

УДК 66.021.3

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

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ НАСАДКИ

В статье рассмотрено перспективное направление для модернизации массообменных контактных устройств. Представлен коэффициент оценки экономической эффективности насадочных тел с использованием приведенных затрат на проведение процесса абсорбции i -го и эталонного контактного устройств. Дана методика для расчета удельных энергозатрат на стадии экспериментальных исследований при большой разнице в допустимых скоростях по газовой фазе. Описана связь между количественными и качественными параметрами процесса массопередачи, в качестве которого выступает его эффективность. Приведены данные по гидравлическому сопротивлению, эффективности массопередачи при десорбции диоксида углерода и насыщению газа парами воды. Получены графические зависимости удельных энергозатрат на проведение процесса извлечения абсорбата из абсорбента и насыщения газа парами воды. Выполнен сравнительный анализ регулярно-структурированных насадок по энергоэффективности. Для дальнейшего исследования выбрана зигзагообразная насадка.

Ключевые слова: регулярно-структурированная насадка, коэффициент экономической эффективности, удельные энергозатраты, гидравлическое сопротивление, эффективность массопередачи.

Для цитирования: Вайтехович П. Е., Мытько Д. Ю. Техничко-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 69–73.

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

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON AND SELECTION OF THE OPTIMAL NOZZLE

The article considers a promising direction for the modernization of mass-exchange contact devices. The coefficient for evaluating the economic efficiency of packing bodies using the reduced costs for the absorption process of the i -th and reference contact device is presented. A method is given for calculating the specific energy consumption at the stage of experimental studies with a large difference in the permissible speeds for the gas phase. The relationship between the quantitative and qualitative parameters of the mass transfer process, which is its efficiency, is described. Data on hydraulic resistance, mass transfer efficiency during carbon dioxide desorption and gas saturation with water vapor are presented. Graphical dependences of specific energy consumption for the process of extracting the absorbate from the absorbent and gas saturation with water vapor are obtained. A comparative analysis of regularly-structured nozzle for energy efficiency is performed. A zigzag nozzle was selected for further research.

Key words: regularly-structured nozzle, economic efficiency coefficient, specific energy consumption, hydraulic resistance, mass transfer efficiency.

For citation: Vaytsekhovich P. Ye., Mytsko D. Yu. Technical and economic comparison and selection of the optimal nozzle. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geology*, 2021, no. 1 (241), pp. 69–73 (In Russian).

Введение. Одним из перспективных направлений модернизации массообменных аппаратов является установка в них в качестве контактных устройств регулярных структурированных насадок [1]. Их эффективность и преимущества доказаны как на стадии экспериментальных исследований, так и при промышленном использовании [2, 3]. Подтверждено это и в работе [4] авторов данной статьи. В ней приведены

результаты исследований эффективности массопередачи эталонной насадки в виде колец Рашига и трех структурированных насадок. Эти исследования проводились в абсолютно одинаковых условиях при идентичных геометрических и технологических параметрах. И хотя эксперименты по эффективности показали преимущества одной из регулярных насадок, их нельзя считать вполне адекватными. Этот

вопрос можно объективно решить только при реализации технико-экономического сравнения, что использовалось ранее [5–7] и нашло продолжение в настоящее время [8].

Основная часть. Анализ указанных выше работ показал, что они в большей степени направлены на промышленную реализацию. В этой связи технико-экономическая оценка содержала определения всего спектра приведенных затрат, включающих эксплуатационные и капитальные [6]. Далее в качестве критерия оптимизации контактных устройств использовался коэффициент экономической эффективности:

$$E_3 = \pm \left(1 - \frac{\min \text{ПЗ}_i}{\min \text{ПЗ}_3} \right), \quad (1)$$

где ПЗ_i , ПЗ_3 – приведенные затраты на проведение процесса абсорбции соответственно i -го и эталонного контактного устройств, руб./т.

Знак «+» означает экономическую целесообразность применения i -го контактного устройства по сравнению с эталонным.

