

УДК 66.021.3

П. Е. Вайтехович, Д. Ю. Мытько

Белорусский государственный технологический университет

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛЯРНЫХ НАСАДОК
ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

В статье изложено краткое описание использования регулярных насадок, цели, для каких они предназначены и какими характеристиками должны обладать для достижения высоких показателей в области массопередачи. Дана классификация насадочных тел, представлены конструкции регулярной и нерегулярной насадок для массообменных аппаратов, описан принцип работы, а также охарактеризована зона контакта фаз, на которой происходит массообмен между жидкостью и газом, указаны преимущества каждой из них. Описана методика проведения экспериментальных исследований. Отмечено, что эффективность массопередачи определялась при десорбции двуокиси углерода из воды и насыщении воздуха парами воды. По результатам экспериментов рассчитана эффективность массопередачи по жидкой и газовой фазам. Построены зависимости эффективности от скорости газа при разных плотностях орошения. Проведен сравнительный анализ полученных значений эффективности по газу и жидкости для трех регулярных насадок и колец Рашига, сделан вывод о дальнейших перспективах разработки новых конструкций для повышения эффективности массопередачи в аппаратах колонного типа.

Ключевые слова: массообменный аппарат, абсорбция, регулярные насадки, эффективность массопередачи, скорость газа, плотность орошения, модельная среда.

P. Ye. Vaytsekhovich, D. Y. Mytsko

Belarusian State Technological University

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS
OF REGULAR ATTACHMENTS FOR MASS TRANSFER DEVICES**

The article provides a brief description of the use of regular nozzles, for what purposes they are intended and what characteristics they must have to achieve high indicators in the field of mass transfer. The classification of packing bodies is given, the designs of regular and irregular nozzles for mass transfer devices are presented, the principle of operation is described, and the phase contact zone where mass exchange occurs between liquid and gas is characterized, the advantages of each of them are indicated. The method of conducting experimental studies is described. It is noted that the efficiency of mass transfer was determined by desorption of carbon dioxide from water and saturation of air with water vapor. Based on the results of experiments, the efficiency of mass transfer in the liquid and gas phases is calculated. The dependences of efficiency on the gas velocity at different irrigation densities are constructed. A comparative analysis of the obtained efficiency values for gas and liquid for three regular nozzles and Raschig rings is made, and a conclusion is made about the future prospects of developing new designs to increase the efficiency of mass transfer in column-type devices.

Key words: mass transfer apparatus, absorption, regular nozzles, mass transfer efficiency, gas velocity, irrigation density, model medium.

Введение. В химической и нефтехимической промышленности используются колонные аппараты, оборудованные контактными устройствами различных типов и конструкций. Широкое распространение в промышленности в качестве абсорберов получили колонны, заполненные насадкой. Для обеспечения высокой эффективности массопередачи насадочное контактное устройство должно обладать большой удельной поверхностью и обеспечивать равномерное распределение газа и жидкости в поперечном сечении колонны с сохранением низкого гидравлического сопротивления.

Виды насадочных тел можно разделить на регулярные и нерегулярные. Регулярные на-

садки обладают рядом преимуществ по сравнению с нерегулярными. Они обеспечивают более равномерное распределение жидкости по сечению аппарата. Наличие каналов правильной формы способствует снижению гидравлического сопротивления в расчете на единицу высоты насадочного слоя и увеличению пропускной способности. Более развитая поверхность контакта фаз приводит к повышению эффективности массопередачи. Эти преимущества определяют широкомасштабное использование регулярных насадок в последние десятилетия [1].

Основная часть. В последнее время развернута активная работа по созданию новых

конструкций регулярных насадок [2], ведутся их многочисленные экспериментальные исследования в лабораторных условиях [3]. Отдельные виды таких насадок внедрены в производство [4].

Широкое применение регулярных насадок заключается в том, что все исследования проводятся при разных геометрических соотношениях как аппаратов, так и самих насадок. При этом эффективность массопередачи определяется как по жидкой, так и по газовой фазе, и при разных расходных характеристиках. Все это не дает возможности объективно сравнить разные виды регулярных насадок между собой и с нерегулярными в частности.

В этой связи цель данной работы заключалась в проведении сравнительных исследований нескольких регулярных насадок с традиционной нерегулярной.

