

УДК 621.9

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОРОЗНОСТИ КОЛЕЦ РАШИГА В ПРИСТЕННОЙ ОБЛАСТИ НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЫ

© 2024 г. А. Б. Голованчиков^а, Н. А. Меренцов^а, М. В. Топилин^{а, *}, П. П. Залипаев^а

^аФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия

*e-mail: topilinmik@gmail.com

Поступила в редакцию 26.03.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 30.06.2024 г.

Выведена формула для расчета порозности при упорядоченной установке колец Рашига в пристенной области насадочной колонны. Проведены сравнительные расчеты порозности в пристенной области с порозностью при упорядоченной укладке колец Рашига в ряды внутри корпуса аппарата, заданной в справочных таблицах и по формуле, рассчитанной теоретически.

Показано влияние геометрических размеров колец Рашига: наружного диаметра и толщины стенки, внутреннего диаметра аппарата и числа свободно установленных колец на порозность в пристенной области аппарата.

Ключевые слова: кольца Рашига, порозность, пристенная область, упорядоченная укладка, наружный диаметр, толщина стенки, диаметр аппарата

DOI: 10.31857/S0040357124040095 EDN: AVYKAA

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, все тепломассообменные колонные аппараты разделяются на два основных типа: тарельчатые и насадочные [1–8]. Первые более совершенные по конструкции и в эксплуатации обеспечивают устойчивую работу в широком диапазоне изменения рабочих параметров по производительности, температуре материальных потоков и концентрациям компонентов. Однако они дорогие по стоимости и в обслуживании.

Поэтому насадочные колонные аппараты, простые в конструктивном исполнении и обслуживании, по-прежнему находят широкое применение в химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, а также в металлургическом, энергетическом, фармакологическом, пищевом и экологическом производстве и других технологических процессах.

Возможны два варианта укладки насадочных тел в колонну: свободная, или в навал, и упорядоченная, или в ряды. Первая: простая и быстрая, с простой засыпкой элементов насадки в колонну не позволяет обеспечить точные значения порозности ϵ и удельной поверхности σ [12–16].

Поэтому эти параметры для разных типов насадок задаются в некотором диапазоне [9]. Так, для одних из самых распространенных «керамических колец Рашига $25 \times 25 \times 3$ » удельный объем или порозность при свободной укладке варьируется в пределах $\pm 4,5\%$, $\epsilon = 0,68 \div 0,74$, а удельная поверхность $\pm 6,8\%$, $\sigma = 190 \div 220 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Более совершенна, но трудоемка и затратна по времени укладка колец Рашига упорядоченно в ряды. Здесь уже вышеназванные параметры насадки – порозность и удельная поверхность задаются жестко или с небольшим диапазоном изменения по величине. В табл. 4.1 того же справочника [11], только для керамической насадки $50 \times 50 \times 5$, размеры задаются в узком диапазоне: порозность $\epsilon = 0,72 \div 0,735 (+1,5\%)$, а удельная поверхность $\sigma = 110 \div 120 (+4,3\%)$. Для остальных 9 колец от « $25 \times 25 \times 2,4$ » до « $150 \times 150 \times 16$ » порозность и удельная поверхность задаются жестко, без границ их возможного варьирования. То же касается и насадок, выполненных из разных материалов, размеры порозности и удельной поверхности которых приведены в табл. 4.2 [9].

Однако другой проблемой, выявленной в процессе эксплуатации насадочных тепломассообменных колонн даже для насадок, упоря-

доченно установленных в ряды, является поперечная неравномерность порозности и удельной поверхности по сечению колонны. Это приводит к необходимости размещения насадки в виде отдельных слоев по высоте с безнасадочными зазорами между ними, в которых устанавливаются перераспределительные тарелки для передачи жидкой фазы с периферии от стенок аппарата к центру. Распределители различных конструкций описаны в справочнике [11].

