

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГЛУБИННОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ В ПОРОВОЙ СТРУКТУРЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский, П. С. Чугаев

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь, 80(17)267-12-54, e-mail: lerakor1974@mail.ru

*Показаны широкие возможности порошковой металлургии в изготовлении многослойных ФМ из порошков, волокон и сеток различными методами. На примере трехслойного ФМ с различными комбинациями слоев из волокон размерами 200, 300, 400 мкм показана реализация нового подхода к организации глубинного фильтрации, учитывающего свойства фильтруемой среды, режимы фильтрации, структурные характеристики ФМ и толщины слоев и обеспечивающего равномерное осаждение частиц по толщине ФМ и требуемую степень очистки 0,95 при тонкости очистки 30 мкм.*

**Введение.** В последние годы получили развитие новые способы изготовления фильтрующих материалов (ФМ) из порошков, волокон и сеток, направленные на создание в них градиентной структуры пор, характеризующейся переменной пористостью и размерами пор в объеме материала. Цель создания таких материалов – выполнение ряда требований, предъявляемых к ФМ: повышение производительности, задерживающей способности, ресурса работы и улучшение регенерируемости.

Одним из наиболее распространенных ФМ с градиентной структурой пор являются многослойные ФМ, у которых каждый слой выполнен из порошков [1], волокон [2–4] различного фракционного состава, сеток с различным размером ячеек [5] или их композиций [6].

В качестве примеров таких многослойных ФМ можно привести следующие.

На рис. 1 представлена микроструктура двухслойного ФМ из порошка сферической бронзы БрОФ10-1 фракций  $-0,1...+0,063$  и  $-0,4...+0,315$  мм, полученного методом виброформования [7]. Этот метод основан на эффекте сегрегации частиц порошка по размерам (образование слоев) и заключается в приложении к порошковым частицам вибрационных колебаний с ускорением  $9,8...19,6$  м/с<sup>2</sup> и частот продольных колебаний  $10...50$  Гц. В результате этого в полидисперсной порошковой засыпке наблюдается разделение частиц порошка по размерам: крупные частицы поднимаются вверх, а мелкие опускаются вниз.

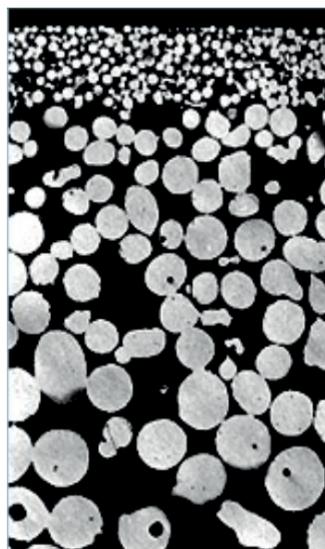


Рис. 1. Микроструктура двухслойного ФМ из порошка бронзы БрОФ10-1

На рис. 2 представлена микроструктура двухслойного ФМ из порошка титана марки ТПП [8]. Такой двухслойный ФМ имеет основной несущий слой с размерами частиц  $-1,0...+0,8$  мм и фильтрующий слой с размерами частиц  $-0,1...+0,063$  мм. Особенностью технологии изготовления таких двухслойных ФМ из порошков является напрессовка фильтрующего слоя через эластичную оболочку на предварительно спрессованную и спеченную заготовку несущего слоя. Технология обеспечивает получение двухслойных порошковых ФМ без зоны перекрытия между слоями.



Рис. 2. Микроструктура шлифа (а) и излома (б) образца двухслойного ФМ из порошка титана марки ТПП

