

УДК 66.021.3

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ НАСАДОК  
МАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**Д.Ю. МЫТЬКО, д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ**  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Дана краткая характеристика экологической проблемы, связанной с загрязнением окружающей природной среды, и предложен один из путей ее решения. Приведено описание процесса использования регулярных насадочных элементов для процесса абсорбции и указаны их преимущества. Представлены четыре вида регулярных насадок для проведения эксперимента, а также предложена методика расчета гидравлического сопротивления в зависимости от средней скорости газового потока в аппарате сухих и орошаемых насадочных тел. Приведены графики зависимостей гидравлического сопротивления от скорости газа, полученные методом расчета сухих и орошаемых насадок, и экспериментальных данных. Выполнен анализ взаимодействия фаз и отражены режимы движения пленки жидкости относительно увеличения скорости газа. Выбрано перспективное направление для дальнейшего развития исследований.

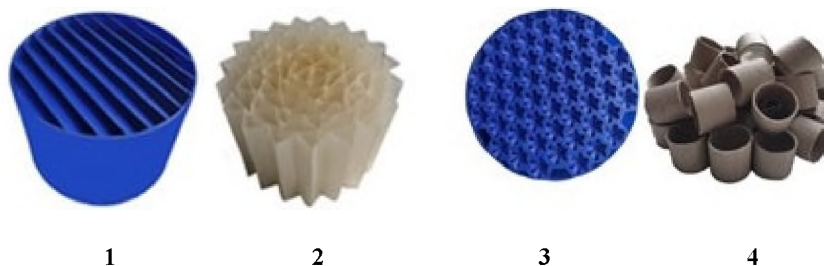
**Ключевые слова:** регулярная насадка, гидравлическое сопротивление, абсорбция, критерий Рейнольдса, инверсия фаз.

**Введение.** С каждым годом содержание в воздухе оксида углерода, диоксида серы, диоксида азота, оксида азота и бензола неуклонно повышается, что актуализирует вопросы, связанные с очисткой отходящих газов после технологического оборудования. Эту проблему можно решить установкой абсорбционной колонны с регулярной структурированной насадкой. Данная насадка позволит увеличить время контакта фаз и повысить эффективность очистки газа [1].

Структурированные насадки обычно выполняются в виде набора отдельных гофрированных листов, собранных в пакеты (блоки), предназначенные для принудительного перемещения жидкостей по определенным траекториям. Сами листы могут быть изготовлены из полимерных, керамических и других материалов. Образующиеся при этом каналы имеют сложную пространственную конфигурацию. Кроме того, структурированные листовые насадки позволяют избежать байпасирования контактирующих потоков из-за присущих насыпным нерегулярным слоям (например, кольцам Рашига) явлений пристенной анизотропии [2].

Регулярная упаковка с упорядоченными каналами обычно предпочтительна для улавливания углеродистых газов, поскольку она обеспечивает более эффективную площадь межфазного контакта между газовой и жидкой фазами [3]. Для данного типа насадок характерен низкий перепад давления, хорошая эффективность массопереноса и высокая производительность. Важными свойствами оптимальной упаковки, являются высокая эффективная площадь, равномерное распределение жидкости, хорошее смешивание фаз, низкий перепад давления и структура, состоящая из материала небольшой толщины [4].

**Основная часть.** Для проведения экспериментального исследования были выбраны три регулярные структурированные насадки (рисунок 1): волнообразная, сотообразная с завихрителями, зигзагообразная и одна неструктурированная – неупорядоченно уложенные кольца Рашига.



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

Рисунок 1. – Насадки для массообменных аппаратов

Исследования проводились на лабораторной абсорбционной установке с внутренним диаметром массообменного аппарата  $D_{\text{вн}} = 0,142$  м на системе воздух-вода. Расход воздуха замерялся через диафрагму, связанную с дифманометром. Перепад давления измерялся дифманометром. Для эксперимента были выбраны три плотности орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ : 0,003; 0,0036; 0,0043.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки  $\Delta P_{\text{сух}}$ , Па/м, рассчитывают следующим образом [5–8]:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \frac{H \cdot \xi_0 \cdot w^2 \cdot \rho_r \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота насадки, м;  
 $\xi_0$  – эффективный коэффициент трения;  
 $w$  – средняя скорость газа в колонне, м/с;  
 $\rho_r$  – плотность газовой смеси при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;  
 $a$  – удельная поверхность насадки м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $\varepsilon$  – удельный свободный объем насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 Для регулярных насадок эффективный коэффициент трения определяется по формуле

