

УДК 66.023

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССООТДАЧИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ ОРОШАЕМЫХ НАСАДОЧНЫХ КОЛОНН В ПРОТИВОТОКЕ

¹Фарахов М.М., ²Лаптев А.Г., ¹Фарахов Т.М.

¹Инженерно-внедренческий центр «Инжехим», Казань, e-mail: info@ingehim.ru;

²ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Выполнено обобщение уравнения для расчета коэффициентов массоотдачи в сухих насадочных слоях на работу колонны в пленочном режиме при противотоке. Даны сравнения с расчетом по известным выражениям и с экспериментальными результатами различных авторов. Полученное уравнение позволяет вычислять коэффициент массоотдачи в газовой фазе с использованием результатов гидравлического исследования насадочных колонн.

Ключевые слова: насадки, массоотдача, гидравлическое сопротивление, число Шервуда, пленочный режим

GAS PHASE MASS TRANSFER COEFFICIENT DETERMINATION OF IRRIGATED PACKED COLUMN IN COUNTERCURRENT

¹Farakhov M.M., ²Laptev A.G., ¹Farakhov T.M.

¹Engineering innovation center «Inzhekhim», Kazan, e-mail: info@ingehim.ru;

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

The generalization of the equation for calculating the mass transfer coefficients in dry packed layers to column work in film countercurrent mode is given. Calculations results according to known expressions and experimental results obtained by different authors are compared. The resulting equation allows to calculate the mass transfer coefficient in the gas phase using the results of the packed columns hydraulic researches.

Keywords: packing, mass transfer, flow resistance, the Sherwood number, film mode

Насадочные колонные аппараты с хаотичной засыпкой (нерегулярной насадкой) находят широкое применение в различных отраслях промышленности для проведения тепломассообменных и сепарационных процессов. Известны [1,2] многие сотни конструкций нерегулярных насадочных элементов. Разнообразие конструкций элементов и их технических параметров приводит к необходимости проведения многочисленных исследований гидравлических и тепломассообменных характеристик в расчетах промышленных колонн. Причем, исследование тепломассообменных процессов наиболее трудоемкое и затратное, чем изучение гидравлических характеристик. К гидравлическим характеристикам насадочного слоя относятся: перепад давления (коэффициент сопротивления), задержка жидкости и коэффициент смачиваемости поверхности элементов, а к тепломассообменным – коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в фазах, с использованием которых вычисляется коэффициент массопередачи и далее эффективность массообменных колонн.

Целью исследования является получение расчетного выражения для коэффициентов массоотдачи в газовой фазе орошаемых насадочных колонн при пленочном режиме в противотоке при использовании выражения, полученного для сухой насадки.

Материалы и методы исследования

Массоотдачу в газовой фазе насадочных колонн изучают путем возгонки твердых тел в отсутствие орошения, а также испарения чистых жидкостей и абсорбции хорошо растворимых газов.

В работах [3, 4] на основе применения теории пограничного слоя и гидродинамической аналогии получены выражения для расчета коэффициента трения и числа Шервуда в сухих нерегулярных насадочных слоях. Обобщенное выражение для расчета числа Шервуда имеет вид:

$$Sh_r = 0,175 Re_r^{0,75} (\xi/2)^{0,25} Sc_r^{0,333}, \quad (1)$$

где $Sh_r = \beta_r d_s / D_r$ – число Шервуда; $Re_r = w_r d_s / \nu_r$ – число Рейнольдса; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления слоя; $Sc_r = \nu_r / D_r$ – число Шмидта; β_r – средний коэффициент массоотдачи, м/с; d_s – эквивалентный диаметр насадки, м; D_r – коэффициент диффузии компонента, м²/с; ν_r – коэффициент кинетической вязкости, м²/с; w_r – средняя скорость газа в слое, м/с; $d_s = 4\epsilon_{св} / a_v$; $\epsilon_{св}$ – удельный свободный объем насадки, м³/м³; a_v – удельная поверхность, м²/м³.

