

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОФРИРОВАННОЙ КОЛЬЦЕОБРАЗНОЙ НАСАДКИ И ЕЁ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

В химической технологии одними из основных являются процессы массопередачи. В настоящее время в промышленных условиях такие процессы в основном реализуются в насадочных аппаратах с контактными массообменными элементами в виде гладких колец Рашига, уложенных «в навал». Такая насадка характеризуется простотой изготовления и низкой стоимостью, но имеет существенные недостатки – относительно малую удельную поверхность и довольно большое гидродинамическое сопротивление. Первый параметр ведет к снижению скорости массообмена, второй – к увеличению энергозатрат. Поэтому, проблема создания эффективной насадки с пониженным гидродинамическим сопротивлением является актуальной и экономически важной.

Для повышения эффективности технологических показателей насадка должна иметь:

- большую долю свободного объема для достижения высоких гидродинамических показателей (низкого гидродинамического сопротивления, большой пропускной способности);
- развитую удельную геометрическую поверхность для обеспечения высоких массообменных характеристик.

Однако увеличение последней может привести к росту турбулизации газо-жидкостной системы, а, значит – к увеличению гидродинамического сопротивления. Поэтому при разработке новых массообменных контактных элементов необходимо обеспечить оптимальное соотношение между свободным объемом и удельной поверхностью насадки.

В данной статье приводится расчёт удельной поверхности и свободного объема гофрированной насадки, а также устанавливается зависимость этих величин от длины и высоты волны гофров. Кроме того рассматривается влияние этих параметров на изменение гидравлического сопротивления.

Для упрощения задачи будем рассматривать так называемую "сухую" колонну, т.е. без подачи орошения жидкостью. Согласно [1] гидравлическое сопротивление сухой массообменной насадки газовому потоку даётся соотношением:

$$\zeta = \frac{\Delta P_{сyx}}{H_{нас}} \sim \frac{a^{1.2}}{\varepsilon^3}, \tag{1}$$

где $\Delta P_{сyx}$ – перепад давлений на сухой насадке; $H_{нас}$ – высота слоя насадки; a – свободный объем насадки; ε – удельная поверхность насадки.

Параметры a и ε – могут быть рассчитаны, если выбрана форма единичного элемента насадки. Будем рассматривать гофры на боковой (внешней и внутренней) поверхности цилиндра в виде элементов сферы. На рис. 1 представлено сечение такого гофрированного цилиндра (ось цилиндра, x – расположена горизонтально). Примем следующие обозначения: H – длина образующей цилиндра (высота элемента насадки); R_2 – радиус внешнего цилиндра; r_{ex} – радиус внешнего гофра; ϕ_{ex} – половина секторного угла внешнего гофра; R_1 – радиус внутреннего цилиндра; r_{in} – радиус внутреннего гофра; ϕ_{in} – половина секторного угла внутреннего гофра.

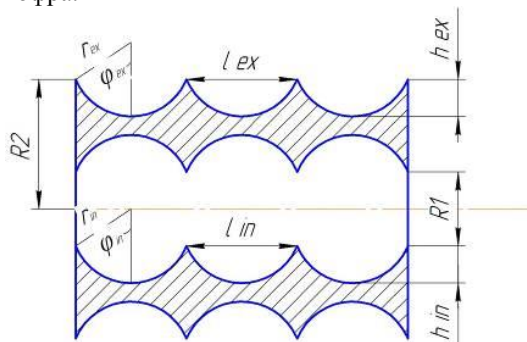


Рисунок 1 – Элемент гофрированной насадки

Площадь поверхности S и объём V одного гофра можно рассчитать по формулам для тел вращения:

$$S = 2\pi \cdot \int_{x_1}^{x_2} f(x) \sqrt{1 + f'^2(x)} dx ; \quad (2)$$

$$V = \pi \cdot \int_{x_1}^{x_2} f^2(x) dx , \quad (3)$$

где $y = f(x)$ – функция, которая описывает линию вращения.

