

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

В.М. КАПЦЕВИЧ, В.К. КОРНЕЕВА, Д.И. КРИВАЛЬЦЕВИЧ,
И.В. ЗАКРЕВСКИЙ, П.С. ЧУГАЕВ, М.Е. ПЕТРИКЕВИЧ

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

В статье описывается моделирование структурных и гидродинамических свойств анизотропных фильтрующих материалов, которые могут найти применение в производственных процессах переработки сельскохозяйственной продукции.

In the article modelling structural and hydrodynamical properties of anisotropic filtering materials is described. This materials can find application in productions of processing of agricultural production.

Введение

Пористые материалы находят широкое применение в перерабатывающей промышленности для очистки жидкостей и газов при решении вопросов повышения качества и чистоты выпускаемой продукции, надежности, долговечности и срока службы машин и механизмов, охраны окружающей среды. Перспективными для этих целей являются материалы с анизотропной структурой пор, размеры которых изменяются в направлении течения очищаемой жидкости или газа. Такие материалы находят широкое применение для реализации процессов глубинной фильтрации или тангенциальной очистки. Для пористых порошковых материалов разработано много способов создания такой анизотропной структуры, основанных на послойном формовании, виброформовании, осаждении, псевдооживлении и пластичном деформировании и др. [1, 2].

Однако имеется ряд материалов, которые по своей природе являются анизотропными или в которых можно создать анизотропию простыми технологическими приемами или конструкторскими решениями. К таким материалам относятся:

- пористые волокнистые материалы (ПВМ),
- деформированные высокопористые ячеистые материалы (ДВПЯМ),
- объемно-сетчатые материалы (ОСМ),
- полученные простым пакетированием (укладкой стопкой) металлических сеток.

Для таких анизотропных фильтрующих материалов (АФМ) нами предложен ряд новых технических решений [3], которые позволяют реализовать в них многостадийную очистку и тем самым эффективно

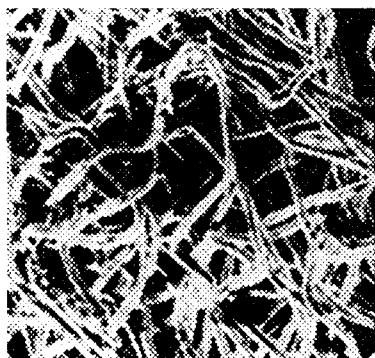
использовать их анизотропную структуру пор. Однако для целенаправленного выбора технологических режимов их получения и конструкторских решений необходимо знание взаимосвязи их структурных и гидродинамических свойств. Такая взаимосвязь может быть определена построением теоретических моделей для каждого вида материала.

Целью данной работы является разработка теоретических моделей ПВМ, ДВПЯМ и ОСМ, учитывающих их анизотропную структуру пор и описывающих взаимосвязь структурных и гидродинамических свойств.

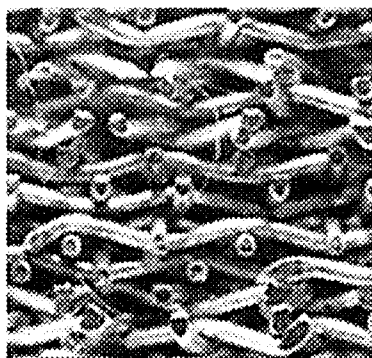
Основная часть

При разработке моделей воспользуемся апробированным для порошковых материалов подходом, основанным на построении элементарных ячеек, выделяемых из регулярной упаковки структурных элементов пористого тела. На рисунке 1 приведены реальные структуры рассматриваемых АФМ.

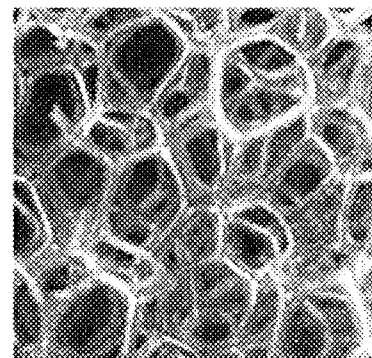
Для математического описания свойств ПВМ последний представляют в виде правильной укладки волокнистых частиц (рис. 2а). Для такой модели свойства каждого элемента объема волокнистого материала задаются параметрами элементарной ячейки в виде прямоугольного параллелепипеда, выделенного из шести элементарных волокон, образующих регулярную укладку, в центре которого расположено дополнительное элементарное волокно (рис. 2б). Размеры элементарной ячейки ПВМ характеризуются диаметром волокон d и размерами ребер (шаг расположения волокон по осям координат) вдоль оси $Ox - l$, $Oy - h$, $Oz - l$.



а



б



в

Рис. 1. Структура анизотропных фильтрующих материалов: а – ПВМ; б – ОСМ; в – ДВПЯМ

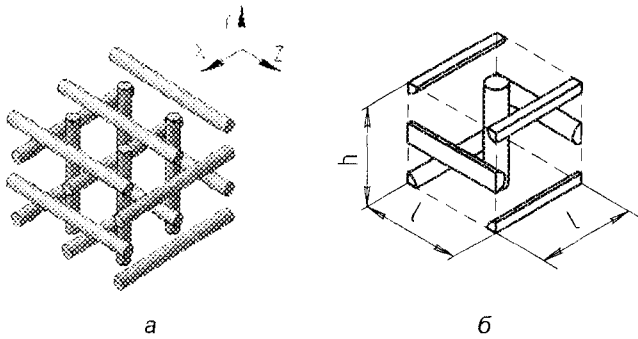


Рис. 2. Модель пористого волокнистого материала: а – модель структуры волокнистого тела; б – модель элементарной ячейки

Модель элементарной ячейки ОСМ в виде прямоугольного параллелепипеда представлена на рис. 3. Его размеры характеризуются диаметром проволоки d и шагом плетения проволоки в сетке.