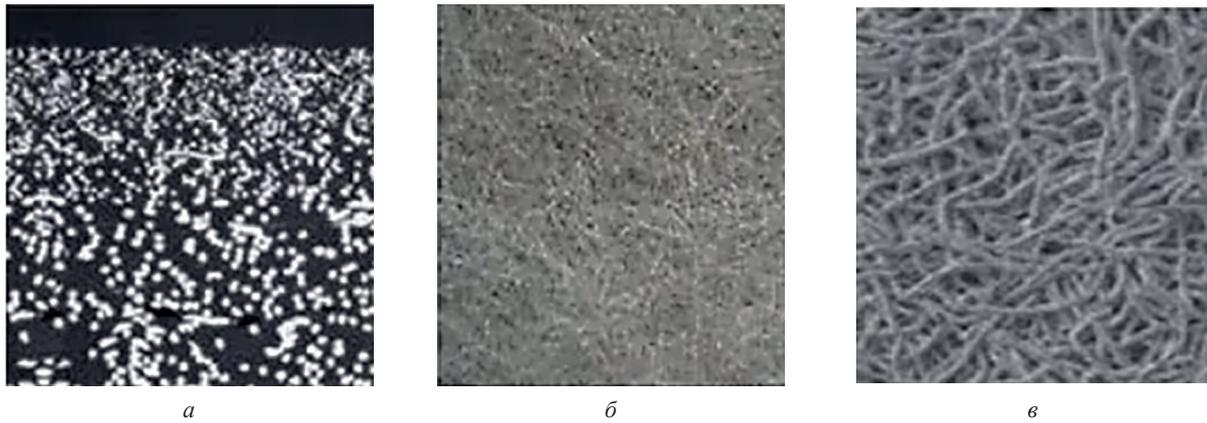


Рис. 3. Микроструктура двухслойного фильтроэлемента: а – продольное сечение; б – вид сверху; в – вид снизу

Фирма «Lianda Filter» [9] изготавливает двухслойные фильтроэлементы из спеченных металлических волокон (рис. 3) из коррозионно-стойкой стали 316L (03X17H14M3) и термостойких сплавов на основе FeCrAl.

Фирма «Lianda Filter» [9] также изготавливает многослойные фильтроэлементы из плетеных стальных сеток из коррозионно-стойкой стали марки 316L (03X17H14M3), 304 (08X18H10), 304L (03X18H11), 316 (03X17H14M3), 310S (20X23H18) и сплавов Monel 400 (МНЖМц28-2,5-1,5), Hastelloy C22, Duplex 2205, Duplex 2507 и др. (рис. 4).

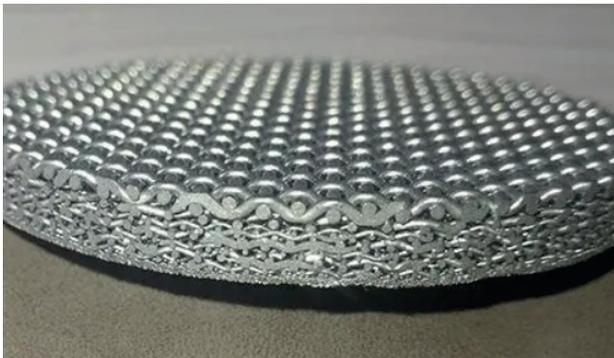


Рис. 4. Фильтроэлементы из плетеных стальных сеток

Технология изготовления таких фильтроэлементов заключается в предварительном пакетировании сеток с различными размерами ячеек путем укладки сеток одна на другую, причем размер ячеек каждого последующего слоя увеличивается по сравнению с предыдущим. Далее сетки в пакете соединяют друг с другом методом спекания под давлением.

Многослойные ФМ из порошков, волокон и сеток могут работать в режиме глубинного фильтрования [3] и при правильном выборе поровой структуры, т. е. соотношения геометрических параметров ФМ (толщины) и размеров пор, определяемых размерами структурных элементов (порошка или волокна) и пористостью, могут обеспечить требуемую степень очистки, большой ресурс работы и высокую грязеемкость. Однако во всех рассмотренных выше исследованиях по получению многослойных ФМ, которые могут работать в режиме глубинного фильтрования, при их создании не учитываются свойства фильтруемой среды, режимы фильтрования, не обосновывается выбор толщин слоев многослойных ФМ, обеспечивающих требу-

емую степень очистки при заданной тонкости фильтрации и обладающих высокой грязеемкостью.

Цель работы – на примере трехслойного ФМ с различными комбинациями слоев из волокон показать реализацию нового подхода к организации глубинного фильтрования, учитывающего свойства фильтруемой среды, режимы фильтрования, структурные характеристики ФМ и толщины слоев и обеспечивающего требуемую степень очистки.