$$\xi_0 = \xi_{\text{тр}} + \zeta \cdot \frac{d_{\text{экв}}}{l}, \quad (2)$$

где  $\xi_{\text{тр}}$  – коэффициент сопротивления трения, равный 0,053 в автомодельном режиме;  
 $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  
 $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр насадки;  
 $l$  – высота элемента насадки.  
 Коэффициент местного сопротивления для регулярных насадок

$$\zeta = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (b - c \cdot \varepsilon) = \frac{b}{\varepsilon^2} - \frac{b + c}{\varepsilon} + c, \quad (3)$$

где  $b = 4,2$  и  $c = 3,9$  – коэффициенты, принятые для блочной насадки.

Критерий Рейнольдса для газа рассчитывают по действительной скорости газа и эквивалентному диаметру насадки:

$$\text{Re}_r = \frac{w_d \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_r}, \quad (4)$$

где  $w_d$  – действительная скорость газа, м/с;  
 $\nu_r$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с.  
 Действительная скорость газа определяется по формуле

$$w_d = \frac{w}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Эффективный коэффициент трения для колец:

– при ламинарном режиме ( $\text{Re}_r < 40$ )

$$\xi_0 = \frac{140}{\text{Re}_r}; \quad (6)$$

– при турбулентном режиме ( $\text{Re}_r > 40$ )

$$\xi_0 = \frac{16}{\text{Re}_r^{0,2}}. \quad (7)$$

Удельная поверхность насадки определяется из формулы

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{\Phi \cdot d_0}, \quad (8)$$

где  $\Phi$  – коэффициент формы;

$d_0$  – диаметр эквивалентного шара, м:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_1}{\pi}}, \quad (9)$$

где  $V_1$  – объем насадочного тела.

Удельный свободный объем насадки вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{n \cdot V_{н.т.}}{V_n}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество насадочных тел;

$V_{н.т.}$  – объем насадочного тела, м<sup>3</sup>;

$V_n$  – объем насадки, м<sup>3</sup>.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки можно определить из выражения [9–10]

$$\Delta P = \Delta P_{сух} \left[ 1 + B \cdot \left( \frac{L}{G} \right)^n \cdot \left( \frac{\rho_r}{\rho_j} \right)^m \cdot \left( \frac{\mu_j}{\mu_r} \right)^c \right], \quad (11)$$

где  $B, n, m, c$  – постоянные для системы газ-жидкость;

$L$  – расход абсорбента, м<sup>3</sup>/с;

$G$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_j$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_j$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\mu_r$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

В формуле (11) выполнен переход от плотности орошаемой жидкости и средней скорости газового потока в сечении аппарата к общему объемному расходу абсорбента и газа. Данный перевод выполнен для более точного определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

Основные параметры насадок, рассчитанные по формулам (1–11), представлены в таблице.

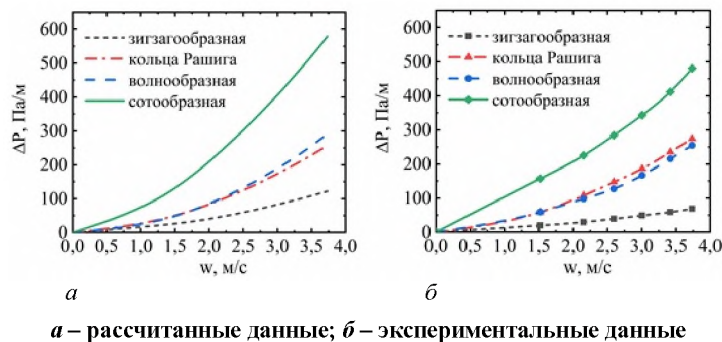
Таблица. – Характеристики насадок

Параметры	Насадки			
	Волнообразная	Зигзагообразная	Сотообразная	Кольца Рашига
$w_d$	1,758	1,877	8,988	1,720
$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,864	0,809	0,771	0,883
$\alpha, \text{м}^2/\text{м}^3$	256,44	394,491	369,94	241,152
$d_0, \text{м}$	0,074	0,083	0,088	0,071