Здесь же приведена таблица с рекомендациями по допустимой высоте секции насадки в колонне и отношению диаметра колонны к наружному диаметру насадки. Чтобы уменьшить неравномерность порозности и удельной поверхности для колец Рашига, рекомендуется $H_{\text{ск}}/D \leq 2,5 \div 3$, то есть при диаметре колонны $D = 1$ м высота секции с насадкой не должна превышать 2,5–3 м, при этом диаметр колонны к наружному диаметру колец Рашига должен быть $D/d \geq 30$. Для колонн малого диаметра возможно уменьшить последнее неравенство до $D/d \geq 8$. Выравнивать распределение порозности и удельной поверхности насадки, засыпанной в навал, возможно, применяя различные способы ее засыпки в колонну: от периферии к центру, от центра к периферии и комбинировании в одной секции обоих способов [11].

То же касается и различных конструкций, обеспечивающих равномерность распределения орошения по сечению колонны.

Причину такого неравномерного распределения потоков жидкости и газа (пара) по сечению колонны объясняют неодинаковой порозностью насадки в центре и у стенок колонны. Но количественного подтверждения этой различной порозности теоретически не проводилось.

Целью работы является теоретический расчет порозности колец Рашига, упорядоченно установленных в пристенной области насадочной колонны, и сравнение ее с табличными значениями, приведенными в научной, учебной и справочной литературе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ВЫВОД ФОРМУЛЫ ПОРОЗНОСТИ

Рассмотрим на рис. 1 сектор окружности АВО с внутренним диаметром колонны D и упорядоченно установленными у стенки в ряд кольцами Рашига с наружным диаметром d и толщиной стенки кольца δ (высота колец Рашига одинаковая и обычно равна $h = d$). Центры колец Рашига у стенки лежат на окружности с диаметром $D_1 = D - d$. Длина этой окружности $L_1 = \pi D_1$, или

$$L_1 = \pi \cdot (D/d). \quad (1)$$

Число колец, укладываемых упорядоченно в кольцевой ряд на этой окружности $N_1 = L_1/d$ или с учетом уравнения (1):

$$N_1 = \pi \cdot (D/d - 1). \quad (2)$$

Центральный угол φ сектора АВО (угол, приходящийся на одно кольцо Рашига) $\varphi = (2\pi)/N_1$, или с учетом формулы (2)

$$\varphi = \frac{2\pi}{(D/d - 1)}, \quad (3)$$

а площадь этого сектора АВО

$$S_{\text{ABO}} = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\varphi}{2\pi} \right),$$

или с учетом формулы (3)

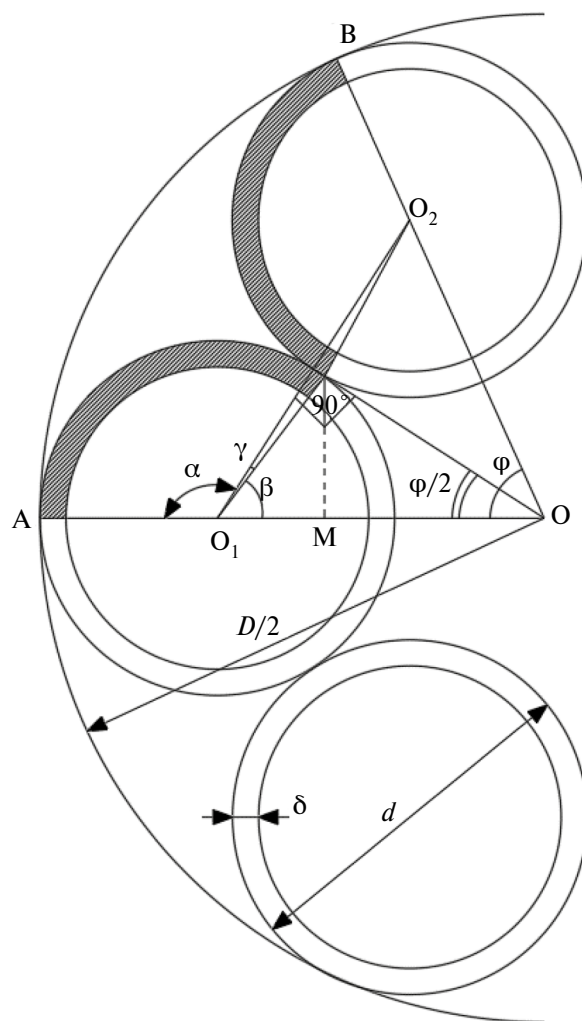


Рис. 1. Схема упорядоченной установки колец Рашига у стенки аппарата.