**Результаты и их обсуждение.** В работе [10] нами предложен новый подход к организации процесса глубинного фильтрования, основанный на выполнении требования равного осаждения частиц загрязнений в поровых каналах каждого слоя ФМ. Для его реализации была разработана математическая модель, основанная на экспериментально установленной зависимости Ивасаки [11]:

$$\frac{dC}{dx} = -\lambda C, \quad (1)$$

где  $C$  – объемная концентрация частиц загрязнений, %;  $x$  – координата в направлении движения очищаемой жидкости, м;  $\lambda$  – коэффициент фильтрования,  $m^{-1}$ .

Известно, что коэффициент  $\lambda$ , входящий в уравнение (1) для ФВМ, равен [3]:

$$\lambda_B = \frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{\pi d}, \quad (2)$$

где  $\Pi$  – пористость;  $\eta_0$  – вероятность столкновения частиц загрязнений в поровых каналах с волокнами;  $\alpha$  – вероятность осаждения частиц загрязнений на волокнах;  $d$  – диаметр волокна, м.

При проведении теоретических расчетов в выражении (2) принимают  $\alpha = 1$ , полагая, что все частицы, столкнувшиеся с коллектором, задерживаются на нем, а при определении значений вероятности столкновения  $\eta_0$  учитывалась роль различных механизмов осаждения частиц загрязнений в поровых каналах (табл. 1):

$$\eta_0 = \eta_{\text{диф}} + \eta_{\text{пр ст}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{ин}}.$$

Опишем методику расчета толщин слоев многослойного ФМ (рис. 5), который должен обеспечить равное осаждение частиц загрязнений в каждом его слое.

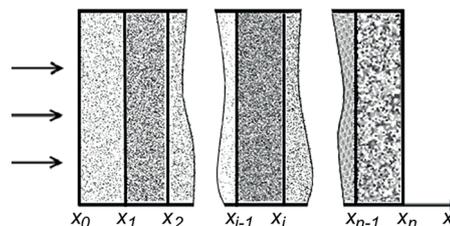


Рис. 5. Схема фильтрования в многослойном ФМ

Таблица 1. Механизмы осаждения частиц загрязнений

Механизм	Сущность механизма	Вероятность столкновения $\eta$
Прямое столкновение ( <i>Interception</i> )	Возникает, когда линии тока, по которым движутся частицы загрязнений, проходят от препятствия на расстоянии, меньшем или равном половине их диаметра	$\eta_{\text{пр ст}} = \frac{16\left(\frac{d_3}{d}\right)^{2-\text{Re}}}{\left(\text{Re}^{1/3} + 1\right)^3} [12]$ $\text{Re} = \frac{dv_\phi \rho_{\text{ж}}}{\mu \Pi}$
Седиментация ( <i>Gravity</i> )	Отклонение частиц загрязнений от линии тока под действием силы тяжести	$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})d_3^2 \Pi g}{18\mu v_\phi} [13]$
Инерция ( <i>Inertia</i> )	Отклонение частиц загрязнений от линии тока под действием сил инерции	$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_{\text{т}} d_3^2 v_\phi}{18\mu d \Pi} [14]$
Диффузия ( <i>Diffusion</i> )	Отклонение частиц загрязнений от линии тока в результате их столкновения с молекулами жидкости	$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left( \frac{k_0 T \Pi}{\mu d_3 d v_\phi} \right)^{2/3} [15]$

Примечание.  $d_3$  – диаметр частиц загрязнений, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $k_0$  – постоянная Больцмана, равная  $1,3804 \cdot 10^{-23}$ , Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $\mu$  – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с;  $v_\phi$  – скорость фильтрации, м/с;  $\rho_{\text{т}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$  – соответственно плотность частиц загрязнений и очищаемой жидкости,  $kg/m^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Для многослойного ФМ решение уравнения Ивасаки (1) имеет вид [10]:

$$C_n = C_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i - h_{i-1})\right), \quad (3)$$

где  $C_n$  и  $C_0$  – соответственно концентрация частиц загрязнений на выходе и на входе в ФМ;  $h_{i-1}$  – толщина  $(i-1)$ -го слоя, м;  $\lambda_i$  – коэффициент фильтрации  $i$ -го слоя,  $\text{м}^{-1}$ .