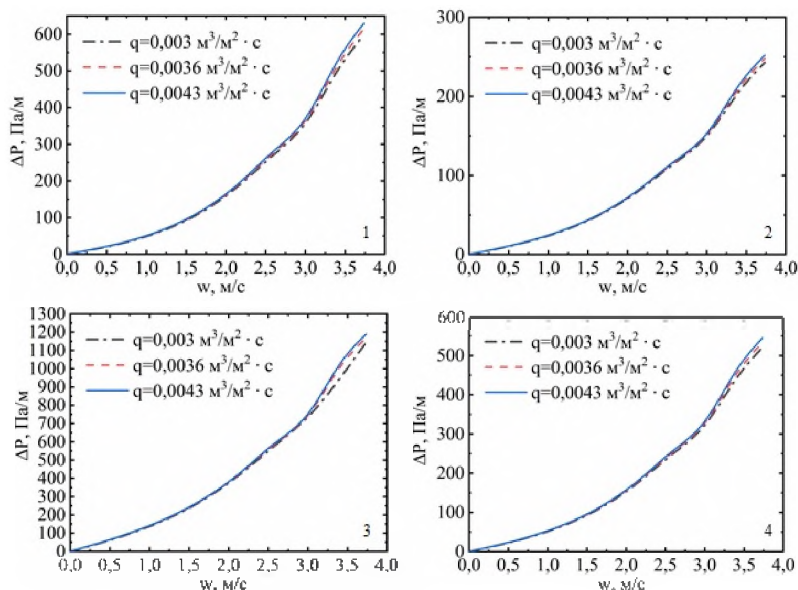
Действительная скорость газа в канале сотообразной насадки высока. Это связано с небольшим значением площади живого сечения. Зигзагообразная насадка обладает наивысшей удельной поверхностью по сравнению с другими насадочными телами. Высокий показатель  $\alpha, \text{м}^2/\text{м}^3$ , позволяет увеличить контакт между жидкой и газообразной фазой тем самым повысить эффективность массопередачи. Пропускная способность колец Рашига является достаточно хорошей из-за наибольшего свободного объема среди исследуемых насадочных тел. Это дает преимущество в снижении гидравлического сопротивления. Для более точного расчета удельной поверхности важным параметром является диаметр эквивалентного шара. Его увеличение приводит к уменьшению площади тела, занимаемого в единице объема.

На рисунках 2, а и 3 изображены графические зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа в колонне, полученные расчетным путем. На рисунке 2, б – экспериментальные данные.

По рисункам 2, а и 2, б видно, что гидравлическое сопротивление сотообразной насадки является самым высоким, что связано с небольшим живым сечением насадки, а также с тем, что на входе и выходе каналов установлены завихрители, меняющие направление движения воздуха. В результате образуются вихри, которые двигаются тангенциально по отношению к поперечному сечению канала.



**а** – рассчитанные данные; **б** – экспериментальные данные  
**Рисунок 2.** – Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м, от средней скорости газа  $w$ , м/с, в колонне без орошения жидкостью



**1** – зигзагообразная насадка; **2** – кольца Рашига;  
**3** – волнообразная насадка; **4** – сотообразная насадка  
**Рисунок 3.** – Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м, от средней скорости газа  $w$ , м/с, в колонне при орошении жидкостью насадок

На всех графиках просматриваются гидродинамические режимы взаимодействия фаз, при которых работает регулярная насадка с увеличением средней скорости газа в колонне. Нужно отметить, что диапазон изменения гидравлического сопротивления при трех плотностях орошения незначительный. Это обусловлено относительно небольшой разницей в выбранном расходе абсорбента.

