

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО БРЫЗГОУНОСА В МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ С ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ РЕГУЛЯРНО-СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ

STUDY OF THE RELATIVE SPRAY LOSS IN A MASS TRANSFER APPARATUS WITH A ZIGZAG REGULAR-STRUCTURED PACKING

УДК 66.021.3

Д.Ю. Мытько, П.Е. Вайтехович

Белорусский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-2-132-140>

D. Mytsko*, P. Vaytsekhovich

Belarusian State Technological University

РЕФЕРАТ

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ БРЫЗГОУНОС, РЕГУЛЯРНАЯ СТРУКТУРИРОВАННАЯ НАСАДКА, МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

В данной работе рассмотрена одна из важных проблем, связанная с загрязнением окружающей среды, вследствие уноса капель жидкости из массообменного аппарата вместе с химически опасными элементами. Проведены экспериментальные исследования и получены графические зависимости изменения величины относительного брызгоуноса от скорости газового потока и плотности орошения для трех видов зигзагообразной регулярно-структурированной насадки. Описано влияние размеров треугольной ячейки насадок и сепарационного пространства на величину брызгоуноса, а также определен наиболее эффективный вариант установки их в массообменный аппарат. Представлена методика для вычисления неизвестных коэффициентов эмпирического уравнения регрессии. Получены уравнения для определения относительного брызгоуноса. Расчитана относительная погрешность. Даны рекомендации по работе насадочных массообменных аппаратов при максимально-фиктивных скоростях.

ABSTRACT

RELATIVE SPRAY LOSS, REGULAR STRUCTURED PACKING, LEAST SQUARES METHOD

The paper, discusses one of the important problems associated with environmental pollution due to the entrainment of liquid droplets from the mass transfer apparatus together with chemically hazardous elements. Experimental studies have been carried out and graphical dependences of the change in the value of the relative spray loss on the gas flow rate and irrigation density for three types of zigzag regularly-structured packing have been obtained. The influence of the dimensions of the triangular cell of the packings and the separation space on the size of the spray loss is described, and the most effective variant of their installation in the mass transfer apparatus is determined. A technique for calculating unknown coefficients of the empirical regression equation is presented. Equations for determining the relative spray loss are obtained. The relative error has been calculated. Recommendations are given on the operation of packed mass transfer apparatus at maximum fictitious speeds.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей в условиях современного производства является снижение загрязнения окружающей среды. Одним из серьезных источников загрязнений можно считать выхлопные

газы, выбрасываемые в атмосферу как на химических, так и на предприятиях других отраслей промышленности. В своем составе они могут содержать опасные химические вещества в виде пыли, паров, капельной влаги, газообразных

* E-mail: mytko.dmitrij@mail.ru (D. Mytsko)

компонентов. И даже в установках по очистке газов абсорбционным методом возможен капельный унос из массообменного аппарата жидкого абсорбента, который становится часто дополнительным источником загрязнения окружающей среды. Исследование относительного брызгоуноса в насадочном массообменном аппарате в зависимости от режимных параметров его работы позволит уменьшить величину брызгоуноса и снизить дополнительное загрязнение окружающей среды.

В последнее время основным направлением совершенствования насадочных массообменных аппаратов является переход к использованию регулярной структурированной насадки [1, 2], позволяющей повысить допустимую скорость газовой фазы, эффективность массопередачи, снизить гидравлическое сопротивление. Свой вклад в развитие этого направления внесли и авторы данной работы [3–5].

Нами проведены сравнительные исследования нескольких типов насадок, определены их гидродинамические и массообменные характеристики [3, 4]. На основе этих исследований выбран оптимальный тип насадки, выполненной в виде концентрических коаксиально-расположенных цилиндров, между которыми установлены зигзагообразные перегородки с образованием контактных каналов треугольного сечения. Такая насадка условно была названа зигзагообразной. Комплекс исследований, проведенных ранее, позволил определить рациональный размер этих каналов, характеризующийся стороной треугольника $15 \div 20$ мм [6]. Единственным параметром, не вошедшим в сферу исследований, остался унос жидкой фазы из насадочного аппарата.

В этой связи в задачу данной работы входило установление закономерностей изменения уноса жидкой фазы из слоя регулярной структурированной насадки нового типа.