Реализацию нового подхода к организации глубинного фильтрования, обеспечивающего требуемую степень очистки в многослойных ФМ, рассмотрим на примере трехслойного ФМ с различными комбинациями слоев из волокон диаметрами 200, 300 и 400 мкм.

Для случая трехслойного ФВМ, обеспечивающего равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое (задержка трети частиц загрязнений каждым слоем), толщины слоев ФМ из решения уравнения Ивасаки (3) будут равны

$$\begin{aligned} h_1 &= -\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{2C_0 + C_n}{3C_0}; \\ h_2 &= -\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{C_0 + 2C_n}{2C_0 + C_n}; \\ h_3 &= -\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{3C_n}{C_0 + 2C_n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Нахождение оптимальной структуры трехслойных ФМ рассмотрим на примере процесса фильтрования моторного масла М-10Г<sub>2</sub> ( $\rho_{\text{ж}} = 850,82 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$  при температуре  $T = 373 \text{ К}$ ). Для проведения расчетов были выбраны частицы загрязнений  $\text{SiO}_2$  ( $\rho_{\text{T}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ) с размерами  $d_3 = 30 \text{ мкм}$ , скорость фильтрования выбиралась равной  $v_{\text{ф}} = 0,01 \text{ м/с}$ . Пористость каждого слоя ФМ равнялась 0,4. Требуемая степень очистки принималась равной 0,95 ( $C_n/C_0 = 0,05$ ).

Для трехслойных ФМ, обеспечивающих тонкость фильтрования  $d_3 = 30 \text{ мкм}$ , выбирали следующие комбинации слоев с размерами волокон: 400, 300, 200 мкм; 300, 400, 200 мкм; 300, 200, 300 мкм; 200, 300, 200 мкм; 400, 200, 400 мкм.

Результаты расчетов толщин слоев  $h_i$  представлены на рис. 6.

Одновременно с расчетом толщин слоев ФМ, обеспечивающих равное осаждение частиц за-

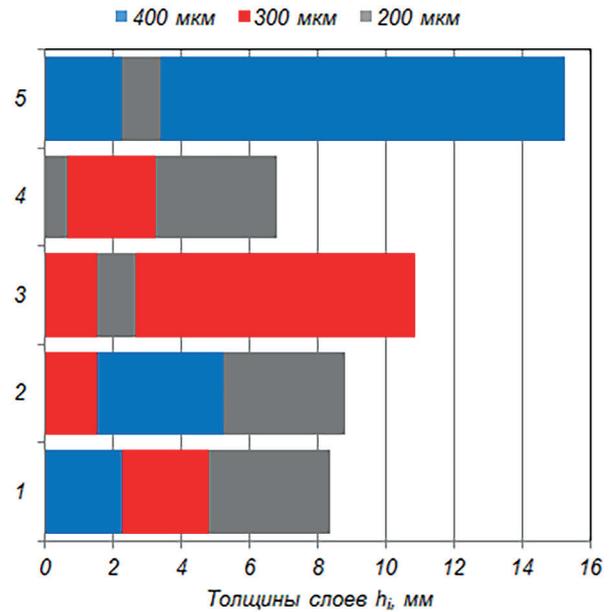


Рис. 6. Толщины слоев  $h_i$  трехслойных ФВМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

грязней в каждом слое, устанавливались закономерности изменения относительной концентрации частиц  $C/C_0$  (3) при прохождении через выбранные комбинации слоев многослойных ФМ. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов (рис. 6, 7) показывает, что выбор различных комбинаций слоев из волокон различного диаметра позволяет определить их толщины, обеспечивающие равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое, при этом общая толщина трехслойных ФМ различна.

Важной характеристикой ФМ является его производительность  $Q$ , которая может быть определена из закона Дарси [16] и зависит от коэффициента проницаемости  $k$  и толщины ФМ  $h$ :

$$Q = \frac{k_{\text{эф}} \Delta P}{\mu h} St, \quad (5)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на ФМ, Па;  $S$  – площадь ФМ,  $\text{м}^2$ ;  $t$  – время процесса фильтрования, с.

