

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 264-271. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 6. P. 264-271. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 66.021.3

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-264-271

РАСЧЕТ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОРОЗНОСТИ НАСАДКИ МАССООБМЕННОЙ КОЛОННЫ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ КОЛЬЦАМИ РАШИГА

Александр Борисович Голованчиков, Ольга Александровна Залипаева,
Николай Анатольевич Меренцов, Татьяна Николаевна Синенко,
Павел Павлович Залипаев

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Автор, ответственный за переписку

Ольга Александровна Залипаева, zalipaevaolga@yandex.ru

Аннотация. Предлагаются новые модифицированные кольца Рашига для массообменных насадочных колонных аппаратов, внутри которых для увеличения поверхности контакта фаз закреплены на стержнях или пружинках свернутые в виде рулонов со спиральными зазорами пластинчатые элементы. Получена формула связи порозности и удельной поверхности насадки через ее геометрические размеры, позволяющая теоретически определять один из этих параметров по известному другому. Приведен пример расчета удельной поверхности по полученной формуле для стандартного кольца Рашига. Показано, что результаты расчета совпадают со справочными табличными значениями. Использование полученной формулы в технологических расчетах массообменных колонн позволяет теоретически определять исходные параметры — порозность или удельную поверхность насадки, не используя справочные и экспериментальные данные. Аналитически выведена формула для определения удельной поверхности предлагаемой модифицированной насадки. Рассмотрена упорядоченная укладка этой насадки на опорные решетки массообменного колонного аппарата, при этом спиральный элемент модифицированной насадки имеет три витка с равномерным спиральным зазором и выполнен из тонкой пластины. Приведен пример расчета удельной поверхности предлагаемого модифицированного кольца Рашига при рассматриваемой укладке насадки в колонном аппарате. По предложенной формуле связи рассчитана порозность модифицированной насадки. Произведен сравнительный анализ порозности и удельной поверхности предлагаемого модифицированного кольца Рашига с установленной внутри него пластиной, свернутой в спираль, и стандартного кольца Рашига. Показано увеличение удельной поверхности насадочных тел в модифицированной насадке в 1,5 и более раз, с 65 до 102,7 м²/м³, при некотором снижении порозности с 0,6 до 0,55 м³/м³, что уменьшает расчетное значение высоты слоя насадки в массообменном колонном аппарате, и, соответственно, высоту и объем самого аппарата. Использование новых модифицированных колец Рашига позволяет значительно снизить общий объем насадки в насадочных колоннах при проведении процессов экстракции, абсорбции, десорбции и ректификации.

Ключевые слова

насадка, массообменная колонна; кольца Рашига; модифицированная насадка; порозность; удельная поверхность; пластинчатые элементы; свернутые в спираль

Для цитирования

Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Меренцов Н.А., Синенко Т.Н., Залипаев П.П. Расчет удельной поверхности и порозности насадки массообменной колонны с модифицированными кольцами Рашига // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, No 6. С. 264-271. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-264-271>.

© Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Меренцов Н.А., Синенко Т.Н., Залипаев П.П., 2023

Original article

CALCULATION OF SPECIFIC SURFACE AREA AND POROSITY OF PACKING OF MASS-EXCHANGE COLUMN WITH MODIFIED RASHIG RINGS

Aleksandr B. Golovanchikov, Olga A. Zalipaeva, Nikolay A. Merentsov,
Tatiana N. Sinenko, Pavel P. Zalipaev

Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

Corresponding author

Olga A. Zalipaeva, zalipaevaolga@yandex.ru

Abstract. New modified Rashig rings are proposed for mass transfer packing columns. Inside these rings, plate elements are attached to rods or springs in the form of rolled spirals with spiral gaps to increase the contact surface area of the phases. A formula linking the porosity and specific surface area of the packing through its geometric dimensions is obtained, allowing for the theoretical determination of one of these parameters based on the known value of the other. An example calculation of specific surface area using the derived formula for a standard Rashig ring is provided. It is demonstrated that the calculation results coincide with reference tabular values. The use of the derived formula in technological calculations of mass transfer columns allows for the theoretical determination of initial parameters (porosity or specific surface area of the packing) without the need for reference or experimental data. An analytical formula for determining the specific surface area of the proposed modified packing is derived. The ordered arrangement of this packing on the support grids of the mass transfer column apparatus is considered, with the spiral element of the modified packing having three turns with uniform spiral gap and made of thin plates. An example calculation of the specific surface area of the proposed modified Rashig ring is given for the considered packing arrangement in the column apparatus. The porosity of the modified packing is calculated using the proposed formula. A comparative analysis of the porosity and specific surface area of the proposed modified Rashig ring with a plate rolled in a spiral inside it and the standard Rashig ring is performed. The results show an increase in specific surface area of the packing in the modified ring by 1.5 times or more, from 65 to 102.7 m²/m³, with a slight decrease in porosity from 0.6 to 0.55 m³/m³. This reduces the calculated height of the packing layer in the mass transfer column apparatus and, consequently, the height and volume of the apparatus itself. The use of the new modified Rashig rings allows for a significant reduction in the total volume of packing in packing columns during extraction, absorption, desorption, and rectification processes.

Keywords

packing; mass exchange column; Rashig rings; modified packing; porosity; specific surface area; plate elements coiled into a spiral

For citation

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Merentsov N.A., Sinenko T.N., Zalipaev P.P. Raschet udel'noj poverhnosti i poroznosti nasadki massoobmennoj kolonny s modifitsirovannymi kol'cami Rashiga // [Calculation of specific surface area and porosity of packing of mass-exchange column with modified Rashig rings] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 6. pp. 264-271. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-264-271>.

Введение

В химических, нефтехимических и газоперерабатывающих производствах широко используются массообменные колонные аппараты. Такое оборудование применяется для первичной перегонки подготовленной в электрообезживающих и обессоливающих установках нефти в процессах ректификации. В абсорберах природный газ очищают от попут-

ных газов и от других примесей. В экстракционных колонных аппаратах разделяют жидкие нефтепродукты при помощи растворителей.

Все многообразие промышленных тепло- и массообменных процессов осуществляется, в основном, в колонных аппаратах, делящихся на два класса: насадочные и тарельчатые. Но если процессы ректификации, абсорбции, десорбции широко используют насадочные ко-

лонны [1-7], то насадочные колонны для экстракционных процессов находят ограниченное применение из-за малой эффективности разделения [8]. Для них используют методы и устройства, способные интенсифицировать процессы тепло- и массопереноса: вибрацию, пульсацию, центробежные силы, контактные узлы и детали со встроенными элементами, препятствующими слиянию капель дисперсной фазы, использующих кавитационный эффект дробления капель и эффект резонанса [3, 9-12].

В работе [13] описаны различные специальные конструкции насадок для вибрационных экстракционных колонн, позволяющие увеличить коэффициент массопередачи максимально в 13 раз, а наложение низкочастотных колебаний может дать значительный прирост для коэффициента теплоотдачи [14]. Однако все эти дополнительные специальные технологические эффекты увеличивают затраты энергии, а конструктивные изыски узлов и деталей усложняют эксплуатацию и увеличивают стоимость самих аппаратов.

Аналитический вывод формул для модифицированной насадки

Предлагается модифицированная конструкция колец Рашига, увеличивающая удельную поверхность каждого элемента в 1,5

и более раз, с выводами уравнений для определения порозности и удельной поверхности этой конструкции насадок.

Эскиз в продольном разрезе предлагаемой модифицированной конструкции типового кольца Рашига представлен на рисунке 1.

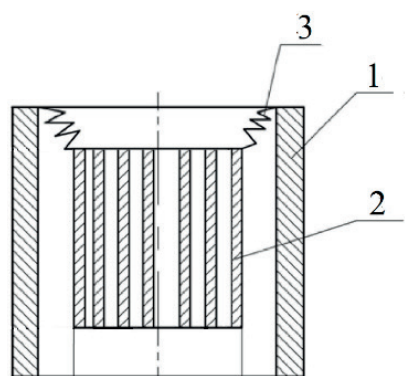
За основу в предлагаемой модифицированной конструкции насадки взяты кольцо Рашига [15] и насадка, выполненная в виде спирали [4], причем последняя установлена внутри типового кольца Рашига, а зазор между витками спирали определяется выражением:

$$\Delta = (0,07 \div 0,12) d_0,$$

где Δ — зазор между витками спирали, d_0 — начальный диаметр внешнего витка спирали.

