

УДК 66.021.3

П. Е. Вайтехович, Д. Ю. Мытько, А. М. Волк
Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКИ
НА ГИДРОДИНАМИКУ И МАССООБМЕН**

В данной работе описываются преимущества регулярной структурированной зигзагообразной насадки. Определена задача дальнейших исследований. Для выполнения эксперимента и дальнейшего сравнения было разработано три вида зигзагообразной насадки, отличие которых заключалось в длине стороны поперечного сечения ячеечного канала. Каждый из пакетов устанавливался с поворотом в двадцать градусов друг от друга. Для сравнения одна из них была выставлена соосно. Исследование направлено на изучение гидродинамики и эффективности массопередачи. По экспериментальным данным построены графические зависимости гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки, а также эффективности массопередачи для системы газ – жидкость. Определены гидродинамические режимы работы насадок и скорость, при которой достигается унос капель жидкости. На основании результатов эксперимента рассчитана высота единицы переноса. Сделан вывод о влиянии длины стороны поперечного сечения ячеечного канала на гидравлическое сопротивление, эффективность массопередачи и высоту эквивалентной теоретической тарелки регулярно-структурированных зигзагообразных насадок.

Ключевые слова: десорбция, гидродинамика, массопередача, регулярно-структурированная насадка, высота единицы переноса.

Для цитирования: П. Е. Вайтехович, Д. Ю. Мытько, А. М. Волк. Влияние геометрических параметров регулярной структурированной насадки на гидродинамику и массообмен // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 67–71.

P. Ye. Vaytsekhovich, D. Yu. Mytsko, A. M. Volk
Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS
OF REGULAR STRUCTURED PACKING
ON HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER**

This paper describes the benefits of a regular structured zigzag packing. The task of further research has been determined. To carry out the experiment and further comparison, three types of zigzag packing were developed, the difference of which was in the length of the side of the cross section of the cell channel. Each of the packages was installed with a twist of twenty degrees from each other. For comparison, one of them was aligned coaxially. The research aims to study fluid dynamics and mass transfer efficiency. Based on the experimental data, graphical dependences of the hydraulic resistance of the dry and irrigated packing, as well as the efficiency of mass transfer for the gas-liquid system, were constructed. The hydrodynamic modes of operation of the nozzles and at what speed the entrainment of liquid drops is achieved are determined. Based on the results of the experiment, the height of the transfer unit was calculated. A conclusion is made about the influence of the length of the side of the cross-section of the cell channel on the hydraulic resistance, the efficiency of mass transfer and the height of the equivalent theoretical plate of regularly-structured zigzag nozzles.

Key words: desorption, hydrodynamics, mass transfer, regularly structured packing, transfer unit height.

For citation: Vaytsekhovich P. Ye., Mytsko D. Yu., Volk A. M. Influence of geometric parameters of regular structured packing on hydrodynamics and mass transfer. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 67–71 (In Russian).

Введение. Регулярные структурированные насадки в последнее время являются как объектом исследования, так и активно используются в массообменных аппаратах химической промышленности. Ранее в работах [1, 2] была изучена гидродинамика, эффективность массопередачи при десорбции CO₂ и насыщении возду-

ха парами воды трех видов регулярно-структурированных насадок. Из приведенных конструкций для проведения дальнейших исследований была выбрана зигзагообразная насадка. Она характеризуется более высокой эффективностью массопередачи и низким гидравлическим сопротивлением.

Задачей дальнейших исследований было определение влияния геометрических размеров зигзагообразной насадки на указанные выше параметры.

Основная часть. Для выполнения поставленной задачи было изготовлено по три пакета зигзагообразной насадки с длиной стороны ячейечного канала 12, 17 и 22 мм [3]. Далее будем использовать следующие условные обозначения этих насадок: 3-12, 3-17, 3-22. Наверное, можно было бы ее назвать структурированной насадкой с треугольными каналами определенного размера. Но пока оставим уже устоявшееся ранее название.

Каждый следующий пакет устанавливался в массообменный аппарат относительно предыдущего с поворотом на 20° . Для сравнения одна из насадок устанавливалась соосно, чтобы ячейки располагались одна над другой. Ее обозначим 3-120.

Для каждой из описанных выше насадок в виде трех пакетов проводились экспериментальные исследования по определению гидравлического сопротивления в сухом и орошаемом состоянии и эффективности массопередачи по жидкой $E_{ж}$ и газовой $E_{г}$ фазам. При этом фиктивная скорость газа изменялась в диапазоне ($w = 0-3,7$ м/с), а плотность орошения оставалась неизменной – $q = 0,0043$ м³/м²·с. Опыты проводились по методике, изложенной в работе [1].

