

13. Ежов, А. А. Изломы конструкционных сталей / А. А. Ежов, Л. П. Герасимова, А. М. Каток // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 4. – С. 34–39.

14. Chakraborty, A. Lath martensite substructure evolution in low-carbon microalloyed steels / A. Chakraborty, R. F. Webster, S. Primig // J Mater Sci. Metals & corrosion. – 2022. – Vol. 57. – P. 10359–10378. – <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07275-9>

15. Effect of microadditions of aluminum and vanadium on the susceptibility to quench cracking in powder steels / V. Dorofeyev [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2467. 020048. – Published Online: 22 June 2022. – <https://doi.org/10.1063/5.0092681>

16. Белоцкий, А. В. О растворимости азота в легированном феррите / А. В. Белоцкий [и др.] // Украинский физический журнал. – 1968. – Т. XIII, № 10. – С. 1749–1751.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ВОЛОКНОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

**В. М. Капцевич, А. А. Тиунчик, В. К. Корнеева,
И. В. Закревский**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь, тел.: +375 29 662 85 81,
e-mail: lerakor1974@mail.ru*

Методы порошковой металлургии позволяют изготавливать фильтрующие материалы (ФМ) с градиентной структурой пор, в том числе многослойные. Такие ФМ обладают повышенной проницаемостью, способностью работать в режиме глубинного фильтрования, обеспечивая при этом высокую грязеемкость и длительный срок службы, и могут быть использованы для очистки различных жидкостей.

Проблема своевременной и качественной жидкостей является всегда актуальной, потому что от ее решения зависит надежность и долговечность работы различных систем и механизмов машин и агрегатов. Так, например, наличие частиц загрязнений

в смазочных материалах сельскохозяйственной техники приводит к отказам, доля которых составляет от 60 до 90 % [1–4].

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одним из наиболее сложных и дорогостоящих агрегатов тракторов, комбайнов и других сельскохозяйственных машин. В процессе эксплуатации ДВС в моторное масло поступает большое количество продуктов износа, а также продукты коррозии, атмосферная пыль и др. Поэтому в работающем масле присутствуют частицы загрязнений различной природы с размером от 1 мкм и более. Наиболее опасными частицами загрязнений, попадающими в смазочные материалы, являются частицы кварцевого песка – оксида кремния (SiO_2) с размерами до 100 мкм и более. Эти частицы имеют твердость 10 000–13 500 МПа, значительно превышающую твердость других частиц загрязнений и твердость деталей ДВС [5]. С увеличением содержания оксидов кремния, попадающих в смазочные материалы из почвы, возрастает износ деталей двигателей. Установлено [5], что при содержании в почве SiO_2 в количестве 95, 70 и 60 % средний износ гильз цилиндров двигателей через 256 ч работы составил соответственно 152, 93 и 72 мкм.

Исследования многих авторов [3, 5, 6] были направлены на изучение влияния размеров частиц загрязнений на интенсивность изнашивания. Ими установлено, что при одном и том же массовом количестве частиц загрязнений разных размеров, максимальный износ вызывают частицы размером от 15 до 40 мкм. Мелкие частицы размером 2–3 мкм находятся в смазочном материале во взвешенном состоянии, частично заполняют микровадины на поверхностях трения, и, действуя подобно коллоидному графиту, препятствуют непосредственному контакту сопрягаемых деталей и уменьшают износ их поверхностей. Однако при увеличении размеров частиц от 3–5 до 15–40 мкм изнашивание, например, поршневых колец увеличивается в 2–4 раза. В то же время при увеличении размеров частиц свыше 40 мкм их изнашивание уменьшается. Полученные результаты объясняются фильтрующей способностью самого зазора, в который не попадают частицы, имеющие размер, превосходящий его величину.

Удаление таких частиц из работающего моторного масла можно осуществить фильтрованием с использованием ФМ, изготовленных методом порошковой металлургии.