Основная часть. Как и все предыдущие исследования определение уноса проводилось на той же экспериментальной установке с диаметром массообменной колонны – 150 мм. Для выполнения поставленной задачи было сконструировано и изготовлено на 3D-принтере по три вида зигзагообразной насадки с длиной стороны ячеечного канала 12 мм, 17 мм, 22 мм. Далее

будем использовать их следующие условные обозначения: 3-12; 3-17; 3-22 [6]. Основные пакеты насадки высотой 300 мм были набраны из трех равных секций. Для определения количества унесенной жидкости на расстоянии 500 мм над насадкой устанавливался гравитационный сепаратор с отбойником. В дополнительной серии опытов в структуру насадки вносилось два изменения. Первое заключалось в том, что отдельные ее секции раздвигались с образованием между ними дополнительного сепарационного пространства высотой 40 мм, а второе отличалось уменьшением общей зоны сепарации до 400 мм.

Варьируемыми параметрами в процессе экспериментов являлись фиктивная скорость газа и плотность орошения, значения которой q , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, задавались: $3 \cdot 10^{-3}$; $3,6 \cdot 10^{-3}$ и $4,3 \cdot 10^{-3}$.

Относительная величина брызгоуноса u , $\text{г}/\text{м}^3$, определяется по формуле [7]:

$$u = \frac{m}{\tau \cdot V} \quad (1)$$

где m – масса жидкости, уловленная сепаратором, г ; τ – время, с ; V – объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$.

Часто при исследовании уноса вводится его максимально допустимая величина. Например, для тарельчатых массообменных аппаратов межтарельчатый унос допускается до 10 %. С учетом того, что в литературе по изучению регулярно-структурированных насадок не указан предел по допустимому уносу из насадочного аппарата, на наш взгляд, в указанных аппаратах можно ограничиться однопроцентным уносом, как граничным для верхнего предела устойчивой работы по скорости газа [8–12].

На рисунке 1 представлены графические зависимости изменения относительного брызгоуноса жидкости u , $\text{г}/\text{м}^3$, из массообменного аппарата с блоком зигзагообразной регулярно-структурированной насадки от фиктивной скорости газам в колонне w , $\text{м}/\text{с}$. Сплошной линией обозначена зависимость для цельного блока, штриховой – для пакета с дополнительным сепарационным пространством.

