

А. Б. Голованчиков (д.т.н., проф.)¹, Н. А. Меренцов (к.т.н., доц.)¹, А. В. Персидский (вед.инж.)²,
А. С. Гендлер (инж.)³, Е. В. Левшина (магистрант)¹, М. В. Топилин (асп.)¹

РАСЧЕТ ПОРОЗНОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЕЦ РАШИГА ПРИ ИХ УПОРЯДОЧЕННОЙ УСТАНОВКЕ В НАСАДОЧНЫХ КОЛОННЫХ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

¹ Волгоградский государственный технический университет,
кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
² 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28; e-mail: pahp@vstu.ru

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
400071, г. Волгоград, пр. Ленина, б/н; e-mail: a-persidskiy@yandex.ru

З ООО «РИТЭК», отдел подготовки и транспорта нефти и газа
400005, г. Волгоград, ул. Лесогорская, д.85; e-mail: alexandergendler@yandex.ru

A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy,
A. S. Gendler, E. V. Levshina, M. V. Topilin

CALCULATIONS OF RASCHIG RING POROSITY AND SPECIFIC SURFACE AREA IN THEIR ORDERED INSTALLATION IN PACKED COLUMN MASS EXCHANGE APPARATUSES

¹ Volgograd State Technical University

28, Prospekt Lenina Str., 400005, Volgograd, Russia; e-mail: pahp@vstu.ru

² JSC «Federal Scientific and Production Center «Titan-Barricades»

Prospekt Lenina Str., 400071, Volgograd, Russia; e-mail: a-persidskiy@yandex.ru

³ LLC «RITEK»

85, Lesogorskaya Str., 400005, Volgograd, Russia; e-mail: alexandergendler@yandex.ru

Аналитически выводятся уравнения для определения порозности и удельной поверхности насадки - колец Рашига при их упорядоченной укладке в колонне. Проводится сравнение рассчитанных теоретически порозности и удельной поверхности этих насадочных тел при их хаотичной и упорядоченной укладке. Теоретически выведена формула для оценочной зависимости удельной поверхности и порозности от наружного диаметра и толщины кольца Рашига.

Ключевые слова: кольцо Рашига; насадка; порозность; расчет порозности; расчет удельной поверхности; удельная поверхность; хаотичная и упорядоченная укладка.

*Работа выполнена при поддержке гранта
РНФ 25-29-00496 «Моделирование тепло-
и массообменных процессов в экологическом
и нефтегазоперерабатывающем оборудовании
с учетом структуры потоков»*

Analytically, equations are derived to determine the porosity and specific surface of the packing - Rashig rings during their ordered laying in the column. The calculated theoretically porosity and specific surface of these packing bodies are compared with their chaotic (that is, added) laying and with ordered laying in the rows given in the reference tables of literary sources; theoretically, the equation for the estimated dependence of specific surface and porosity on the outer diameter and thickness of the Rashig ring is also deduced.

Key words: chaotic and ordered laying; packing; porosity; Rashig ring; specific surface area.

*The work was supported by the Russian
Science Foundation grant 25-29-00496 «Modeling
of heat and mass transfer processes in
environmental and oil and gas processing
equipment taking into account the flow structure»*

Дата поступления 18.09.24

Насадочные контактные устройства различных конфигураций и конструктивных исполнений получили широкое применение во многих технологических процессах химической, нефтехимической, нефтегазовой, биохимической, атомной, металлургической, строительной, пищевой и смежных отраслях промышленности, а также в широком спектре экологического оборудования очистки газовых выбросов промышленных предприятий¹⁻⁴. Они являются неотъемлемой частью технологического оборудования в таких процессах как абсорбция, мокрая очистка газов, ректификация, экстракция, испарительное охлаждение и др.⁵⁻⁹. Насадочные контактные устройства должны отвечать требованиям конкретного массообменного процесса, развивать максимальную поверхность контакта фаз, способствовать активизации взаимного перемешивания продуктов массообмена и турбулизации потоков жидких и газовых фаз, обеспечивать требуемое время пребывания продуктов массообмена и удерживающую способность по жидкой и газовой фазам, создавать наиболее развитые условия протекания тепло- и массообменных процессов, обеспечивая наивысшие показатели степеней улавливания, концентрирования, глубины охлаждения и т.д.¹⁰⁻¹⁴.