Такая свободная укладка спирали внутри кольца Рашига возможна при упорядоченной укладке элементов насадки в ряды. При неупорядоченной, хаотичной укладке внутренних спиральный элемент должен быть закреплен с основным кольцом Рашига или подвешен на пружинках растяжения [16-18].

Надо иметь в виду, что при свободной укладке спиральный элемент может иметь высоту, равную высоте основного кольца Рашига, а при хаотичной укладке в навал высота спирального элемента h должна быть меньше высоты основного кольца Рашига H , например $h = 0,9 \cdot H$.

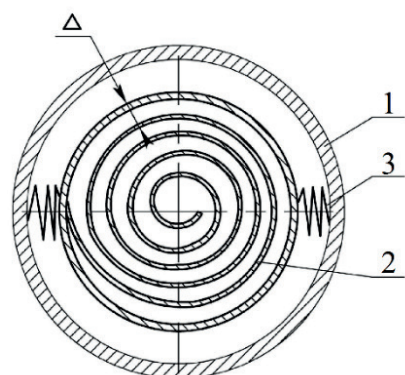


1) основное кольцо Рашига; 2) внутреннее кольцо или закрученная по спирали пластина; 3) пружина

1) Raschig's main ring; 2) an inner ring or a spirally twisted plate; 3) spring

Рисунок 1. Эскиз разреза модифицированного кольца Рашига с установленной внутри него пластиной, свернутой в спираль [18]

Figure 1. Sketch of section of modified Raschig ring with plate installed inside it, coiled into spiral [18]



1) основное кольцо Рашига; 2) внутреннее кольцо или закрученная по спирали пластина; 3) пружина

1) Raschig's main ring; 2) an inner ring or a spirally twisted plate; 3) spring

Рисунок 2. Вид сверху в разрезе на модифицированное кольцо Рашига

Figure 2. Top section view of the modified Raschig ring

Это связано с тем, что при свободной укладке часть основных колец оказывается внутри смежных элементов и могут их деформировать, так как спиральный элемент, не несущий механической нагрузки, может быть выполнен из тонкого листового материала и его толщина

$$\delta_1 \ll \delta,$$

где δ — толщина материала основного кольца Рашига.

Свяжем между собой геометрические размеры одного кольца Рашига с технологическими параметрами: порозностью ε и удельной поверхностью σ . Обычно в таблицах справочников задаются наружным диаметром кольца Рашига D , высотой H , равной диаметру D , и толщиной стенки δ в виде триады, например $100 \times 100 \times 14$. А также задают порозность $\varepsilon = 0,6$ и удельную поверхность $\sigma = 65 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

По геометрическому смыслу порозность — это доля внутреннего и внешнего свободного объема, приходящегося на одно кольцо, отнесенная к общему объему насадки, приходящемуся на одно кольцо:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V}, \quad (1)$$

где $V_c = V_v + V_n$; V_c — внутренний свободный объем; V_n — наружный свободный объем, образованный зазорами между внешними поверхностями колец, установленных упорядоченно в ряды или засыпаны в навал.

Внутренний свободный объем находится исходя из основных геометрических размеров кольца Рашига:

$$V_c = \frac{\pi D^2}{4} [1 - (2\delta/D)]^2 H.$$

Тогда общий объем насадки, отнесенный к одному кольцу:

$$V = V_n + \frac{\pi D^2}{4} H.$$

Удельная поверхность — это отношение боковых и торцевых поверхностей одного кольца, отнесенная к общему объему:

$$\sigma = \frac{f}{V}, \quad (2)$$

$$f = [\pi DH + \pi H(D - 2\delta)] + 2 \left[\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D - 2\delta)^2}{4} \right]. \quad (3)$$

Первое слагаемое в квадратных скобках — это площадь боковых поверхностей кольца, а

второе — площади двух торцевых поверхностей.