Коэффициент сопротивления является функцией критерия Рейнольдса $\xi = f(Re)$, его находят по формулам в зависимости от вида элементов и характера движения потока [1, 2, 5]:

для колец Рашига (при $Re_r > 40$):

$$\xi = 16/Re_r^{0,2}, \quad (2)$$

для насадок «Инжехим-2003М» (при $Re_r > 100$):

$$\xi = 26,18/Re_r^{0,248}, \quad (3)$$

для насадок «Инжехим-2002» (при $Re_r > 500$):

$$\xi = 1,34(64/Re_r + 1,8/Re_r^{0,08}), \quad (4)$$

для насадок «Инжехим-2000» (при $Re_r > 500$):

$$\xi = 4,99/Re_r^{0,04}, \quad (5)$$

для насадок шарообразной формы (при $Re_r > 2000$):

$$\xi = 4,36/Re_r^{0,14}, \quad (6)$$

и при $Re_r < 2000$

$$\xi = 4(36,3/Re_a + 0,45). \quad (7)$$

Выражение (1) проверено при $50 \leq Re_r \leq 4000$ и $0,5 \leq \varepsilon_{св} \leq 0,9$ и дает удовлетворительное согласование ($\pm 15\%$) с экспериментальными данными в интервале чисел Re_r вполне достаточного для работы большинства насадочных колонн при пленочном режиме.

Ниже рассмотрена возможность применения выражения (1) при расчете массоотдачи и в орошаемой насадке, если использовать поправку Shulman H.L. и коэффициент смачиваемости поверхности элементов. Тогда формула (1) получит вид:

$$Sh_r = 0,175 \left(\frac{1 - \varepsilon_{св} - \varepsilon_{жс}}{1 - \varepsilon_{св}} \right)^{0,36} \psi_w Re_r^{0,75} (\xi/2)^{0,25} Sc_r^{0,333}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{жс}$ — удельная задержка жидкости в насадке, m^3/m^3 ; ψ_w — коэффициент смачиваемости поверхности.

Количество удерживаемой жидкости $\varepsilon_{жс}$ в насадочной колонне складывается из статической и динамической составляющей и вычисляется по эмпирическим выражениям для каждого вида насадки. Для большинства насадок $\varepsilon_{жс} \approx 0,05 \div 0,1$ [2, 5].

Коэффициент смачиваемости поверхности насадок при пленочном режиме $\psi_w < 1$, т.к. не вся поверхность смачивается жидкостью, особенно при небольших расходах и большой удельной поверхности элементов в слое [2,5].

Для расчетов наибольшее применение находит выражение вида [5]

$$\psi_w = 1 - \exp(-\varepsilon Re_{жс}^p), \quad (9)$$

где для колец (15-35 мм); $\varepsilon = 0,16$; $p = 0,4$; для седел (12,5 и 50 мм); $\varepsilon = 0,089$; $p = 0,7$; $Re_{жс} = 4 Q_{жс} / a_v v_{жс}$ — число Рейнольдса; $Q_{жс}$ — плотность орошения, $m^3/(m^2 \cdot c)$. Необходимо учитывать, что в процессе массообмена участвует активная поверхность насадки, которая не всегда равна смоченной [2, 5].

Для сравнения результатов расчетов числа Sh_r (8) используем критериальное выражение Onda K. и др. [6]:

$$Sh_r = A \varepsilon_{св}^p Re_r^{0,8} Ga_r^q Sc_r^{1/3}, \quad (10)$$

где $Ga_r = g d_s^3 / \nu_r$ — число Галилея.

Постоянные A, p, q имеют значения, представленные на таблице.