Активно развивается работа по исследованию протекающих гидродинамических, тепло- и массообменных процессов, а также совершенствованию конструкций аппаратов и насадочных контактных устройств селективной очистки газовых выбросов промышленных предприятий¹⁵.

Одним из основных способов создания развитой поверхности контакта фаз в тепло- и массообменных аппаратах был и остается использование насадочных тел разной геометрической формы¹. В справочной литературе приводятся технологические параметры этих насадок и, прежде всего, самых простых в конструктивном исполнении так называемых колец Рашига, представляющих собой цилиндры с высотой, равной их наружному диаметру. Эта насадка отличается простотой изготовления и имеет небольшую стоимость, а в качестве материалов для ее изготовления используют отрезки металлических труб, фарфор, стекло, керамику, графит и пластмассы^{1, 16}. Простые по форме и в изготовлении кольца Рашига являлись и являются в настоящее время основой для многочисленных новых конструкций^{17, 18}. Диапазон размеров колец Рашига варьируется от 15 до 150 мм, хотя в промышленных колоннах в основном используются кольца диаметров 25 и 50 мм. Кольца обычно загружаются хаотично (внавал) или могут укладываться с созданием регулярной структуры, то есть упорядоченно. Однако в справочной литературе приво-

дятся примеры параметров колец Рашига и прежде всего порозности (свободного объема) и удельной поверхности иногда без объяснения способа загрузки этих насадочных тел в колонне^{16, 19}.

Целью настоящей работы являлось теоретическое определение порозности и удельной поверхности колец Рашига, упорядоченно установленных в колонне, и сравнение полученного теоретически значений с экспериментальными, а также сравнение параметров колец Рашига, установленных упорядоченно, с хаотичной загруженными, порозность и удельная поверхность которых приведены в справочной литературе.

Выведем аналитически зависимость порозности колец Рашига при их упорядоченной укладке в колонне. Фрагмент упорядоченной установки шести колец Рашига, образующих криволинейный кольцевой зазор abc между их наружными поверхностями, представлен на рис. 1.

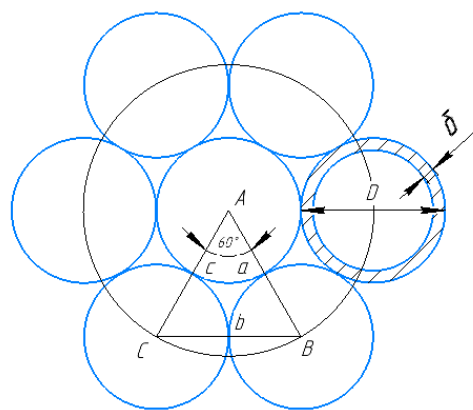


Рис. 1. Фрагмент упорядоченной установки семи смежных колец Рашига в колонне: вид сверху, толщина стенки δ показана у одного кольца

Определим площадь криволинейного треугольника abc в зазоре между дугами окружностей с центрами ABC . Диаметр каждой окружности D равен наружному диаметру колец Рашига (внутренние диаметры колец, кроме одного, не показаны). Треугольник ABC равносторонний с углами при вершинах 60° , его площадь равна

$$S_T = \frac{1}{2} D \cdot H, \quad (1)$$

где $H = Ab$ – высота этого треугольника, равная $H = \frac{\sqrt{3}}{2} D$.

Тогда площадь

$$S_T = \frac{\sqrt{3}}{4} D^2. \quad (2)$$

Площадь сектора Aac с углом при вершине A , равным 60° , равна $1/6$ площади окружности с диаметром D (с общим углом 360°). Так как площадь окружности равна

$$S_O = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3)$$

то площадь трех секторов внутри треугольника ABC (это сектора Aac , Bbc и Ccb) с учетом формулы площади окружности равна

$$S_C = 3 \left(\frac{S_O}{6} \right) = \frac{S_O}{2},$$

или с учетом формулы (3):

$$S_C = \frac{\pi D^2}{8}. \quad (4)$$

Вычитая из площади (2) треугольника ABC площадь (4) трех секторов S_C , получаем формулу для площади криволинейного треугольника abc

$$S_K = \frac{D^2 \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi D^2}{8} = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} - 0,5 \right). \quad (5)$$

Каждое кольцо образует со смежными с ним шестью кольцами, упорядоченно уложенными рядом, 6 криволинейных треугольников abc :

$$S_{об} = 6S_K,$$

а один криволинейный треугольник abc образуется другими тремя смежными кольцами.