Так как:

$$V = V_c + V_m, \quad (4)$$

где V_m — объем материала одного кольца, то

$$V_m = \left[\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D - 2\delta)^2}{4} \right] H,$$

или после упрощения:

$$V_m = \frac{\pi D^2}{4} H \left[1 - \left(1 - \frac{2\delta}{D} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Тогда с учетом формул (1) и (4):

$$V_m = V(1 - \varepsilon). \quad (6)$$

Из уравнения (4) $V_c = V - V_m$.

Разделим левые и правые части уравнений (2) и (1) друг на друга:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{f}{V_c},$$

или с учетом уравнения (4):

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{f}{V - V_m}. \quad (7)$$

Выразим общий объем V , занимаемый одним кольцом в насадке, через объем материала из уравнения (6):

$$V = \frac{V_m}{(1 - \varepsilon)}. \quad (8)$$

Подставив его в уравнение (7), получим:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{f(1 - \varepsilon)}{V_m \varepsilon},$$

то есть:

$$\frac{\sigma}{(1 - \varepsilon)} = \frac{f}{V_m}. \quad (9)$$

При $H=D$ уравнение (9), с учетом формул (3) и (5), после алгебраических преобразований приобретает простой вид:

$$\frac{\sigma}{(1 - \varepsilon)} = \left[\frac{2(1 + \delta/D)}{\delta/D} \right] / D. \quad (10)$$

Порозность для одного кольца Рашига сложно найти экспериментально.

Так, для стандартного кольца Рашига $100 \times 100 \times 14$ порозность $\varepsilon = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Тогда по формуле (10) можно теоретически рассчитать удельную поверхность:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2(1 - \varepsilon)(1 + \delta/D)}{\delta} = \\ &= \frac{2 \cdot 0,4(1 + 0,14)}{14 \cdot 10^{-3}} = 65,14 \text{ м}^2/\text{м}^3, \end{aligned}$$

что практически совпадает с табличным значением $\sigma_T = 65 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

При установке внутри основного кольца Рашига пластины, свернутой в спираль, толщиной δ_1 , высотой H_1 и длиной L_1 ее объем составит:

$$V_1 = H_1 \cdot L_1 \cdot \delta_1. \quad (11)$$

Соответственно на эту величину уменьшится свободный объем:

$$V_{c1} = V_c - V_1. \quad (12)$$

Тогда порозность, как доля свободного объема, приходящегося на одно модифицированное кольцо Рашига с внутренней пластиной, свернутой в спираль с зазорами между боковыми стенками (рисунок 1), составит:

$$\varepsilon_1 = V_{c1} / V, \quad (13)$$

или с учетом формул (1) и (13):

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - V_1 / V. \quad (14)$$

Подставляя в уравнение (14) значение общего объема V из уравнения (8) с учетом формулы (11), получаем уравнение для расчета порозности модифицированной насадки:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - \frac{(H_1 \cdot L_1 \cdot \delta_1) \cdot \frac{\pi D^2}{4} [1 - (1 - 2\delta/D)^2]}{4}. \quad (15)$$

Поверхность модифицированной насадки складывается из поверхностей самого кольца f , определяемой формулой (3), плюс двух площадей поверхности пластины, свернутой в спираль и установленной внутри основного кольца с зазорами Δ между витками:

$$f_1 = f + 2H_1 L_1,$$

где H_1 и L_1 — соответственно высота и длина пластины, свернутой в спираль внутри кольца (рисунок 2).

При упорядоченной установке колец на опорную решетку спираль не воспринимает механических усилий, поэтому она может быть выполнена из тонкой пластины.

Удельная поверхность модифицированного кольца

$$\sigma_1 = \frac{f + 2H_1 \cdot L_1}{V},$$

или с учетом формулы (2)

$$\sigma_1 = \sigma + 2H_1 \cdot L_1 / V, \quad (16)$$

где второе слагаемое характеризует прирост удельной поверхности модифицированной насадки, а общий объем, занимаемый в насадке одним кольцом V , рассчитывается по формулам (5) и (8).

Определим длину L_1 пластины, которая свернута в спираль с зазором Δ между вит-

ками и устанавливается внутри основного кольца Рашига (рисунок 2).

Полагаем в начальной координате угол $\varphi = 0$, а радиус спирали $r = Ro$.

