

УДК 66.021.3

**ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕДАЧИ
В РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКЕ**

д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ, Д.Ю. МЫТЬКО
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0762-6204>

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9816-2539>

Определено перспективное направление в разработке и исследовании контактных устройств для массообменных аппаратов. Описаны преимущества разработанной регулярно-структурированной зигзагообразной насадки, а также отмечены устойчивые режимы работы в интервале скоростей газа. Исследовано влияние геометрических параметров насадки на ее гидравлические и массообменные характеристики. Эффективность массопередачи оценивалась по высоте единицы переноса на модельной системе при десорбции диоксида углерода из воды. Рассмотрена методика теории подобия для возможности масштабирования и использования полученных данных при расчете промышленных аппаратов. Приведены критерии, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность массопередачи и гидродинамику. Представлены функциональные зависимости и методика расчета определяемых критериев. Получены коэффициенты и показатели степеней критериальных уравнений методом наименьших квадратов с использованием системы нормальных уравнений. Установлен диапазон погрешностей полученных данных.

Ключевые слова: массообменный аппарат, регулярно-структурированная насадка, гидродинамика, массопередача, теория подобия, критериальные уравнения.

Введение. Одним из перспективных направлений в разработке и исследовании контактных устройств для массообменных аппаратов является использование структурированной насадки [1–3]. Среди конструктивных исполнений такой насадки выделим две основных разновидности: с криволинейными каналами для прохода газа и жидкости и прямолинейными. К конструкциям первого вида можно отнести насадки Mellapak, Zulzer, Flexipac, Intalox; второго – щелевые, решетчатые и сотовые блоки, плоскопараллельную, хордовую [1, 4]. Насадки второго вида в зависимости от способа изготовления могут иметь в поперечном сечении каналы различной формы: треугольные, прямоугольные, шестиугольные, трапециевидные. Их основное преимущество по сравнению с первым видом заключается в более простом изготовлении и сборке пакетов насадки. Они, например, представляют собой несколько коаксиально установленных цилиндров, соединенных между собой гофрированными листами с образованием вертикальных каналов треугольного сечения, что обеспечивает их повышенную жесткость¹. Внешний вид такой насадки показан на рисунке 1.

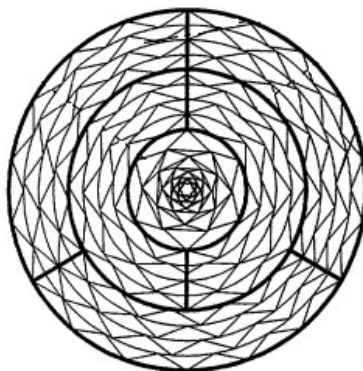


Рисунок 1. – Регулярная насадка для теплообменных аппаратов

Авторы данной работы провели сравнительные исследования подобной насадки¹ [5; 6], названной нами зигзагообразной, с известными и используемыми в производстве и установили ряд ее преимуществ. К ним относятся меньшее гидравлическое сопротивление, более высокая и стабильная во всем диапазоне эффективность массопередачи, устойчивый режим работы в интервале скоростей газа 0,7–2,6 м/с. Более того, пакет такой насадки можно изготовить на 3D-принтере.

¹ Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов : пат. РФ 54818 / М.И. Фарахов, И.М. Шигапов, Н.Н. Маряхин, Т.М. Фарахов, Л.Е. Анатольевна. – Оpubл. 27.07.2006. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU54818U1_20060727

Основная часть. Дальнейшие исследования были направлены на установление влияния геометрических параметров указанной насадки, ее гидравлические и массообменные характеристики. Определяющим геометрическим параметром была принята длина стороны треугольного канала (12 мм; 17 мм; 22 мм). При этом условно зигзагообразная насадка такого вида именовалась как 3-12; 3-17; 3-22.

Исследования проводились в идентичных условиях на установке и по методике, описанной в работах [5; 6]. Отличие заключалось в том, что в аппарате устанавливалось по три пакета соответствующей насадки высотой 100 мм. Во время эксперимента изменялась скорость газа в рабочем диапазоне, а плотность орошения оставалась неизменной $q = 0,043 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$. Эффективность массопередачи оценивалась по высоте единицы переноса (ВЕП) на модельной системе при десорбции CO_2 из воды, когда основное сопротивление сосредоточено в жидкой фазе.

Результаты экспериментальных исследований показаны на рисунках 2, 3.