Значения постоянных для различных насадок

	<i>A</i>	<i>p</i>	<i>Q</i>
Кольца внавал	0,0142	0,52	0,16
Седла	0,0058	0,34	0,22

А также уравнение полученное с использованием модели диффузионного пограничного слоя [7]

$$\beta_r = 0,013 (\bar{\varepsilon}_{г.жс} v_r / \rho_r)^{0,25} Q_{жс}^{-0,4} Sc_r^{-0,666}, \quad (11)$$

где средняя скорость диссипации энергии равна

$$\bar{\varepsilon}_{г.жс} = \frac{\Delta P_{г.жс} w_r}{(\varepsilon_{св} - \varepsilon_{жс}) H}, \quad (12)$$

где $\Delta P_{г.жс}$ — составляющая перепада давления $\Delta P_{ог}$ в орошаемой насадке, вызванная наличием жидкой

фазы; H — высота слоя насадки в колонке, м. Выражение (11) запишем используя число Шервуда

$$Sh_r = 0,013 Re_r (\bar{\varepsilon}_{г.жс} v_r / \rho_r)^{0,25} (w_r Q_{жс}^{-0,4})^{-1} Sc_r^{1/3}. \quad (13)$$

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1,2 даны результаты расчета по выражениям (8), (10) и (13).

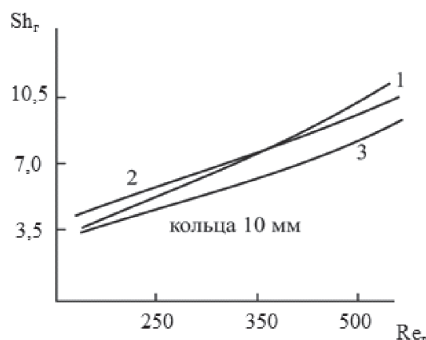


Рис. 1. Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа в колонне (кольца 10 мм): 1 — по уравнению (8); 2,3 — по выражениям (10) и (13). Коэффициент массоотдачи отнесен к смоченной поверхности насадки. Абсорбция аммиака водой. Расход жидкости $10 m^3/(m^2 \cdot ч)$; $d_s = 0,007 m$

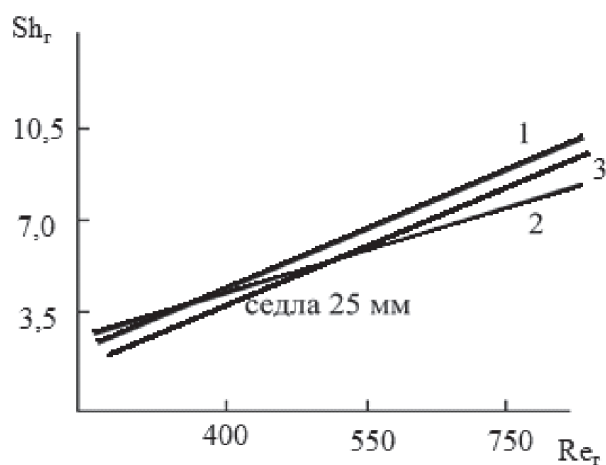


Рис. 2. Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа в колонне (седла 25 мм): 1 – по уравнению (8); 2-3 – по выражениям (10), (13). Абсорбция аммиака водой. Расход жидкости $10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $d_s = 0.011 \text{ м}$

На рис. 3, 4 представлена корреляция по безразмерному комплексу для различных

насадок [5] с расчетом по формуле (8) при абсорбции различных смесей.