В качестве объектов исследования были выбраны три варианта регулярных структурированных насадок (волнообразная, зигзагообразная, сотообразная с завихрителем) и одна нерегулярная – кольца Рашига (загруженные внавал).

Принцип действия волнообразной насадки (рис. 1, а) следующий: жидкость, поступающая в верхнюю часть аппарата, стекает по волнообразным каналам 1 вниз. Газ поднимается вверх, изменяя свое направление. В результате этого на насадке образуется пленочная область контакта фаз, на которой происходит массообмен между жидкостью и газом.

Такое конструктивное решение регулярной насадки позволяет повысить удельную поверхность взаимодействия жидкой и газовой фаз за счет движения контактных потоков по удлиненной волнообразной траектории и, как следствие, увеличить эффективность массопередачи.

Принцип действия зигзагообразной насадки (рис. 1, б) несколько иной. Равномерно распределенный по сечению корпуса аппарата 1 газ поступает в каналы, образованные concentрическими цилиндрами 2, вертикальными зигзагообразными лентами 3 и корпусом аппарата 1. Он поднимается вверх, взаимодействуя со стекающей по всей поверхности насадки и внутренней поверхности корпуса аппарата в виде пленки жидкостью, равномерно распределенной по сечению корпуса аппарата 1 [5].

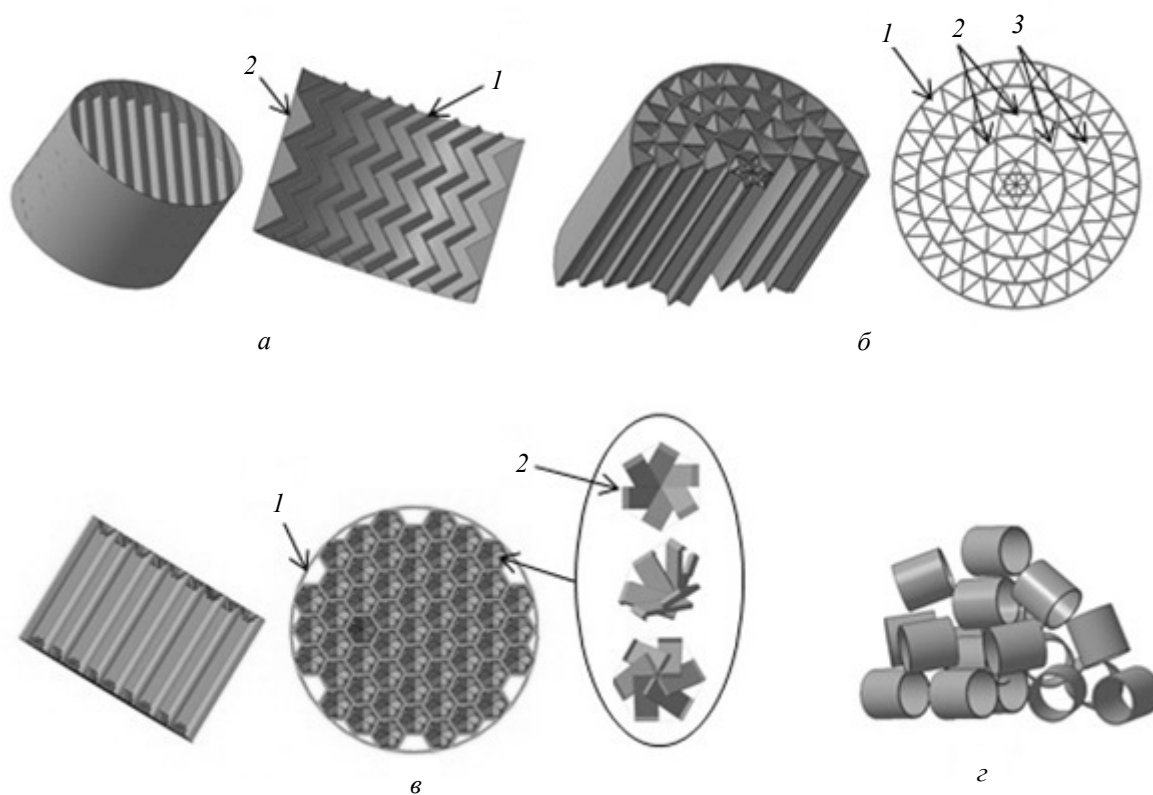


Рис. 1. Насадки для массообменных аппаратов:
 а – волнообразная: 1 – волнообразные каналы, 2 – корпус;
 б – зигзагообразная: 1 – корпус, 2 – цилиндры, 3 – зигзагообразные ленты;
 в – сотообразная (вид сверху): 1 – полые шестигранники, 2 – лепестки;
 г – кольца Рашига