Под приведенными затратами понимается сумма затрат, приходящихся на единицу продукции. Например, для процесса абсорбции приведенные затраты

$$\text{ПЗ}_i = \mathcal{E}_3^c + \mathcal{E}_3^n + K_3, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_3^c – эксплуатационные затраты на подачу сырья, руб./т; \mathcal{E}_3^n – эксплуатационные затраты на подачу поглотителя, руб./т; K_3 – капитальные затраты, руб./т.

Такая методика может быть использована даже на стадии экспериментальных исследований, когда проводится сравнение контактных устройств с большой разницей в допустимых скоростях газовой фазы [7]. В результате этого существенно изменяется диаметр аппарата, а значит, металлоемкость и капитальные затраты.

В данной работе сравниваются различные виды насадок с небольшим интервалом по расходным характеристикам, в частности по скорости газовой фазы. Поэтому капитальные затраты будут оставаться неизменными. В приложении к экспериментальным исследованиям затраты на подачу поглотителя (воды) также незначительны. Все вышесказанное свидетельствует о возможности проводить технико-экономическое сравнение различных видов насадок только по затратам на подачу газа.

Таким образом, мы приходим к известному и широко используемому критерию, называемому удельными энергозатратами:

$$J = \frac{N}{Q}, \quad (3)$$

где N – мощность, затрачиваемая на подачу газа, Вт; Q – расход газа (производительность), м³/с.

Этот критерий связывает два основных количественных параметра, характеризующих работу машины (аппарата). Но на энергозатраты оказывает влияние и качественный параметр процесса массопередачи, которым является его эффективность. Это в определенной мере степень приближения к идеальному результату (к равновесию). Эффективность массопередачи $E \leq 1,0$ выражается в долях или процентах.

Мощность, затрачиваемая на перемещение сплошной среды (газа), $N = p \cdot Q$, где давление $p \geq \Delta p$, которое должно быть больше гидравлического сопротивления Δp . С учетом этого и эффективности массопередачи выражение (3) для удельных энергозатрат примет вид

$$J = \frac{\Delta p}{E}. \quad (4)$$

Причем, несмотря на сокращение параметра Q , единицу измерения удельных энергозатрат можно оставить в неизменном виде.

Данные по изменению эффективности массопередачи и гидравлического сопротивления (рис. 1–3) от скорости газа для различных видов насадок при одной (средней) плотности орошения $q = 0,0036 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ получены нами в предыдущей работе [4]. Они определялись на двух модельных средах: при десорбции CO_2 из воды и насыщении воздуха парами воды. Для первой из них основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе и оценивается эффективностью $E_{ж}$, а для второй – в газовой фазе с эффективностью $E_{г}$.

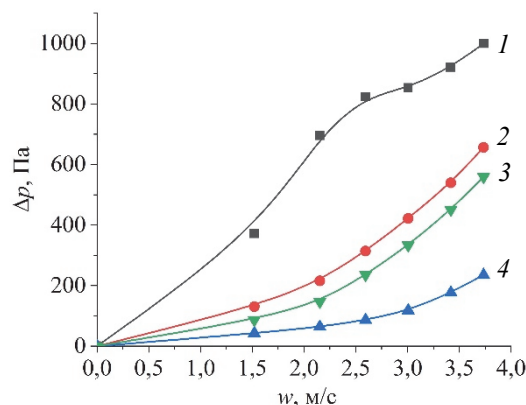


Рис. 1. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок:

1 – сотообразная; 2 – кольца Рашига; 3 – волнообразная; 4 – зигзагообразная

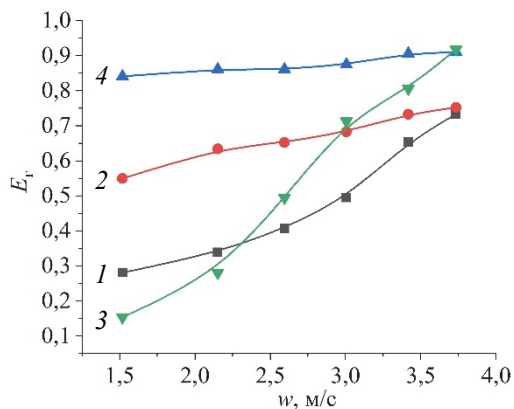


Рис. 2. Эффективность массопередачи в газе для регулярных насадок: 1 – сотообразная; 2 – кольца Рашига; 3 – волнообразная; 4 – зигзагообразная