В данном случае, вокруг оси цилиндра (x) 'вращается' элемент окружности (сектор). Для гофра на внешней поверхности цилиндра можно записать:

$$x_0 = r_{ex} \sin(\phi_{ex}) - x - \text{координата центра окружности};$$

$$y_0 = R_2 + r \cos(\phi_{ex}) - y - \text{координата центра окружности};$$

$$f^2(x) = \left[y_0 - \sqrt{r_{ex}^2 - (x - x_0)^2} \right]^2 . \quad (4)$$

Вычисление соответствующих интегралов даёт формулы:

$$S_{ex}^1 = 4\pi r_{ex} (R_2 + r_{ex} \cos \phi_{ex}) \cdot \phi_{ex} - 4\pi r_{ex}^2 \sin \phi_{ex} ; \quad (5)$$

$$V_{ex}^1 = 2\pi r_{ex} \sin \phi_{ex} [(R_2 + r_{ex} \cos \phi_{ex})^2 + r_{ex}^2] + 2\pi / 3 \cdot r_{ex}^3 \sin^3 \phi_{ex} - 2\pi r_{ex}^2 (R_2 + r_{ex} \cos \phi_{ex}) \cdot [\phi_{ex} + \sin \phi_{ex} \cdot \cos \phi_{ex}] . \quad (6)$$

Далее, проводя последовательно вычисления для внутренней и внешней поверхности гофрированного кольца, можно определить соответствующие, занимаемые гофрами площади и свободный от них объём:

$$S_{in} = 2\pi H (R_1 - r_{in} \cos \phi_{in}) \cdot \phi_{in} / \sin \phi_{in} + 2\pi H r_{in} ; \quad (7)$$

$$V_{in} = \pi H \left[(R_1 - r_{in} \cos \phi_{in})^2 + r_{in}^2 \right] + \pi H r_{in}^2 \sin^2 \phi_{in} / 3 + \pi H r_{in} (R_1 - r_{in} \cos \phi_{in}) \cdot [\phi_{in} / \sin \phi_{in} + \cos \phi_{in}] . \quad (8)$$

Полная площадь поверхности и свободный объём цилиндра с гофрами внутри и снаружи равны, соответственно:

$$S_{gofr} = S_{ex} + S_{in} ; \quad (9)$$

$$V_{gofr-free} = V_{free-ex} + V_{free-in} . \quad (10)$$

Далее рассмотрим свободный и удельный объёмы, которые создаются насадкой загруженной в колонну. Если в колонну объёма V_c помещается $n_{gofr-el}$ гофрированных элементов, то общая поверхность этих элементов равна:

$$S_{gofr-el} = n_{gofr-el} \cdot S_{gofr} . \quad (11)$$

Свободный объём в колонне, остающийся после загрузки $n_{gofr-el}$ элементов, равен:

$$V_{free-gofr-col} = n_{gofr-el} \cdot V_{free-el} + (V_{col} - \pi R_2^2 \cdot H \cdot n_{gofr-el}) . \quad (12)$$

В скобках – объём, который остаётся свободным в колонне из-за неплотной упаковки цилиндров высотой H и внешним радиусом R_2 (независимо – есть ли гофры на боковой поверхности, или нет).

Теперь можно выразить искомые параметры a и ε :

$$a_{gofr} = \frac{S_{gofr-el}}{V_{col}} ; \quad \varepsilon_{gofr} = \frac{V_{free-gofr-el}}{V_{col}} . \quad (13)$$

Подставляя полученные соотношения для a и ε в выражение (1) определим отношение $\Delta P_{gofr} / \Delta P_{rash}$ для различных соотношений длины и высоты волны гофрировки. Чтобы сравнить удельную поверхность и свободный объём колец Рашига и гофрированной насадки, будем рассматривать колонны одинакового объёма при условии, что площади поверхности обеих насадок равны. Т.е. число элементов гофрированной насадки $n_{gofr-el}$, необходимой для создания такой площади поверхности в 1 м^3 найдём из равенства:

$$S_{rash-el} = S_{gofr-el} . \quad (14)$$

Результаты расчёта выполнены для колец с наружным диаметром 50 мм, внутренним диаметром 40 мм, высотой кольца 50 мм и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики гофрированной насадки

Высота волны гофров h , мм	Длина волны гофров l , мм	Удельная поверхность 1 элемента насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Число элементов гофрированной насадки	Свободный объём ε , м^{-1}	$\Delta P_{гофр} / \Delta P_{рашиг}$
1,5	1,5	226,19	3820	0,928	0,613
1,5	3	166,91	5176	0,889	0,697
1,5	4,5	158,90	5594	0,871	0,740
1,5	6	154,44	5763	0,857	0,777
0	0	144,00	6000	0,788	1

Аналогичные расчёты были произведены для высоты волны гофрировки равной 0,5 мм, 1 мм, 2 мм. Длина волны при этом бралась в отношении 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4. По полученным результатам были построены графики зависимостей отношения гидравлического сопротивления в колонне с гофрированной насадкой и кольцами Рашига при различных соотношениях длины и высоты гофров (рис. 2).

