

УДК 66.021.3

А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева,
В. В. Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ В КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПРЯМЫМИ УГЛАМИ

Ключевые слова: тепло-массообмен, струйно-пленочное устройство

В работе рассматривается актуальная задача увеличения эффективности оборудования с контактными устройствами для проведения тепло- и массообменных процессов в нефтехимической, химической и энергетической промышленности. Представлена схема разработанного струйно-пленочного контактного устройства и описан принцип его действия. Несомненными преимуществами устройства является малая металлоемкость, простота в использовании и относительно низкое гидравлическое сопротивление. Проводится расчет коэффициента массоотдачи в струйно-пленочном контактном устройстве на вертикальных перегородках на основе модели обновления поверхности. Построены зависимости коэффициента массоотдачи от ширины контактного элемента при изменении средней скорости газового потока и соотношения массовых расходов жидкости и газа. Показано, что для интенсификации процессов массообмена в разработанном струйно-пленочном контактном устройстве требуется увеличение значения коэффициента массоотдачи на вертикальных перегородках. Для его роста необходимо повысить среднюю скорость газового потока и уменьшить габаритные размеры контактных элементов до оптимальных значений. Исследования показали, что увеличение средней скорости газового потока на 1 м/с, приводит к росту коэффициента массоотдачи в среднем на 19 %. Однако, необходимо учитывать, что при увеличении скорости газа, рост значения коэффициента массоотдачи постепенно уменьшается и, соответственно, увеличиваются энергозатраты на проведение данного процесса. Найдено, что увеличение отношения массового расхода жидкости к массовому расходу газа практически не сказывается на изменении коэффициента массоотдачи, поэтому разработанное устройство можно широко использоваться для проведения различных тепло- и массообменных процессов для сравнительно больших объемов жидкости.

A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva,
V. V. Kharkov

STUDY OF MASS-TRANSFER COEFFICIENT IN RECTANGULAR CONTACT DEVICES

Keywords: heat-and-mass transfer, jet-film device

Work represents the urgent task of increasing the efficiency of the apparatus with contact devices, that is intended for performance heat and mass transfer processes in petrochemical, chemical and energy industries. The schematic sketch of the developed jet-film contact device is presented and its operation principle is described. The key advantages of the device are low metal consumption, ease of use and relatively low hydraulic resistance. Based on a model of surface updating, the calculation of the mass transfer coefficient in jet-film contact devices on vertical partitions is carried out. Dependences of mass transfer coefficient on the width of contact elements under change of average gas velocity and liquid-gas flow ratio are depicted. It is shown that for transport phenomena intensification in the developed jet-film contact device, an increasing of the mass transfer coefficient value on the vertical plates is required. For its growth, it is necessary to increase the average gas flow rate and reduce the overall dimensions of the contact elements to optimal values. The studies have shown that an increase in the average gas flow velocity by 1 m/s results in an increase in the mass transfer coefficient by an average of 19 %. However, it should be noted that when the gas velocity increases, the increase in the mass transfer coefficient gradually slows down and the energy consumption of the process rises. It has been found that the growth in the liquid-gas flow ratio practically does not affect the change in the mass transfer coefficient, thus the developed device can be used to carry out heat and mass transfer processes with a relatively high flow rate.

Одной из ключевых позиций программы отраслевых планов импортозамещения РФ является разработка нового оборудования и его модернизация для нефтехимической, химической и энергетической промышленности [1]. Это актуально для аппаратов с контактными устройствами, предназначенных для осуществления тепло- и массообменных процессов. При имеющихся преимуществах данных аппаратов, таких как высокая эффективность, простота использования, умеренное гидравлическое сопротивление, они имеют существенные недостатки: относительно небольшая скорость газа, неравномерность распределения жидкой и газовой фаз по сечению и т. д., что в результате приводит к снижению эффективности проведения процессов. Поэтому разработка новых технических решений, которые повысят эффек-

тивность тепло- и массообменных процессов, является актуальной задачей [2–12].

