

А. О. Маясова, О. С. Дмитриева, И. Н. Мадышев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕСПРОВАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ВИХРЕВОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА

Ключевые слова: вихревое контактное устройство, беспровальный режим, коэффициент гидравлического сопротивления, высота столба жидкости, скорость газа, отверстия в полотне тарелки.

Стремление к эффективным и устойчивым тепломассообменным процессам стимулирует развитие методов их интенсификации. Представлены результаты исследования прямооточного вихревого контактного устройства, используемого в современных колонных массообменных аппаратах. Актуальность статьи обусловлена потребностью отрасли в повышении стабильности работы контактных устройств вихревого типа при существенных колебаниях нагрузок по газовой и жидкой фазам. Основной целью настоящих теоретических и экспериментальных исследований является определение условий работы контактного устройства при продавливании слоя жидкости газовым потоком. Экспериментальные данные подтвердили адекватность предложенной теоретической модели: максимальное относительное отклонение расчетных величин от опытных не превысило 14,2%, а среднее отклонение составило не более 8,6%. Установлено, что минимальная скорость газа, необходимая для успешного продавливания слоя жидкости, закономерно возрастает с увеличением высоты этого слоя. Выявлено, что максимально допустимая высота столба жидкости, обеспечивающая устойчивый пробой газа, достигается при использовании внутреннего цилиндрического патрубка меньшего условного диаметра. Также показано, что увеличение диаметра и количества отверстий в полотне тарелки приводит к снижению скорости газового потока во внутреннем патрубке, что наиболее критично для устройств малого диаметра. При массовом расходе газа 0,04 кг/с и диаметре внутреннего патрубка 40 мм скорость газа в отверстиях тарелки составляет 26,45 м/с, а с увеличением указанного диаметра до 50 мм скорость снижается до 16,93 м/с. Полученные результаты позволяют исключить провал жидкости через отверстия тарелки и обеспечить эффективную работу аппарата с разработанными контактными устройствами, повышая общую надежность и экономичность процессов.

А. О. Mayasova, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshv

DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF WIRELESS OPERATION OF THE VORTEX CONTACT DEVICE

Keywords: vortex contact device, vibration-free operation, coefficient of hydraulic resistance, height of the liquid column, gas velocity, holes in the plate web.

The desire for efficient and sustainable heat and mass transfer processes stimulates the development of methods for their intensification. The results of a study of a direct-flow vortex contact device used in modern column mass transfer devices are presented. The relevance of the article is due to the industry's need to improve the stability of vortex-type contact devices with significant fluctuations in gas and liquid phase loads. The main purpose of these theoretical and experimental studies is to determine the operating conditions of the contact device when a liquid layer is forced through by a gas stream. Experimental data confirmed the adequacy of the proposed theoretical model: the maximum relative deviation of the calculated values from the experimental values did not exceed 14.2%, and the average deviation was no more than 8.6%. It has been found that the minimum gas velocity required for successful penetration of a liquid layer increases naturally with increasing height of this layer. It is revealed that the maximum allowable height of the liquid column, which ensures stable gas breakdown, is achieved using an internal cylindrical pipe with a smaller nominal diameter. It is also shown that an increase in the diameter and number of holes in the plate web leads to a decrease in the gas flow rate in the inner pipe, which is most critical for small-diameter devices. With a mass flow rate of 0.04 kg/s and an inner pipe diameter of 40 mm, the gas velocity in the plate openings is 26.45 m/s, and with an increase in the specified diameter to 50 mm, the velocity decreases to 16.93 m/s. The results obtained make it possible to eliminate liquid leakage through the plate openings and ensure efficient operation of the device with the developed contact devices, increasing the overall reliability and efficiency of processes.

