

О возможности использования керамических высокопористых
блочно-ячеистых материалов в качестве контактных сорбционно-
фильтрующих элементов

М. Д. Гаспарян^{1,*}, В. Н. Грунский^{1,*}, М. Г. Давидханова^{1,*},
Р. И. Григоренко^{1,*}

¹РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены структурно-физические характеристики носителей на основе керамических высокопористых блочных материалов ячеистой структуры, обеспечивающих сорбционно-фильтрующие свойства контактных элементов. Описаны методы определения внешней удельной объемной поверхности, газодинамического сопротивления и газопроницаемости. Показана их взаимосвязь и оптимальное сочетание с эксплуатационными характеристиками фильтров-сорбентов в процессах улавливания летучих соединений йода и цезия в газовых потоках. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза контактных элементов нового класса и создания на их основе высокоэффективных систем газоочистки, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред.

Ключевые слова

Керамические высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), носители контактных элементов, эквивалентный диаметр ячейки, общая пористость, внешняя удельная объемная поверхность, газодинамическое сопротивление, газопроницаемость, фильтр-сорбент, эффективность очистки, сорбционная емкость

Введение. Уникальные структурно-физические характеристики керамических высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) обусловлены геометрической формой и вещественным составом керамического каркаса, получаемого методом дублирования структуры прекурсора – ретикулированного пенополиуретана (ППУ). Регулируемые при синтезе размеры перемычек и узлов

ячеек создают чрезвычайно высокую общую пористость (до 95%) и доступную внешнюю объемную поверхность (до 3500 м²/м³ и выше в зависимости от плотности пор исходного ППУ) [1]. Высокоглиноземистый, как правило, состав керамики в процессе твердофазного обжига и деструкции полимерной матрицы придает материалу высокую прочность на сжатие (свыше 2,0 МПа) и

* Для переписки

Email addresses: migas56@yandex.ru, oxt@muctr.ru, maria@muctr.ru, alla.komarova@me.com, roman.grigorenko2016@yandex.ru, alexeydubko1994@gmail.com

химическую стойкость. Данные характеристики, в свою очередь, обеспечивают повышенные эксплуатационные свойства полученных носителей и контактных элементов на их основе в процессах сорбционной фильтрации газовых сред: низкое газодинамическое сопротивление, высокую эффективность очистки и сорбционную емкость по нейтрализуемым вредным компонентам в высокотемпературных и агрессивных газовых потоках.

Перечисленные физические и эксплуатационные характеристики взаимно связаны с первичными структурными характеристикам блочно-ячеистых контактных элементов, к которым относятся эквивалентный диаметр ячейки и общая пористость. Уменьшение эквивалентного диаметра ячеек и пористости увеличивает внешнюю поверхность и механическую прочность на сжатие. При этом одновременно повышаются массообменные характеристики и газодинамическое сопротивление. Разработка блочных фильтров-сорбентов ячеистой структуры постоянно требует находить оптимальные сочетания первичных структурных характеристик с их вторичными свойствами.

Методы определения основных структурно-физических характеристик керамических ВПЯМ.

Важнейшие характеристики, определяющие эффективность работы контактных элементов на основе ВПЯМ: внешняя объемная поверхность нанесенного на керамический каркас сорбционно-активного слоя, газодинамическое сопротивление и газопроницаемость,

Доступная удельная внешняя объемная поверхность представляет собой внешнюю поверхность контактных элементов, находящихся в единице объема – количественная оценка компактности материала. Для ее расчета предложен целый ряд зависимостей, основанных на

различных структурных моделях ячейки ВПЯМ. Наиболее распространена модель ВПЯМ (или пенокерамики) в виде тетракайдекаэдра (ТТКД), для которой предложено несколько вариантов расчета.