Для разработки эффективных многослойных ФМ, реализующих процесс глубинного фильтрования, необходимо разработать математический подход, позволяющий устанавливать оптимальную поровую структуру таких материалов.

Целью исследования является разработка математической модели построения оптимальной поровой структуры многослойных волоконных ФМ, реализующих процесс глубинного фильтрования на примере очистки моторного масла.

Пути решения проблемы. При разработке математической модели построения оптимальной поровой структуры многослойных ФМ нами предлагается новый подход к организации процесса фильтрования, основанный на выполнении требования осаждения равного количества частиц загрязнений в поровых каналах каждого слоя ФМ. Такая структура многослойных ФМ обеспечит повышение грязеемкости и ресурса их работы за счет равномерного осаждения частиц загрязнений по толщине ФМ.

Математическая модель построения оптимальной поровой структуры многослойных ФМ, учитывающая свойства фильтруемой среды, свойства каждого слоя ФМ и режимы фильтрования, позволит прогнозировать толщины слоев и обосновывать выбор структурных параметров (размеров волокон) при заданной тонкости фильтрования и степени очистки.

В основу разработки модели построения оптимальной поровой структуры многослойных ФМ положена экспериментально установленная зависимость Ивасаки [7], описывающая закономерности осаждения частиц загрязнений в ФМ:

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

где C – объемная концентрация частиц загрязнений, %; x – направление движения очищаемой жидкости, м; λ – коэффициент фильтрования, м^{-1} .

Известно [8], что коэффициент λ , входящий в уравнение (1) для волокнувого ФМ, равен

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{\pi D_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где Π – пористость; η_0 – вероятность столкновения частиц загрязнений в поровых каналах с волокнами; α – вероятность осаждения частиц загрязнений на волокнах; D – диаметр волокна, м.

Выражение (2) получено при следующих предположениях: во-первых, частицы загрязнений имеют сферическую форму, во-вторых, структурные элементы, образующие пористую среду, являются цилиндрами и, в-третьих, их размеры не изменяются с течением времени. Осаждение частиц загрязнений в ФМ в этом случае происходит под действием комплекса механизмов [9–12], зависящих от режимов фильтрования, физических и химических свойств очищаемой жидкости и частиц загрязнений, и структурных характеристик ФМ.

Особенностью глубинного фильтрования является то, что размер осаждаемых частиц загрязнений может быть намного меньше, чем размер пор ФМ. Если бы на частицы загрязнений механизмы осаждения не действовали, то траектории движения частиц совпадали бы с линиями тока жидкости. В этом случае многие из частиц, особенно небольшого размера, никогда бы не столкнулись со структурными элементами, образующими каркас ФМ, и не были бы удалены из очищаемой жидкости. Однако под действием механизмов осаждения частицы отклоняются от линий тока и приходят в контакт со структурными элементами, образующими поровое пространство ФМ. В результате такого взаимодействия происходит осаждение частиц загрязнений в поровых каналах.

К основным механизмам осаждения, отклоняющим частицы загрязнений от линий тока жидкости, относятся прямое столкновение, седиментация, инерция и диффузия (табл. 1).

При проведении теоретических расчетов авторы [10] в выражении (2) принимают $\alpha = 1$, полагая, что все частицы, столкнувшиеся

с коллектором, задерживаются на нем, а при определении значе- ний вероятности столкновения η_0 учитывают роль вышеописан- ных механизмов следующим образом:

$$\eta_0 = \eta_{\text{пр ст}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{ин}} + \eta_{\text{диф}} \quad (3)$$

Таблица 1. Механизмы осаждения частиц загрязнений, их сущность и вероятность столкновения при глубинном фильтровании