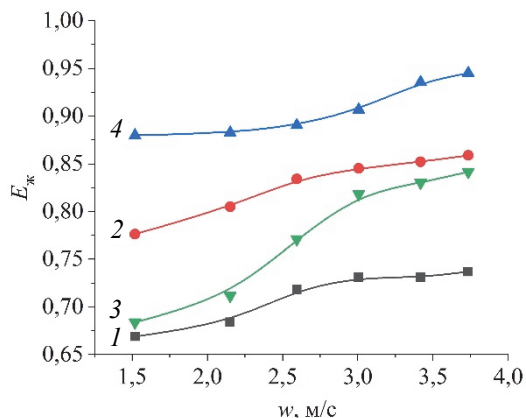


Рис. 3. Эффективность массопередачи в жидкости для регулярных насадок: 1 – сотообразная; 2 – кольца Рашига; 3 – волнообразная; 4 – зигзагообразная

Удельные энергозатраты рассчитывались по формуле (4) для обеих модельных систем, оцениваемых эффективностью массопередачи $E_{ж}$ и $E_{г}$. Их изменение от скорости газа показано на рис. 4, 5.

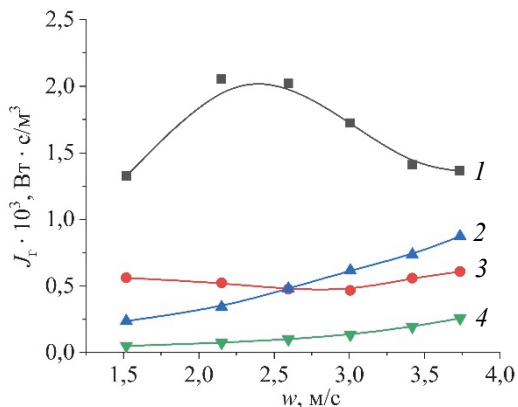


Рис. 4. Удельные энергозатраты регулярных насадок на десорбцию диоксида углерода: 1 – сотообразная; 2 – кольца Рашига; 3 – волнообразная; 4 – зигзагообразная

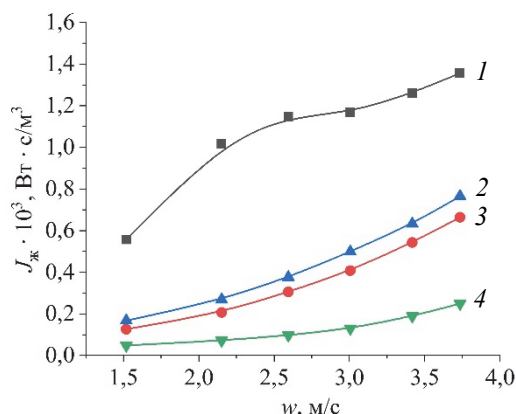


Рис. 5. Удельные энергозатраты регулярных насадок при насыщении газа парами воды: 1 – сотообразная; 2 – кольца Рашига; 3 – волнообразная; 4 – зигзагообразная

Из этих зависимостей видно, что удельные энергозатраты в основном постепенно возрастают с увеличением скорости газа. Это обусловлено, прежде всего, аналогичным изменением гидравлического сопротивления. Несколько выпадает из указанной закономерности изменение удельных энергозатрат для сотообразной насадки. Это связано с наличием в ней лопастей, препятствующих попаданию жидкости внутрь ячеек насадки и способствующих ее накоплению в виде слоя над лопастями. В результате нарушается устойчивый режим работы насадки и увеличивается унос жидкости и в целом повышаются удельные энергозатраты. В этой связи надо отметить, что указанная насадка требует конструктивной доработки.

Сравнение двух других регулярных насадок с эталонной показывает, что удельные энергозатраты у них ниже. Именно это предопределило широкое использование в производстве одной из них – волнообразной.

Вместе с тем наши исследования и расчеты показали, что зигзагообразная насадка имеет лучшие технико-экономические показатели по сравнению с волнообразной. Она характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением и более высокой эффективностью массопередачи на обеих модельных средах. Более того, все указанные параметры изменяются плавно без резких скачков во всем диапазоне изменения скоростей газа, что свидетельствует о стабильности режима работы зигзагообразной насадки.