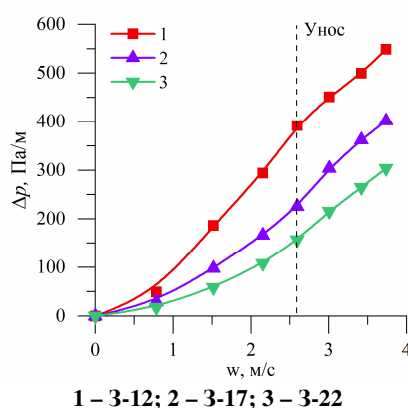


Рисунок 2. – Гидравлическое сопротивление пакета зигзагообразных насадок с орошением жидкостью

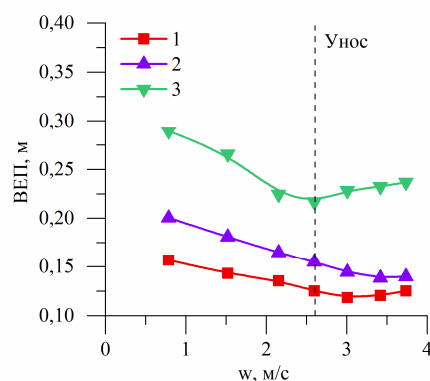


Рисунок 3. – Изменения ВЕП для насадок разной геометрии (обозначение на рисунке 2)

Видно, что с уменьшением размера канала повышается эффективность массопередачи (снижается ВЕП), но одновременно повышается и гидравлическое сопротивление насадки. Технико-экономическое сравнение показало², что треугольный канал с размером стороны 15–20 мм будет наиболее рациональным.

Для возможности масштабирования и использования полученных данных при расчете промышленных аппаратов воспользуемся методами теории подобия [7–9].

Известно, что на интенсивность массопередачи и гидродинамику наибольшее влияние оказывают критерии Рейнольдса для газа Re_y и жидкости Re_x , а также симплекс геометрического подобия Γ . Определяющим при этом являются диффузионный критерий Нуссельта для жидкости Nu'_x (основное сопротивление массопередачи в жидкой фазе) и гидродинамический критерий Эйлера Eu [7–9].

² Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов : пат. РФ 54818 / М.И. Фарахов, И.М. Шигапов, Н.Н. Маряхин, Т.М. Фарахов, Л.Е. Анатольевна. – Оpubл. 27.07.2006. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU54818U1_20060727

Для выполнения поставленной задачи запишем функциональные зависимости определяемых критериев [7; 10]:

$$\text{Nu}'_x = f(\text{Re}_y, \text{Re}_x, \Gamma), \quad (1)$$

$$\text{Eu} = f(\text{Re}_y, \text{Re}_x, \Gamma) \quad (2)$$

Характерной особенностью зависимостей по эффективности массоотдачи и гидравлическому сопротивлению является их монотонное изменение во всем диапазоне скорости газа. Такие зависимости хорошо аппроксимируются степенными функциями [11–13]:

$$\text{Nu}'_x = Q \cdot \text{Re}_y^b \cdot \text{Re}_x^c \cdot \left(\frac{\delta_{np}}{H}\right)^d, \quad (3)$$

$$\text{Eu} = U \cdot \text{Re}_y^f \cdot \text{Re}_x^j \cdot \left(\frac{d_э}{H}\right)^l, \quad (4)$$

где Q, b, c, d, U, f, j, l – постоянные числа;
 δ_{np} – приведенная толщина пленки жидкости, м;
 H – высота регулярной структурированной насадки, м;
 $d_э$ – эквивалентный диаметр насадки, м.

Для определения неизвестных коэффициентов в уравнениях (3) и (4) прологарифмируем степенную функцию. При ее графическом представлении в логарифмических координатах получается группа прямых линий. Ниже представлены уравнения, описывающие эти зависимости:

$$\ln \text{Nu}'_x = \ln Q + b \cdot \ln \text{Re}_y + c \cdot \ln \text{Re}_x + d \cdot \ln \left(\frac{\delta_{np}}{H}\right), \quad (5)$$

$$\ln \text{Eu} = \ln U + f \cdot \ln \text{Re}_y + j \cdot \ln \text{Re}_x + l \cdot \ln \left(\frac{d_э}{H}\right). \quad (6)$$

На основании экспериментальных данных рассчитаем критерии Nu'_x и Eu .