Введение

Современная химическая, нефтехимическая и нефтеперерабатывающая промышленность неразрывно связана с эффективностью процессов разделения гетерогенных смесей. Интенсивность взаимодействия фаз напрямую определяет эффективность процесса, его энергоэффективность и экологическую безопасность [1]. Основными аппаратами для реализации массообменных процессов в этих отраслях остаются колонные с контактными устройствами. Среди большого разнообразия конструктивных исполнений контактных устройств особое внимание занимают тарелки вихревого типа [2–5]. Последними

разработками в этой области стали исследования работы центробежно-барботажных аппаратов для интенсификации массообменных процессов и процессов сепарации [6–8]. Главное преимущество тарелок, используемых в этих аппаратах, заключается в увеличении скорости массообмена между газом и жидкостью за счет увеличения площади межфазной поверхности и ее турбулентности, кроме того, они обеспечивают короткое время пребывания, отличаются компактностью и приемлемой стоимостью [9]. Однако эксплуатация таких устройств сопряжена со сложностями регулирования гидродинамических ха-

рактеристик. Поэтому определение гидродинамических параметров играет важную роль в проектировании теплообменного и сепарационного оборудования.

При проектировании устройств вихревого типа актуальной проблемой является определение диапазонов устойчивой работы, связанные с ограничениями по скорости газовой фазы, а именно предотвращение провала жидкости при низких нагрузках газовой фазы, а при высоких нагрузках – снижение брызгоуноса и гидравлического сопротивления [10]. Все это снижает эффективность контакта, или полностью переводит аппарат в нерабочий режим. Многие доступные модели расчета скорости прекращения провала проанализированы в работе [11, 12].

Несмотря на широкое применение данных типов устройств, существующие методологии расчета часто базируются на эмпирических формулах, полученных для других геометрий [13, 14]. Кроме того, сложность, вносимая гидродинамикой такого устройства в области барботажного слоя и зоне вихреобразования, создает значительные проблемы для CFD-моделирования, увеличивая вычислительные ресурсы, при этом такие модели требуют высокой степени верификации экспериментальными данными [15, 16]. Таким образом для прогнозирования желаемых параметров чисто теоретическое или чисто численное исследование менее ценно из-за необходимости верификации, существующие методы расчета, хотя и описывают общие принципы гидродинамики, не всегда позволяют точно спроектировать рабочий диапазон без проведения испытаний на экспериментальных стендах.

Целью работы является определение условий работы разработанного контактного устройства вихревого типа путем теоретического и экспериментального анализа при продавливании слоя жидкости газовым потоком, определение зависимости между устойчивым уровнем жидкости на полотне и допустимым расходе газа, обеспечивающей эффективный процесс без перехода в режим проваливания.

Методика исследования

Для достижения поставленной цели исследовалась работа прямооточного вихревого контактного устройства (рис. 1). На полотне тарелки 1 соосно размещены патрубки 2, 3, конструктивные размеры которых следующие: наружный диаметр внешнего 2 и внутреннего 3 цилиндрического патрубка 100×3 мм и 50×2 мм соответственно. Во внутреннем 3 цилиндрическом патрубке выполнено шесть прямоугольных продольных прорезей 4 шириной 4 мм и высотой 200 мм каждая, позволяющих организовать в зазоре между указанными патрубками вихревой дисперсно-кольцевой газожидкостный поток за счет отрыва потока газа с кромок продольных прорезей 4 при прохождении сквозь них газа и последующего его взаимодействия с жидкостью, которая диспергируется при прохождении газа через слой жидкости, находящейся на полотне 1 с отверстиями 5. В полотне тарелки 1 выполнено двенадцать сквозных отверстий 5 диаметром 3 мм, равномерно расположенных по окружности в межцилиндрическом пространстве, и

одно центральное отверстие, внутренний диаметр которого совпадает с внутренним диаметром патрубка 3 и служит для подачи в него основного потока газа. Жидкость поступает в межцилиндрическое пространство между двух патрубков через отверстия 6, встречая на своем пути гидрозатвор 7, необходимый для исключения прохода газа напрямую через эти отверстия 6. Восходящий вихревой дисперсно-кольцевой газожидкостный поток достигая верхней части контактного устройства сепарируется при прохождении пленки жидкости через отверстия сепарационной части 8 аппарата.