Определим коэффициенты проницаемости  $k_{\text{эф}}$  выше рассматриваемых трехслойных ФМ с различными комбинациями слоев при тонкости фильтрования  $d_3$ , равной 30 мкм. Для этого воспользуемся выражением:

$$k_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^3 h_i / \sum_{i=1}^3 \frac{h_i}{k_i}, \quad (6)$$

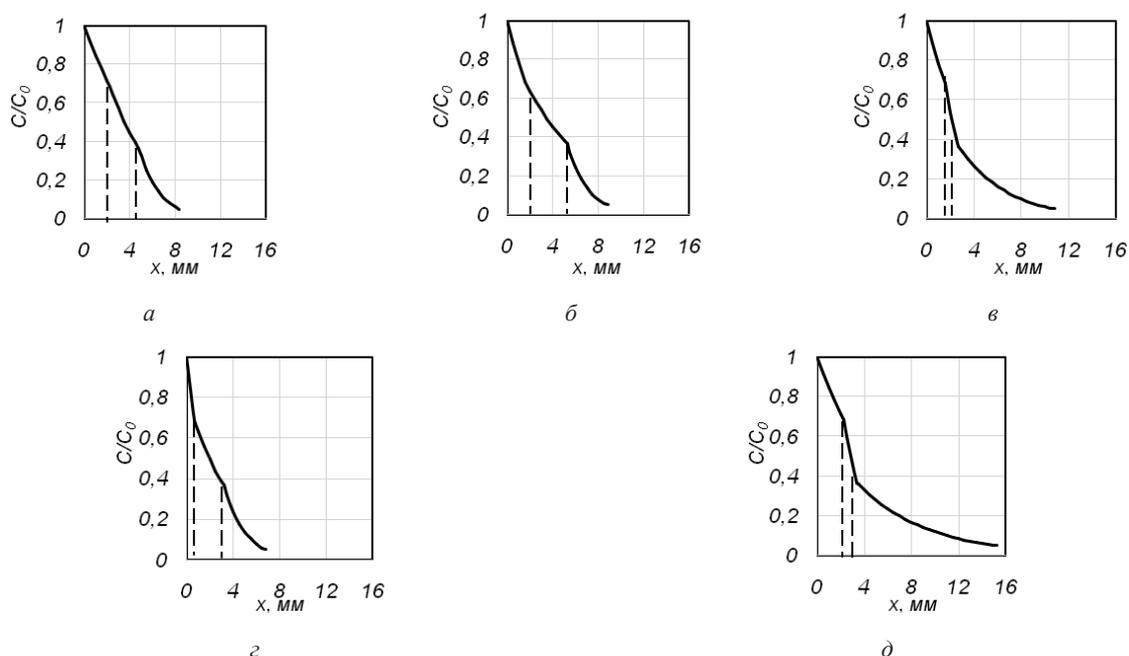


Рис. 7. Изменения относительной концентрации частиц загрязнений  $C/C_0$  трехслойных ФВМ с размерами волокон: а – 400, 300, 200 мкм; б – 300, 400, 200 мкм; в – 300, 200, 300 мкм; г – 200, 300, 200 мкм; д – 400, 200, 400 мкм

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя, м;  $k_i$  – коэффициент проницаемости  $i$ -го слоя,  $m^2$ .

Для расчета коэффициента проницаемости  $k_{эф}$  использовали ранее определенные [17] экспериментальные значения  $k_i$  каждого слоя. Результаты расчетов коэффициентов проницаемости  $k_{эф}$  трехслойных ФМ представлены на рис. 8.