Согласно источнику [2] величина внешней поверхности S_v зависит от радиуса порового канала r_k , толщины перемычки δ – и параметров макроструктуры A , B и C :

$$S_v = \frac{3}{5C \cdot r_k} \times [(r_k - \delta)^2 \cdot A + 2\delta \cdot B \cdot r_k - 6\delta^2 \cdot r_k]. \quad (1)$$

В работе [3] выведено эмпирическое уравнение:

$$S_v = 3,84 \cdot d_{яч}^{0,85} \cdot \varepsilon^{0,82}. \quad (2)$$

Эквивалентный диаметр ячейки в блоках ячеистой структуры связан со средним диаметром ячейки уравнением [4]:

$$d_{яч} = 0,55d_{\sigma}^{1,5}. \quad (3)$$

Газодинамическое (или гидравлическое) сопротивление из-за отсутствия надежных методов расчета часто определяют экспериментально.

Исследование газодинамических свойств блочных носителей ячеистой структуры в [5] выполнено с учётом ряда важных требований, основное из них – соблюдение минимального размера поперечного сечения образца, перпендикулярного потоку фильтруемой среды. Диаметр испытуемых цилиндрических образцов D_o удовлетворял условию из [4]:

$$D_o \geq 25d_{яч}. \quad (4)$$

В [6] приведена аппроксимационная зависимость:

$$\Delta P/L = \alpha \mu u + \beta \rho u^2, \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость среды, ρ – плотность фильтруемой среды, u – скорость газа, α и β – вязкостный и инерционный коэффициенты газодинамического сопротивления. Их связь со

структурными параметрами, определенная в [7] на основе продувок воздухом цилиндрических образцов ВПЯМ ($D_b = 15$ и 40 мм, высотой $h = 9,9-18,1$ мм; диаметром ячейки $d_{яч} = 0,62-2,17$ мм, общей пористостью $\Pi = 0,87-0,97$), представлена в виде:

$$\alpha = 6,61 \cdot 10^7 \cdot D_{ок}^{-1,98} \Pi^{4,75}, \quad (6)$$

$$\beta = 5,16 \cdot 10^2 \cdot D_{ок}^{-1,07} \Pi^{1,16}. \quad (7)$$

В [4] в качестве структурного параметра, определяющего, наряду с диаметром окна $D_{ок}$, газодинамическое сопротивление ВПЯМ, в выражениях (6) и (7) использовали величину макропористости Π_m , полагая, что сопротивление зависит не от всей величины суммарной пористости Π , включающей также канальную пористость Π_k и микропористость стенок перемычек:

$$\Pi_m = \Pi - (\Pi_k + \Pi_{мик}). \quad (8)$$

В результате получены эмпирические формулы для расчёта α и β :

$$\alpha = 45,56 D_{ок}^{-2} \Pi_m^{0,94}, \quad (9)$$

$$\beta = k_n \cdot 0,24 \cdot D_{ок}^{-1} \Pi_m^{13,06}. \quad (10)$$

Переменный коэффициент k_n учитывает направление потока фильтруемой среды по отношению к осям ячеек, причём $k_n = 1,31$, когда поток перпендикулярен длинным осям ячеек и $k_n = 1$, когда поток параллелен длинным осям ячеек. Нерегулярная структура ВПЯМ обеспечивает турбулентность газовых потоков [8].

В [9], исходя из принятой модели ячейки ТТКД, предложена корреляция

для расчёта гидравлического сопротивления, отнесенного к высоте слоя пенокерамики (L_0):

$$\frac{\Delta P}{L_0} = \frac{\alpha S_v^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u + \frac{\beta S_v (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho u^2, \quad (11)$$