Результаты опытов представлены далее в виде графических зависимостей $E_{г} = f(w)$, $E_{ж} = f(w)$, $\Delta p = f(w)$. Причем гидравлическое сопротивление [4–6] рассчитывалось на 1 м ее высоты.

Изменение гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадкой от скорости газа представлено на рис. 1.

Видно, что в обоих случаях оно существенно возрастает с увеличением фиктивной

скорости газа и совсем незначительно при уменьшении геометрических размеров ячейки. Максимальная его величина наблюдается у 3-12. Это объясняется уменьшением свободного сечения из-за того, что боковые стенки каждой ячейки, создают препятствие движущемуся газу.

Совсем небольшое снижение гидравлического сопротивления наблюдается при соосной установке ячеек (3-120).

Присутствие жидкой фазы в совокупности с изменением размеров ячеек (рис. 1, б) более существенно влияет на гидравлическое сопротивление. В ячейках малых размеров стекающая жидкость в виде тонкой пленки на стенках и струек в углах в большей степени перекрывает каналы для прохода газа, повышая тем самым гидравлическое сопротивление.

Гидродинамические исследования обычно направлены не только на определение гидравлического сопротивления насадки, но и на установление ее режимов устойчивой работы.

Анализируя зависимости, полученные при орошении насадок, можно отметить, что в диапазоне скоростей газа от 0 до 2,6 м/с наблюдаются устойчивые гидродинамические режимы взаимодействия фаз. Выше скорости 2,6 м/с заметен унос на выходе из колонны при сепарационном пространстве 600 мм. При таком режиме работы происходит инверсия фаз, где сплошной фазой становится жидкая, а газовая переходит в дисперсное состояние [1].

Эффективность массопередачи регулярно структурированных зигзагообразных насадок с преобладающим диффузионным сопротивлением в газе (насыщение воздуха парами воды) и жидкости (десорбции CO_2) представлена на рис. 2.

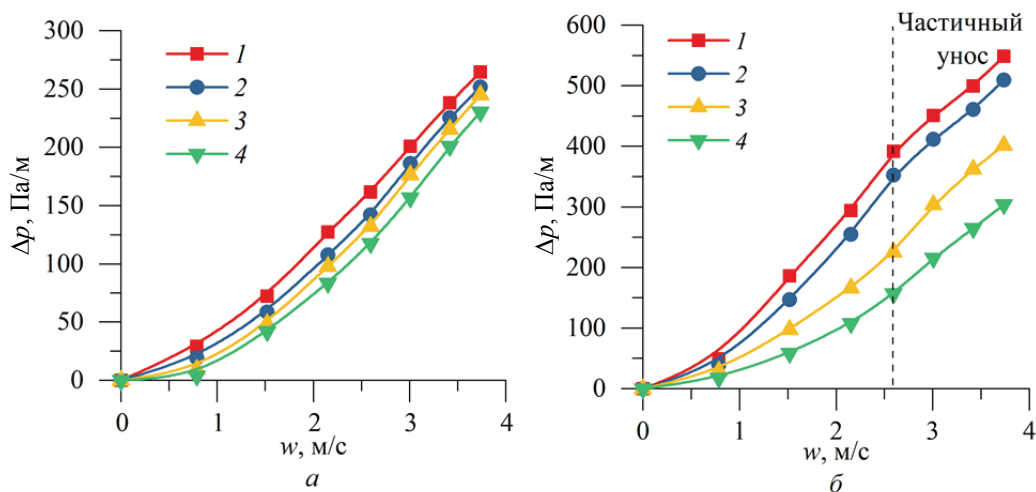


Рис. 1. Гидравлическое сопротивление пакета зигзагообразных насадок:
а – без орошения; б – с орошением;
1 – 3-12; 2 – 3-120; 3 – 3-17; 4 – 3-22

Эффективность десорбции диоксида углерода по жидкой фазе (рис. 2, б) более стабильна во всем диапазоне изменения скоростей газа вплоть до уноса, когда она начинает немного снижаться. Для насадки с наименьшим размером ячейки поверхность контакта между газом и жидкостью увеличивается, следовательно, поэтому эффективность массопередачи значительно выше.

Переход к соосной установке ячеек (3-120) мало влияет на гидродинамику течения жидкой фазы, что таким же образом отображается и на изменении эффективности по жидкости $E_{ж}$. А вот это же смещение пакетов насадки и переход к соосности ячеек значительно упрощает прохождение газа через них. Соответственно изменяется эффективность массопередачи за счет уменьшения поверхности контакта газа с жидкостью (рис. 2, а).