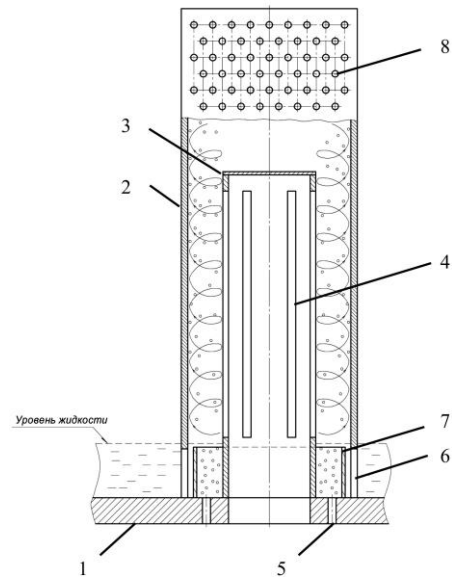


Рис. 1 – Прямоточное вихревое контактное устройство: 1 – полотно; 2, 3 – внешний и внутренний патрубки; 4 – прорези; 5, 6 – проходные отверстия; 7 – гидрозатвор; 8 – сепаратор

Fig. 1 – Direct-flow vortex contact device: 1 – web; 2, 3 – external and internal nozzles; 4 – slots; 5, 6 – through holes; 7 – hydraulic gate; 8 – separator

Регулирование уровня жидкости на полотне тарелки 1 можно осуществлять как технологически, меняя расход жидкости в целом по аппарату, так и конструктивно, подбирая оптимальные значения диаметра патрубков 2 и 3. Для экспериментального исследования процесса работы прямооточного вихревого контактного устройства при продавливании слоя жидкости газовым потоком была собрана лабораторная установка. Эксперименты проводились на системе воздух–вода при температуре 273К и атмосферном давлении. Скорость воздушного потока в подающем патрубке в ходе эксперимента изменялась в диапазоне 2,71–37,06 м/с, что соответствует массовым расходам воздуха от 0,00542 кг/с до 0,07415 кг/с.

Основная часть потока газа проходит через внутренний цилиндрический патрубок для образования множества вихрей в межцилиндрическом пространстве [17]. Другая часть газа проходит через отверстия, выполненные в полотне тарелки. Вода с помощью подводной трубки подавалась в межцилиндрическое пространство во внутрь кольца гидрозатвора. В случае если гидростатическое давление столба

жидкости уравнивалось давлением, создаваемым потоком воздуха, то наблюдалось накопление жидкости на полотне тарелки и подача жидкости прекращалась. Таким образом поддерживался определенный уровень жидкости на тарелке. С увеличением скорости воздуха слой жидкости, накопленный на тарелке барботировался газом, вовлекая за собой жидкость в вихревой закрученный газовый поток, выходящий из прямоугольных прорезей внутреннего цилиндрического патрубка.

При недостаточной скорости воздушного потока в отверстиях полотна наблюдалось стекание жидкости через отверстия, что нарушало работу прямооточного контактного устройства вихревого типа. Из-за сопротивления устройства свободному движению жидкости уровень жидкости на тарелке аппарата может меняться.

Потери давления газа при прохождении через отверстия, выполненные в полотне тарелки, можно определить по уравнению Вейсбаха:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho_G W_0^2}{2}, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ_G – плотность газа, кг/м³; W_0 – скорость газа в отверстиях тарелки, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления при прохождении газа через отверстия в полотне тарелки по аналогии работы контактного устройства с ситчатыми тарелками можно определить по уравнению [18]:

$$\xi = K \left[0,4(1,25 - \varphi) + \lambda \frac{\delta}{d_0} + (1 - \varphi)^2 \right], \quad (2)$$

где K – поправочный коэффициент, определяемый по графику в зависимости от соотношения δ/d_0 [19]; δ – толщина полотна тарелки, м; d_0 – диаметр отверстий в полотне тарелки, м; φ – доля живого сечения тарелки (в данном случае определяется как отношение суммарной площади сечения отверстий к площади поперечного сечения межцилиндрического пространства); λ – коэффициент трения в гладких трубах.

Гидростатическое давление столба жидкости на тарелке можно определить по формуле:

$$p = \rho_L g h_L, \quad (3)$$

где ρ_L – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; h_L – высота слоя жидкости на тарелке, м.