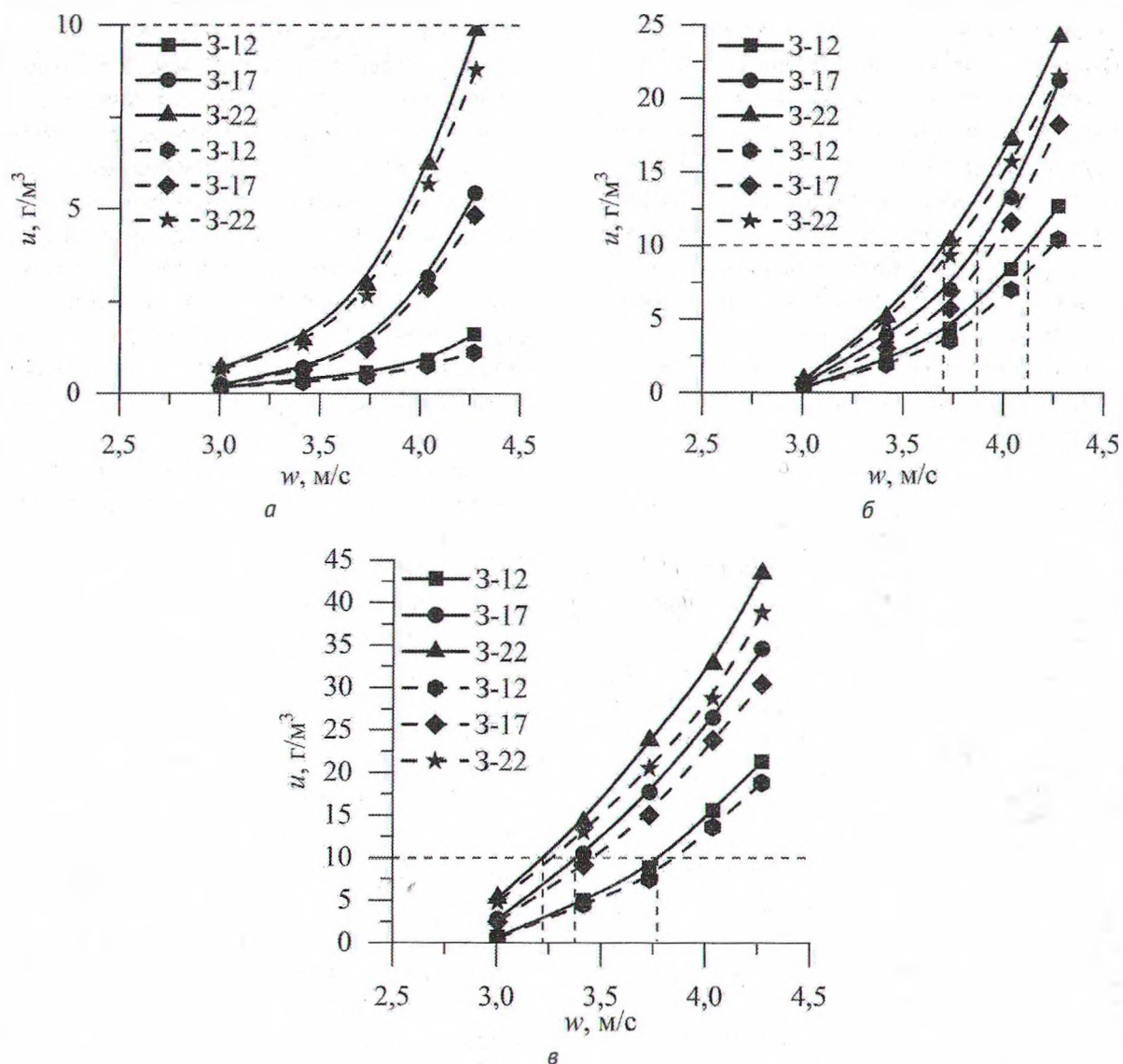


Рисунок 1 – Относительный брызгоунос жидкости при трех плотностях орошения (при $H = 500$ мм):
 а - $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; б - $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; в - $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$

Из рисунка 1 (а, б, в) видно, что величина относительного брызгоуноса возрастает с увеличением фиктивной скорости газа в колонне. Причем для всех вариантов насадки его изменение описывается степенной функцией. При уменьшении размера ячейки унос снижается. Объяснение этому может быть дано только после детального изучения пленочного течения жидкости в каналах насадки, которое намечается провести в ближайшей перспективе. Установка насадки с дополнительным сепарационным про-

странством способствует уменьшению уноса, но не очень значительно.

Максимальная величина брызгоуноса $10 \text{ г}/\text{м}^3$ или 1 % не была достигнута при $q = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (рисунок 1 а) для всех вариантов насадок. Однако с увеличением плотности орошения (рисунок 1 б, в) она была значительно превышена. По зависимостям на рисунке 1 (б, в), можно определить максимально-фиктивные скорости газа. Для 3-12 (рисунок 1 б) она равна $4,2 \text{ м}/\text{с}$, для 3-17 и 3-22 – $4,0 \text{ м}/\text{с}$ и $3,7 \text{ м}/\text{с}$ соответ-

ственно. При максимальной плотности орошения (рисунок 1 в) они будут равны 3,75 м/с для 3-12, 3,4 м/с для 3-17 и 3,2 м/с для 3-22.

Для большей наглядности на рисунке 2 представлены графические зависимости изменения относительного уноса в массообменной колонне со сплошным блоком насадок от плотности орошения, при одной скорости газа в колонне 3,5 м/с.

Здесь четко видно, что с увеличением плотности орошения величина относительного брызгоуноса возрастает. Причем это изменение происходит почти линейно.