Механизм	Сущность механизма	Вероятность столкновения η
Прямое столкновение (<i>Interception</i>)	Возникает, когда линии тока, по которым движутся частицы загрязнений, проходят от препятствия на расстоянии, меньшем или равном полови- не их диаметра	$\eta_{\text{пр ст}} = \frac{16 \left(\frac{d}{D} \right)^{2-\text{Re}}}{\left(\text{Re}^{1/3} + 1 \right)^3} \quad [9]$ $\text{Re} = \frac{D v_{\text{ф}} \rho_{\text{ж}}}{\mu \text{П}}$
Седиментация (<i>Gravity</i>)	Отклонение частиц загрязне- ний от линии тока под дейст- вием силы тяжести	$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) d^2 \text{П} g}{18 \mu v_{\text{ф}}} \quad [10]$
Инерция (<i>Inertia</i>)	Отклонение частиц загрязне- ний от линии тока под дейст- вием сил инерции	$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_{\text{т}} d^2 v_{\text{ф}}}{18 \mu D \text{П}} \quad [12]$
Диффузия (<i>Diffusion</i>)	Отклонение частиц загрязне- ний от линии тока в резуль- тате их столкновения с моле- кулами жидкости	$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left(\frac{k_{\text{В}} \text{П} \text{П}}{\mu d D v_{\text{ф}}} \right)^{2/3} \quad [11]$

Примечание: d – диаметр частиц загрязнений, м; Re – число Рейнольдса; $k_{\text{В}}$ – постоянная Больцмана, равная $1,3804 \cdot 10^{-23}$, Дж/К; T – абсолютная тем- пература, К; μ – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с; $v_{\text{ф}}$ – ско- рость фильтрации, м/с; $\rho_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – соответственно плотность частиц загрязне- ний и очищаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²

Опишем модель поровой структуры многослойного волок- ного ФМ (рис. 1), который должен обеспечить равное осажде- ние частиц загрязнений в каждом его слое.

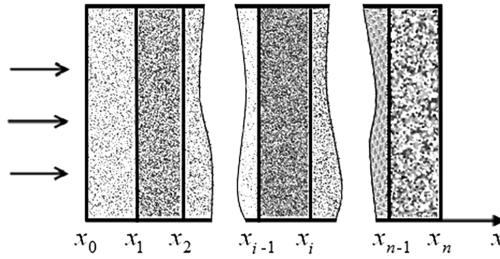


Рис. 1. Схема фильтрования в многослойном волокнутом ФМ

Для многослойного ФМ уравнение Ивасаки (1) имеет вид [8]

$$C = C(x) = \begin{cases} C_0 e^{-\lambda_1 x}, & 0 \leq x \leq x_1; \\ C_1 e^{-\lambda_2(x-h_1)}, & x_1 \leq x \leq x_2; \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ C_{i-1} e^{-\lambda_i(x-h_{i-1})}, & x_{i-1} \leq x \leq x_i; \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ C_{n-1} e^{-\lambda_n(x-h_{n-1})}, & x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases}, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация частиц загрязнений на входе в ФМ; $C_1, \dots, C_{i-1}, \dots, C_{n-1}$ – концентрация частиц загрязнений на выходе из первого, \dots , $(i-1)$ -го, \dots , $(n-1)$ -го слоев, соответственно; $h_1, h_2, \dots, h_{i-1}, h_i, \dots, h_{n-1}, h_n$ – толщины первого, второго, \dots , $(i-1)$ -го, i -го, \dots , $(n-1)$ -го, n -го слоев, соответственно; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$ – коэффициент фильтрования первого, второго, \dots , i -го, \dots , n -го слоев, соответственно.

Определим толщины слоев многослойного волокнутого ФМ, обеспечивающие равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое при требуемой степени фильтрования ψ . Последняя определяется из выражения

$$\psi = 1 - \frac{C_n}{C_0}, \quad (5)$$

где C_n – конечная концентрация частиц загрязнений на выходе из ФМ.

В качестве примера рассмотрим двухслойный волоконный ФМ.