Объяснение этому кроется в конструктивном исполнении двух сравниваемых насадок. В волнообразной насадке газ постоянно изменяет направление движения, что приводит к повышению гидравлического сопротивления. Кроме того, на гребешках волн, где скорость газа увеличивается, изменяется толщина пленки, происходит срыв капель, и канальная

инверсия фаз может наступить раньше, чем в общем по аппарату. В целом режим работы у этой насадки менее стабилен, о чем свидетельствует резкое изменение эффективности массопередачи в исследуемом интервале скоростей газа.

В противоположность в зигзагообразной насадке направление движения газа осевое, что гарантирует низкое гидравлическое сопротивление. Но он, как и жидкость, равномерно распределяется по многочисленным маленьким ячейкам, в результате чего увеличивается поверхность контакта фаз и, соответственно, эффективность массопередачи. Естественно, что все это способствует снижению удельных энергозатрат по сравнению с другими насадками.

Поскольку удельные энергозатраты рассчитывались для двух граничных систем, когда основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой или газовой фазе, то для всех других систем они должны иметь промежуточные значения.

Таким образом, технико-экономический расчет дал более объективную оценку по возможностям применения различных видов регулярных структурированных насадок. Оптимальным конструктивным исполнением является зигзагообразная насадка, которая будет принята для дальнейших исследований.

Заключение. В работе используется коэффициент оценки экономической эффективности как критерий для оптимизации контактных устройств. Определена методика для технико-экономического сравнения регулярных насадок. Основным показателем для анализа является критерий удельных энергозатрат на преодоление насадочного слоя относительно эффективности массопередачи десорбируемого газа и насыщения парами воды. Сделан вывод, что зигзагообразная насадка менее энергозатратна по сравнению с другими и является наиболее оптимальной конструкцией для дальнейших исследований.

Список литературы

1. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография / А. М. Каган [и др.]. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
2. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г. Эффективность конструкции структурированных насадок для процесса теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 8. С. 15–17.
3. Бомо П., Брой К. Опыт использования регулярных насадок в процессах абсорбции под высоким давлением // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 12. С. 1–7.
4. 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.
5. Лебедев Ю. Н. Технико-экономический анализ эффективности работы контактных устройств массообменных колонн: тезисы докл. Всесоюз. совещания по теории и практике ректификации нефтяных смесей. Уфа, 1975. С. 265–269.
6. Hoppe K., Köhler H., Weiner L., Müller J. Anwendungstechnische Aspekte von Hochgeschwindigkeits-gleichstromkolonne und Einschätzung der technischökonomischen Bewertung // Chemische Technik. 1980. № 4. S. 183–188.
7. Вайтехович П. Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 1982. 211 л.
8. Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Дударовская О. Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями: монография. СПб.: Страта, 2016. 214 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]. Kazan, Otechestvo Publ., 2013. 454 p.
2. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G. Effectiveness of the structure of structured attachments for the heat exchange process. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 8, pp. 15–17 (In Russian).
3. Bomio P., Broy K. Experience in the use of regular attachments in the processes of absorption under high pressure. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 12, pp. 1–7 (In Russian).
4. 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).
5. Lebedev Ju. N. Technical and economic analysis of the efficiency of the contact devices of mass transfer columns. *Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya po teorii i praktike rektifikatsii neftyanykh*

smesey [Abstracts of the all-Union conference on the theory and practice of rectification of oil mixtures.]. Ufa, 1975, pp. 265–269 (In Russian).

6. Hoppe K., Köhler H., Weiner L., Müller J. Anwendungstechnische Aspekte von Hochgeschwindigkeits-gleichstromkolonne und Einschätzung der technischökonomischen Bewertung. *Chemische Technik*, 1980, no. 4, ss. 183–188 (In German).

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.

8. Laptev A. G., Farakhov T. M., Dudarovskaya O. G. *Effektivnost' yavleniy perenosa v kanalakh s khaotichnymi nasadochnymi sloyami* [Efficiency of transport phenomena in channels with chaotic packing layers]. St. Petersburg, Strata Publ., 2016. 214 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

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 Dmitriy 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

Поступила 05.11.2020