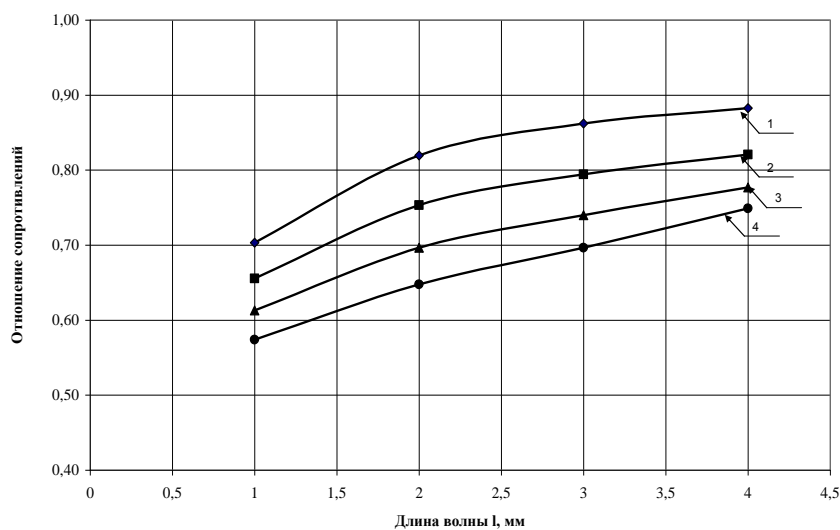


Рисунок 2 – Зависимость отношения гидравлического сопротивления в колонне с гофрированной насадкой к сопротивлению колонны с кольцами Рашига при различных соотношениях длины l и волны h гофра:
 1 – $h = 0,5$ мм; 2 – $h = 1$ мм; 3 – $h = 1,5$ мм; 4 – $h = 2$ мм

Представленные на рис. 2 графики были обработаны методом наименьших квадратов для получения зависимости сопротивления в «сухой» колонне заполненной гофрированной насадкой от величины высоты (h) и длины (l) гофров насадки. В результате обработки данных получена зависимость:

$$\Delta P_{gof} / \Delta P_{rash} = F(h, l) = 1 - A \cdot h^\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot l), \quad (15)$$

где $A = 0,684$, $\alpha = 0,257$, $\beta = 0,436$.

Как видно из рисунка сопротивление "сухой" колонны с гофрированной насадкой всегда меньше сопротивления колонны заполненной кольцами Рашига, при любых соотношениях длины и высоты гофра. Наименьшим сопротивлением обладает насадка с длиной и высотой гофра 2 мм. Следовательно для достижения наименьшего гидравлического сопротивления в колонне, необходимо изготавливать максимально глубокие гофры (ограничение возникает из за толщины стенки) с равной им длиной. Однако, исходя из представленной модели (гофры выполнены в виде полусфер), при таком отношении длины и высоты, гофр будет представлять собой замкнутую сферу. Таким образом, целесообразным является выбор отношения l/h начиная от 1:2 для исключения застойных зон на поверхности гофра.

На основе полученной математической модели были созданы образцы гофрированной насадки для проведения гидродинамических исследований на экспериментальном стенде [2]. Соотношение длины волны и высоты волны гофрировки образцов были следующие: 1:2, 1:3, а высота гофров в одном случае составила 1 мм и 1,5 мм. Изучение гидродинамических характеристик данных насадок проводилось в широком диапазоне значений линейной скорости воздуха – от 0,5 до 2 м/с и плотности орошения – от 0 до 30 м³/(м²час).

На рис. 4 представлен график зависимостей отношения гидравлического сопротивления в колонне с гофрированной насадкой и кольцами Рашига при различных соотношениях длины и высоты гофров при плотности орошения 10 и 20 м³/(м²час).