На рисунке 3 представлены графические зависимости изменения относительного брызгоуноса жидкости $u, г/м^3$, из массообменного аппарата с цельным блоком регулярно-структурированной насадки от фиктивной скорости

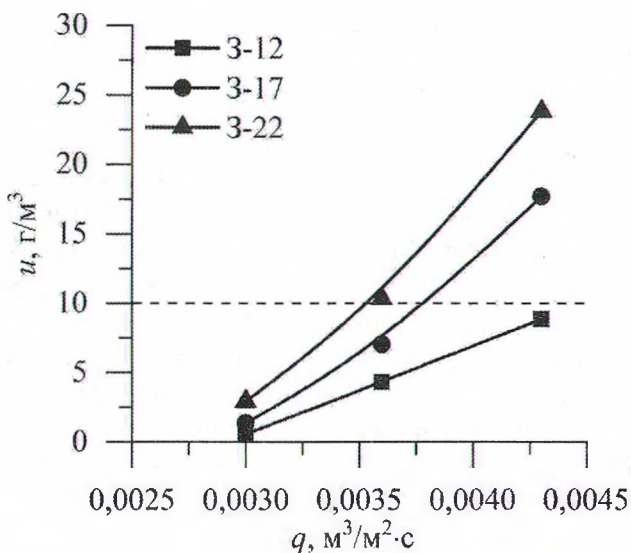


Рисунок 2 – Изменение относительного брызгоуноса от плотности орошения ($H = 500 \text{ мм}$)

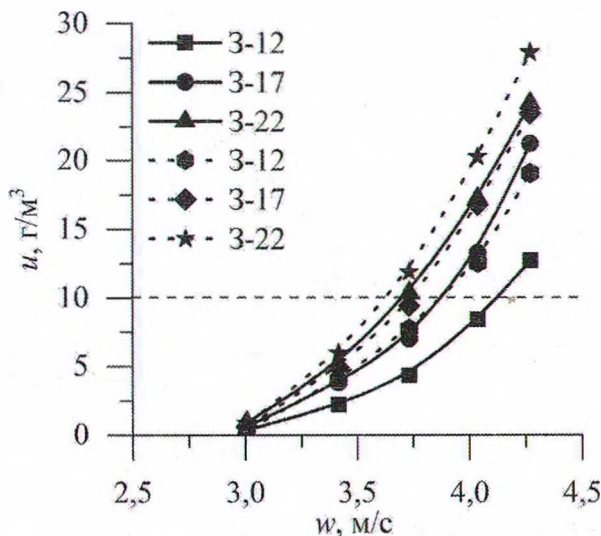


Рисунок 3 – Относительный брызгоунос жидкости при плотности орошения $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$

газа w , м/с, при плотности орошения $3,6 \cdot 10^{-3}$ м³/м²·с. Сплошной линией обозначена зависимость для блока с высотой зоны сепарации 500 мм, пунктирной – 400 мм.

Из рисунка 3 видно, что при изменении сепарационного пространства над сплошным блоком насадок с 500 до 400 мм величина относительного брызгоуноса возрастает.

В ходе проводимых исследований также измерялось гидравлическое сопротивление Δp , Па/м, орошаемого блока зигзагообразной регулярно-структурированной насадки, которое изменялось с увеличением фиктивной скорости газа в колонне. На рисунке 4 приведены зависимости для насадки 3-12.

Видно, что с увеличением фиктивной скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление резко возрастает. Ранее авторами данной работы уже были проведены исследования по изучению гидродинамики в массообменных аппаратах с зигзагообразной регулярно-структурированной насадкой [4, 6, 13], где четко описаны устойчивые гидродинамические режимы движения фаз.

Следующий этап работы заключается в проведении регрессионного анализа полученных экспериментальных данных. Для этого мы выбрали три параметра, которые изменялись в каждом опыте: u , w и Δp . Так как зависимости относительного брызгоуноса u , м³/м²·с, описываются степенной функцией, то эмпирическое уравнение регрессии примет вид [14–16]:

$$u = b_0 + b_1 \cdot w + b_2 \cdot w^2 + b_3 \cdot \Delta p^2, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – постоянные коэффициенты; w – фиктивная скорость газа в колонне, м/с; Δp – гидравлическое сопротивление сплошного блока насадок (с орошением), Па/м.