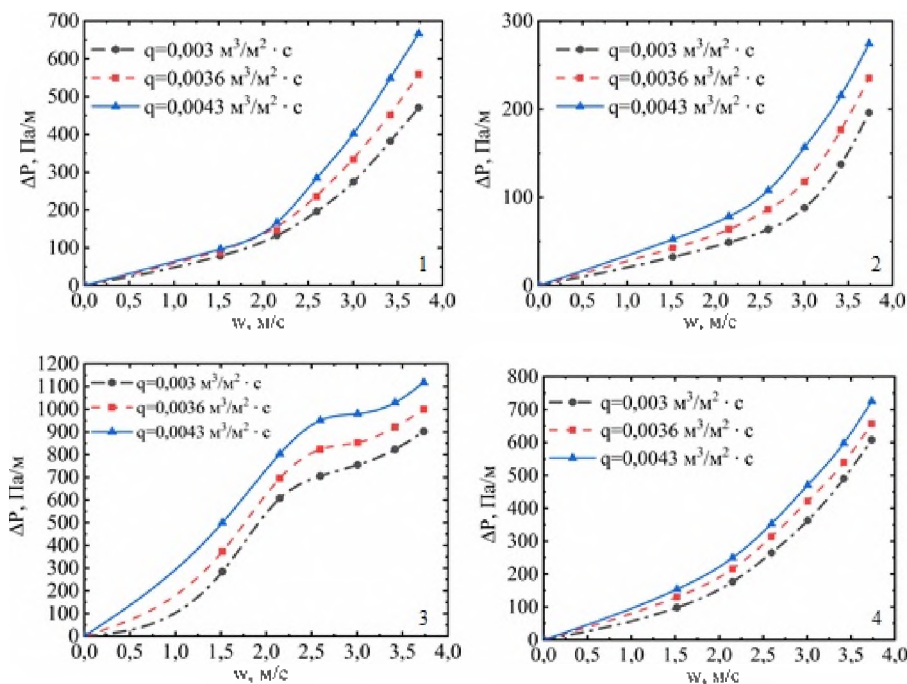
Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления орошаемых насадок представлены на рисунке 4.

При невысоких скоростях газа и небольших плотностях орошения на первоначальных этапах проведения процесса (рисунок 4) наблюдается пленочный режим, в котором отсутствует влияние газового потока на скорость стекания жидкой пленки, и, следовательно, на количество удерживаемой в насадке жидкости. Пленочный режим заканчивается при достижении скорости газа в колонне примерно 1,5 м/с.

С повышением скорости газа наблюдается режим подвисяния, в котором скорость движения пленки по стенкам насадки снижается за счет увеличения сил трения между жидкостью и газом. Соответственно, увеличивается толщина пленки и количество удерживаемой жидкости. Режим подвисяния заканчивается при достижении скорости примерно 1,5–2,0 м/с.

При дальнейшем увеличении скорости возникает режим эмульгирования. В результате происходит накопление жидкости в свободном объеме насадки, где жидкость находится в подвешенном состоянии, за счет уравнивания сил тяжести и трения. При этом наступает обращение, или инверсия, фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной). Проявление этого режима можно наблюдать в интервале скоростей 2,0–2,5 м/с. Преимуществом этого и предыдущего режимов является хорошая смачиваемость насадки, за счет образующихся завихрений и брызг, а также высокая интенсивность массопередачи.

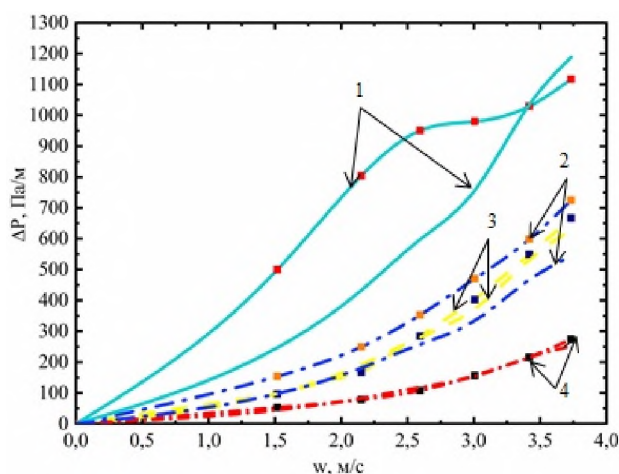
При скоростях от 2,5 м/с до 3,0 м/с наблюдается унос жидкости из аппарата.



1 – зигзагообразная насадка; 2 – кольца Рашига;  
3 – волнообразная насадка; 4 – сотовая насадка

Рисунок 4. – Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м, от средней скорости газа  $w$ , м/с, в колонне при разных плотностях орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , насадок

Сравнение гидравлического сопротивления орошаемых насадок при максимальной плотности орошения  $q = 0,0043$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , полученного экспериментальным путем (линии с указанными точками) и рассчитанного по формулам (1)–(11) (сплошные линии без точек) представлено на рисунке 5.