Параметры α и β здесь выраены как:

$$\alpha = 973 d_{яч}^{0,743} (1 - \varepsilon)^{-0,0982}, \quad (12)$$

$$\beta = 368 d_{яч}^{-0,7523} (1 - \varepsilon)^{0,07158}. \quad (13)$$

В [10] было выполнено сравнение экспериментальных и рассчитанных данных по гидравлическому сопротивлению высокопористых ячеистых материалов, показавшее, что последнее уравнение дает погрешность 47–57 %. Для оценочных расчетов предложено скорректированное уравнение:

$$\frac{\Delta P}{L_0} = 1,275 \cdot 10^9 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu u}{d_{яч}^{-0,05}} + 1,89 \cdot 10^4 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho u^2}{d_{яч}^{-0,25}} \quad (14)$$

В [11] по результатам обработки экспериментальных данных, пришли к выводу, что в уравнении (14) необходимо изменить коэффициенты перед первым и вторым слагаемыми на: $1,08 \cdot 10^{10}$ и $3,74 \cdot 10^4$, соответственно.

Удельная внешняя объемная поверхность сорбционно-фильтрующего слоя ячеистой структуры имеет наибольшую величину в сравнении с организованным слоем (сотовая структура) и с неорганизованным насыпным слоем гранул. На рис. 1 представлены рассчитанные значения внешней объемной поверхности слоев различной структуры.

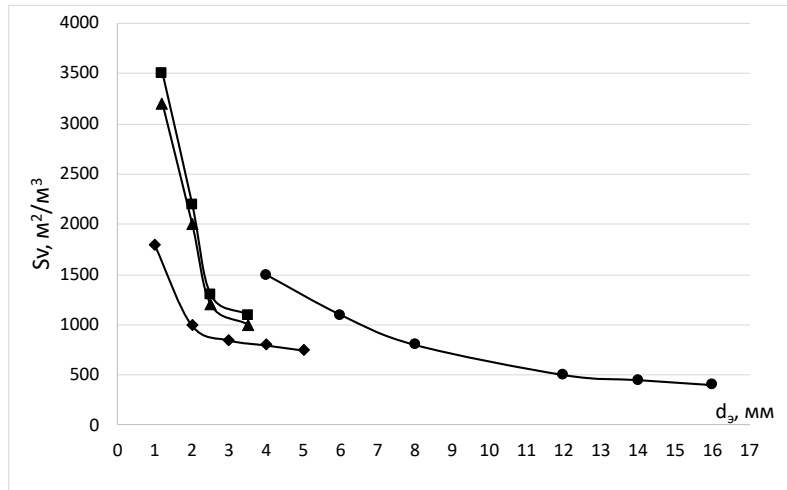


Рисунок 1 – Зависимость внешней удельной объемной поверхности от эквивалентного диаметра для контактных элементов различной структуры:

■ – ВПЯМ, $\epsilon = 0,88$; ▲ – ВПЯМ, $\epsilon = 0,80$; ◆ – соты с общей пористостью $\epsilon = 0,59$;
● – гранулы, $\epsilon = 0,30$

Изменение эквивалентного диаметра ячейки, гранулы или соты оказывает большое влияние на изменение удельной внешней поверхности фильтрующего слоя, особенно в диапазоне $d_{э} = 1,0-3,0$ мм.

Для экспериментального исследования газодинамического сопротивления керамических блочно-ячеистых носителей контактных элементов при различных скоростях газа были отобраны образцы

с плотностью пор 45 и 30 ppi. Контактные элементы с данными параметрами ячеек наиболее часто используются в газофазных сорбционно-каталитических процессах. Их характеристики (h – высота, m – масса, S – площадь сечения, V – объем блоков, $\rho_{каж}$ – кажущаяся плотность, $P_{общ}$ – общая пористость) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики испытанных образцов

Мелкоячеистый высокопористый керамический носитель $d_{яч}=1-2$ мм ($d_{ср}=1,5$ мм), плотность пор 45 ppi						
№	h , см	m , г	S , см ²	V , см ³	$\rho_{каж}$, кг/м ³	$P_{общ}$, %
1	5	24,75	15,9	79,5	0,31	92,2
2	5	26,71			0,34	91,6
3	5	24,91			0,31	92,1
4	5	27,48			0,35	91,3
5	5	26,88			0,34	91,5
6	5	26,79			0,34	91,6
Крупноячеистый высокопористый керамический носитель $d_{яч}=2-4$ мм ($d_{ср}=3$ мм), плотность пор 30 ppi						
1	5	24,80	15,9	79,5	0,31	94,9
2	5	21,60			0,27	94,2
3	5	25,40			0,32	95,1