Требование равного осаждения частиц загрязнений в каждом слое такого ФМ предполагает, что в первом слое, при прохождении через него жидкости, задерживается первая половина частиц загрязнений. Тогда на выходе из первого слоя объемная концентрация частиц загрязнений уменьшится со значения C_0 до значения C_1 :

$$C_1 = \frac{C_0 - C_n}{2} + C_n = C_0 e^{-\lambda_1 h_1}. \quad (6)$$

Из уравнения (8) толщина первого слоя h_1 равна

$$h_1 = -\frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\frac{1}{2} + \frac{C_n}{2C_0} \right). \quad (7)$$

Для второго слоя, обеспечивающего задержку второй половины частиц загрязнений, концентрация частиц загрязнений уменьшится до значения C_2 , равного C_n . В этом случае толщина второго слоя h_2 равна

$$h_2 = -\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{2C_n}{C_0 + C_n}. \quad (8)$$

Проводя аналогичные рассуждения и расчеты для случая трехслойного волоконного ФМ, обеспечивающего равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое (задержка трети частиц загрязнений каждым слоем), толщины слоев волоконного ФМ будут равны

$$\begin{aligned} h_1 &= -\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{2C_0 + C_n}{3C_0}; & h_2 &= -\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{C_0 + 2C_n}{2C_0 + C_n}; \\ h_3 &= -\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{3C_n}{C_0 + 2C_n}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда для многослойного волоконного ФМ, состоящего из n слоев и обеспечивающего равное осаждение частиц загрязнений

в каждом слое, толщина i -го слоя h_i может быть определена из выражения:

$$h_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{(n-i)C_0 + iC_n}{(n-i+1)C_0 + (i-1)C_n}. \quad (10)$$

Нахождение оптимальной структуры многослойных ФМ рассмотрим на примере процесса фильтрования работающего моторного масла М-10Г₂ (ГОСТ 8581-78). В работе [13] показано, что наибольшее количество частиц загрязнений в работающем моторном масле представляют частицы размерами 10, 20, 30 мкм, которые являются наиболее опасными в процессе работы трибосопряжений деталей ДВС.

Рассчитаем толщины слоев многослойных волоконных ФМ с волокнами различного размера. При проведении расчетов в качестве очищаемой жидкости выбрано вышерассмотренное моторное масло М-10Г₂ ($\rho_{\text{ж}} = 850,82 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температуре $T = 373 \text{ К}$), скорость фильтрования $v_{\text{ф}} = 0,01 \text{ м/с}$. Размеры частиц загрязнений SiO₂ ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$) выбирались равными $d = 10, 20$ и 30 мкм , а диаметры волокон $D = 100, 200, 300$ и 400 мкм . Требуемая степень очистки ψ принималась равной $0,95$ ($C_n/C_0 = 0,05$).

Для расчета толщин слоев двухслойного ФМ использовали выражения (7), (8), трехслойного – выражения (9). При этом при определении из выражения (2) значений коэффициента фильтрования λ учитывали действующие механизмы осаждения (табл. 1, выражение (3)), зависящие от свойств очищаемой среды ($\rho_{\text{ж}}$, μ), структурных свойств ФМ (Π , D) и режимов фильтрования (T , $v_{\text{ф}}$). Для ФМ, обеспечивающих тонкость очистки $d = 30$ и 20 мкм , выбирали следующие комбинации слоев с размерами волокон: двухслойных – $400, 300 \text{ мкм}$; $400, 200 \text{ мкм}$; $300, 200 \text{ мкм}$; трехслойного – $400, 300, 200 \text{ мкм}$, а для ФМ, обеспечивающих тонкость очистки $d = 10 \text{ мкм}$, были рассмотрены следующие комбинации: двухслойных – $300, 200 \text{ мкм}$; $300, 100 \text{ мкм}$; $200, 100 \text{ мкм}$; трехслойного – $300, 200, 100 \text{ мкм}$.