Для решения поставленной задачи авторами было разработано струйно-пленочное контактное устройство (рис. 1). Оно состоит из прямоугольного корпуса квадратного сечения размером 100×100 мм, внутри которого расположено 4 ряда контактных элементов, разделенных вертикальной перегородкой. В каждом контактном элементе проделаны отверстия диаметром 2 мм. Отверстие, через которое стекает основной поток жидкости, располагается в углу так называемых сливных стаканов. Под этими отверстиями располагаются каналы, которые образованы отгибами в перегородках, где возникает столб жидкости для создания высоких скоростей потока газа при достаточно хорошей сепарации [13,

14]. Следует отметить, что элементы в устройстве расположены относительно друг друга таким образом, чтобы поток газа, двигающийся со дна аппарата навстречу потоку жидкости, достигал максимального значения центробежной силы при огибании контактных элементов. При разработке аппарата особое внимание уделялось достижению следующих показателей: развитая поверхность контакта фаз, высокая сепарационная способность и относительно невысокое гидравлическое сопротивление.



Рис. 1 – Внешний вид контактного устройства

Одним из главных показателей, характеризующих тепло- и массообменные процессы в струйно-пленочном контактном устройстве, является коэффициент массоотдачи [15–17]. Поэтому целью данной работы является исследование коэффициента массоотдачи в струйно-пленочном контактном устройстве на вертикальных перегородках.

Для определения коэффициента массоотдачи применялась модель обновления поверхности, так как совместное решение уравнений движения, неразрывности и конвективной диффузии для нахождения относительного диффузионного потока не представляется возможным для данного случая. Для проведения расчета коэффициента массоотдачи в экспериментальной установке задавались некоторые постоянные параметры: плотность жидкости (воды) $\rho_L = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность газа $\rho_G = 1,2 \text{ кг/м}^3$, температура окружающей среды и жидкости принимались равными $20 \text{ }^\circ\text{C}$. При данной температуре определялся коэффициент молекулярной диффузии диоксида углерода в воде $D = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. В ходе исследований изменялись следующие параметры: соотношение массовых расходов жидкости и газа L_m / G_m в диапазоне 0,5–1,5 и средняя скорость газового потока W_{cp} – от 2 до 4 м/с.

Коэффициент массоотдачи в жидкости β_L (м/с) рассчитывался по поверхности:

$$\beta_L = \sqrt{\frac{D}{\tau}}, \quad (1)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии в жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время обновления поверхности, с.

Вследствие того, что время обновления поверхности является неизвестным параметром, были выведены уравнение, позволяющее его определить.

Площадь входа в один элемент F (м^2) определялась по следующей формуле:

$$F = b^2, \quad (2)$$

где b – ширина контактного элемента, м.

Массовый расход газа G_m определялся по следующему выражению:

$$G_m = W_h \rho_G F, \quad (3)$$

где W_h – скорость газа в сужении между рядами контактных элементов, м/с.

Уравнение для скорости газа в сужении выводилось из условия равнопроточности:

$$W_h = 2W_{cp}, \quad (4)$$

где W_{cp} – средняя скорость газа на входе в устройство, м/с.

Объем исследуемой области V (м^3) определялся по выражению:

$$V = b^3. \quad (5)$$

Из соотношения массового расхода жидкости к массовому расходу газа было получено уравнение для объема контактного элемента V_L , м^3 , заполненного жидкостью:

$$V_L = \frac{L_m V \rho_G}{\rho_L G_m + L_m \rho_G}. \quad (6)$$

Время обновления поверхности:

$$\tau = \frac{V_L}{L_v}, \quad (7)$$

где L_v – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

Таким образом, уравнение (1) с учетом выражений (2)–(7) было преобразовано к виду:

$$\beta = \sqrt{\frac{D_L}{V} \left(\frac{G_m}{\rho_G} + \frac{L_m}{\rho_L} \right)}. \quad (8)$$

Результаты исследований показали, что при увеличении ширины контактных элементов b значение коэффициента массоотдачи β уменьшается (рис. 2–3). Это объясняется увеличением площади контактных элементов в связи с ростом их ширины при постоянных диаметрах отверстий в них.