Далее, пользуясь методом наименьших квадратов, проведем оценку коэффициентов выражения (2). Для этого составим систему нормальных уравнений, количество строк которой равно числу опытов, а количество столбцов – числу неизвестных коэффициентов. Количество опытов, в которых изменялись параметры u , w и Δp ,

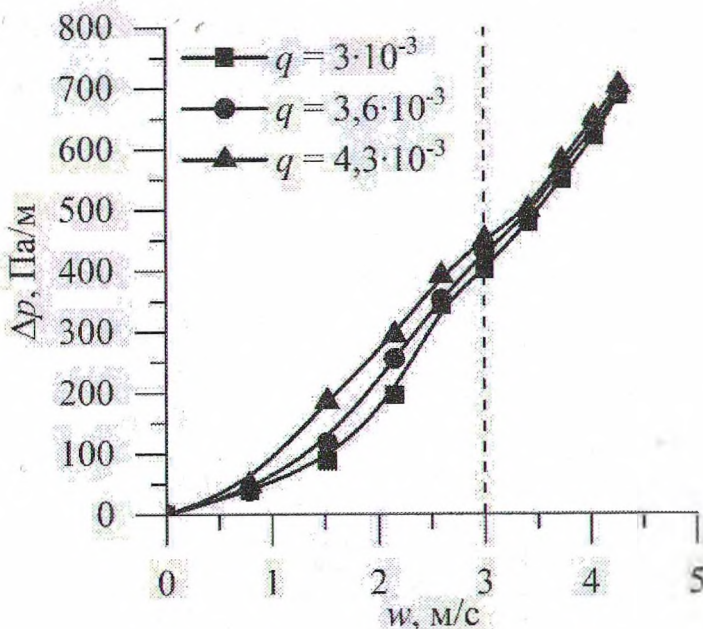


Рисунок 4 – Гидравлическое сопротивление орошаемого блока зигзагообразной регулярно-структурированной насадки 3-12 при трех плотностях орошения q , м³/м²·с

равно $N = 5$ [14-17]. Данные фиктивной скорости, относительного брызгоуноса и гидравлического сопротивления для определяемых коэффициентов брались при возникновении уноса капель жидкости из колонны, а именно при $w = 3 \text{ м/с}$.

$$\begin{cases} 5 \cdot b_0 + b_1 \cdot \sum w + b_2 \cdot \sum w^2 + b_3 \cdot \sum \Delta p^2 = \sum u \\ b_0 \cdot \sum w + b_1 \cdot \sum w^2 + b_2 \cdot \sum w^3 + b_3 \cdot \sum \Delta p^2 \cdot w = \sum u \cdot w \\ b_0 \cdot \sum w^2 + b_1 \cdot \sum w^3 + b_2 \cdot \sum w^4 + b_3 \cdot \sum \Delta p^2 \cdot w^2 = \sum u \cdot w^2 \\ b_0 \cdot \sum \Delta p^2 + b_1 \cdot \sum w \cdot \Delta p^2 + b_2 \cdot \sum w^2 \cdot \Delta p^2 + b_3 \cdot \sum \Delta p^4 = \sum u \cdot \Delta p^2 \end{cases} \quad (3)$$

Воспользуемся полученными коэффициентами и приведем уравнение для определения относительного брызгоуноса в колонне со сплошным блоком насадок 3-12 (рисунок 3) с сепарационным пространством 500 мм от гравитационного сепаратора:

$$u = 91,712 - 60,401 \cdot w + 10,665 \cdot w^2 - 3,312 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p^2. \quad (4)$$

Значения брызгоуноса, полученные по эмпирическим уравнениям, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Относительная погрешность определялась по формуле из источника [18] и не превысила одного процента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что брызгоунос снижается с уменьшением геометрических размеров каналов насадки. Повышение плотности орошения ведет к увеличению уноса. Рекомендуется работать на 80 % от максимально-фиктивной скорости для снижения выбросов в окружающую среду. Наиболее предпочтительный размер стороны ячеистого канала зигзагообразной регулярно-структурированной насадки, способствующий уменьшению количества уносимой жидкости из массообменного аппарата, равен 12 мм. Полученные эмпирические уравнения относительного брызгоуноса с высокой точностью описывают экспериментальную функцию. Погрешность не превысила одного процента. Результаты исследований могут быть использованы предприятиями химической и нефтехимической промышленности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Городилов, А. А. (2016), *Интенсификация процесса тепломассообмена в контактных аппаратах с регулярной насадкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08*. Москва, 142 с., доступен по: https://diss.muctr.ru/media/dissertations/2016/04/Диссертация_Городилов_А.А.pdf (по состоянию на 25 октября 2021).
2. Тхет, М. А. (2018), *Получение концентратов стабильных изотопов водорода и кислорода ректификацией воды в пленочном и затопленном режимах: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01*. Москва, 115 с., доступен по: https://diss.muctr.ru/media/dissertations/2018/09/Диссертация_-_Тхет_Мьюю_Аунг.pdf (по состоянию на 25 октября 2021).