Одновременно с расчетом толщин слоев ФМ, обеспечивающих равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое, уста-

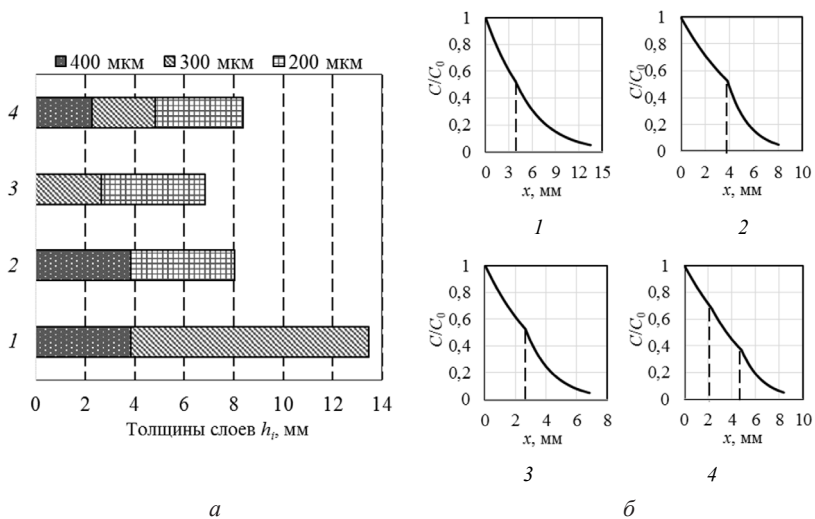


Рис. 2. Толщины слоев h_i (а) и изменения относительной концентрации частиц загрязнений C/C_0 (б) для различных комбинаций многослойных ФМ, обеспечивающих тонкость очистки 30 мкм, с размерами волокон:
 1 – двухслойный (400, 300 мкм); 2 – двухслойный (400, 200 мкм);
 3 – двухслойный (300, 200 мкм); 4 – трехслойный (400, 300, 200 мкм)

навливались закономерности изменения относительной концентрации частиц C/C_0 (4) при прохождении через выбранные комбинации слоев многослойных ФМ.

Результаты расчетов толщин слоев h_i и закономерности изменения концентрации частиц загрязнений C/C_0 в каждом слое представлены на рис. 2–4.

Анализ полученных результатов (рис. 2–4) 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 многослойных ФМ различна.

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

$$Q = \frac{k\Delta P}{\mu h} St, \quad (11)$$

где ΔP – перепад давления на ФМ, Па; S – площадь ФМ, м²; t – время процесса фильтрования, с.

Для волоконных ФМ коэффициент проницаемости k может быть определен из выражения [14]

$$k = \frac{D^2}{f(1-\Pi)}, \quad (12)$$

где $f(1-\Pi)$ равно [15]

$$f(1-\Pi) = 64(1-\Pi)^{3/2} \left(1 + 56(1-\Pi)^3\right). \quad (13)$$

Используя выражения (12), (13), были рассчитаны коэффициенты проницаемости k ФМ из волокон различных диаметров D :