$$S_{ABO} = \frac{D^2}{4(D/d - 1)}. \quad (4)$$

Треугольник OO_1O_2 – равнобедренный со сторонами $OO_1 = OO_2$, а отрезок OE – его высота

$$OE = OO_1 \cos(\varphi/2).$$

Так как $OO_1 = (D - d)/2$, то с учетом формулы (3) высота

$$OE = \left(\frac{D - d}{2} \right) \cos \left(\frac{1}{\frac{D}{d} - 1} \right),$$

а угол $\beta = \pi/2 - \varphi/2$, или

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{(D/d - 1)}. \quad (5)$$

Угол OEO_1 прямой и O_1C – гипотенуза треугольника $O_1 - EC$, тогда угол γ может быть представлен в виде:

$$\cos \gamma = \frac{O_1E}{O_1C}, \quad (6)$$

O_1E – катет прямоугольного треугольника OO_1E

$$O_1E = \frac{D - d}{2} S_m \varphi/2,$$

или с учетом формулы (3)

$$O_1E = \frac{D - d}{2} \sin \left(\frac{1}{D/d - 1} \right). \quad (7)$$

Тогда с учетом формулы (7) и $O_1C = d/2$ можно записать:

$$\cos \gamma = \left(\frac{D}{d} - 1 \right) \sin \left(\frac{1}{D/d - 1} \right), \quad (8)$$

Обозначим α угол AO_1C , то есть

$$\alpha = \pi - \beta + \gamma,$$

или с учетом обозначений (5) и (8)

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{D/d - 1} + \arccos \left[\left(\frac{D}{d} - 1 \right) \sin \left(\frac{1}{D/d - 1} \right) \right], \quad (9)$$

Площадь криволинейной фигуры ABO_2CO_1 является периодом в пристенной с корпусом колонны, в которой заключены площадь порозности и площадь твердых колец насадки (последние на рис. 1 затемнены), соответствующие объемам пустот и твердой части колец Рашига, т.к. высоты равны высотам колец Рашига.

Площадь этой криволинейной фигуры равна площади сектора ABO с радиусом $D/2$, описываемая формулой (4), за минусом двух площадей

треугольника O_1CO (площади треугольников O_1CO и O_2CO равны). В этом треугольнике O_1CO известны стороны $O_1O = \frac{D - d}{2}$ и $O_1C = d/2$ и все

три угла:

угол $O_1OC = \varphi/2$, угол $CO_1O = \beta - \varphi$ и угол $O_1CO = \pi - (\beta - \gamma) - \varphi/2$.

Высота треугольника O_1CO

$$C3 = O_1C \cdot \sin(\beta - \gamma)$$

Тогда площадь двух треугольников O_1CO определяется как

$$S_t = O_1O \cdot C3$$

или

$$S_t = \frac{D - d}{2} \cdot \frac{d}{2} \sin(\beta - \gamma). \quad (10)$$

Площадь криволинейной фигуры ABO_2CO_1 может быть с учетом уравнения (4) и (10) записана в виде:

$$S_\phi = \frac{D^2}{4(D/d - 1)} - \frac{(D - d)}{4} d \sin(\beta - \gamma). \quad (11)$$

Площадь двух дуг торцов твердых поверхностей колец внутри этой фигуры ABO_2CO_1 :

$$S_m = 2 \frac{\alpha}{2\pi} \left\{ \frac{\pi}{4} \left[d^2 - (d - 2\delta)^2 \right] \right\},$$

где сомножитель в фигурных скобках – площадь торца кольца Рашига.

После алгебраических преобразований последняя формула приобретает вид:

$$S_m = \alpha (d\delta - \delta^2). \quad (12)$$

Порозность в пристенной области может быть записана в виде:

$$S_c = 1 - \frac{S_m}{S_\phi}$$

или с учетом уравнений (11) и (12):

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{4\alpha(\delta/D) \left(1 - \frac{\delta}{d} + \frac{\delta - d}{d} \right)}{2 - (1 - d/D)^2 \sin(\beta - \gamma)}. \quad (13)$$

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СО СПРАВОЧНЫМИ ДАННЫМИ

Расчеты по формуле (13) для упорядочено насыпанных колец Рашига $25 \times 25 \times 3$ у пристенной области дают значения порозности при изменении внутреннего диаметра в диапазоне $D = 250 - 1400$ мм, $\varepsilon = 0,6723 \div 0,6692$, то есть в широком диапазоне изменения диаметров колонны отклонения по $\Delta\varepsilon$ не превышают $\pm 0,003$.