Увеличение средней скорости газового потока приводит к росту коэффициента массоотдачи (рис. 2). Вследствие повышения скорости газового потока происходит интенсификация процесса массообмена в струйно-пленочном контактном устройстве за счет более интенсивного взаимодействия двух фаз в рассматриваемой области. В среднем коэффициенты массоотдачи $\beta \cdot 10^{-4}$ равны 1,927; 2,360 и 2,726 м/с при скоростях газовых потоков 2,0; 3,0 и 4,0 м/с, соответственно. Анализ данных значений показывает, что с увеличением скорости газового потока постепенно уменьшается рост коэффициента массоотдачи. Так при увеличении скорости газового потока от 2,0 до 3,0 м/с коэффициент массоотдачи повышается на 22 %, тогда как когда при увеличении скорости от 3,0 до 4,0 м/с – только на 16 %.

Поэтому необходимо подбирать скорость газового потока таким образом, чтобы оптимально сочетать между собой высокую эффективность массоотдачи в устройстве и энергетические затраты, необходимые на достижение более высокой скорости. Следует отметить, что коэффициенты массоотдачи в среднем уменьшаются на 30 и 49 % при увеличении ширины контактных элементов от 100 до 200 мм и от 100 до 300 мм, соответственно. Таким образом, для интенсификации процесса массоотдачи в струйно-пленочном контактном устройстве наиболее рентабельнее использовать контактные элементы небольших размеров.

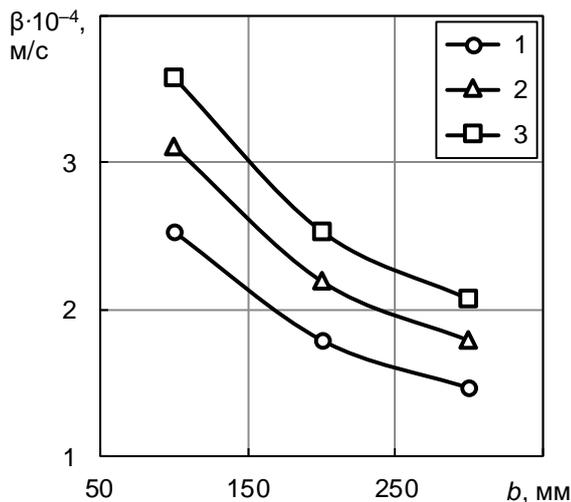


Рис. 2 – Зависимость коэффициента массоотдачи от ширины контактного элемента при изменении средней скорости газового потока W_{cp} , м/с: 1 – 2,0; 2 – 3,0; 3 – 4,0

Увеличение значения отношения массового расхода жидкости к массовому расходу газа практически не влияет на коэффициент массоотдачи в жидкости (рис. 3).

Расхождение значений коэффициентов массоотдачи между собой в каждом из трех случаев при разных значениях L_m/G_m составляют менее 0,5 %. Коэффициенты массоотдачи в среднем уменьшаются на 29,4 и 42,5 % при увеличении ширины контактных элементов от 100 до 200 и от 100 до 300 мм, соответственно. Следует отметить, что в данном случае уменьшение коэффициента массоотдачи при росте ширины контактных элементов происходит немного медленнее относительно исследуемого процесса, в котором увеличивали среднюю скорость газового потока.

Таким образом, в работе показано, что существует возможность интенсифицировать процессы массообмена в разработанном струйно-пленочном контактном устройстве путем увеличения значения коэффициента массоотдачи на вертикальных перегородках. Для его роста необходимо повысить среднюю скорость газового потока и уменьшить габариты контактных элементов. Исследования показали, что при увеличении средней скорости газового потока на 1 м/с коэффициент массоотдачи в среднем

увеличивается на 19 %. Однако, необходимо учитывать, что при увеличении скорости газа рост значения коэффициента массоотдачи постепенно уменьшается и увеличиваются энергетические затраты на проведение процесса. Более того, так как увеличение соотношения массового расхода жидкости к массовому расходу газа практически не сказывается на изменении коэффициента массоотдачи, разработанное устройство можно использовать для проведения тепло- и массообменных процессов для более больших объемов жидкостей по сравнению с аналогами, у которых относительно небольшие скорости протекающих процессов. Несомненными преимуществами устройства является малая металлоемкость, простота в использовании и относительно низкое гидравлическое сопротивление.