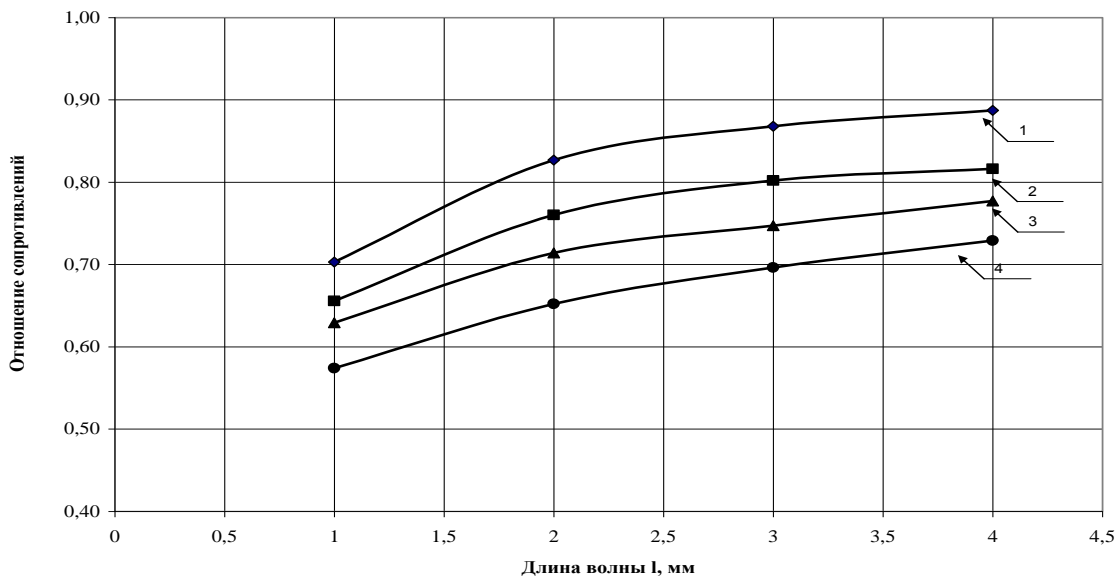


Рисунок 4 – Зависимость отношения гидравлического сопротивления в колонне с гофрированной насадкой к сопротивлению колонны с кольцами Рашига при различных соотношениях длины l и волны h гофра: 1, 2 – высота гофра 1 мм, плотность орошения 20 и 10 м³/м²ч соответственно; 3, 4 – высота гофра 1,5 мм, плотность орошения 20 и 10 м³/(м²час) соответственно

Полученные экспериментальные данные также были обработаны методом наименьших квадратов для получения зависимости отношения гидравлического сопротивления ΔP_{op} к сопротивлению сухой насадки ΔP как функции от высоты и длины гофра. В результате было получено следующее выражение:

$$\Delta P_{gof} / \Delta P_{rash} = F(h, l) = 1 - 0,735 \cdot h^{0,312} \cdot e^{-0,47 \cdot l}. \quad (16)$$

Выводы

1. Разработана математическая модель гофрированной кольцеобразной насадки, позволяющая определить значения удельной поверхности и свободного объема в зависимости от соотношения высоты гофра h и его длины l .

2. На основе полученных расчётных данных, были построены графики зависимостей отношения гидравлического сопротивления "сухой" колонны к сопротивлению такой же колонны с кольцами Рашига. Исходя из данных графиков было определено соотношение, определяющее зависимость гидравлического сопротивления в абсорбционной колонне от соотношения высоты гофра насадки и его длины.

3. На основе разработанной математической модели были изготовлены опытные образцы гофрированной кольцеобразной насадки с различными соотношениями длины и высоты гофров. Данные образцы были использованы для гидродинамических исследований в колонне при орошении жидкостью. Полученные в ходе эксперимента данные подтвердили правильность разработанной модели и были использованы для её уточнения.

Литература

1. Рамм В.М. Абсорбция газов / М.Н. Ратманский.– М.: Химия, 1975.– с. 341–347.
2. В.Л. Голуб Гофрированная винтовая энергосберегающая массообменная насадка и её гидродинамические характеристики / В.Л. Голуб, А.В. Медяник, В.И. Тошинский // Экология и промышленность.– 2011.– №2.– с. 58–63.

УДК 661.25.66.097

Тошинський В.І., Голуб В.Л., Медяник А.В.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГОФРОВАНОЇ КІЛЬЦЕПОДІБНОЇ НАСАДКИ ТА ЇЇ ГІДРОДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ

У статті наводиться математична модель гофрованої кільцеподібної насадки, що застосовується у насадочних масообмінних апаратах. Розглядається вплив висоти і довжини гофров поверхні насадки на гідравлічний опір, що створюється шаром насадки в колоні. На основі отриманої моделі були створені зразки насадок з різними співвідношеннями довжини і висоти гофрів для проведення гідродинамічних випробувань. Отримані експериментальні дані були оброблені для уточнення коефіцієнтів у представленій моделі.

Toshinskiy V.I., Golub V.L., Medyanik A.V.

A MATHEMATICAL MODEL OF A CORRUGATED ANNULAR NOZZLE AND ITS HYDRODYNAMIC TESTING

The article provides a mathematical model of a corrugated annular nozzle used in the packed mass exchange apparatus. The influence of height and length of the corrugations on the surface of the nozzle flow resistance created by a layer of packing in the column. On the basis of the model have been established patterns of nozzles with different ratios of length and height of the corrugations for hydrodynamic tests. The experimental data were processed to clarify the factors in the presented model.