Газ будет барботировать через слой жидкости на тарелке только в том случае, когда давление, создаваемое слоем жидкости, будет меньше давления входящего потока газа. Для этого приравняем формулы (1) и (3) и получим выражение для расчета минимальной скорости газа в отверстиях, необходимой для продавливания слоя жидкости на тарелке высотой h_L :

$$W_0 = 1,414 \sqrt{\frac{\rho_L g h_L}{\xi \rho_G}}. \quad (4)$$

С другой стороны, скорость газа в отверстиях тарелки можно определить из уравнения неразрывности потока:

$$W_0 = \frac{G_m}{S_0 \rho_G n_0}, \quad (5)$$

где G_m – массовый расход газа, кг/с; $S_0 = \pi d_0^2/4$ – площадь поперечного сечения отверстия в полотне тарелки, м²; n_0 – количество отверстий.

Приравняв выражения (4) и (5), можно получить формулу для расчета максимально допустимой высоты столба жидкости на тарелке, обеспечивающей пробой газа через этот слой жидкости:

$$h_{L\max} = \left(\frac{G_m}{S_0 n_0} \right)^2 \frac{\xi}{2 \rho_G \rho_L g}. \quad (6)$$

Для проверки адекватности полученного выражения (4) были проведены экспериментальные исследования работы вихревого контактного устройства.

Результаты и обсуждение

Высота слоя жидкости на тарелке измерялась непосредственно через прозрачный корпус. Задаваясь величиной h_L в диапазоне от 1 до 60 мм получена кривая зависимости минимальной скорости газа в отверстиях тарелки от высоты слоя жидкости (рис. 2). Коэффициент гидравлического сопротивления в незначительной степени зависит также от режима течения газа в отверстиях ($Re_0 = W_0 d_0 / \nu_G$), где ν_G – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с. При скорости газа в отверстиях тарелки до 13,8 м/с коэффициент гидравлического сопротивления ξ составил в среднем 1,74, а при скорости газа в диапазоне от 14 до 37 м/с составил в среднем 1,72, что близко к значениям коэффициента гидравлического сопротивления ситчатых тарелок [20].

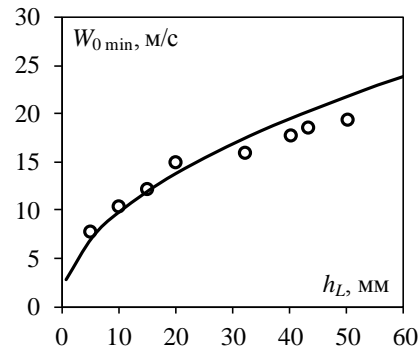


Рис. 2 – Изменение минимальной скорости газа в отверстиях полотна тарелки в зависимости от высоты слоя жидкости на нем в условиях беспровального режима работы: линия – расчет по уравнению (4); точки – эксперимент

Fig. 2 – Variation of the minimum gas velocity in the holes of the plate web depending on the height of the liquid layer on it under continuous operation conditions: line – calculation according to equation (4); points – experiment

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают удовлетворительную сходимость теоретически рассчитанных скоростей газа в отверстиях тарелки и опытных данных. Видно, что с увеличением высоты слоя жидкости на тарелке ми-

нимальная скорость газа, необходимая для продавливания слоя жидкости на тарелке возрастает. Максимальное относительное отклонение рассчитанных и опытных величин не превышает 14,2 %, а среднее отклонение составляет не более 8,6 %.

Подтвердив адекватность полученных результатов, произведем расчеты максимально допустимой высоты столба жидкости на полотне тарелки, обеспечивающей пробой газа через слой жидкости, согласно выражению (6) при разных геометрических размерах внутреннего цилиндрического патрубка устройства с условным диаметром от 40 до 80 мм и толщиной стенки равной 2 мм. Массовый расход газа при этом изменялся в диапазоне от 0,03 до 0,06 кг/с.

Результаты исследований показывают, что при одинаковом массовом расходе газа величина h_{Lmax} будет более высокой при наименьшем диаметре внутреннего цилиндрического патрубка (рис. 3).