При скручивании одного витка $\varphi = 2\pi$ и $r = r_1$.

Так как $Ro - r_1 = \Delta$, то градиент радиуса r :

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{\Delta}{2\pi},$$

и для произвольного радиуса витка:

$$r = Ro - \frac{\Delta}{2\pi} \varphi. \quad (17)$$

Длина элемента длины дуги:

$$dl = r d\varphi.$$

Тогда после определенного интегрирования левых и правых частей этого дифференциального уравнения получаем с учетом (17):

$$L_1 = \int_0^{2\pi} \left[Ro - \frac{\Delta}{2\pi} \varphi \right] d\varphi,$$

или

$$L_1 = Ro \varphi - \frac{\Delta \cdot \varphi^2}{2\pi \cdot 2}.$$

Угол φ связан с числом витков Z формулой (Z может быть дробным):

$$\varphi = 2\pi Z.$$

В этом случае:

$$L_1 = 2\pi Z \left(Ro - \frac{\Delta \cdot Z}{2} \right).$$

Так как

$$Ro = (D - 2\delta) / 2 - \Delta,$$

то есть свободный наружный край пластины, свернутой в спираль, отстоит от внутренней поверхности на величину зазора Δ , то:

$$L_1 = 2\pi Z \left[(D/2 - \delta) - \Delta \left(1 + \frac{Z}{2} \right) \right]. \quad (18)$$

Необходимо связать число витков спирали Z с величиной межвиткового зазора Δ .

Как видно из рисунка 2, число межвитковых зазоров на 1 больше числа витков спирали, то есть:

$$\Delta = \left(\frac{D - 2\delta}{2} \right) / (Z + 1). \quad (19)$$

Тогда формула (18) упрощается до вида:

$$L_1 = \pi \cdot \Delta \cdot Z^2. \quad (20)$$

Для рассматриваемого кольца $100 \times 100 \times 14$ при числе витков $Z=3$ (рисунок 2) согласно (19) $\Delta \approx 7$ мм, а длина согласно (20):

$$L_1 = 3,14 \cdot 9 \cdot 7 = 198 \text{ мм}.$$

Объем насадки, занимаемый одним кольцом $100 \times 100 \times 14$, рассчитывается по формулам (5) и (8):

$$V_m = 3,78 \cdot 10^5 \text{ мм}^3,$$

$$V = \frac{V_m}{1 - \varepsilon} = 9,45 \cdot 10^5 \text{ мм}^3 = 9,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Тогда удельная поверхность модифицированного кольца Рашига составит с учетом уравнения (15) при $H_1 = 0,9 \cdot H$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 65 + \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 0,1 \cdot 0,198}{9,45 \cdot 10^{-4}} = \\ &= 65 + \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 198}{9,45} = 102,7 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

Таким образом удельная поверхность модифицированной насадки $100 \times 100 \times 14$ увеличивается в 1,5 и более раз, а порозность снижается согласно формуле (14).

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев В.С., Сидоров С.И. Современные насадочные колонны: особенности конструктивного оформления // Химическая промышленность. 2005. Т. 82. № 7. С. 347-356.
2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т., 2006. 342 с.
3. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. Пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. М.: Техносфера, 2007. 655 с.
4. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн / Под ред. Д.А. Баранова. М.: Галилея-принт, 2009. 358 с.
5. Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в регулярных насадках // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 3 (89). С. 45-51.
6. Golovanchikov A.B., Shagarova A.A., Vasil'ev P.S., Cherikova K.V. Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 53. Issue 11–12. P. 759-764.
7. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Показатели энергоэффективности работы массообменных колонн с хаотичными насадками // Химическая промышленность сегодня. 2018. № 1. С. 33-77.
8. Тимонин А.С. [и др.]. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств: учебник / 2-е изд. перераб. испр. и доп. Вологда: Инфа-Инженерия, 2022. 948 с.
9. Перри Дж.Г. Справочник инженера-химика. Т. 1. / Пер. с 4 англ. изд. Под общ. ред. Н.М. Жаворонкова и П.Г. Романкова. Ленинград: Химия. 1969. 639 с.
10. Кузнецов Г.И., Пушкин А.А., Косоголов А.В. Центробежные экстракторы ЦЕНТРЕК. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000. 213 с.
11. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 208 с.