Насадка (рис. 1, в) выполнена из полых шестигранников 1, собранных в сотообразный пакет. Шестигранники 1 сверху и снизу снабжены лепестками 2, которые отогнуты к их центру под острым углом. Между лепестками 2 образованы наклонные каналы для прохождения газа и жидкости.

Жидкость пленкой стекает по стенкам шестигранников. Газ, проходя через наклонные каналы между лепестками, изменяет свое направление и перемещается под углом к направлению движения жидкости. За счет этого жидкость хорошо турбулизуется, равномерно распределяется по стенкам шестигранников. В результате увеличиваются время и поверхность контакта газа с жидкостью. Взаимодействие фаз в закрученном потоке дает возможность значительно увеличить тангенциальную составляющую скорости газа в насадке, что способствует снижению уноса [6].

Кольца Рашига (рис. 1, г) относятся к нерегулярным насадкам кольцевого типа. Внешне это цилиндрические насадки с тонкими стенками. Их наружный диаметр чаще всего равен высоте и изменяется от 25 до 150 мм. Данная насадка обладает небольшим удельным весом, малым гидравлическим сопротивлением и хорошей способностью распределять жидкость [1].

При проведении лабораторных исследований по массопередаче всегда встает вопрос о модельной среде, включающей газовую и жидкую фазы. Компоненты этой среды должны быть доступными, неагрессивными и безвредными для исследователей. И, главное, результаты, полученные на таких средах, должны быть адекватными и применимыми для оценки работы промышленных массообменных аппаратов с реальными контактирующими веществами.

На протяжении длительного периода шел поиск таких сред. Например, некоторое время основной считалась аммиак-вода, что для лабораторных условий оказалось неприемлемым. Дискуссия по этому поводу оказалась закончилась в конце двадцатого столетия. Ее подробная оценка дана в работе [7]. В итоге в качестве модельных принято две среды: десорбция CO_2 из воды и насыщение воздуха парами воды. Для первой из них основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе, для второй – в газовой. Данные об эффективности массопередачи, полученные на других системах, укладываются в интервале между двумя указанными выше. В общем случае эффективность массопередачи как степень приближения к равновесию для десорбции двуокиси углерода считается определяющей по жидкой фазе – $E_{\text{ж}}$, а для насыщения воздуха парами воды по газовой – $E_{\text{г}}$.

Первая из них рассчитывается по формуле

$$E_{\text{ж}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}^*}, \quad (1)$$

где $x_{\text{н}}$, $x_{\text{к}}$, $x_{\text{к}}^*$ – начальная, конечная и вторая равновесная концентрация CO_2 в воде.

$$E_{\text{г}} = \frac{y_{\text{к}} - y_{\text{н}}}{y_{\text{к}}^* - y_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где $y_{\text{н}}$, $y_{\text{к}}$, $y_{\text{к}}^*$ – начальное, конечное и равновесное влагосодержание воздуха.

Поскольку содержание CO_2 в воздухе, поступающем в аппарат, близкое к нулю, – $y_{\text{н}} = 0$, то $x_{\text{к}}^* = 0$ и формула для $E_{\text{ж}}$ преобразуется к виду

$$E_{\text{ж}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}}}. \quad (3)$$

Оценка методов определения концентрации CO_2 в воде x и влагосодержание воздуха y проведена также в работе [7]. Первая из них определяется по рН водного раствора, а вторая – по относительной влажности воздуха. Причем связь между рН и концентрацией CO_2 в воде установлена автором [7] по результатам большого числа экспериментов и корреляционно-регрессионного анализа. В итоге этой работы получена эмпирическая формула:

$$x = 2,69 \cdot 10^{5-\text{pH}}. \quad (4)$$

Более того, с учетом (4) формула для расчета эффективности по жидкой фазе преобразуется к виду

$$E_{\text{ж}} = 1 - 10^{-\Delta\text{pH}}, \quad (5)$$

где $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{к}} - \text{pH}_{\text{н}}$.