Таким образом, на одно кольцо Рашига приходится из шести 2 площади криволинейного треугольника $abcS_K$

$$S_1 = 2S_K,$$

и с учетом выражения (5)

$$S_1 = 2 \left[\frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} - 0,5 \right) \right]. \quad (6)$$

Общая площадь сечения, приходящаяся на одно кольцо Рашига, определяется в виде суммы площадей сечения самого кольца Рашига и прилегающей к нему площади свободного сечения S_1

$$S_{об} = \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} - 1 \right) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right), \quad (7)$$

а площадь свободного сечения, приходящегося на одно кольцо Рашига, как сумма прилегающей к нему площади свободного сечения S_1 и площади отверстия внутри кольца

$$S_2 = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(1 - \frac{2\delta}{D} \right)^2. \quad (8)$$

Тогда

$$S_{1,2} = \frac{\pi D^2}{4} \left[\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} - 1 \right) + \left(1 - \frac{2\delta}{D} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Разделив площадь свободного сечения $S_{1,2}$ на общую площадь сечения $S_{об}$, приходящуюся на од-

но кольцо Рашига, получаем отношение площадей свободного сечения ко всему сечению кольца.

Отношение $S_{1,2}/S_{об}$, умноженное в числителе и знаменателе на высоту кольца, равно доли свободного объема приходящегося на одно кольцо, то есть порозности ε

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} - 1 \right) + \left(1 - \frac{2\delta}{D} \right)^2}{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}}. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (10) порозности колец Рашига, упорядоченно уложенные в ряды, в сравнении с порозностью этих колец, уложенными внавал¹⁶.

Сравнение расчетных параметров порозности колец Рашига, упорядоченно уложенных в колонне, с их порозностью при хаотичной укладке внавал показывает, что порозность в первом случае всегда меньше, чем во втором и это уменьшение варьируется от минус 6 до минус 19 %. Это, на наш взгляд, связано с более плотной упорядоченной укладкой в ряды без дополнительных зазоров между наружными поверхностями колец Рашига при их укладке внавал. Средние минусовые отклонения равны $\delta = -12,4\%$. Поэтому для перехода от известной из справочной литературы порозности ε колец Рашига, уложенных внавал к ориентировочному значению порозности при упорядоченной укладке можно из первой вычитать 0.1 порозности

$$\varepsilon_y = \varepsilon - 0.1. \quad (11)$$

Относительная ошибка ε_y от значения порозности рассчитанной по формуле (10) будет лежать в пределах $\pm 6\%$.

Вторым важным технологическим параметром, помимо порозности или удельного свободного объема, является удельная поверхность насадки. Она задается для колец Рашига так же, как и порозность в справочной литературе для насадки, уложенной внавал и упорядоченно в ряды.

Выведем теоретически форму для определения удельной поверхности колец Рашига, упорядоченно уложенных в колонне.

Поверхность одного кольца Рашига f_1 складывается из наружной и внутренней боковых стенок и двух торцевых поверхностей. При высоте $H = D$:

$$f_1 = \left[\pi D^2 + \pi (D - 2\delta) D \right] + 2 \left[\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D - 2\delta)^2}{4} \right],$$

которая после алгебраических преобразований приводится к формуле

Порозность колец Рашига, рассчитанная по формуле (10), в сравнении с ¹⁷

Виды колец ¹⁶	Размеры кольца, мм	Порозность		Относительное отклонение, %
		Рассчитанная по формуле (10) при упорядоченной укладке в ряды	Приведенное значение для колец Рашига, уложенных «внавал», %	
Фарфоровые	8×8×1	0.6034	0.64	-5.71
Керамические	15×15×2	0.581	0.7	-17
	25×25×3	0.617	0.74	-16.6
	35×35×4	0.633	0.78	-18.8
	50×50×5	0.674	0.785	-14.2
Железные	35×35×2.5	0.76	0.83	-8.5
	50×50×1.5	0.894	0.95	-5.84