REFERENCES

1. Gorodilov, A. A. (2016), *Intensification of the process of heat and mass transfer in contact devices with a regular packing: cand. diss.* [Intensifikacija processa teplomassoobmena v kontaktnyh apparatah s reguljarnoj nasadkoj: cand. diss.], Moscow, 142 p., available at: https://diss.muctr.ru/media/dissertations/2016/04/Dissertacija_Gorodilov_A.A.pdf (accessed 25 October 2021).
2. Thet, M. A. (2018), *Obtaining concentrates of stable isotopes of hydrogen and oxygen by distillation of water in film and flooded modes: cand. diss.* [Poluchenie koncentratov stabil'nyh izotopov vodoroda i kisloroda rektifikaciej vody v plenochnom i zatoplennom rezhimah: cand. diss.], Moscow, 115 p., available at: <https://diss.muctr.ru/media/dissertations/2018/09/>

3. Вайтехович, П. Е., Мытько, Д. Ю. (2020), Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов, *Труды БГТУ, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*, 2020, № 2, С. 44–49.
 4. Мытько, Д. Ю., Вайтехович, П. Е. (2020), Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов, *Вестник Полоцкого государственного университета, Строительство, Прикладные науки*, 2020, № 8, С. 33–38.
 5. Вайтехович, П. Е., Мытько, Д. Ю. (2021), Технико-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки, *Труды БГТУ, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*, 2021, № 1, С. 69–73.
 6. Мытько, Д. Ю., Вайтехович, П. Е. (2021), 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, 2021, С. 56–58.
 7. Бальчугов, А. В., Шевель, С. О., Бадеников, А. В. (2020), Применение метода наименьших квадратов для обработки результатов экспериментов по определению брызгоуноса в слое насадки, *Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации*, Пенза, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2020, С. 102–105.
 8. Рамм, В. М. (1976), *Абсорбция газов*, Москва, Химия, 656 с.
 9. Каган, А. М. (2013), *Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов: монография*, Казань, Отечество, 454 с.
 10. Лаптев, А. Г., Коначин, А. М., Минеев, Н. Г. (2007), *Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей*, Казань, Казан. гос. энерг. ун-т, 426 с.
- Dissertacija_-_Thet_M'jo_Aung.pdf (accessed 25 October 2021).
 3. Vajtehovich, P. E., Myt'ko, D. Ju. (2020), Comparative analysis of the effectiveness of regular packings for mass transfer apparatus [Srvnritel'nyj analiz jeffektivnosti reguljarnyh nasadok dlja massoobmennyh apparatov], *Trudy BGTU, Himicheskie tehnologii, biotehnologii, geojekologija – Proceedings of BSTU, Chemical technology, biotechnology, geoecology*, 2020, № 2, pp. 44–49.
 4. Myt'ko, D. Ju., Vajtehovich, P. E. (2020), Hydraulic resistance of regular packings of mass exchangers [Gidravlichesкое soprotivlenie reguljarnyh nasadok massobmennyh apparatov], *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta, Stroitel'stvo, Prikladnye nauki – Bulletin of Polotsk State University, Construction, Applied Sciences*, 2020, № 8, pp. 33–38.
 5. Vajtehovich, P. E., Myt'ko, D. Ju. (2021), Feasibility study and selection of the optimal packing [Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie i vybor optimal'noj nasadki], *Trudy BGTU, Himicheskie tehnologii, biotehnologii, geojekologija – Proceedings of BSTU, Chemical technology, biotechnology, geoecology*, 2021, № 1, pp. 69–73.
 6. Myt'ko, D. Ju., Vajtehovich, P. E. (2021), Hydrodynamics and Efficiency of Regularly Structured Zigzag Packs [Gidrodinamika i jeffektivnost' reguljarno-strukturirovannyh zigzagoobraznyh nasadok], *Chemical technology and equipment: materials 85-z scientific and technical. conf. prof-teach. composition, scientific. employees and graduate students (with international participation)*, Minsk, 2021, pp. 56–58.
 7. Bal'chugov, A. V., Shevel', S. O., Badenikov, A. V. (2020), Application of the least squares method for processing the results of experiments to determine the spray loss in the packing layer [Primenenie metoda naimen'shih kvadratov dlja obrabotki rezul'tatov jeksperimentov po opredeleniju bryzgounosa v sloe nasadki], *High*