Определение газодинамического сопротивления высокопористых керамических носителей и пакетов, составленных из отдельных образцов носителей цилиндрической формы, проводили в аэродинамической трубе (внутренний диаметр 45 мм, длина 400 мм). Расход воздуха обеспечивал предельную линейную скорость течения среды 2,3 м/с. Отсутствие искусственного выравнивания потока по сечению аэродинамической трубы не имеет решающего значения, поскольку при встрече со средой испытываемые образцы, по сути своей, являются насадками для распределения и выравнивания газового потока.

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерений перепада давления для пакетов носителей с плотностью пор 45 ррi и последовательно наращиваемым количеством блоков от одного до шести и носителей с плотностью пор 30 ррi – от одного до трех.

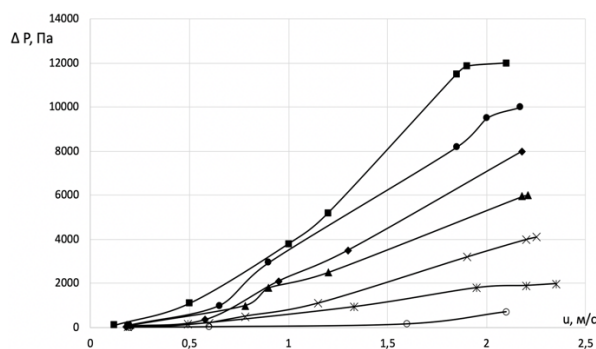


Рисунок 2 – Зависимость газодинамического сопротивления носителей контактных элементов с плотностью пор 45 ррi от скорости газового потока:
ж – 1 носитель; х – 2 носителя; ▲ – 3 носителя; ◆ – 4 носителя; ● – 5 носителей; ■ – 6 носителей; ○ – литературные данные [4]

Параметры образцов, использованных авторами работы [4], отличаются от

полученных нами (в частности, образцы имеют другие диаметр и высоту), однако из рис. 2 видно, что все зависимости $\Delta P = f(u)$ имеют общую тенденцию повышения перепада давления от скорости и количества составных модулей. Аналогичная картина наблюдается для образцов носителей с плотностью пор 30 ррi (рис. 3) на более высоком уровне газодинамического сопротивления (в 3 – 5 раз).

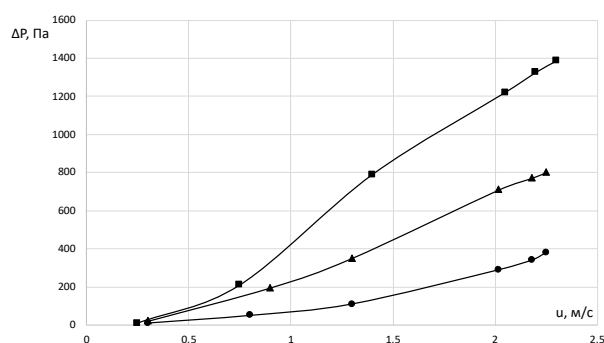


Рисунок 3 – Зависимость газодинамического сопротивления носителей контактных элементов с плотностью пор 30 ррi от скорости газового потока:
● – 1 носитель; ▲ – 2 носителя;
■ – 3 носителя

На рис. 4 выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных по газодинамическому сопротивлению мелкоячеистых ($d_a = 0,50-1,00$ мм) носителей контактных элементов на основе ВПЯМ в диапазоне скоростей 1,0 – 7,0 м/с.