Таблица 2

Расчетные значения порозности ε и удельной поверхности σ колец Рашига при их упорядоченной укладке в сравнении с этими же параметрами при хаотичной укладке ¹

Вид кольца	Размеры	Порозность, ε		Отклонение, %	Удельная поверхность σ		Отклонение, %
		Формула (10)	Справочник		Формула (14)	Справочник	
Стальные	8×8×0.3	0.869	0.9	-3.43	419	630	-33.3
	10×10×0.5	0.828	0.88	-5.93	327	500	-34.6
	15×15×0.5	0.883	0.917–0.92	-3.79	225.9	364	-37.9
	25×25×0.5	0.92	0.92	0.97	139.3	220	-36.7
	50×50×0.8	0.943	0.95	-0.74	70	110	-36.17
Керамические	10×10×1.5	0.538	0.65–0.7	-17.2	262	440	-40.4
	16×16×2	0.63	0.69–0.73	-15	173	300	-42
	25×25×2.4	0.681	0.72–0.81	-9.8	118.5	174	-31.8
	38×38×4.4	0.629	0.68–0.76	-12	74.6	115–150	-34
	50×50×4.4	0.709	0.74–0.83	-9.1	60.3	91–98	-32.8
	50×50×5	0.67	0.7–0.785	-8.8	58.7	90–120	-34
	75×75×9.5	0.6	0.71	-15.6	36.87	69–82	-43
	80×80×8	0.67	0.77–0.8	-15	36.7	60–75	-38
	100×100×8	0.73	0.81	-9.5	30	44–75	-34

$$f_1 = \frac{\pi D^2}{4} 4 \left[1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Общий объем, включающий объем самого кольца плюс объем прилегающего к нему объема, образованного площадью $S_{об}$ (8) и высотой $H = D$, равен

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} D, \quad (13)$$

удельная поверхность при упорядоченной укладке

$$\sigma_y = f_1/V_1$$

или с учетом формул (12) и (13)

$$\sigma_y = \frac{2 \left[1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right]}{\left[\frac{\sqrt{3}}{\pi} D \right]}. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены дополнительные результаты расчетов порозности ε по формуле (10) и удельной поверхности σ_y по формуле (14) при упорядоченной установке колец Рашига в колонне в сравнении с их табличными значениями при хаотичном укладке и приведенными в ¹.

В табл. 2 приведены технологические параметры ε и σ для геометрических колец Рашига, не повторяющих их геометрические размеры, приведенные в табл. 1. Из табл. 2 видно, что расчетная порозность колец Рашига по формуле (10), как и в табл. 1, меньше, чем для колец Рашига, уложенных внавал, и эта относительная разница не превышает минус 18%.

Расчетные значения удельной поверхности колец насадки, упорядоченно установленные в колонне и рассчитанные по формуле (14), также меньше, чем их значения для хаотично уложенной насадки, но здесь это относительное уменьшение варьируется от минус 30 до минус 43 % при среднем относительном отклонении минус 36%, то есть примерно в 2 раза больше, чем относительное отклонение для порозности. То есть удельная по-

верхность колец Рашига, упорядоченно уложенных в колонне, может рассчитываться по формуле

$$\sigma_y = \sigma / 1.36,$$

где σ – табличное значение удельной поверхности насадки, уложенной в навал.

Свяжем технологические параметры насадки: порозность ε и удельную поверхность σ с ее геометрическими характеристиками при упорядоченной укладке колец в колонне.