Начальная и конечная кислотность водного раствора определялась с помощью рН-метра.

Для определения влагосодержания сначала с помощью психрометра, а затем более современного влагомера замерялась относительная влажность. По ней при фиксированной температуре с использованием диаграммы Рамзина осуществлялся переход к влагосодержанию y .

Описанная выше методика обработки экспериментальных данных апробирована в работе [7] и была успешно использована при выполнении нескольких диссертационных работ [8, 9] и отдельных научных работ, в том числе и при исследовании регулярной насадки [5].

Исследования по определению эффективности массопередачи всех четырех насадок проводились на установке и по методике, описан-

ной в [7, 9]. Идентичность геометрических параметров достигалась тем, что диаметр аппарата составлял 150 мм, высота всех регулярных насадок и колец Рашига – 100 мм. Во время экспериментов скорость газа на полное сечение аппарата изменялась в диапазоне 1,5–3,7 м/с, плотность орошения q составляла 10,8; 12,96; 15,48 м³/м²·ч.

Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей $E_{ж} = f(v)$ (рис. 2) и $E_{г} = f(v)$ (рис. 3). Анализируя зависимости эффективности массопередачи при десорбции CO₂ от скорости газа и расхода (плотности орошения) жидкости, можно сделать следующие выводы. Повышение эффективности просматривается на промежутке от 1,5 до 3,8 м/с. В диапазоне скоростей от 2 до 3 м/с наблюдается рост эффективности у волнообразной насадки. Это обусловлено тем, что жидкость задерживается в слое насадки и появляется режим подвисяния пленки. Данный тип насадки имеет широкий диапазон рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме, а также малую удерживающую способность. Одновременно нужно отметить, что при скорости газового потока от 3,0 до 3,7 м/с снижается эффектив-

ность массопередачи у всех насадок. На этом участке происходит запирание потока жидкостью и ее эмульгирование. При этом наступает инверсия фаз, где сплошной фазой становится жидкая, а газовая переходит в дисперсное состояние. Низкой эффективностью обладает сотообразная насадка, так как площадь свободного сечения ее невысока и жидкость с трудом проходит через каналы. С увеличением плотности орошения насадка быстро затопливается, тем самым она теряет возможность работать при высоких нагрузках как по газу, так и жидкости.

Сравнивая зависимость эффективности массопередачи при испарении жидкости от скорости газа и плотности орошения, можно сделать следующие выводы. Наилучшие показатели эффективности у зигзагообразной насадки и колец Рашига. Это связано с тем, что они обладают высокой пропускной способностью по газу и жидкости. В дополнение можно отметить, что жидкость поступает в колонну в виде тонких струек, образующиеся вихри подхватывают капли и уносят их из колонны. Наименьшей эффективностью при малых скоростях обладает сотообразная и волнообразная насадки.