Расчет ΔP при фильтрации воздуха по уравнению (15) с коэффициентами перед первым и вторым слагаемыми $1,08 \cdot 10^{10}$ и $3,74 \cdot 10^4$ дает лучшую сходимость с экспериментальными данными, чем расчет по уравнению (11).

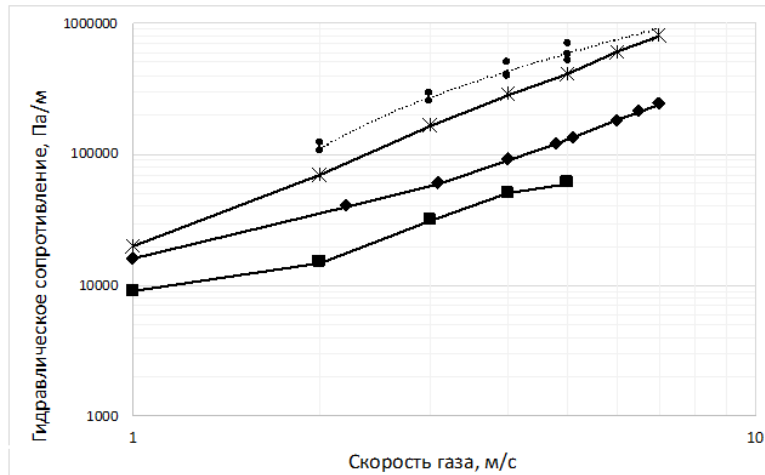


Рисунок 4 – Зависимость газодинамического сопротивления слоя блочного высокопористого носителя ячеистой структуры от скорости воздуха: \blacklozenge – расчет по уравнению (14), $d_{я} = 1,0$ мм, $\varepsilon = 0,8$; \blacksquare – экспериментальные данные, $d_{я}=1,2$ мм, $\varepsilon = 0,85$; \times – расчет по уравнению (11), $d_{я}=1,0$ мм, $\varepsilon = 0,8$; \bullet – литературные экспериментальные данные [13] ($d_{я}$ и ε не указаны)

Обсуждение полученных результатов.

Сетчато-ячеистая структура и свободно доступные открытые поры ВПЯМ делают их одинаково проницаемыми для потока в любом направлении, чего нет в блочных сотовых и гранулированных носителях контактных элементов. Постоянное изменение направления потока в макропорах турбулизует поток реагентов, ликвидирует застойные зоны. Однородная открытая ячеистая структура ВПЯМ обеспечивает возможность активного массообмена во всем свободном объеме материала. Оптимальное сочетание взаимосвязанных структурных и эксплуатационных характеристик открывает большие перспективы использования высокопористых ячеистых носителей (ВПЯН) в различных процессах, сопряженных с явлениями переноса, в частности, в хемосорбции.

Опыт применения керамических высокопористых блочно-ячеистых контактных элементов в процессах локализации летучих радионуклидов на высокотемпературных переделах переработки

облученного ядерного топлива подтверждает это положение. С учетом небольших скоростей газовых потоков в этих процессах (0,05–0,5 м/с) были выбраны отмеченные выше оптимальные размеры ячейки керамического каркаса блочных фильтров-сорбентов $d_{яч} = 0,5–1,3$ мм (30 и 45 ppi). Организованный из контактных элементов диаметром 45 мм сорбционно-активный слой высотой до 135 мм в указанном диапазоне скоростей очищаемого воздуха имеет минимальное газодинамическое сопротивление, на уровне незаполненного реактора [13]. Внешняя удельная поверхность для блоков с плотностью пор 30 ppi составляет в среднем $1500 \text{ м}^2/\text{м}^3$, для блоков 45 ppi – $2100 \text{ м}^2/\text{м}^3$. В данном случае применение ВПЯМ с большим размером ячейки (плотность пор < 30 ppi) нецелесообразно в связи со значительным снижением внешней объемной поверхности и большей вероятности проскока газообразных радионуклидов. Увеличение плотности пор выше 45 ppi приводит к резкому возрастанию газодинамического сопротивления.