Критерий подобия Нуссельта определим по формуле [14; 15]:

$$\text{Nu}'_x = \frac{\beta_x \cdot \delta_{np}}{D_x}, \quad (7)$$

где β_x – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с;
 D_x – коэффициент диффузии жидкости, м²/с.
 Коэффициент массоотдачи жидкой фазы β_x , м/с, выразим из основного уравнения массопередачи [14; 15]:

$$\beta_x = \frac{M_x}{F \cdot \Delta \bar{X}_{cp}}, \quad (8)$$

где F – поверхность контакта фаз, м²;
 $\Delta \bar{X}_{cp}$ – средняя движущая сила;
 M_x – объем CO₂, переходящий из жидкости в газ, м³/с.
 Площадь поверхности контакта фаз F , м², определим по уравнению [7]:

$$F = H \cdot S_k \cdot a_v, \quad (9)$$

где S_k – площадь поперечного сечения колонны, м²;
 a_v – удельная поверхность насадки, м²/м³.
 Приведенную толщину стекающей пленки жидкости δ_{np} , м, определим по формуле [14; 15]:

$$\delta_{np} = \left[\frac{\mu_x^2}{\rho_x^2 \cdot g} \right]^{0,33}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;
 μ_x – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Коэффициент диффузии диоксида углерода в жидкости определим по уравнению [14; 15]:

$$D_x = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot C \cdot \sqrt{\mu_x} \cdot (v_{CO_2}^{0,33} + v_{H_2O}^{0,33})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{H_2O}}}, \quad (11)$$

где A и C – поправочные коэффициенты, зависящие от свойств растворенного вещества и растворителя; для газов $A = 1$, для воды $C = 4,7$;

v_{CO_2}, v_{H_2O} – мольный объем диоксида углерода и воды, см³/моль;

M_{CO_2}, M_{H_2O} – мольная масса диоксида углерода и воды, кг/моль.

Критерий гидродинамического подобия Эйлера Eu определяется по формуле [8]

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_y \cdot w^2}, \quad (12)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление пакета насадок, кг/м · с²;

w – скорость газового потока в каналах насадки, м/с.

Критерий Рейнольдса в уравнениях (3) и (4) для газа как сплошной фазы и жидкости, стекающей по стенкам канала в виде пленки, определяются по формуле [14; 15]:

$$Re_y = \frac{w_{cp} \cdot d_s}{\nu}, \quad (13)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с;

w_{cp} – средняя скорость газа в колонне, м/с;

$$Re_x = \frac{4 \cdot L_x}{S_x \cdot a_v \cdot \mu_x}, \quad (14)$$

где L_x – расход жидкости, кг/с.

Геометрические симплексы уже представлены в упомянутых уравнениях (3) и (4) как соотношения размеров d_s/H и δ_{np}/H .

Далее на примере формулы (5) найдем коэффициенты и показатели степеней методом наименьших квадратов, воспользовавшись системой нормальных уравнений. Запишем ее в общем виде. Число опытов $N = 7$ [11–13].

$$\begin{cases} 7A + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x + f \cdot \sum_{i=1}^N \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N Re_y + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y^2 + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot Re_x + f \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot Re_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N Re_x + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot Re_x + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x^2 + f \cdot \sum_{i=1}^N Re_x \cdot \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot Re_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N H / \delta_{np} + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot H / \delta_{np} + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x \cdot H / \delta_{np} + f \cdot \sum_{i=1}^N (\delta_{np} / H)^2 = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot \delta_{np} / H. \end{cases} \quad (15)$$

В результате описанной выше методики получены критериальные уравнения для насадки 3-17:

$$Nu'_x = Re_y^{0,247} \cdot Re_x^{-1,079}, \quad (16)$$

$$Eu = Re_y^{-0,312} \cdot Re_x^{1,554}. \quad (17)$$

В уравнениях (16), (17) отсутствуют коэффициенты Q и U из уравнений (3), (4) вследствие того, что их значения равны единице. Для геометрических симплексов d_s/H и δ_{np}/H были получены степени, близкие к нулю ($7,642 \cdot 10^{-16}$ и $-1,321 \cdot 10^{-16}$), что также приравнивает их величины к единице.

Определим среднюю относительную погрешность критериев Nu'_x и Eu [16]:

$$\delta = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^7 x_{i,э.}}{\sum_{i=1}^7 x_{i,п.}} \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

где $x_{i,э}$ – значения, полученные по экспериментальным данным;

$x_{i,р}$ – значения, полученные методом наименьших квадратов.