По геометрическому смыслу порозность – это свободный объем, относящийся к одному элементу насадки, к полному объему, им занимаемому. Последний складывается из объема материала V_m плюс суммы объемов внутреннего полого кольца и внешнего свободного объема, образованного зазорами между наружными поверхностями элементов насадки, установленными упорядоченно в ряды

$$V_{об} = V_1 + V_2.$$

Тогда

$$\varepsilon = V_{1,2} / V_{об}$$

где $V_{1,2} = V_1 + V_2$, а общий объем, занимаемый элементом насадки, можно представить в виде

$$V_{об} = V_m / (1 - \varepsilon). \quad (15)$$

По геометрическому смыслу понятия удельной поверхности ее, относя к одному элементу насадки, можно представить в виде отношения поверхности одного элемента к общему объему:

$$\sigma = f_1 / V_{об} \quad (16)$$

Разделив левые и правые части уравнения (16) на такие же части уравнения (15), получаем

формулу связи технологических параметров элемента насадки ε и σ с его геометрическими параметрами

$$\frac{\sigma}{1 - \varepsilon} = \frac{f_1}{V_m}. \quad (17)$$

Для типовых колец Рашига формулу (17) можно упростить.

Площадь поверхностей кольца Рашига

$$f_1 = [\pi DH + \pi DH(1 - 2\delta/D)] + 2 \left[\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D - 2\delta)^2}{4} \right].$$

При $H = D$ после алгебраических преобразований

$$f_1 = 2\pi D^2(1 - \delta/D)(1 + \delta/D). \quad (18)$$

Объем материала в одном кольце Рашига

$$V_m = \frac{\pi D^2}{4} H - \frac{\pi(D - 2\delta)^2}{4} H.$$

или после алгебраических преобразований

$$V_m = \pi D \delta H - \pi \delta^2 H. \quad (19)$$

С учетом формул (18) и (19)

$$\frac{f_1}{V_m} = \frac{2(1 + \delta/D)}{\delta}. \quad (20)$$

Тогда, исходя из уравнений (17) и (20) получаем для колец Рашига уравнение связи его диаметра и толщины с технологическими параметрами

$$\frac{\sigma}{1 - \varepsilon} = \frac{2(1 + \delta/D)}{\delta}. \quad (21)$$

Таблица 3

Сравнение табличных значений удельной поверхности с расчетными данными

Характеристика кольца	Заданные параметры		Удельная поверхность по формуле (22) σ , м ² /м ³	Относительная ошибка, %
	ε	σ , м ² /м ³		
Керамические				
100×100×14	0.6	65	65.14	0.21
100×100×8	0.81	44–75	51.3	16.5 или –31.6
80×80×8	0.785	60–75	59.1	–1.5 или –19.4
75×75×9.5	0.71	69–82	68.7	–0.43 или –16.2
50×50×5	0.74	90–120	114	20.6 или –5
50×50×4.4	0.785	91–98	106.3	16.8 или 8.5
38×38×4.4	0.72	116–150	142.9	22.4 или –4.7
25×25×2.4	0.765	174	213.4	22.6
16×16×2	0.71	300	326	8.7
10×10×1.5	0.675	440	345	–21.6
Стальные				
50×50×0.8	0.95	110	127	15.4
25×25×0.5	0.92	220	326	48.2
15×15×0.5	0.92	364	330	–9.1
10×10×0.5	0.88	500	504	0.8
8×8×0.3	0.9	630	673.3	6.8

Обычно порозность ε несложно проверить экспериментально. Тогда теоретическая зависимость удельной поверхности с учетом (21) определяется по формуле

$$\sigma = \frac{2(1-\varepsilon)(1+\delta/D)}{(\delta/D)D} \cdot 10^3, \quad (22)$$

где 10^3 – коэффициент перевода.

В табл. 3 приведены результаты вычислений по формуле (22) в сравнении со справочными данными.

Таким образом, полученная аналитически формула для расчета порозности (10) при плотной упорядоченной укладке колец Рашига в ряды занижает значение порозности, приведенной в справочниках, примерно на 10%. Это объясняется реальной установкой колец (с зазорами между их боковыми стенками) в ряды в колонном аппарате.

Поэтому расчетное значение порозности ε для приближения его к реальному значению можно увеличить на 10%, при этом относительная ошибка в сравнении с табличным значением не будет превышать $\pm 6\%$.