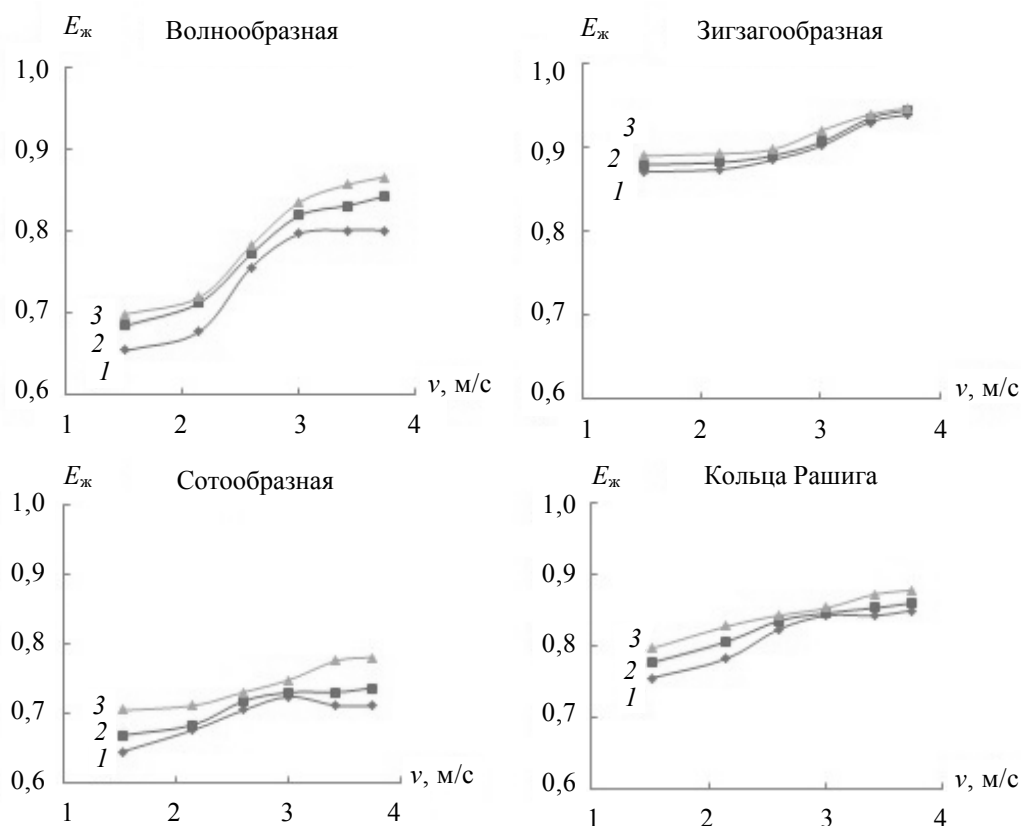


Рис. 2. Зависимости эффективности массопередачи в жидкой фазе от скорости газа v , м/с, при различных плотностях орошения q , м³/м²·ч: 1 – 10,8; 2 – 12,96; 3 – 15,48

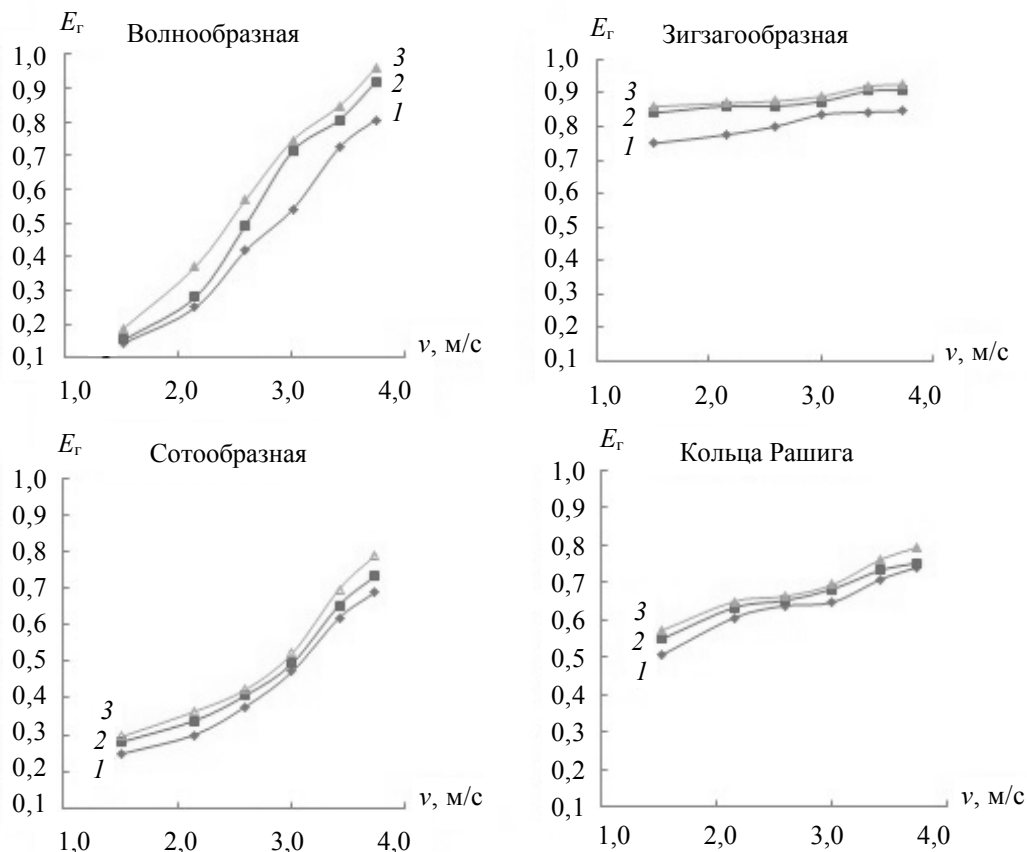


Рис. 3. Зависимости эффективности массопередачи в газовой фазе от скорости газа v , м/с, при различных плотностях орошения q , $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{ч}$:
1 – 10,8; 2 – 12,96; 3 – 15,48