Например, фильтры-сорбенты на основе блочных ВПЯМ для улавливания летучих соединений йода с нанесенным активным слоем AgNO_3 [14] имеют преимущества перед применяемыми на радиохимических производствах гранулированным силикагелем или алюмогелем, пропитанными также нитратом серебра. В гранулированных сорбентах эффективно работает до 70% AgNO_3 (импрегнированного в количестве 7-10 % масс. от массы носителя), а у блочно-ячеистых сорбентов работает практически весь нанесенный на развитую внешнюю поверхность активный слой в количестве до 15–20 % масс. AgNO_3 . В результате в несколько раз повышается емкость контактных элементов: до 0,09 г I_2 /г сорбента и до 0,068 г CH_3I /г сорбента.

Динамическая емкость практически пропорциональна количеству нанесенного нитрата серебра. При температуре процесса 190°C эффективность очистки по метилйодиду и молекулярному йоду достигает 99,20 % для образцов с плотностью пор 30 ppi и 99,97 % для образцов с плотностью пор 45 ppi.

Блочно-ячеистые контактные элементы на основе ВПЯМ с активным слоем из аморфных $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и SiO_2 [15] имеют высокую сорбционную емкость по оксиду цезия, определенную в процессе высокотемпературной хемосорбции (при $t = 700\text{--}1000^\circ\text{C}$) при кальцинации CsNO_3 . В статических условиях сорбционная емкость при степени использования активного слоя 85–100 % составляет 0,07 – 0,32 г Cs_2O /г сорбента. По сравнению с применяемыми в настоящее время фильтрами из пористых неорганических материалов (ПНМ) при сравнимых емкости и эффективности у блочно-ячеистых фильтров-сорбентов в 1,5–2 раза снижены массогабаритные характеристики.

Заключение

Проведенные исследования показали, что сорбционно-фильтрующие контактные элементы на основе керамических блочных ВПЯМ имеют в 2–3 раза большие доступную внешнюю удельную поверхность, общую пористость и время контакта с очищаемыми газовыми потоками по сравнению с гранулированными, при этом кажущаяся плотность и газодинамическое сопротивление сорбционного слоя в 2–3 раза меньше.

Такие показатели структурно-физических характеристик обеспечивают динамическую емкость сорбентов при практически полном использовании внешней поверхности их активного слоя для повышенных в такой же степени удельных нагрузок по реакционным газовым потокам, что обуславливает уменьшение конструктивных габаритов реакторов, снижение их металлоемкости и капитальных затрат.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки и проектирования высокоэффективных систем газоочистки, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред, с применением расчетного объема контактных элементов на основе керамических ВПЯМ с заданным оптимальным соотношением газодинамических и массообменных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Беспалов А.В., Давидханова М.Г., Кабанов А.Н., Лукин Е.С., Попова Н.А., Харитонов Н.И. Синтез полифункциональных высокопористых блочно-ячеистых материалов на основе оксидной керамики. Огнеупоры и техническая керамика, 2016, № 6, с.3–8.