Полученная аналитически формула для расчета удельной поверхности насадки (14) приводит к значительно большим отклонениям по сравнению со значениями, приведенными в справочной и учебной литературе. Поэтому для расчета реальной удельной поверхности расчетное значение надо завышать в 1.36 раза.

При произвольной укладке колец Рашига в колонне при известной порозности насадки оценочное значение удельной поверхности можно рассчитать по формуле (22). При этом средние отклонения расчетной величины удельной поверхности от табличного значения в среднем не превышает $\pm 10\%$.

Литература

1. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. и др. Насадки массообменных колонн. – М.: Инфохим, 2009. – 358 с.
2. Микуленок И.О. Классификация элементов насадок массообменных колонн с формой поверхностей второго порядка (обзор конструкций) // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – №11. – С.46-48.
3. Laptev A.G., Lapteva E.A., Gilyazov A.D. Updating packed fractionating columns using mathematical model of multicomponent mixture separation // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2021. – Т.57, №1. – Pp.1-8.
4. Голованчиков А.Б., Балашов В.А., Меренцов Н.А. Уравнение фильтрации для насадочных контактных устройств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – №1. – С.8-10.
5. Dmitriev A.V., Farakhov M.M., Khafizova A.I., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Gilyazov A.D., Akhmitshin A.A. Investigation into the process of interaction of the liquid and the gas in a jet-film contact device // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Т.95, №2. – Pp.421-427.
6. Lapteva E.A., Laptev A.G., Alasgarli S.W. Mathematical model of contact cooling and purification of the dispersed phase of gases in packed scrubbers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Т.56, №2. – Pp.244-251.
7. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. Определение объемного коэффициента массоотдачи в градириях со струйно-пленочными контактными устройствами // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т.94, №1. – С.121-126.
8. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – Т.22. – Pp.100-125.

References

1. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranov D.A. i dr. *Nasadki massoobmennyykh kolonn* [Nozzles of mass transfer columns]. Moscow: Infokhim Publ., 2009, 358 p.
2. Mikulyonok I.O. *Klassifikatsiya elementov nasadok massoobmennyykh kolonn s formoy poverkhnostey vtorogo poryadka (obzor konstruksiy)* [Classification of elements of nozzles of mass transfer columns with the shape of surfaces of the second order (review of structures)]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and oil and gas engineering], 2021, no.11, pp.46-48.
3. Laptev A.G., Lapteva E.A., Gilyazov A.D. [Updating packed fractionating columns using mathematical model of multicomponent mixture separation]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2021, vol.57, no.1, pp.1-8.
4. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Merentsov N.A. *Uravnenie fil'tratsii dlya nasadochnyykh kontaktnyykh ustroystv* [Filtration equation for nozzle contact devices]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and oil and gas engineering], 2017, no.1, pp.8-10.
5. Dmitriev A.V., Farakhov M.M., Khafizova A. I., Dmitrieva O. S., Madyshev I. N., Gilyazov A. D., Akhmitshin A. A. [Investigation into the process of interaction of the liquid and the gas in a jet-film contact device]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no.2, pp.421-427.
6. Lapteva E.A., Laptev A.G., Alasgarli S.W. Mathematical model of contact cooling and purification of the dispersed phase of gases in packed scrubbers. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Vol. 56. № 2. pp. 244-251.
7. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. *Opreделение obyemnogo koeffitsienta massootdachi v gradirnyakh so struyno-plenochnymi kontaktnymi ustroystvami* [Determination of the volumetric mass transfer coefficient in cooling towers with jet-film contact devices]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering and Physics Journal], 2021, vol.94, no.1, pp.121-126.

9. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Determination of the Volumetric Coefficient of Mass Transfer in Cooling Towers with Jet-Film Contact Devices// *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*.– 2021.– V.94, №1.– Pp.113-117.
10. Laptev A.G., Lapteva E.A. Determining the efficiency of packed gas separators of droplets taking into account the nonuniformity of the gas velocity profile// *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*.– 2021.– V.55, №2.– Pp.301-306.
11. Laptev A.G., Lapteva E.A. Mathematical model and thermohydraulic characteristics of packed scrubbers of condensation cooling of a gas // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*.– 2022.– V.95, №1.– Pp.257-265.
12. Голованчиков А.Б., Меренцов Н.А., Качанов А.В. Моделирование процесса абсорбции в насадочной колонне, работающей в режиме эмульгирования// *Экология и промышленность России*.– 2021.– Т.25, №3.– С.24-29.
13. Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Исследования диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы// *Экология и промышленность России*.– 2017.– Т.21, №3.– С.12-15.
14. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями.– Санкт-Петербург: Страта, 2016.– 212 с.
15. Микуленок И.О. Классификация конструкций массообменных колонн с подвижной насадкой (обзор патентов) // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*.– 2021.– №4.– С.44-47.
16. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепло-массообменных аппаратов.– Казань: Отечество, 2013.– 454 с.
17. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Персидский А.В., Топилин М.В. Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании.– Волгоград: ВолгГТУ, 2021.– 212 с.
18. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Персидский А.В., Лебедев В.Н. Моделирование процессов управления в экологическом массообменном оборудовании.– Волгоград: ВолгГТУ, 2020.– 188 с.
19. Тимонин А.С., Божко Г.В., Борщев В.Я. и др. Оборудование нефтегазопереработки химических и нефтехимических производств.– М.: Инфра-Инженерия, 2022.– 948 с.
8. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S. [Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol.22, pp.100-125.
9. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. [Determination of the Volumetric Coefficient of Mass Transfer in Cooling Towers with Jet-Film Contact Devices]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol.94, no.1, pp.113-117.
10. Laptev A.G., Lapteva E.A. [Determining the efficiency of packed gas separators of droplets taking into account the nonuniformity of the gas velocity profile]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol.55, no.2, pp.301-306.
11. Laptev A.G., Lapteva E.A. [Mathematical model and thermohydraulic characteristics of packed scrubbers of condensation cooling of a gas]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol.95, no.1, pp.257-265.
12. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Kachanov A.V. *Modelirovanie protsessa absorptsii v nasadochnoy kolonne, rabotayushey v rezhime emul'girovaniya* [Simulation of the absorption process in a nozzle column operating in emulsification mode]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2021, vol.25, no.3, pp.24-29.
13. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Nikolaev A.N. *Issledovaniya dispergirovaniya zhidkosti i gaza v kontaktnykh ustroystvakh s uvelichennym diapazonom ustoychivoy raboty* [Studies of liquid and gas dispersion in contact devices with an extended range of stable operation]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2017, vol.21, no.3, pp.12-15.
14. Laptev A.G., Farakhov T.M., Dudarovskaya O.G. *Effektivnost' yavleniy perenosa v kanalah s khaotichnymi nasadochnymi sloyami* [The effectiveness of transfer phenomena in channels with chaotic packing layers]. Saint Petersburg, Strata Publ., 2016, 212 pp.
15. Mikulyonok I.O. *Klassifikatsiya konstruktsiy massoobmennyykh kolonn s podvizhnoy nasadkoy (obzor patentov)* [Classification of designs of mass transfer columns with a movable nozzle (review of patents)]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and oil and gas engineering], 2021, no.4, pp.44-47.
16. Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I. *Kontaktnye nasadki promyshlennykh teplo-massoobmennyykh apparatov* [Contact nozzles of industrial heat and mass transfer devices]. Kazan', Otechestvo Publ., 2013, 454 p.
17. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persidskiy A.V., Topilin M.V. *Modelirovanie protsessov upravleniya v neftegazopererabatyvayushem massoobmennom oborudovanii* [Modeling of control processes in oil and gas processing mass transfer equipment]. Volgograd, VSTU Publ., 2021, 212 p.
18. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persidskiy A.V., Lebedev V.N. *Modelirovanie protsessov upravleniya v ekologicheskom massoobmennom oborudovanii* [Modeling of control processes in environmental mass transfer equipment]. Volgograd, VSTU Publ., 2020, 188 p.
19. Timonin A.S., Bozhko G.V., Borshchev V.Ya. and oth. *Oborudovanie neftegazopererabotki khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv* [Equipment for oil and gas processing of chemical and petrochemical industries]. Moscow Infra-Inzheneriy Publ., 2022, 948 p.