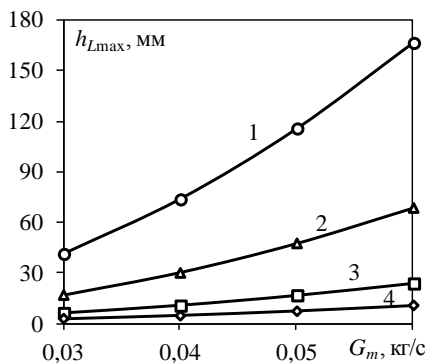


Рис. 3 – Изменение максимально допустимой высоты столба жидкости на тарелке, обеспечивающей пробой газа через слой жидкости, при диаметре внутреннего цилиндрического патрубка d , мм: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Fig. 3 – Variation of the maximum allowable height of the liquid column on the plate, which ensures the breakdown of gas through the liquid layer, with the diameter of the inner cylindrical pipe d , mm: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Это связано с тем, что с уменьшением условного диаметра внутреннего патрубка возрастает скорость газа как в отверстиях тарелки, так и в самом патрубке. Так, например, при массовом расходе газа равном 0,04 кг/с и диаметре внутреннего патрубка 40 мм скорость газа в отверстиях тарелки составляет 26,45 м/с, а при увеличении диаметра внутреннего патрубка до 50 мм скорость газа в отверстиях тарелки снижается до 16,93 м/с (рис. 4).

С учетом того, что часть газового потока проходит через отверстия, выполненные в полотне контактного устройства, массовый расход газа, поступающий через прорезы внутреннего цилиндрического патрубка будет снижаться в зависимости от доли живого сечения тарелки, а именно от количества отверстий n_0 и их диаметра d_0 . В связи с этим произведем расчеты средней скорости газа во внутреннем цилиндрическом патрубке W_3 вихревого контактного устройства при постоянном массовом расходе газа

равном 0,04 кг/с. В базовом исполнении принята конструкция тарелки с 12-ю отверстиями диаметром 3 мм.

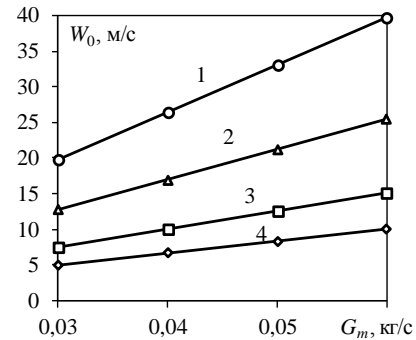


Рис. 4 – Скорость газа в отверстиях тарелки в зависимости от массового расхода газа при диаметре внутреннего цилиндрического патрубка d , мм: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Fig. 4 – The gas velocity in the plate holes depends on the mass flow rate of the gas at the diameter of the inner cylindrical pipe d , mm: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Исследования показали, что диаметр отверстий в полотне тарелки устройства наиболее значительно влияет на скорость газа во внутреннем цилиндрическом патрубке при наименьшем ее диаметре (в исследуемом случае $d = 40$ мм). Так, снижение скорости газа с увеличением диаметра отверстий с 2 до 6 мм может достигать 32,9%. При диаметре внутреннего цилиндрического патрубка $d = 65$ мм это снижение составляет 10,1 %.

Влияние количества отверстий в полотне тарелки на скорость газа во внутреннем патрубке контактного устройства менее существенно (рис. 5).

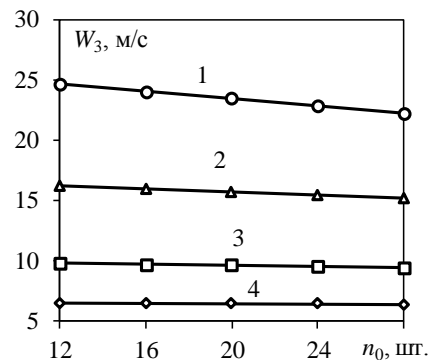


Рис. 5 – Изменение скорости газа во внутреннем цилиндрическом патрубке контактного устройства разного диаметра от количества отверстий в полотне тарелки, d , мм: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Fig. 5 – Variation of the gas velocity in the inner cylindrical nozzle of the contact device of different diameters from the number of holes in the plate web, d , mm: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 65; 4 – 80

Например, с увеличением количества отверстий с 12 до 28 штук снижение скорости газа составляет от 2,3 % до 10,7 % при максимальном и минимальном

диаметре внутреннего патрубка контактного устройства из рассмотренных соответственно.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования вихревого контактного устройства позволяют определить:

1. минимальную скорость газового потока в отверстиях тарелки при беспровальном режиме работы в зависимости от действительной высоты слоя жидкости;

2. максимально допустимую высоту столба жидкости на тарелке, обеспечивающей пробой газа через слой жидкости, при разном массовом расходе газа и переменном диаметре внутреннего патрубка. Следовательно, при заданном расходе газа следует подбирать диаметр внутреннего патрубка таким образом, чтобы исключить провал жидкости через отверстия в полотне тарелки и увеличить максимально допустимую величину высоты столба жидкости.

