
3,47	0,237	0,202

Модель рассматривает взаимодействие капли жидкости диаметром a и массой m_a , обладающей кинетической энергией E_a , с поверхностью пленки. При взаимодействии кинетическая энергия капли преобразуется в кинетическую энергию возмущения поверхности и потенциальную энергию новой поверхности, согласно уравнению:

$$E_a = \frac{\pi R^2 \rho_L \delta}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \pi R^2 \sigma + \varepsilon E_a \quad (4)$$

где R – радиус зоны возмущения, м; ρ_L – плотность жидкости, кг/м³; δ – толщина вытесненной жидкости волной возмущения, м; σ – поверхностное натяжение, Н/м²; t – время контакта, с; ε – доля энергии капли, пошедшая на диссипацию.

Взаимодействие одиночной капли с поверхностью пленки вызывает полное перемешивание жидкости на радиусе R [10]. При потоке n капель, оседающих на 1 м² поверхности, возможны два режима:

1 – поток капель мал: отдельные зоны возмущения не перекрываются последующими. В этом случае доля поверхности пленки, подвергающаяся возмущению за время T составит:

$$\gamma_f = \pi R^2 T n < 1, \quad (5)$$

2 – поток капель интенсивен; отдельные зоны возмущения накладываются друг на друга, причем последующие капли прерывают эффект перемешивания предыдущих. Возмущенной оказывается вся поверхность.

$$\gamma_f = \pi R^2 T n = 1. \quad (6)$$

Связь площади возмущенной поверхности с исходными параметрами имеет вид:

$$\gamma_f = \pi R^2 T n = \frac{n}{\sigma^2} \sqrt{E_a^3 (1 - \varepsilon)^3} \rho_L \delta. \quad (7)$$

Суммарное значение коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости при её взаимодействии с каплями будет зависеть как от конвективного массообмена в пленке, так и от воздействия капель на её перемешивание:

$$\beta_{\Sigma} = (1 - \gamma_f) \beta' + \gamma_f \beta''. \quad (8)$$

где β' – коэффициент массоотдачи без воздействия капель, м/с; β'' – коэффициент массоотдачи с учетом воздействия капель, м/с.

Значения коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости, представленные на (рис. 4), подтверждают влияние удара капель о поверхность пленок на процесс массопереноса и коррелируют с результатами эксперимента.

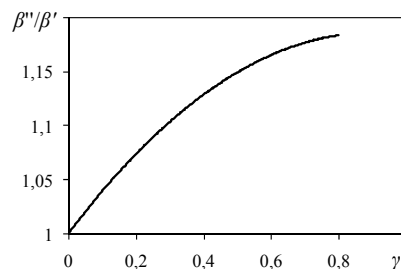


Рис. 4 – Зависимость коэффициента массоотдачи в пленке жидкости при различных значениях возмущения поверхности

Литература

1. Николаев, А.Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе. / А.Н. Николаев, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов.- Казань: Новое знание, 2004. - 136 с.
2. Пат. RU № 76576 (2008).
3. Сафиуллин, Р.Г. Диспергирование жидкости пористыми вращающимися распылителями. Модели каплеобразования / Р.Г. Сафиуллин, Н.А. Николаев, В.Н. Посохин, А.А. Колесник.- Казань: Новое знание, 2004, 64 с.
4. Newman, A.B. The drying of porous solids: Diffusion calculations/ A.B. Newman // Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 1931. V. 27. № 10. P. 203-220.
5. Kroni, R. On the theory of extraction from falling droplets / R. Kroni, J.C. Brink // Appl. Sci. Res., 1950. V. 2. № 2. P. 142-148.
6. Geddes, R.L. / R.L. Geddes// Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. 1946. Apr. 2. P. 142-147.
7. Войнов, Н.А. Пленочные трубчатые газо-жидкостные реакторы/ Н.А. Войнов, Н.А. Николаев .- Казань: Новое знание, 2008. 272 с.
8. Михалкина, Г.С. Математическое моделирование процесса теплообмена в пленке жидкости, сопровождающегося взаимодействием капель с ее поверхностью/ Г.С. Михалкина, Н.А. Николаев // Промышленная энергетика, № 11, 2006. С. 49-50.
9. Зиннатуллин, Н.Х. /Н.Х. Зиннатуллин, А.А. Булатов, В.Г. Кузнецов, И.М. Нафиков, Г.Н. Зиннатуллина //Вестник Казанского технологического университета, 2012. Т.15, №.6. С.160-163.
10. Усманов, Р.Р. /Р.Р. Усманов, А.К. Панов, Г.Е. Заиков, А.Ф. Яруллин// Вестник Казанского технологического университета, 2012. Т.15, №.10. С.244-247.

© С. Ф. Дебердеева – канд. техн. наук, ст. препод каф. ИКГ и АП КНИТУ; Г. Х. Гумерова - канд. техн. наук, вед. программист той же кафедры, ggx70@yandex.ru.