При толщине спирали $\delta_1 = 1 \text{ мм}$

$$\varepsilon_1 = 0,6 - \frac{f_1 \delta_1}{V} = 0,6 - \frac{0,9 \cdot 100 \cdot 198 \cdot 1}{3,78 \cdot 10^5} = 0,55 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Выводы

Переход от стандартных керамических колец Рашига $100 \times 100 \times 14$ с удельной поверхностью $\sigma = 65 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и порозностью $\varepsilon = 0,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$ к предлагаемой модифицированной насадке, внутри которой установлена спиральная пластина, значительно увеличивает удельную поверхность насадки, в 1,5 и более раз, а порозность снижается до $\varepsilon_m = 0,55 \text{ м}^3/\text{м}^3$, то есть уменьшается на 8,3 %. В связи с этим высота модифицированной насадки в колонне существенно снижается, а диаметр колонны незначительно возрастает.

12. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
13. Городецкий И.Я., Васин А.А., Олевский В.М., Луганов П.А. Вибрационные массообменные аппараты / Под ред. В.М. Олевского. М.: Химия, 1980. 190 с.
14. Варсанович В.Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия, 1985. 240 с.
15. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химических технологий / Изд. 10-е, перераб. и доп. Ленинград: Химия, 1970. 624 с.
16. Пат. 212214 РФ, МПК В01J 19/30. Насадка для теплообменных аппаратов / О.А. Залипаева, А.Б. Голованчиков, В.М. Яшук, Т.Н. Синенко, К.В. Черикова, П.П. Залипаев. 2022104647, Заявлено 22.02.2022; Опубл. 12.07.2022.
17. Пат. 196444 РФ, МПК В01J 19/30. Насадка для тепло- и массообменных процессов / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, К.В. Черикова, Н.В. Шибитова, О.А. Залипаева, Р.С. Кочарян. Заявлено 16.01.2022; Опубл. 28.02.2022.
18. Пат. 198655 РФ, МПК В01J 19/30. Насадка для тепло- и массообменных процессов / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, О.А. Залипаева, Н.В. Шибитова, Д.О. Смольская. Заявлено 23.04.2020; Опубл. 21.07.2020.

REFERENCES

1. Leontiev V.S., Sidorov S.I. Sovremennye nasadochnye kolonny: osobennosti konstruktivnogo oformleniya [Modern Packed Columns: Features of Structural Design]. *Himicheskaya promyshlennost' — Chemical industry*, 2005, Vol. 82, No. 7, pp. 347-356. [in Russian].
2. Laptev A.G., Farakhov M.I. *Razdelenie geterogennykh sistem v nasadochnykh apparatah* [Separation of Heterogeneous Systems in Packing Apparatuses]. Kazan: Kazan State Energy University Publ., 2006. 342 p. [in Russian].