По сравнению с теми же керамическими кольцами Рашига, насыпанными в навал, табличное значение $\varepsilon = 0,68 \div 0,74$, то есть формула (13) несколько занижает порозность, хотя сравнение значений порозности для колец, насыпанных в навал и установленных упорядоченно, не совсем корректно.

Поэтому целесообразно сравнивать табличное значение порозности для упорядоченно установленных колец Рашига внутри колонны и рассчитанное по формуле (13) — установленных в области стенки.

Для керамических колец Рашига $25 \times 25 \times 2,4$, упорядоченно установленных внутри колонны, табличное значение $\varepsilon = 0,81$ [11], а при расчетах по формуле (13) оно значительно меньше и изменяется в том же диапазоне изменения диаметров колонны $D(250-1400)$ мм $\varepsilon = 0,7307 \div 0,7281$.

Для стальных колец аналогичные результаты расчетов табличной порозности внутри колонны и рассчитанной по формуле (13), когда они установлены вблизи стенки, приведены в табл. 1.

Уменьшение порозности во всех расчетах порозности колец Рашига в пристенной области, по сравнению с заданными в таблицах, при их установке внутри колонны связано с неплотной укладкой колец в пристенной области. Действительно, для колец $25 \times 25 \times 3$ расчетное число колец Рашига в пристенной области, рассчитанное по формуле (2), для диаметра колонны $D = 500$ мм

$$N_1 = 3,14 \left(\frac{500}{25} - 1 \right) = 59,66.$$

Уже дробная часть этого числа должна быть отброшена, а значит, увеличена доля порозности в пристенной области.

Модифицированная формула порозности в пристенной области при уменьшении числа колец по сравнению с их плотной укладкой N_1 ,

$$N = N_1 - n,$$

где n — число, на которое уменьшается число колец в пристенной области по сравнению с их плотной укладкой:

$$\varepsilon_M = 1 - B \left(\frac{N_1 - n}{N_1} \right),$$

где B — вычитаемое формулы (13)

$$B = 1 - \varepsilon_c,$$

равная твердой доли объема колец в рассматриваемом секторе АВО (рис. 1).

На рис. 2 приведен график зависимости порозности колец Рашига при их неплотной укладке в пристенной области для колец $25 \times 25 \times 2,4$ (табличное значение $\varepsilon = 0,81$ [11], $D = 250$ мм) $B = 0,27$ от величины n .

Как видно из графиков на рис. 2, свободной укладкой колец Рашига в пристенной области с зазором между их боковыми стенками можно значительно увеличить порозность и даже поднять ее до уровня порозности внутри колонны, заданной по таблице [11]. Если уменьшить число колец Рашига в пристенной области с 28 (плотная укладка) до 20, то порозность в пристенной области увеличится с 0,73 до 0,81, то есть сравняется с табличным значением.

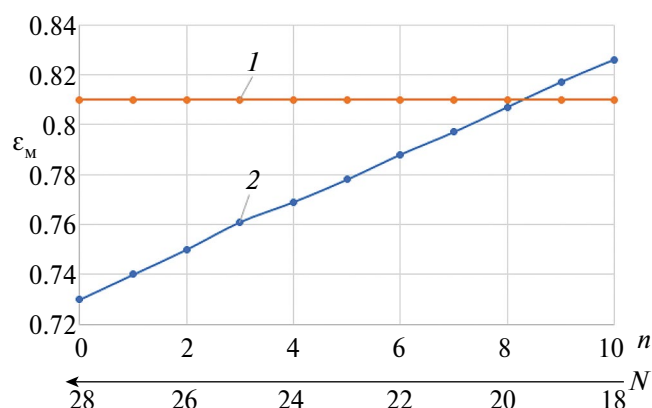


Рис. 2. Зависимость модифицированной порозности колец Рашига в пристенной области колонны при свободной и упорядоченной укладке. 1 — табличное значение $\varepsilon_t = 0,81$ [11] порозности для керамических колец $25 \times 25 \times 2,4$, 2 — упорядоченная свободная укладка колец Рашига с зазорами между боковыми стенками, где n — уменьшение числа колец Рашига по сравнению с их плотной укладкой в пристенной области. N — число колец Рашига в пристенной области.