- [2] Кулаков С.В. Моделирование структуры высокопористых ячеистых материалов. Перспективные материалы, 2000, № 3, с. 22-26.
- [3] Incera Garrido G. Mass and momentum transfer upon flow through solid sponges: Dissertation (PhD thesis). University of Karlsruhe. 2009. 162 p.
- [4] Анциферов В.Н., Беклемышев А.М., Гилев В.Г., Порозова С.Е., Швейкин Г.П. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. II. Высокопористые проницаемые материалы. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 262 с.
- [5] Тищенко С. В., Козлов А. И., Грунский В. Н., Беспалов А. В. Гидравлическое сопротивление шликерного ВПЯМ. Химическая промышленность сегодня, 2005, №2, с. 42 – 51.
- [6] Белов С.В. Пористые материалы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
- [7] Гортышев Ю.Ф., Муравьев Г.Б., Надьров И.Н. Экспериментальное исследование течения и теплообмена в высокопористых структурах. Инженерно-физический журнал, 1987, Т. 53. № 3, с. 75 – 83.
- [8] Анциферов В.Н., Филимонова И.В., Фионов А.В. Поверхностные свойства покрытия из гамма-оксида алюминия на высокопроницаемых ячеистых материалах. Кинетика и катализ, 2002, Т. 43, № 5, с.788–793.
- [9] Richardson J.T., Peng Y. and Remue D., Properties of Ceramic Foam Catalyst Supports: Pressure Drop, Applied Catalysis A General, 2000, vol.204, pp.19–31
- [10] Moreira E.A., Coury J.R. The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004, vol.21, № 1, pp. 23–33
- [11] Беспалов А.В., Татарина И.Н., Прокудин С.В., Грунский В.Н., Козлов А.И., Расчёт гидравлического сопротивления ВПЯМ для газофазных процессов. Химическая промышленность сегодня. 2006, № 2, с. 44-49.
- [12] Анциферов В.Н., Макаров А.М., Остроушко А.А. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. VII. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы – перспективные носители катализаторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 228 с.
- [13] Grunskii, V.N., Davidkhanova, M.G., Gasparyan, M.D., Zolotukhin, S.E. Potential Application in Heterogeneous Catalysis of Polyfunctional Contact Elements Based on Highly Porous Permeable Network Ceramics. Fibre Chemistry, 2019, vol.51, № 4, pp. 240–243.
- [14] Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Магомедбеков Э.П., Беспалов А.В., Игнатов А.В., Лебедев С.М. Локализация радиоактивного йодистого метила на керамических сорбентах. Огнеупоры и техническая керамика. 2011, № 11–12, с. 24–26.
- [15] Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Беспалов А.В., Магомедбеков Э.П., Попова Н.А. Керамические высокопористые блочно-ячеистые фильтры-сорбенты для улавливания паров цезия. Огнеупоры и техническая керамика, 2013, № 7–8, с. 3 – 7.

Гаспарян Микаэл Давидович — д-р техн. наук, профессор, кафедра Общей химической технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Грунский Владимир Николаевич — д-р техн. наук, зав. кафедрой Общей химической технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Давидханова Мария Григорьевна — канд. техн. наук, доцент кафедры Общей химической технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Григоренко Роман Игоревич — аспирант кафедры Общей химической технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

On the possibility of using ceramic highly porous block-cellular materials as contact sorption-filtering elements

M. D. Gasparyan^{1,*}, V. N. Grunsky^{1,*}, M. G. Davidkhanova^{1,*}, R. I. Grigorenko^{1,*}

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The paper considers the structural and physical characteristics of carriers based on ceramic highly porous block materials of a cellular structure, which provide the sorption-filtering properties of contact elements. Methods for determining the external specific volumetric surface, gas-dynamic resistance and gas permeability are described. Their interrelation and optimal combination with the operational characteristics of sorbent filters in the processes of capturing volatile compounds of iodine and cesium in gas streams is shown. The results obtained can be used to synthesize contact elements of a new class and create on their basis highly efficient gas cleaning systems operating at high temperatures and corrosive environments.

Keywords

Ceramic highly porous cellular materials, contact element carriers, equivalent cell diameter, total porosity, external specific volume surface, gas dynamic resistance, gas permeability, filter-sorbent, cleaning efficiency, sorption capacity

* *Corresponding author*

Email address: migas56@yandex.ru, ozt@muctr.ru, maria@muctr.ru, roman.grigorenko2016@yandex.ru