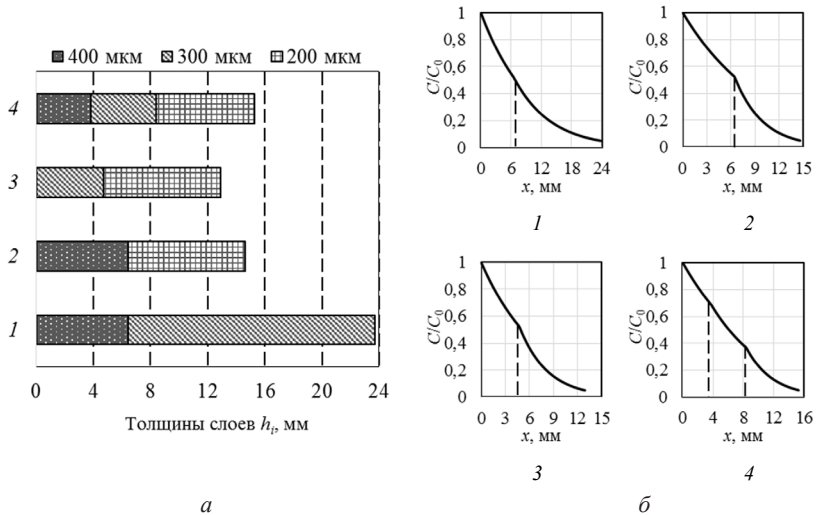


Рис. 3. Толщины слоев h_i (а) и изменения относительной концентрации частиц загрязнений C/C_0 (б) для различных комбинаций многослойных ФМ, обеспечивающих тонкость очистки 20 мкм (1–4 – см. рис. 2)

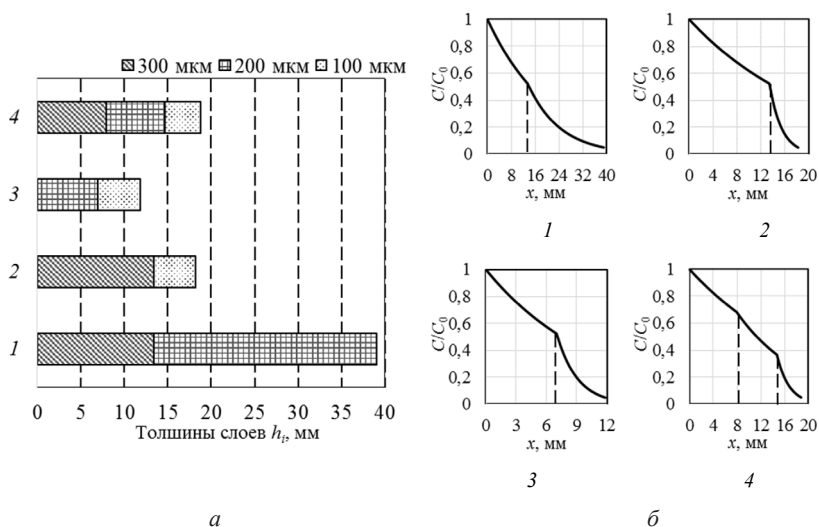


Рис. 4. Толщины слоев h_i (а) и изменения относительной концентрации частиц загрязнений C/C_0 (б) для различных комбинаций многослойных ФМ, обеспечивающих тонкость очистки 10 мкм, с размерами волокон:
 1 – двухслойный (300, 200 мкм); 2 – двухслойный (300, 100 мкм);
 3 – двухслойный (200, 100 мкм); 4 – трехслойный (300, 200, 100 мкм)

при $D = 100$ мкм, $k = 25,7$ мкм; при $D = 200$ мкм, $k = 102,7$ мкм;
 при $D = 300$ мкм, $k = 231,0$ мкм; $D = 400$ мкм, $k = 410,7$ мкм.

Определим коэффициенты проницаемости $k_{\text{эф}}$ выше рассматриваемых многослойных ФМ с различными комбинациями слоев при тонкости очистки d , равной 30, 20 и 10 мкм. Для этого воспользуемся выражением [8]:

$$k_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i}}, \quad (14)$$

где h_i и k_i – толщина и коэффициент проницаемости i -го слоя ФМ, мкм².

Результаты расчетов коэффициентов проницаемости $k_{\text{эф}}$ многослойных ФМ представлены на рис. 5.

Анализ диаграмм (рис. 2, а; 3, а; 4, а и 5) показывает, что максимальной проницаемостью обладают многослойные ФМ наиболь-