Заключение. На всех графиках просматривается увеличение эффективности массопередачи как по жидкой, так и по газовой фазе с повышением скорости газа и плотности орошения.

Можно отметить, что во всем диапазоне скоростей у зигзагообразной насадки и колец

Рашига наблюдаются стабильные и высокие показатели эффективности как по жидкости, так и по газу. В дальнейшем планируется работа над оптимизацией конструкции более эффективной зигзагообразной регулярной насадки.

Список литературы

1. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов: монография / А. М. Каган; под ред. А. Г. Лаптева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
2. Бахшиян Д. Ц., Шумская Т. В. Эффективность применения насадок различных конструкций // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. № 11. С. 3–6.
3. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г. Эффективность конструкции структурированных насадок для процесса теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 8. С. 15–17.
4. Бомио П., Брой К. Опыт использования регулярных насадок в процессах абсорбции под высоким давлением // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 12. С. 1–7.
5. 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.
6. Насадка для теплообменных аппаратов: пат. ВУ 921608 / П. Е. Вайтехович, И. М. Плехов, Э. И. Левданский, В. В. Бабкин, Н. И. Киреев. Опубл. 23.04.1982. Ужгород.
7. Вайтехович П. Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 1982. 211 с.
8. Лютаревич И. А. Структура потоков и эффективность взаимодействия и разделения фаз в дисперсионно-пленочном аппарате роторного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 2008. 153 с.
9. Аль-Саэди М. Повышение эффективности массопередачи в аппаратах с клапанно-ситчатыми тарелками: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 2018. 163 с.

References

1. Kagan A. M., Laptev A. G., Pushnov A. S., Farakhov M. I. *Kontaktnyye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennykh apparatov* [Contact nozzles for industrial heat and mass transfer devices]. Ed. A. G. Lapteva. Kazan, Otechestvo Publ., 2013. 454 p.
2. Bakhshiyani D. Ts., Shumskaya T. V. Efficiency of application of attachments of various designs. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2000, no. 11, pp. 3–6 (In Russian).
3. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G. Effectiveness of the structure of structured attachments for the heat exchange process. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 8, pp. 15–17 (In Russian).
4. Bomio P., Broy K. Experience in the use of regular attachments in the processes of absorption under high pressure. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 12, pp. 1–7 (In Russian).
5. Misyulya D. I., Protasov S. K. Experimental studies of a regular nozzle for mass transfer devices. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], 2014, no. 3: Chemistri and Technologi of Inorganic Substances, pp. 117–120 (In Russian).
6. Vaytekovich P. E., Plekhov I. M., Levdansky E. I., Babkin V. V., Kireev N. I. *Nasadka dlya teplomassoobmennykh apparatov* [Nozzle for heat and mass transfer apparatus]. Patent BY, no 921608, 1982 (In Russian).
7. Vaytsekhovich P. Ye. *Razrabotka i issledovaniye vikhrevykh massoobmennykh apparatov. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development and research of vortex mass transfer devices. Cand. Diss]. Minsk, 1982. 211 p. (In Russian).
8. Lyutarevich I. A. *Struktura potokov i effektivnost' vzaimodeystviya i razdeleniya faz v dispersionno-plenochnom apparate rotornogo tipa. Dis. kand. tekhn. nauk* [Structure of flows and efficiency of interaction and separation of phases in a dispersion-film apparatus of the rotary type. Cand. Diss]. Minsk, 2008. 153 p. (In Russian).
9. Al-Saadi M. *Povysheniye effektivnosti massoperedachi v apparatakh s klapanno-sitchatymi tarelkami. Dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of mass transfer in the apparatus with the valve-perforated plates. Cand. Diss]. Minsk, 2018. 163 p. (In Russian).

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

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 Dzmitry Yurievich – 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

Поступила 10.04.2020