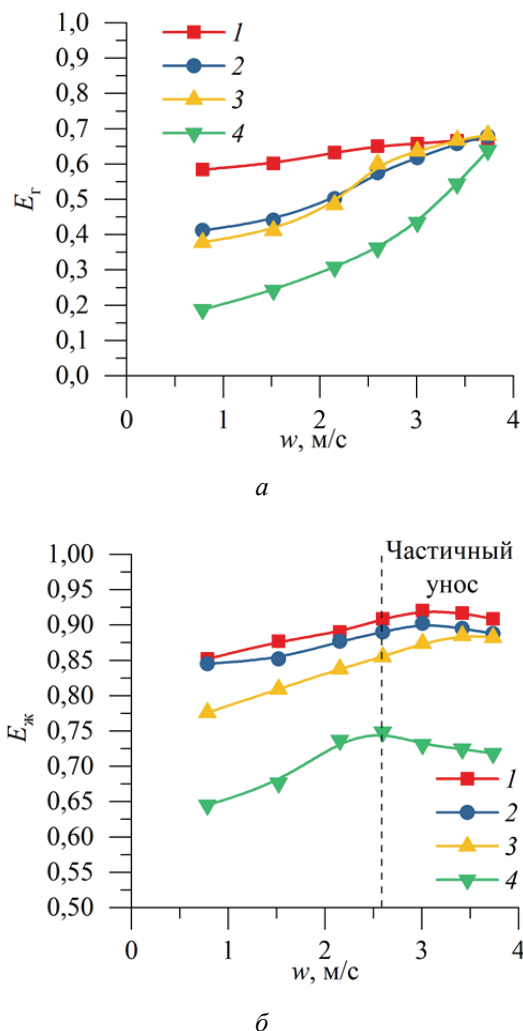


Рис. 2. Эффективность массопередачи зигзагообразных насадок:
 а – сопротивление в газовой фазе;
 б – сопротивление в жидкой фазе;
 1 – 3-12; 2 – 3-120; 3 – 3-17; 4 – 3-22

Это особенно наблюдается при низких скоростях газа. В режиме уноса, когда сильно турбулизируется жидкость, влияние всех других факторов на эффективность по газовой фазе сводится к нулю.

Для сравнения разных видов насадок и одновременно их с тарельчатыми контактными устройствами вполне допустимо использовать такой параметр, как эффективность массопередачи. Но, когда исследования сосредоточены на одном конкретном, оптимальном виде насадки, то необходимо переходить к общепринятому для них параметру [6] – высоте единицы переноса (ВЕП).

Она рассчитывается по формуле

$$h_{0x} = \frac{H}{n_{0x}}, \quad (1)$$

где H – высота пакета насадок, м; n_{0x} – число единиц переноса по жидкой фазе, определяемое по формуле

$$n_{0x} = \frac{x_n - x_k}{\Delta x_{cp}}, \quad (2)$$

где x_n – молярная доля в воде на входе в колонну, кмоль $\text{CO}_2/\text{кмоль} (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$; x_k – молярная доля в воде на выходе из колонны, кмоль $\text{CO}_2/\text{кмоль} (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$; Δx_{cp} – среднелогарифмическая движущая сила процесса по жидкой фазе [7–10].

В этом случае ВЕП можно рассчитать по экспериментальным данным, полученным нами при определении эффективности массопередачи.

По результатам расчетов построены зависимости изменения ВЕП от скорости газа для всех видов насадок (рис. 3) системы «десорбция CO_2 из воды», когда основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе.

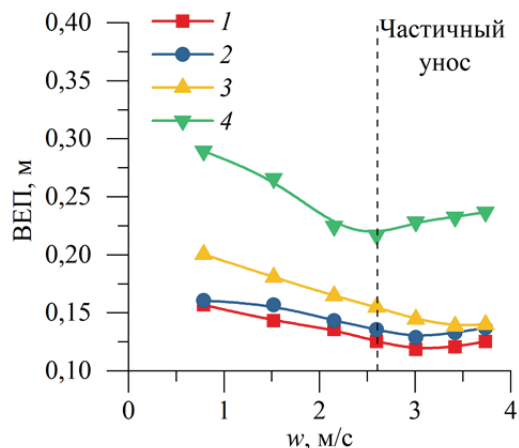


Рис. 3. Изменение ВЕП разных вариантов насадки:
 1 – 3-12; 2 – 3-120; 3 – 3-17; 4 – 3-22

Из представленной зависимости видно, что изменение ВЕП подобно, но полностью противоположно изменению эффективности насадки. Это не противоречит основным законам массопередачи, которые свидетельствуют о повышении ее интенсивности при уменьшении высоты единицы переноса.