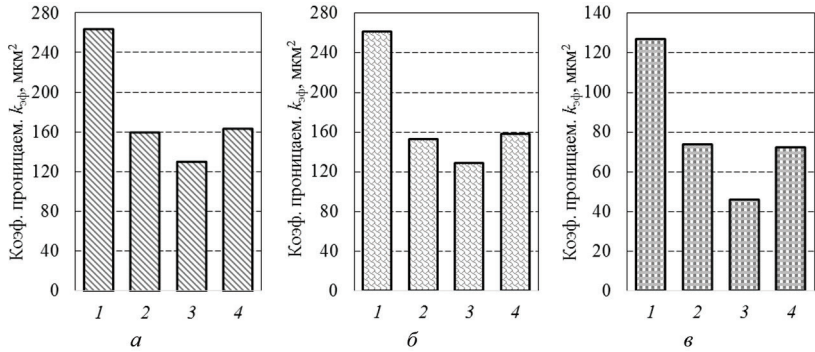


Рис. 5. Значения коэффициентов проницаемости $k_{эф}$ многослойных ФМ с различной толщиной очистки: $a - d = 30$ мкм; $б - d = 20$ мкм; $в - d = 10$ мкм (1 – 4 – см. рис. 2)

шей толщины, что на практике является нецелесообразным ввиду высоких материальных затрат при их изготовлении.

Для оценки выбора оптимальной комбинации слоев ФМ была рассчитана относительная производительность ФМ $Q_{отн}$, равная отношению объема профильтрованной жидкости Q (11) к объему ФМ Q_M :

$$Q_{отн} = \frac{Q}{Q_M}.$$

Очевидно, что если площадь фильтрации ФМ равна S , а его толщина h , то $Q_M = Sh$. Тогда, воспользовавшись уравнением (11), можно записать, что

$$Q_{отн} = \frac{k\Delta P}{\mu h^2} t. \quad (15)$$

Определим значения $Q_{отн}$ для случая фильтрации моторного масла М-10Г₂ через рассматриваемые многослойные ФМ при перепаде давления $\Delta P = 0,1$ МПа и времени процесса $t = 1$ с.

Результаты расчетов относительной производительности $Q_{отн}$ многослойных ФМ представлены на рис. 6.

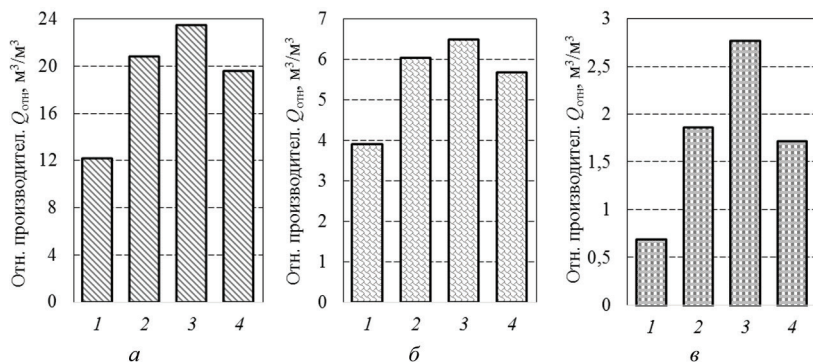


Рис. 6. Значения относительной производительности $Q_{\text{отн}}$ многослойных ФМ с различной толщиной очистки: $a - d = 30$ мкм; $б - d = 20$ мкм; $в - d = 10$ мкм (1–4 – см. рис. 2)

Анализ проведенных расчетов (рис. 6) показал, что несмотря на полученную низкую проницаемость (рис. 5), наибольшей относительной производительностью при меньшей толщине (рис. 2–4) обладают двухслойные ФМ с размерами волокон 300 и 200 мкм при тонкости очистки, равной 30 и 20 мкм, и 200 и 100 мкм при тонкости очистки, равной 10 мкм. Полученные результаты позволяют утверждать, что такие ФМ обеспечивают равномерное осаждение частиц загрязнений по толщине, а их поровая структура является оптимальной.

Выводы. Разработана математическая модель построения оптимальной поровой структуры многослойных ФМ, основанная на новом подходе к организации процесса фильтрования, заключающемся в выполнении требования осаждения равного количества частиц загрязнений в поровых каналах каждого слоя ФМ.

На основе разработанной модели рассчитаны толщины слоев ФМ, обеспечивающих равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое и установлены закономерности изменения относительной концентрации частиц при прохождении через выбранные комбинации слоев многослойных ФМ.