На рисунке 4 приведены зависимости изменения критерия Нуссельта и Эйлера от числа Рейнольдса газа для 3-17 при ее орошении. Линии построены по значениям уравнений (16), (17). Точками представлены показатели, полученные по уравнениям (7), (12).

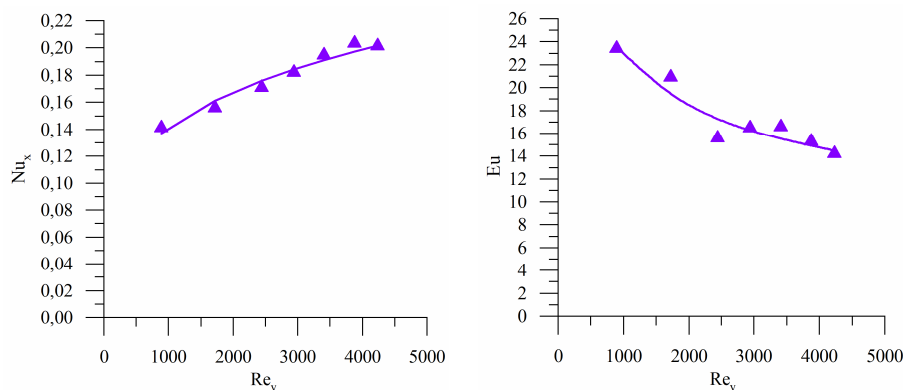


Рисунок 4. – Изменение критериев подобия для насадки 3-17

Исходя из рисунка 4, первоначально рассчитанные критерии по экспериментальным данным удовлетворительно описываются линиями, полученными по критериальным уравнениям с относительной погрешностью 0,043–0,828%.

Заключение. В данной работе представлена методика для определения коэффициентов и показателей степеней критериальных уравнения Нуссельта и Эйлера, позволяющая рассчитать интенсивность массоотдачи распределяемого компонента на границе раздела фаз и установить влияние геометрии на гидродинамику регулярно-структурированной зигзагообразной насадки. Выявлено, что максимальная погрешность была достигнута 0,828%. Следовательно, представленная методика может быть рекомендована для инженерных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / А.М. Каган [и др.]. – Казань : Отечество, 2013. – 454 с.
2. Aroonwilas, A. High-efficiency structured packing for CO₂ separation using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) / A. Aroonwilas, P. Tontiwachwuthikul // Separation and Purification Technology. – 1997. – Vol. 98, № 12-1. – P. 67–79. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(97)00037-3).
3. Investigation of hydrodynamic performance and effective mass transfer area for Sulzer DX structured packing / H. Gao [et al.] // AIChE Journal. – 2018. – Vol. 3726, № 10. – P. 3625–3637. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16346>.
4. MellapakPlus: A new Generation of Structured Packings // Sulzer Chemtech Ltd, Wintthur, Switzerland, 1999. – Vol. 28. – Режим доступа: <https://www.sulzer.com>.
5. Вайтехович, П.Е. Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов / П.Е. Вайтехович, Д.Ю. Мытько // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 44–49. Режим доступа: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/35282/1/Vajtehovich_Sravnitel%27nyj.pdf.
6. Мытько, Д.Ю. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов / Д.Ю. Мытько, П.Е. Вайтехович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Приклад. науки. – 2020. – № 8. – С. 33–38. – Режим доступа: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/37387/1/Myt%27ko_gidravlichesкое.pdf.
7. Вайтехович, П.Е. Технично-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки / П.Е. Вайтехович, Д.Ю. Мытько // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 69–73. – Режим доступа: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/39003>.
8. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
9. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н.И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.
10. Флореа, О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии / О. Флореа, О. Смигельский. – М. : Химия, 1971. – 448 с.
11. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М. : Высш. шк., 1973. – 296 с.
12. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. – 302 с.
13. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М. : ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.
14. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.
15. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2009. – 543 с.

16. Савчук, В.П. Обработка результатов измерений / В.П. Савчук. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Ч. 1. – 54 с.