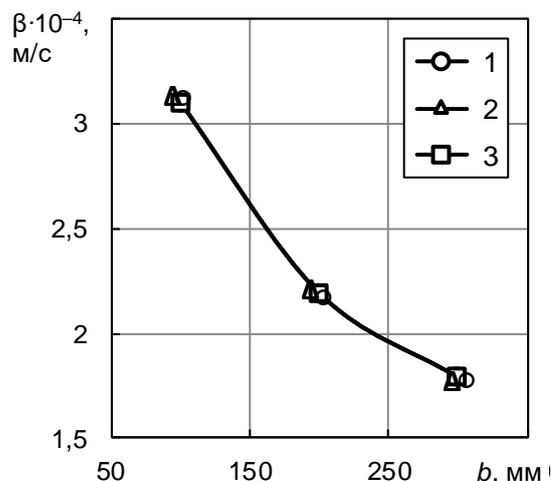


Рис. 3 – Зависимость коэффициента массоотдачи от ширины контактного элемента при изменении соотношения массовых расходов фаз L_m/G_m : 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Литература

1. П.А. Бирюков, *Вестник Финансового университета*, **20**, 5(95), 45-57 (2016).
2. T. Wen, L. Lu, W. He, Y. Min, *Applied Energy*, 261, 114473 (2020).
3. М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев, *Вестник Казанского технологического университета*, 9, 152-158 (2011).
4. Н.А. Войнов, Д.А. Земцов, О.П. Жукова, *Теоретические основы химической технологии*, **51**, 2, 174-181 (2017).
5. J.R. Mehta, T.K. Desai, A.K. Patel, H.B. Diyora, A.S. Rabadiya, *Energy Procedia*, **109**, 167-173 (2017).
6. Е.В. Полиенова, А.Ю. Вальдберг, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2, 12-16 (2011).
7. М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев, *Вестник Казанского технологического университета*, 10, 117-124 (2010).
8. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник Технологического университета*, **18**, 18, 130-132 (2015).
9. А.А. Харитонов, А.С. Пушнов, М.Г. Лагуткин, *Химическая промышленность сегодня*, 6, 50-56 (2011).
10. И.А. Семёнов, Б.А. Ульянов, Н.Н. Кулов, *Теоретические основы химической технологии*, **50**, 3, 239 (2016).

11. А.С. Пушнов, А.М. Каган, *Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг*. Издательство политехнического университета, Санкт-Петербург, 2011. 135 с.
12. N. Karwa, L. Schmidt, P. Stephan, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 13-14 (2012).
13. A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev, *Thermal Engineering*, 63, 9, 674-677 (2016).
14. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник Технологического университета*, 21, 9, 58-61 (2018).
15. А.Ф. Хайруллин, *Экспозиция Нефть Газ*, 5 (37), 71-72 (2014).
16. В.В. Харьков, А.Н. Николаев, *Вестник Технологического университета*, 19, 13, 149-152 (2016).
17. Н.Н. Пашков, Ф.М. Долгачев, *Гидравлика. Основы гидрологии*. Энергоатомиздат, Москва, 1993. 448 с.

© **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; **В. Э. Зинуров** – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru; **В. В. Харьков** – старший преподаватель кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», v.v.kharkov@gmail.com.

© **A. V. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», Kazan State Power Engineering University (KSPEU), ieremiada@gmail.com; **V. E. Zinurov** – postgraduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru; **O. S. Dmitrieva** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University (KNRTU), ja_deva@mail.ru; **V. V. Kharkov** – Senior Lecturer, Department of Food Production Equipment, KNRTU, v.v.kharkov@gmail.com.