В качестве критерия оценки оптимальности поровой структуры ФМ предложено использовать относительную производи-

тельность, равную отношению объема профильтрованной жидкости к объему ФМ.

На примере фильтрации моторного масла установлено, что наибольшей относительной производительностью обладают двухслойные ФМ с размерами волокон 300 и 200 мкм при тонкости очистки, равной 30 и 20 мкм, и 200 и 100 мкм при тонкости очистки, равной 10 мкм. Полученные результаты позволяют утверждать, что такие ФМ обеспечивают равномерное осаждение частиц загрязнений по толщине, а их поровая структура является оптимальной.

Литература

1. Коваленко, В. П. Основы техники очистки жидкости от механических загрязнений / В. П. Коваленко, А. А. Ильинский. – М. : Химия, 1982. – 277 с.
2. Григорьев, М. А. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Григорьев, Г. В. Борисова. – М. : Машиностроение, 1991. – 208 с.
3. Бродский, Г. С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин / Г. С. Бродский. – М. : НПК «ГЕМОС Лтд.», 2003. – 360 с.
4. Барышев, В. И. Повышение технического уровня и надежности гидропривода тракторов и сельхозмашин в эксплуатации : автореф. дис. ... докт. техн. наук / В. И. Барышев. – М. : МИИСП, 1991. – 39 с.
5. Большаков, Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов / Г. Ф. Большаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра, 1982. – 350 с.
6. Коваленко, В. П. Загрязнения и очистка нефтяных масел / В. П. Коваленко. – М. : Химия, 1978. – 304 с.
7. Iwasaki, T. Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // Jour. AWWA. – 1937. – № 29. – P. 1591–1602.
8. Капцевич, В. М. Проницаемые материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2013. – 380 с.
9. 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.
10. Water and Waste Water Filtration: Concepts and Application / K. Yao [et al.] // Environmental Science and Technology. – 1971. – Vol. 5. – № 12. – P. 1105–1112.
11. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М. : Гос. изд-во физ.-хим. лит.-ры, 1959. – 700 с.
12. Bliss, T. Suspended Solids Washing Overview / T. Bliss, M. Ostoj-Starzewski // IPST Technical Paper Series Number 679. – 1997. – 13 p.
13. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2007. – 232 с.

14. Spielman, L. Model for predicting pressure drop and filtration efficiency in fibrous media / L. Spielman, S. L. Goren // Environmental Science and Technology. – 1968. – Vol. 2. – № 4. – P. 279–287.

15. Davies, C. N. Air filtration / C. N. Davies. – London. – New York : Academic Press, 1973. – 171 p.

РАСТЕКАНИЕ КАПЛИ РАБОТАЮЩЕГО МОТОРНОГО МАСЛА ПО ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ БУМАГЕ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь, тел.: +375 29 662 85 81,
e-mail: lerakor1974@mail.ru*

В работах [1–3] нами рассмотрены особенности радиального фильтрования, в которых движение загрязненной жидкости в радиальном направлении описывается уравнением Ивасаки и показано действие различных механизмов на процесс осаждения частиц загрязнений в поровых каналах фильтровального материала.

Одним из примеров реализации метода радиального фильтрования для контроля качества моторного масла является метод «капельной пробы» (*Blotter Spot*). Метод заключается в нанесении капли масла на фильтровальную бумагу и последующем анализе полученного масляного пятна (хроматограммы). Так, согласно стандарту *ASTM D7899-19* [4], разработанному Американским обществом по испытанию материалов (*American Society for Testing and Materials*) для контроля качества моторных масел, хроматограмма масляного пятна может быть разделена на следующие зоны в зависимости от степени загрязненности (рис. 1).

Анализ полученных хроматограмм позволяет оценить степень загрязненности моторного масла нерастворимыми примесями, попадающими в него в процессе работы двигателя и, в конечном