1 – сотовая насадка; 2 – кольца Рашига;  
3 – волнообразная насадка; 4 – зигзагообразная насадка

Рисунок 5. – Сравнительная зависимость экспериментального и рассчитанного гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м от средней скорости газа  $w$ , м/с в колонне при максимальной плотности орошения  $q = 0,0043$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  насадок

Видно, что расхождение экспериментальных и расчетных значений сотовой насадки существенны. Оно достигает до 37,9%. Эта разница является достаточно высокой. Такой процент можно аргументировать скоплением большого количества жидкости над завихрителями насадки. Эта конструктивная

особенность не учтена в рассмотренной ранее методике расчета. Достаточно большое (до 25%) несоответствие расчетных и экспериментальных значений гидравлического сопротивления наблюдается и для колец Рашига. Этот факт можно также объяснить несовершенством методики расчета, которая, в основном, ориентирована на регулярную насадку. Последнее подтверждается хорошей сходимостью (отклонение не превышает 8%) для регулярной волно- и зигзагообразной насадок.

**Заключение.** В результате изучения гидродинамических характеристик установлено, что гидравлическое сопротивление волно- и зигзагообразной насадок сопоставимо и даже ниже, чем у колец Рашига. Более высокое его значение для сотообразной насадки свидетельствует о необходимости ее конструктивного совершенствования. В итоге нужно отметить, что из всех четырех насадок самым низким гидравлическим сопротивлением обладает зигзагообразная насадка. Она является перспективным вариантом для дальнейшей оптимизации с целью интенсификации технологических процессов, а именно: формирование режимов с регулярными гидродинамическими структурами при течении тонких слоев жидкости в условиях волнообразования, создания искусственной шероховатости поверхности насадок с определенным соотношением ее геометрических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мамбетова, М.Ж. Очистка и сорбция токсичных газов / М.Ж. Мамбетова [и др.] // Химический журнал Казахстана. – 2016. – № 3. – С. 162–173.
2. Пушнов, А. Аэродинамика керамических регулярных насадок для теплообменных процессов в аппаратах защиты окружающей среды / А. Пушнов, А. Сакалаускас // Journal of environmental engineering and landscape management. – 2008. – № 16(1). – С. 30–37.
3. Miramontes, E. Additively Manufactured Packed Bed Device for Process Intensification of CO<sub>2</sub> Absorption and Other Chemical Processes / E. Miramontes [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2020. – С. 1–38.
4. Jokar, S.M. Simulation and feasibility analysis of structured packing replacement in absorption column of natural gas dehydration process: A case study for Farashband gas processing plant, Iran / S.M. Jokar [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2014. – С. 317–350.
5. Рамм, В.М. Абсорбция газов. / В.М. Рамм. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
6. Малков, М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Малков [и др.]; под ред. М.П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
7. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
8. Флореа, О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. / О. Флореа, О. Смигельский. – М.: Химия, 1971. – 448 с.
9. Никольский, Б.П. Справочник химика: в 5 т. / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин. – М.: Химия, Ленинское отделение, 1968. – 976 с.
10. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2-х кн. / Н.И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

Поступила 09.07.2020

#### HYDRAULIC RESISTANCE OF REGULAR ATTACHMENTS OF MASS EXCHANGE DEVICES

P. VAJTEHOVICH, D. MYTSKO

*A brief description of the environmental problem associated with environmental pollution is given, and one of the ways to solve it is proposed. The process of using regular packing elements for the absorption process is described and their advantages are indicated. Four types of regular nozzles for the experiment are presented, and a method for calculating the hydraulic resistance depending on the average gas flow rate in the apparatus of dry and irrigated nozzle bodies is proposed. Graphs of the dependence of hydraulic resistance on gas velocity obtained by calculating dry and irrigated nozzles and experimental data are presented. The analysis of the interaction of phases is performed and the modes of motion of the liquid film relative to the increase in the gas velocity are reflected. A promising direction for further development of research has been chosen.*

**Keywords:** regular nozzle, hydraulic resistance, absorption, Reynolds criterion, phase inversion.