Кроме того, установлено снижение скорости газового потока во внутреннем цилиндрическом патрубке прямоточного вихревого контактного устройства с увеличением диаметра отверстий в полотне тарелки и их количества.

Таким образом, проведенные исследования позволяют произвести подбор конструктивных параметров прямоточного вихревого контактного устройства для обеспечения эффективной и устойчивой работы в условиях изменения нагрузок по жидкой и газовой фазам в колонных массообменных аппаратах.

Литература

1. H. Li, Y. Wu, X. Li, X. Gao, *Chemical Engineering & Technology*, **39**, 815–833 (2016). DOI: 10.1002/ceat.201500656.
2. Л.С. Молоканова, Н.В. Шибитова, В.В. Колоскова, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, **9**, 9–13 (2018).
3. В.Е. Яшин, Л.В. Равичев, А.М. Трушин, Д.Р. Сахапов, *Химическая промышленность сегодня*, **3**, 28–35 (2022). DOI: 10.53884/27132854_2022_3_28.
4. А.В. Дмитриев, И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев, *Экология и промышленность России*, **21**, 3, 12–15 (2017). DOI: 10.18412/1816-0395-2017-3-12-15.
5. А.Б. Емельянов, М.В. Мальцев, В.Б. Попов, *Вестник ВГУИТ*, **79**, 2, 176–179 (2017). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-2-176-179.
6. Р.А. Халитов, Э.С. Степанов, Р.Р. Туктаров, Ю.В. Пензин, А.Ф. Махоткин, *Вестник технологического университета*, **21**, 4, 139–142 (2018).
7. N.V. Deryagina, N.A. Voinov, D.A. Zemtsov, A.V. Bogatkova, *Thermal Science and Engineering Progress*, **18**, 100524 (2020). DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100524.
8. T. Zarei, *Separation Science and Technology*, **58**, 12, 2217–2227 (2023). DOI: 10.1080/01496395.2023.2240950.
9. A. Kourou, S. Chen, Y. Ouyang, *Current Opinion in Chemical Engineering*, **46**, 101056 (2024). DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056.
10. С.В. Зотов, Ю.К. Молоканов, *Теоретические основы химической технологии*, **17**, 4, 547–550 (1983).
11. Т.А. Тарасова, Е.А. Дмитриев, М.В. Куликов, *Успехи в химии и химической технологии*, **29**, 2(161), 74–76 (2015).
12. Д.В. Свиридов, А.В. Ларькин, Е.Б. Федорова, *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, **2**(146), 45–49 (2025).

13. О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Дульзон, *Инженерно-физический журнал*, **87**, 5, 1129–1137 (2014).
14. N.A. Voinov, A.V. Bogatkova, D.A. Zemtsov, *ChemEngineering*, **6**, 2, 29 (2022). DOI: 10.3390/chemengineering6020029.
15. Д.Н. Захарова, Ф.Ш. Вильданов, Р.Ф. Ахметов, Т.Х. Рахимов, С.К. Чуракова, *Башкирский химический журнал*, **26**, 2, 121–126 (2019). DOI: 10.17122/bcj-2019-2-121-126.
16. А.Н. Николаев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **27**, 6, 90–93 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_90.
17. И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, А.О. Маясова, *Теплоэнергетика*, **12**, 64–72 (2022).
18. С.К. Протасов, А.А. Боровик, Н.П. Матвейко, *Труды БГТУ*, **3**, 170–172 (2011).
19. Г.Г. Рабинович, П.М. Рябых, П.А. Хохряков, Ю.К. Молоканов, Е.Н. Судаков, *Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки*. М.: Химия, 1979. 568 с.
20. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков, *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии*. М.: Альянс, 2013. 575 с.