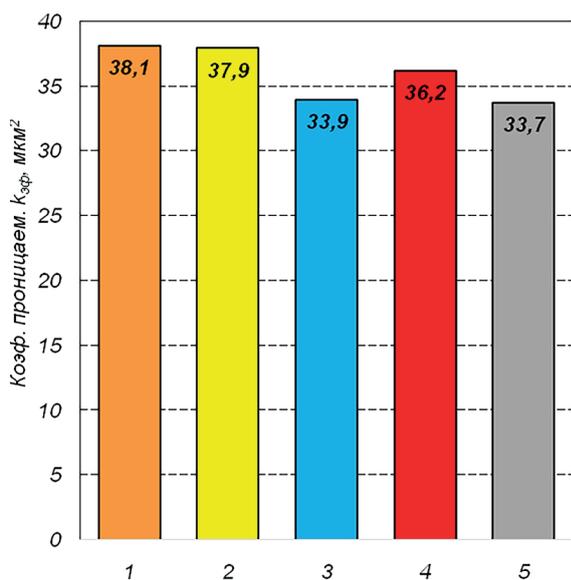


Рис. 8. Значения коэффициентов проницаемости  $k_{эф}$  трехслойных ФМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

Анализ диаграмм (рис. 6, 8) показывает, что для всех рассматриваемых комбинаций слоев трехслойных ФМ однозначная корреляция значений их коэффициентов проницаемости и соответствующих толщин отсутствует: толщина трехслойных ФМ различна, в то время как значения коэффициентов проницаемости находятся в узком диапазоне.

Для оценки выбора оптимальной комбинации слоев ФВМ была рассчитана их относительная производительность  $Q_{отн}$ , равная отношению объема профильтрованной жидкости  $Q$  к объему ФМ  $Q_M$  [7]:

$$Q_{отн} = \frac{Q}{Q_M}$$

Очевидно, что если площадь фильтрации ФВМ равна  $S$ , а его толщина  $h$ , то  $Q_M = Sh$ . Тогда, воспользовавшись уравнением (5), можно записать, что

$$Q_{отн} = \frac{k_{эф} \Delta P}{\mu h^2} t \tag{7}$$

Определим значения  $Q_{отн}$  для случая фильтрации моторного масла М-10Г<sub>2</sub> через рассматриваемые трехслойные ФМ при перепаде давления  $\Delta P = 0,1$  МПа и времени процесса  $t = 1$  с.

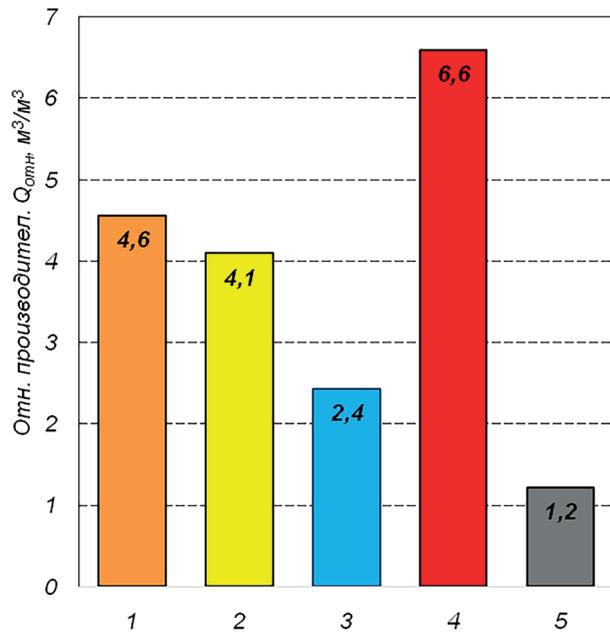


Рис. 9. Значения относительной производительности  $Q_{отн}$  трехслойных ФМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

Результаты расчетов относительной производительности  $Q_{отн}$  трехслойных ФМ представлены на рис. 9.

Анализируя полученные результаты (рис. 9), можно сделать вывод, что наибольшей относительной производительностью при наименьшей толщине (см. рис. 6) обладает трехслойный ФМ с размерами волокон 200, 300, 200 мкм.

**Закключение.** Показаны широкие возможности порошковой металлургии в изготовлении многослойных ФМ из порошков, волокон и сеток различными методами.

На примере трехслойного ФМ с различными комбинациями слоев из волокон размерами 200, 300, 400 мкм продемонстрирована реализация нового подхода к организации глубинного фильтрования, учитывающего свойства фильтруемой среды, режимы фильтрования, структурные характеристики ФМ и толщины слоев и обеспечивающего равномерное осаждение частиц по толщине ФМ и требуемую степень очистки 0,95 при тонкости очистки 30 мкм.