По результатам проведенных исследований и полученным графическим зависимостям следует, что высокая эффективность массопередачи достигается для насадки с большим количеством ячеек (3-12), но при этом повышается гидравлическое сопротивление. Следовательно, необходимо проводить десорбцию диоксида углерода при малых нагрузках по газу для данного типа насадки.

Заключение. Исследования показали, что гидравлическое сопротивление как для сухой, так и для орошаемой насадки равномерно возрастает с уменьшением длин сторон поперечного сечения ячейки канала. Эффективность массопередачи с диффузионным сопротивлением как в газе, так и в жидкости выше для насадочных устройств с наибольшим количеством ячеек. Наименьшей высотой единицы переноса, при которой достигается максимальная эффективность процесса, обладает насадка 3-12, что ниже на 0,012 м 3-120, на 0,015 м 3-17 и на 0,112 м 3-22. Следовательно, для повышения эффективности массопередачи надо уменьшать размер ячеек насадки, а при ограничениях, наоборот, увеличивать его.

Список литературы

1. Вайтехович П. Е., Мытько Д. Ю. Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2020. № 2. С. 44–49.
2. Мытько Д. Ю., Вайтехович П. Е. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. 2020. № 8. С. 33–38.
3. Мытько Д. Ю., Вайтехович П. Е. Гидродинамика и эффективность регулярно-структурированных зигзагообразных насадок // Химическая технология и техника: материалы 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2021. С. 56–58.
4. Рамм В. М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 656 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
6. Сивухина М. А. Декарбонизаторы: монография. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 204 с.
7. Мисюля Д. И., Протасов С. К. Экспериментальные исследования регулярной насадки для массообменных аппаратов // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 117–120.
8. Фарахов М. М., Лаптева Е. А. Экспериментальные исследования бинарной и многокомпонентной ректификации смесей в колонне с новыми насадками // Труды Академэнерго. 2020. № 2. С. 43–54.
9. Массообмен в насадочной колонне экстрактивной ректификации / И. В. Иванов [и др.] // Геоэкологические основы химической технологии. 2016. № 5. С. 485–495.
10. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии. СПб.: Химиздат, 2009. 544 с.

References

1. Vaytsekhovich P. Ye., Mytsko D. Yu. Comparative analysis of the effectiveness of regular packings for mass transfer apparatus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2020, no. 2, pp. 44–49 (In Russian).
2. Mytsko D. Yu., Vaytsekhovich P. Ye. Hydraulic resistance of regular attachments of mass exchange devices. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Polotsk State University Bulletin], Construction. Applied sciences, 2020, no. 8, pp. 33–38 (In Russian).
3. Mytsko D. Yu., Vaytsekhovich P. Ye. Hydrodynamics and Efficiency of Regularly Structured Zigzag Packs. *Materialy 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov "Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika"* [Materials of the 85th scientific and technical conference of the professors and teaching staff, researchers and graduate students (with international participation) "Chemical technology and engineering"] 2021, pp. 56–58 (In Russian).
4. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 656 p.
5. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Hydraulic resistance reference]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1992. 672 p.

6. Sivukhina M. A. *De karbonizatory* [Decarbonizers]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2000. 204 p.
7. Misyulya D. I., Protasov S. K. Experimental studies of regular packing for mass transfer apparatus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 117–120 (In Russian).
8. Farakhov M. M., Lapteva E. A. Experimental studies of binary and multicomponent rectification of mixtures in a column with new packing. *Trudy Akademenergo* [Academenergo Proceedings]. 2020, no. 2, pp. 43–54 (In Russian).
9. Ivanov I. V., Lothov V. A., Moiseeva K. A., Kulov N. N. Mass transfer in a packed column for extractive rectification. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology]. 2016, no. 5, pp. 485–495 (In Russian).
10. Romankov P. G., Frolov V. F., Flisyuk O. M. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Methods for calculating processes and devices of chemical technology]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2009. 544 p.

Информация об авторах

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

Мытько Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mytko.dmitrij@mail.ru

Волк Анатолий Матвеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Anatoliyvolk@mail.ru

Information about the authors

Vaytsekhovich Petr Yevgen'yevich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

Mytsko Dzmity Yur'yevich – PhD student, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: mytko.dmitrij@mail.ru

Volk Anatoliy Matveevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: Anatoliyvolk@mail.ru

Поступила 27.05.2021