Таблица 1. Сравнение табличного значения порозности стальных колец Рашига, установленных внутри колонны, с расчетным ее значением по формуле (13), установленных в области стенки колонны

№	Размеры колец Рашига	Табличное значение порозности внутри колонны	Расчетное значение порозности в области стенки в диапазоне измерения диаметра колонны $D = (250-1400)$ мм
1	$8 \times 8 \times 0,3$	0,9	$0,8870 \div 0,8868$
2	$10 \times 10 \times 0,5$	0,88	$0,8516 \div 0,8510$
3	$15 \times 15 \times 0,5$	0,917	$0,8994 \div 0,8990$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически выведенная формула (13) для плотной упорядоченной укладки колец Рашига в пристенной области колонны занижает порозность по сравнению с ее табличным значением при упорядоченной укладке внутри колонны.

2. Увеличение диаметра колонны мало влияет на расчетное значение порозности в пристенной области при плотной укладке колец Рашига.

3. Для колец малых размеров и толщины стенки заданные табличные значения порозности колец Рашига внутри колонны незначительно отличаются от рассчитанных значений порозности по формуле (13) для пристенной области.

4. Модифицированная формула (14) позволяет регулировать порозность колец Рашига в пристенной области при их свободной упорядоченной укладке с зазором между боковыми стенками. Уменьшая число колец при свободной укладке, по сравнению с их плотной без зазоров укладкой в пристенной области, можно уравнивать порозность в пристенной области с порозностью внутри слоя насадки.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ε	порозность, $\text{м}^3/\text{м}^3$
σ	удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$
d	наружный диаметр кольца Рашига, м
δ	толщина стенки кольца Рашига, м
h	высота кольца Рашига, м
φ	угол, приходящийся на одно кольцо Рашига

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перри Г.Дж.* Справочник инженера-химика. Т. 2 / Пер. с 4-го англ. изд. под общ. ред. Н.М. Жаворонского и П.Г. Раменкова. Л.: Химия, 1969. 504 с.
2. *Плановский А.М., Рамм В.М., Каган С.З.* Процессы и аппараты химической технологии. 5-е изд., стер. М.: Химия, 1968. 848 с.
3. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 655 с.
4. *Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К.* Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1982. 584 с.
5. *Гальперин Н.И., Пебамк В.Л., Костянян А.Е.* Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности. 1977.
6. *Лантев А.Г.* Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями: монография. СПб.: Страта, 2016.
7. *Баранов Д.А.* Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 408 с.
8. *Борисов Г.С., Брыков В.Д., Дыткерский Ю.И., Каган С.З. и др.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1983. 272 с.
9. *Сокол Б.А.* Насадки массообменных колонн / Под общ. ред. Д.А. Баранова. М.: ЗАО "ИНФОХИМ", 2009. 358 с.
10. *Пушинов А.С.* Совершенствование конструкций контактных устройств для градилен. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2019.
11. *Лантев А.Г.* Сравнительная теплогидравлическая эффективность процессов с хаотичными насадочными слоями (упаковками) // Теорет. основы хим. техн. 2018. Т. 52. № 5. С. 591–596.
12. *Niegodajew P., Marek M.* Statistical variation of characteristics of random packed beds of Raschig rings: The influence of the sample size // Particuology. 2021. V. 56. P. 50.
13. *Marek M.* Numerical simulation of a gas flow in a real geometry of random packed bed of Raschig rings // Chem. Eng. Sci. 2017. V. 161. P. 382.
14. *Moghaddam E.M.* Hydrodynamics of narrow-tube fixed bed reactors filled with Raschig rings // Chem. Eng. Sci. 2020. V. 5
15. *Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.* Определение зависимости аэродинамического сопротивления насыпной садки от величины порозности и скорости фильтрации // Вестник Ивановского гос. энерг. ун-та. 2019. № 2. С. 16–24.
16. *Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А., Левшина Е.В.* Оптимальная установка колец Рашига в насадочной ректификационной колонне // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2024. № 1. С. 11–15.