11. Скобло, А. И., Молоканов, Ю. К., Владимиров, А. И., Щелкунов, В. А. (2000), *Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии*, Москва, ООО «НедраБизнесцентр», 677 с.
12. Лаптев, А. Г. (2007), *Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов*, Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 500 с.
13. Вайтехович, П. Е., Мытько, Д. Ю., Волк, А. М. (2021), Влияние геометрических параметров регулярной структурированной насадки на гидродинамику и массообмен, *Труды БГТУ, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*, 2021, № 2, С. 67–71.
14. Гухман, А. А. (1973), *Введение в теорию подобия*, Москва, Высшая школа, 296 с.
15. Красовский, Г. И., Филаретов, Г. Ф. (1982), *Планирование эксперимента*, Минск, Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 302 с.
16. Грачев, Ю. П., Плаксин, Ю. М. (2005), *Математические методы планирования экспериментов*, Москва, Делипринт, 296 с.
17. Вайтехович, П. Е., Францкевич, В. С. (2014), *Моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования*, Минск, БГТУ, 268 с.
18. Савчук, В. П. (2002), *Обработка результатов измерений*, Одесса, ОНПУ, 54 с.
8. Ramm, V. M. (1976), *Absorbicija gazov* [Gas absorption], Moscow, Himija Publ., 656 p.
9. Kagan, A. M. (2013), *Kontaktnye nasadki promyshlennyh teplomassoobmennyh apparatov: monografija* [Contact nozzles of industrial heat and mass transfer devices: monograph], Kazan, Otechestvo Publ., 454 p.
10. Laptev, A. G., Konahin, A. M., Mineev, N. G. (2007), *Teoreticheskie osnovy i raschet apparatov razdelenija gomogennyh smesej* [Theoretical foundations and calculation of apparatus for the separation of homogeneous mixtures], Kazan, Kazan. gos. jenerg. un-t Publ., 426 p.
11. Skoblo, A. I., Molokanov, Ju. K., Vladimirov, A. I., Shhelkunov, V. A. (2000), *Processy i apparaty neftegazopererabotki i neftehimii* [Processes and apparatuses for oil and gas processing and petrochemistry], Moscow, ООО «Недра-Бизнесцентр» Publ., 677 p.
12. Laptev, A. G. (2007), *Modeli pogranichnogo sloja i raschet teplomassoobmennyh processov* [Boundary layer models and calculation of heat and mass transfer processes], Kazan, Izd-vo Kazansk. un-ta Publ., 500 p.
13. Vajtehovich, P. E., Myt'ko, D. Ju., Volk, A. M. (2021), Influence of geometric parameters of a regular structured packing on hydrodynamics and mass transfer [Vlijanie geometricheskikh parametrov reguljarnoj strukturirovannoj nasadki na gidrodinamiku i massoobmen], *Trudy BGTU, Himicheskie tehnologii, biotehnologii, geojekologija – Proceedings of BSTU, Chemical technology, biotechnology, geoecology*, 2021, № 2, pp. 67–71.

14. Guhman, A. A. (1973), *Vvedenie v teoriju podobija* [Introduction to similarity theory], Moscow, Vysshaja shkola Publ., 296 p.
15. Krasovskij, G. I., Filaretov, G. F. (1982), *Planirovanie jeksperimenta* [Experiment planning], Minsk, Izd-vo BGU im. V. I. Lenina Publ., 302 p.
16. Grachev, Ju. P., Plaksin, Ju. M. (2005), *Matematicheskie metody planirovanija jeksperimentov* [Mathematical methods for planning experiments], Moscow, DeLiprint Publ., 296 p.
17. Vajtehovich, P. E., Franckevich, V. S. (2014), *Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov i oborudovanija* [Modeling and optimization of technological processes and equipment], Minsk, BGTU Publ., 68 p.
18. Savchuk, V. P. (2002), *Obrabotka rezul'tatov izmerenij* [Processing of measurement results], Odessa, ОНПУ Publ., 54 p.

Статья поступила в редакцию 12. 11. 2021 г.