## Литература

1. **Новые** фильтрующие материалы и перспективы их применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2008. – 232 с.
2. **Patent** US4126560. Filter medium / J. T. Marcus, H. M. Kennard. – № 4126560; patented Nov. 21, 1978. – United States Patent Office.
3. **Проницаемые** материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2013. – 380 с.
4. **Свойства** двухслойных волоконных фильтроэлементов, полученных методом сухого изостатического прессования из медных отходов / В. М. Капцевич [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials: сб. докл. 8-го Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г.: в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2013. – Ч. 1. – С. 207–212.
5. **URL:** <http://www.weiku.com/products-image/10255326/multi-layer-filter-discs.html>. Дата обращения: 15.10.2012.
6. **Богинский, Л. С.** Теория и практика сухого изостатического (радиального) прессования порошковых и волоконных уплотняемых материалов / Л. С. Богинский, Е. Е. Петюшок, О. П. Реут // 50 лет порошковой металлургии Беларуси / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2010. – Гл. 10. – С. 171–217.
7. **Формирование** структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.]; под ред. П. А. Витязя. – М.: Металлургия, 1993. – 240 с.
8. **Савич, В. В.** Пористые и композиционные материалы на основе порошков титана: технологии получения и основные свойства / В. В. Савич // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 214–238.
9. **Sintered** wire mesh laminates [Electronic resource] / Lianda Filter. – Mode of access: <https://www.liandafilter.com/sintered-wire-mesh-laminates>. – Date of access: 02.07.2021.
10. **Построение** оптимальной структуры многослойных фильтрующих материалов для очистки моторного масла после обкатки двигателя / В. М. Капцевич [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 3 (128). – С. 38–45.
11. **Iwasaki, T.** Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // Jour. AWWA. – 1937. – № 29. – P. 1591–1602.
12. **Huang, Ch.** Mechanism of Particle Impaction and Filtration by the Dry Porous Metal Substrates of an Inertial Impactor / Ch.-Hs. Huang, Ch.-J. Tsai. // Aerosol Science and Technology. – 2003. – № 37. – P. 486–493.
13. **Water** and Waste Water Filtration: Concepts and Application / K. Yao [et al.] // Environmental Science and Technology. – 1971. – Vol. 5, № 12. – P. 1105–1112.
14. **Bliss, T.** Suspended Solids Washing Overview / T. Bliss, M. Ostojca-Starzewski // IPST Technical Paper Series Number 679. – 1997. – 13 p.
15. **Левич, В. Г.** Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М.: Гос. изд-во физ.-хим. лит., 1959. – 700 с.
16. **Витязь, П. А.** Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

17. **Ильюшенко, А. Ф.** Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 3: Взаимосвязь структурных и гидродинамических свойств проницаемых материалов из медных волоконных отходов, полученных методом сухого изостатического прессования / А. Ф. Ильюшенко, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2014. – Вып. 37. – С. 121–126.

**ORGANIZATION OF THE DEPTH FILTERING PROCESS IN THE PORE STRUCTURE OF MULTILAYER FILTER MATERIALS**

**V. M. Kapceovich, V. K. Korneeva, I. V. Zakrevskij, P. S. Chugaev**

*Belarusian State Agrarian Technical University,  
Independence avenue, 99, 220023, Minsk city, Belarus, 80(17)267-12-54, e-mail: lerakor1974@mail.ru*

*The broad possibilities of powder metallurgy in the manufacture of multilayer FM from powders, fibers and meshes by various methods are shown.*

*Using the example of a three-layer FM with various combinations of layers of fibers with sizes of 200, 300, 400  $\mu\text{m}$ , the implementation of a new approach to the organization of depth filtration is shown, taking into account the properties of the filtered medium, filtration modes, structural characteristics of the FM and layer thicknesses, and providing uniform deposition of particles along the thickness of the FM and the required degree of purification is 0.95 at a fineness of purification of 30  $\mu\text{m}$ .*