References

1. H. Li, Y. Wu, X. Li, X. Gao, *Chemical Engineering & Technology*, **39**, 815–833 (2016). DOI: 10.1002/ceat.201500656.
2. L.S. Molokanova, N.V. SHibitova, V.V. Koloskova, *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy*, **9**, 9–13 (2018). (In Russ).
3. V.E. Yashin, L.V. Ravichev, A.M. Trushin, D.R. Sahapov, *Himicheskaya promyshlennost' segodnya*, **3**, 28–35 (2022). (In Russ). DOI: 10.53884/27132854_2022_3_28.
4. A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, A.N. Nikolaev, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, **21**, 3, 12–15 (2017). (In Russ). DOI: 10.18412/1816-0395-2017-3-12-15.
5. A.B. Emel'yanov, M.V. Mal'cev, V.B. Popov, *Vestnik VGUIT*, **79**, 2, 176–179 (2017). (In Russ). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-2-176-179.
6. R.A. Halitov, E.S. Stepanov, R.R. Tuktarov, YU.V. Penzin, A.F. Mahotkin, *Herald of Technological University*, **21**, 4, 139–142 (2018). (In Russ).
7. N.V. Deryagina, N.A. Voinov, D.A. Zemtsov, A.V. Bogatkova, *Thermal Science and Engineering Progress*, **18**, 100524 (2020). DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100524.
8. T. Zarei, *Separation Science and Technology*, **58**, 12, 2217–2227 (2023). DOI: 10.1080/01496395.2023.2240950.
9. A. Kourou, S. Chen, Y. Ouyang, *Current Opinion in Chemical Engineering*, **46**, 101056 (2024). DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056.
10. S.V. Zotov, Yu.K. Molokanov, *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, **17**, 4, 547–550 (1983). (In Russ).
11. T.A. Tarasova, E.A. Dmitriev, M.V. Kulikov, *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*, **29**, 2(161), 74–76 (2015). (In Russ).
12. D.V. Sviridov, A.V. Lar'kin, E.B. Fedorova, *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, **2**(146), 45–49 (2025). (In Russ).
13. O.V. Matvienko, V.P. Bazuev, N.K. Dul'zon, *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, **87**, 5, 1129–1137 (2014). (In Russ).
14. N.A. Voinov, A.V. Bogatkova, D.A. Zemtsov, *ChemEngineering*, **6**, 2, 29 (2022). DOI: 10.3390/chemengineering6020029.
15. D.N. Zaharova, F.Sh. Vil'danov, R.F. Ahmetov, T.H. Rahimov, S.K. CHurakova, *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, **26**, 2, 121–126 (2019). (In Russ). DOI: 10.17122/bcj-2019-2-121-126.
16. A.N. Nikolaev, O.S. Dmitrieva, V.V. Har'kov, *Herald of Technological University*, **27**, 6, 90–93 (2024). (In Russ). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_90.
17. I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, V.V. Har'kov, A.O. Mayasova, *Teploenergetika*, **12**, 64–72 (2022). (In Russ).

18. S.K. Protasov, A.A. Borovik, N.P. Matvejko, *Trudy BGTU*, 3, 170–172 (2011). (In Russ).
19. G.G. Rabinovich, P.M. Ryabyh, P.A. Hohryakov, YU.K. Molokanov, E.N. Sudakov, *Raschety osnovnyh processov i*

- apparatov neftepererabotki*. Moscow, Himiya, 1979. 568 s. (In Russ).
20. K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov, *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tekhnologii*. Moscow, Al'yans, 2013. 575 s. (In Russ).

© **А. О. Маясова** – старший преподаватель кафедры МАХП, Нижнекамский химико-технологический институт (НХТИ) филиал Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), Нижнекамск, Россия, mayasova-fwoq@yandex.ru; **О. С. Дмитриева** – д.т.н., доцент кафедры ОПП, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, ja_deva@mail.ru; **И. Н. Мадышев** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой МАХП, НХТИ филиал КНИТУ, Нижнекамск, Россия, ilnyr_91@mail.ru.

© **A. O. Mayasova** – Senior Lecturer of the department of MACHP, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (NCTI), branch of Kazan National Research Technological University (KNRTU), Nizhnekamsk, Russia, mayasova-fwoq@yandex.ru; **O. S. Dmitrieva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, ja_deva@mail.ru; **I. N. Madyshev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of MACHP, NCTI, branch of KNRTU, Nizhnekamsk, Russia, ilnyr_91@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 06.04.26.

Дата принятия рукописи в печать – 26.05.26.