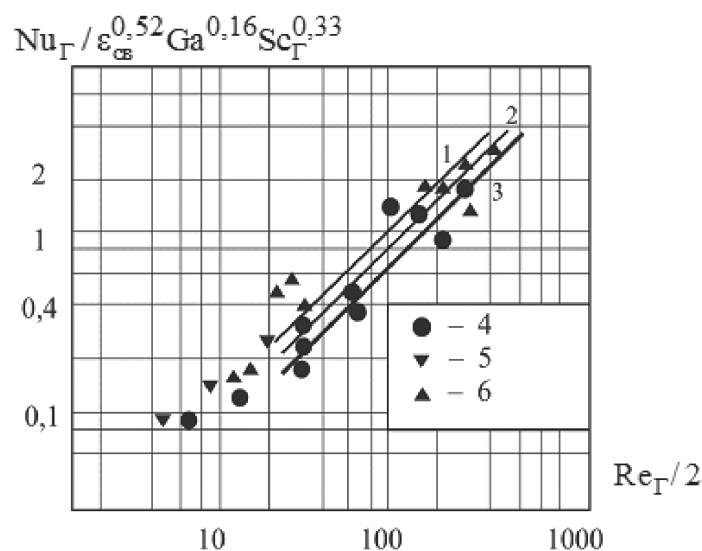


Рис. 3. Корреляция данных по массоотдаче в газовой фазе с насадкой из колец Рашига: 1,4 – кольца 10 мм; 2,5 – 15 мм; 3,6 – 25 мм. 1 – 3 – расчет по уравнению (8); 4 – 6 – экспериментальные данные, обобщенные в работе [5]. Коэффициент массоотдачи отнесен к смоченной поверхности насадки

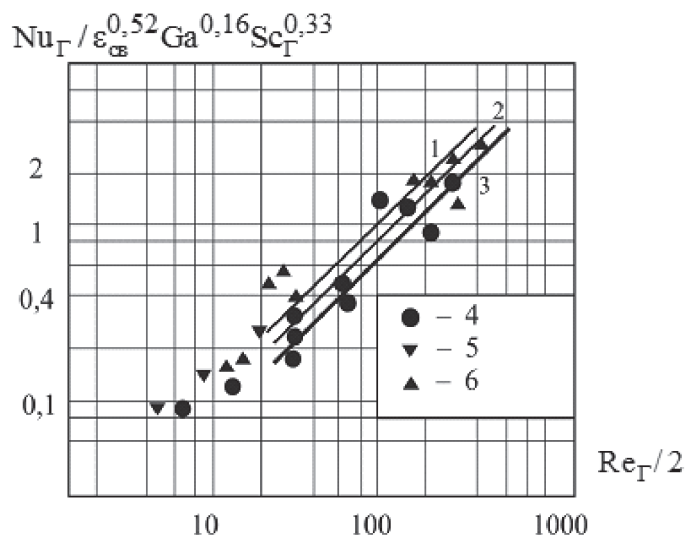


Рис. 4. Массоотдача в газовой фазе с седлами Берля:
1,4 – седла 13 мм; 2,5 – 25 мм; 3,6 – 38 мм. Остальные обозначения см. на рис. 3

Выводы

В результате можно сделать вывод о том, что предложенное выражение (8) удовлетворительно согласуется ($\pm 15\%$) с другими уравнениями и экспериментальными данными различных авторов и рекомендуется к использованию при расчетах массообменных колонн с новыми насадками, когда есть результаты по гидравлическим характеристикам ($\xi, \epsilon_{ae}, \psi_w$) [1, 2, 5]. Данное выражение применяется при проектировании или модернизации промышленных колонн [8].

Статья выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Заявка №13.405.2014/К.

Список литературы

1. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. – М.: Галилея-принт, 2009. – 358 с.
2. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. – Казань: Отечество, 2013. – 428 с.
3. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Модель массоотдачи в зернистых и насадочных слоях // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2013. – Т.56, №6. – С.92-96.
4. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Модели трения в турбулентных потоках при обтекании различных поверхностей // Вестник Казанск.технол.ун-та. – 2013. – № 23. – С. 82-86.
5. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
6. Onda K. Mass transfer and packet columns / K.Onda, E.Sada, M.Saito // Kadaku Kodaku. – 1961. – V. 25, № 11. – P. 820–829.
7. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов. - Казань: изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.
8. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Энергоэффективное оборудование разделения и очистки веществ в химической технологии // Вестник Казанск. технол. ун-та. – 2011. – №9 – С.152-158.