REFERENCES

- [1] Gasparyan M.D., Grunsky V.N., Bespalov A.V., Davidkhanova M.G., Kabanov A.N., Lukin E.S., Popova N.A., Kharitonov N.I. Synthesis of polyfunctional highly porous block-cellular materials based on oxide ceramics. *Refractories and technical ceramics*, 2016, № 6, pp. 3–8.
- [2] S.V. Kulakov Modeling the structure of highly porous cellular materials. *Advanced materials*, 2000, № 3, pp. 22-26.
- [3] Incera Garrido G. Mass and momentum transfer upon flow through solid sponges: Dissertation (PhD thesis). University of Karlsruhe. 2009. 162 p.
- [4] Antsiferov V.N., Beklemyshev A.M., Gilev V.G., Porozova S.E., Shveikin G.P. Problems of powder materials science. Part II. Highly porous permeable materials. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2002. 262 p.
- [5] Tishchenko S.V., Kozlov A.I., Grunsky V.N., Bespalov A.V. Hydraulic resistance of slip HPCM. *Chemical industry today*, 2005, №2, pp. 42–51.
- [6] S.V. Belov Porous materials in mechanical engineering. M.: Mechanical Engineering, 1981. 247 p.
- [7] Gortyshev Yu.F., Muravyev G.B., Nadyrov I.N. Experimental study of flow and heat transfer in highly porous structures. *Engineering Physics Journal*, 1987, vol. 53. № 3, pp.75-83.
- [8] Antsiferov V.N., Filimonova I.V., Fionov A.V. Surface properties of gamma alumina coating on highly permeable cellular materials. *Kinetics and catalysis*, 2002, vol. 43, № 5, pp.788–793.
- [9] Richardson J.T., Peng Y. and Remue D., Properties of Ceramic Foam Catalyst Supports: Pressure Drop, *Applied Catalysis A General*, 2000, vol.204, pp. 19 – 31
- [10] Moreira E.A., Coury J.R. The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2004, vol.21, № 1, pp. 23–33
- [11] Bespalov A.V., Tatarinova I.N., Prokudin S.V., Grunsky V.N., Kozlov A.I., Calculation of hydraulic resistance of HPCM for gas-phase processes. *Chemical industry today*. 2006, № 2, pp. 44 – 49.
- [12] Antsiferov V.N., Makarov A.M., Ostroushko A.A. Problems of powder materials science. Part VII. Highly porous permeable cellular materials are promising catalyst carriers. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2006. 228 p.
- [13] Grunskii V.N., Davidkhanova M.G., Gasparyan M. D., Zolotukhin S.E. Potential Application in Heterogeneous Catalysis of Polyfunctional Contact Elements Based on Highly Porous Permeable Network Ceramics. *Fibre Chemistry*, 2019, vol.51, № 4, pp. 240 – 243.
- [14] Gasparyan M. D., Grunsky V. N., Magomedbekov E. P., Bespalov A. V., Ignatov A. V., Lebedev S. M. Localization of radioactive methyl iodide on ceramic sorbents. *Refractories and technical ceramics*. 2011, № 11–12, pp. 24–26.
- [15] Gasparyan M. D., Grunsky V. N., Bespalov A. V., Magomedbekov E. P., Popova N.A. Ceramic highly porous block-cell sorbent filters for capturing cesium vapors. *Refractories and technical ceramics*, 2013, № 7–8, pp. 3–7.

Gasparyan M. D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Grunsky V. N. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Davidkhanova M. G. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Grigorenko R. I. — postgraduate student, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

О возможности использования керамических высокопористых блочно-ячеистых материалов в качестве контактных сорбционно-фильтрующих элементов / М. Д. Гаспарян, В. Н. Грунский, М. Г. Давидханова, Р. И. Григоренко // Промышленные процессы и технологии. 2021. № 1. С. 17 – 27.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-17-27

Please cite this article as:

M. D. Gasparyan, V. N. Grunsky, M. G. Davidkhanova et al. On the possibility of using ceramic highly porous block-cellular materials as contact sorption-filtering elements. *Industrial processes and Technologies*, 2021, no. 1, pp. 17 – 27.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-17-27