3. Ignatovich E. *Himicheskaya tekhnika. Processy i apparaty* [Chemical technology. Processes and apparatuses]. Translation from German by L.N. Kazantseva. Moscow, Technosphere Publ., 2007. 655 p. [in Russian].
4. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranov D.A. *Nasadki massoobmennyykh kolonn*. [Packing of mass-exchange columns]. Ed. by D.A. Baranova. Moscow, Galilee Print Publ., 2009. 358 p. [in Russian].
5. Gorodilov A.A., Pushnov A.S., Berengarten M.G. *Metody intensivatsii processov teplo- i massoobmena v regulirnykh nasadkakh* [Methods of Intensification of Heat and Mass Exchange Processes in Regular Nozzles]. *Energobezrezhenie i vodoropodgotovka — Energy Saving and Water Treatment*, 2014, No. 3 (89), pp. 45-51. [in Russian].
6. Golovanchikov A.B., Shagarova A.A., Vasil'ev P.S., Cherikova K.V. Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 53, Issue 11–12, pp. 759-764.
7. Laptev A.G., Basharov M.M. Pokazateli energoeffektivnosti raboty massoobmennyykh kolonn s haotichnymi nasadkami [Energy Efficiency Indicators of Mass Exchange Columns with Chaotic Nozzles]. *Himicheskaya promyshlennost' segodnya — Chemical Industry Today*, 2018, No. 1, pp. 33-77. [in Russian].
8. Timonin A.S. [et al.]. *Oborudovanie neftegazopererabotki, himicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv: uchebnyk* [Oil and Gas Processing, Chemical and Petrochemical Production Equipment: Textbook] 2nd Edition Revised, Enlarged. Volgda, InfA-Engineering Publ., 2022. 948 p. [in Russian].
9. Perry J.G. *Spravochnik inzhenera-himika T. 1*. [Chemical Engineer's Handbook. Vol. 1]. Translation from 4 English. Ed. by N.M. Zhavoronkova and P.G. Romankova. Leningrad, Chemistry Publ., 1969. 639 p. [in Russian].
10. Kuznetsov G.I., Pushkov A.A., Kosogorov A.V. *Centrobezhnye ekstraktory CENTREK*. [Centrifugal Extractors CENTREK]. Moscow, RKHTU named after D.I. Mendeleev Publ., 2000. 213 p. [in Russian].
11. Kardashev G.A. *Fizicheskie metody intensivatsii processov himicheskoy tekhnologii* [Physical Methods of Intensification of Chemical Technology Processes]. Moscow, Chemistry Publ., 1990. 208 p. [in Russian].
12. Novitsky B.G. *Primenenie akusticheskikh kolebaniy v himiko-tekhnologicheskikh procesakh* [Application of acoustic oscillations in chemical processes]. Moscow, Chemistry Publ., 1983. 192 p. [in Russian].
13. Gorodetsky I.Ya., Vasin A.A., Olevsky V.M., Luganov P.A. *Vibratsionnye massoobmennyye apparaty* [Vibration Mass Exchangers]. Ed. by V.M. Olevsky. Moscow, Chemistry Publ., 1980. 190 p. [in Russian].
14. Varsanofiev V.D., Kolman-Ivanov E.E. *Vibratsionnaya tekhnika v himicheskoy promyshlennosti* [Vibration Technology in the Chemical Industry]. Moscow, Himiya Publ., 1985. 240 p. [in Russian].
15. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskikh tekhnologiy* [Examples and tasks on the course of processes and apparatus of chemical technologies] Ed. 10nd, Revised and Enlarged. Leningrad, Himiya Publ., 1970. 624 p. [in Russian].
16. Zalipaeva O.A., Golovanchikov A.B., Yashchuk V.M., Sinenko T.N., Cherikova K.V., Zalipaev P.P. *Nasadka dlya teplomassoobmennyykh apparatov* [Nozzle for Heat and Mass Exchange Apparatuses]. Patent RF, No. 212214, 2022. [in Russian].
17. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Cherikova K.V., Shibitova N.V., Zalipaeva O.A., Kocharyan R.S. *Nasadka dlya teplo- i massoobmennyykh processov* [Nozzle for Heat and Mass Exchange Processes]. Patent RF, No. 196444, 2022. [in Russian].
18. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Zalipaeva O.A., Shibitova N.V., Smolskaya D.O. *Nasadka dlya teplo- i massoobmennyykh processov* [Nozzle for Heat and Mass Exchange Processes]. Patent RF, No. 198655, 2020. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Борисович Голованчиков, доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Alexander B. Golovanchikov, doctor of technical sciences, professor, Processes and apparatus of chemical and food production department, Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

Ольга Александровна Залипаева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Olga A. Zalipaeva, candidate of technical sciences, associate professor, Processes and apparatus of chemical and food production department, Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

zalipaevaolga@yandex.ru

Николай Анатольевич Меренцов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Nikolay A. Merentsov, candidate of technical sciences, associate professor, Processes and apparatus of chemical and food production department, Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

zalipaevaolga@yandex.ru

Татьяна Николаевна Синенко, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Иностранные языки», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Tatiana N. Sinenko candidate of pedagogical sciences, associate professor, Foreign Language department, Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

TNSinenko@mail.ru

Павел Павлович Залипаев, магистрант, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Pavel P. Zalipaev, undergraduate student, Volgograd state technical university, Volgograd, Russia

Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 15.10.2023; accepted for publication 30.11.2023.