REFERENCES

1. Kagan, A.M., Laptev, A.G., Pushnov, A.S., & Farakhov, M.I. (2013). *Kontaktnyye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennykh apparatov* [Contact nozzles for industrial heat and mass transfer devices]. Kazan: Otechestvo. (In Russ.).
2. Aroonwilas, A., & Tontiwachwuthikul, P. (1997). High-efficiency structured packing for CO₂ separation using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP). *Separation and Purification Technology*, 12(1), 67–79. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(97)00037-3)
3. Gao, H., Liu, S., Luo, X., Zhang, H., & Liang, Z. (2018). Investigation of hydrodynamic performance and effective mass transfer area for Sulzer DX structured packing. *AIChE Journal*, 10, 3625–3637. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16346>
4. MellapakPlus: A new Generation of Structured Packings // Sulzer Chemtech Ltd, Winterthur, Switzerland, 1999. – Vol. 28. <https://www.sulzer.com>.
5. Vaytsekhovich, P.Ye., & Mytsko, D.Yu. (2020). Sravnitel'nyy analiz jeffektivnosti reguljarnyh nasadok dlja massoobmennykh apparatov [Comparative analysis of the effectiveness of regular packings for mass transfer apparatus]. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2, 44–49 (in Russ., abstr. In Engl.). https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/35282/1/Vajtehovich_Sravnitel%27nyj.pdf
6. Mytsko D.Yu., & Vaytsekhovich P.Ye. (2020). Gidravlichesкое soprotivlenie reguljarnyh nasadok massobmennykh apparatov. [Hydraulic resistance of regular attachments of mass exchange devices]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Polotsk State University]*, 8, 33–38 (in Russ., abstr. In Engl.). https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/37387/1/Myt%27ko_gidravlichesкое.pdf
7. Vaytsekhovich, P.Ye., & Mytsko, D.Yu. (2021). Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie i vybor optimal'noj nasadki [Feasibility study and selection of the optimal packing]. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 1(241), 69–73 (in Russ. abstr. In Engl.). <https://elib.belstu.by/handle/123456789/39003>
8. Ramm, V.M. (1976). *Absorbicija gazov [Gas absorption]*. Moscow: Himija. (in Russ.).
9. Gel'perin, N.I. (1981). *Osnovnye processy i apparatay himicheskoj tehnologii [Basic processes and devices of chemical technology]*. Moscow: Himija. (in Russ.).
10. Florea, O., & Smigel'skij, O. (1971). *Raschety po processam i apparatam himicheskoj tehnologii [Calculations for processes and devices of chemical technology]*. Moscow: Himija. (in Russ.).
11. Guhman, A.A. (1973). *Vvedenie v teoriju podobija [Introduction to similarity theory]*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russ.).
12. Krasovskij, G.I., & Filaretov G.F. (1982) *Planirovanie jeksperimenta [Experiment planning]*. Misnk: BGU. (in Russ.).
13. Grachev, Ju.P., & Plaksin, Ju.M. (2005). *Matematicheskie metody planirovanija jeksperimentov [Mathematical methods for planning experiments]*. Moscow: DeLiprint. (in Russ.).
14. Pavlov, K.F., Romankov, P.G., & Noskov, A.A. (1976). *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov [Examples and tasks for the course of processes and devices]*. Leningrad: Himija. (in Russ.).
15. Romankov, P.G., Frolov, V.F., & Flisjuk, O.M. (2009). *Metody rascheta processov i apparatov himicheskoj tehnologii [Methods for calculating processes and devices of chemical technology]*. Saint Petersburg: HIMIZDAT. (in Russ.).
16. Savchuk, V.P. (2002). *Obrabotka rezul'tatov izmerenij. Ch. 1 [Processing of measurement results. P. 1]*. Odessa: ONPU. (in Russ.).

Поступила 27.08.2021

SIMILARITY OF PROCESSES OF HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER IN A REGULAR STRUCTURED NOZZLE

P. VAYTEKHOVICH, D. MYTSKO

In this work, a promising direction in the development and research of contact devices for mass transfer devices is determined. The advantages of the developed regularly-structured zigzag packing are described, and stable modes of operation in the range of gas velocities are noted. The influence of the geometric parameters of the packing on its hydraulic and mass transfer characteristics has been investigated. It is noted that the efficiency of mass transfer was estimated from the height of the transfer unit on a model system during desorption of carbon dioxide from water. The technique of the theory of similarity is considered for the possibility of scaling and using the obtained data in the calculation of industrial devices. Criteria are given that have the greatest impact on the intensity of mass transfer and hydrodynamics. Functional dependencies and methods for calculating the determined criteria are presented. The coefficients and exponents of the criteria equations are obtained by the least squares method using a system of normal equations. The range of errors of the obtained data is determined.

Keywords: mass transfer apparatus, regularly structured packing, hydrodynamics, mass transfer, similarity theory, criterion equations.