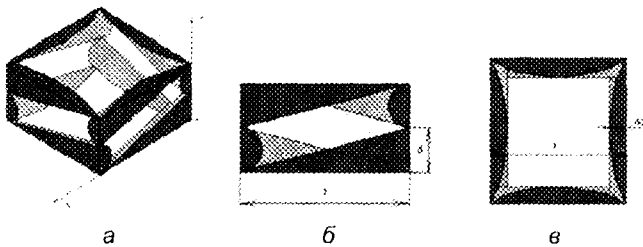


Рис. 3. Модель элементарной ячейки: а – общий вид; б – вид сбоку; в – вид сверху

На рисунке 4а приведено схематическое изображение элементарной ячейки ДВПЯМ. В качестве модели выбрана призматическая модель, представленная на рис. 4б. Такая модель, на первый взгляд, мало похожа на реальную ячеистую структуру, основным элементом которой является деформированный пентагондодекаэдр (рис. 4а). Однако она достаточно точно отражает основные закономерности, свойственные структуре исходного пенополиуретана. В рассматриваемой модели в несжатом состоянии $l = h$. В процессе сжатия полагаем, что переменным является только один параметр h .

Проиллюстрируем подробно расчет структурных и гидродинамических свойств высокопористых АФМ на примере ПВМ. К структурным свойствам пористых материалов, согласно [4], относят пористость, удельную поверхность и размер пор.

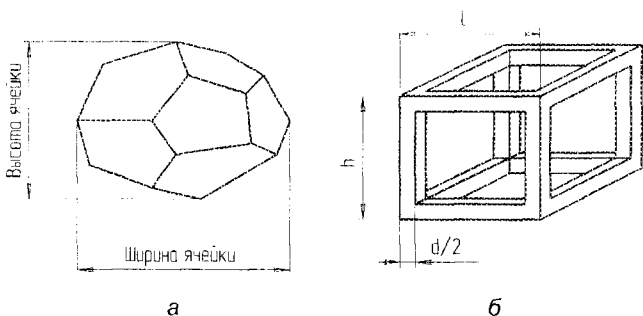


Рис. 4. Структура ДВПЯМ: а – схематическое изображение ячейки; б – кубическая модель ячейки ДВПЯМ

Пористость Π определяется отношением объема пор V_n к полному объему пористого тела V_0 [4]:

$$\Pi = \frac{V_n}{V_0} \quad (1)$$

Для рассматриваемой элементарной ячейки (рис. 2б) $V_0 = hl^2$ и $V_n = 1 - \pi d^2 \frac{(2l+h)}{4}$.

Тогда

$$\Pi = 1 - \frac{\pi d^2}{4hl^2} (2l+h) \quad (1')$$

Удельная поверхность $S_{уд}$ равна отношению площади поверхности каркаса элементарной ячейки $S_{пов}$ к ее объему V_0 : $S_{уд} = \frac{S_{пов}}{V_0}$.

Как следует из рис. 2б, $S_{пов} = \pi d(2l+h)$. Тогда

$$S_{уд} = \frac{\pi d(2l+h)}{hl^2} \quad (2)$$

Размеры пор определяются максимальными диаметрами окружности, вписанными в сечения грани элементарной ячейки, и будут характеризоваться значениями d_{ny} , d_{nz} , d_{nx} – соответственно в направлении оси OY, OZ и OX.

$$d_{nx} = d_{nz} = h - d, \quad (3)$$

$$d_{ny} = l - d. \quad (4)$$

Гидродинамические свойства ПВМ определяются коэффициентами проницаемости при различных режимах фильтрации. Расчет вязкостного K_η и инерционного K_p коэффициентов проницаемости ПВМ проведем по аналогии с расчетом гидродинамических свойств ячеистых материалов [5, 6].

С этой целью воспользуемся известным уравнением, которое описывает течение жидкости в пористой среде:

$$-\frac{dP}{dH} = \frac{\eta}{K_\eta} V + \frac{\rho}{K_p} V^2, \quad (5)$$

где dP – перепад давления на слое пористого материала, Па;

dH – толщина фильтрующего слоя, м;

ρ – плотность жидкости или газа, кг/м^3 ;

η – динамическая вязкость жидкости или газа, Па·с;

V – линейная скорость фильтрации, м/с;

K_η и K_p – вязкостной и инерционный коэффициенты проницаемости, соответственно м^2 и м.

Рассмотрим течения жидкости или газа в направлении оси OZ. Выделим три области прохождения жидкости или газа через элементарную ячейку (рис. 5): I – область, лежащая на входе и выходе потока жидкости или газа; II – переходная область внутри элементарной ячейки; III – область, содержащая центральное волокно.

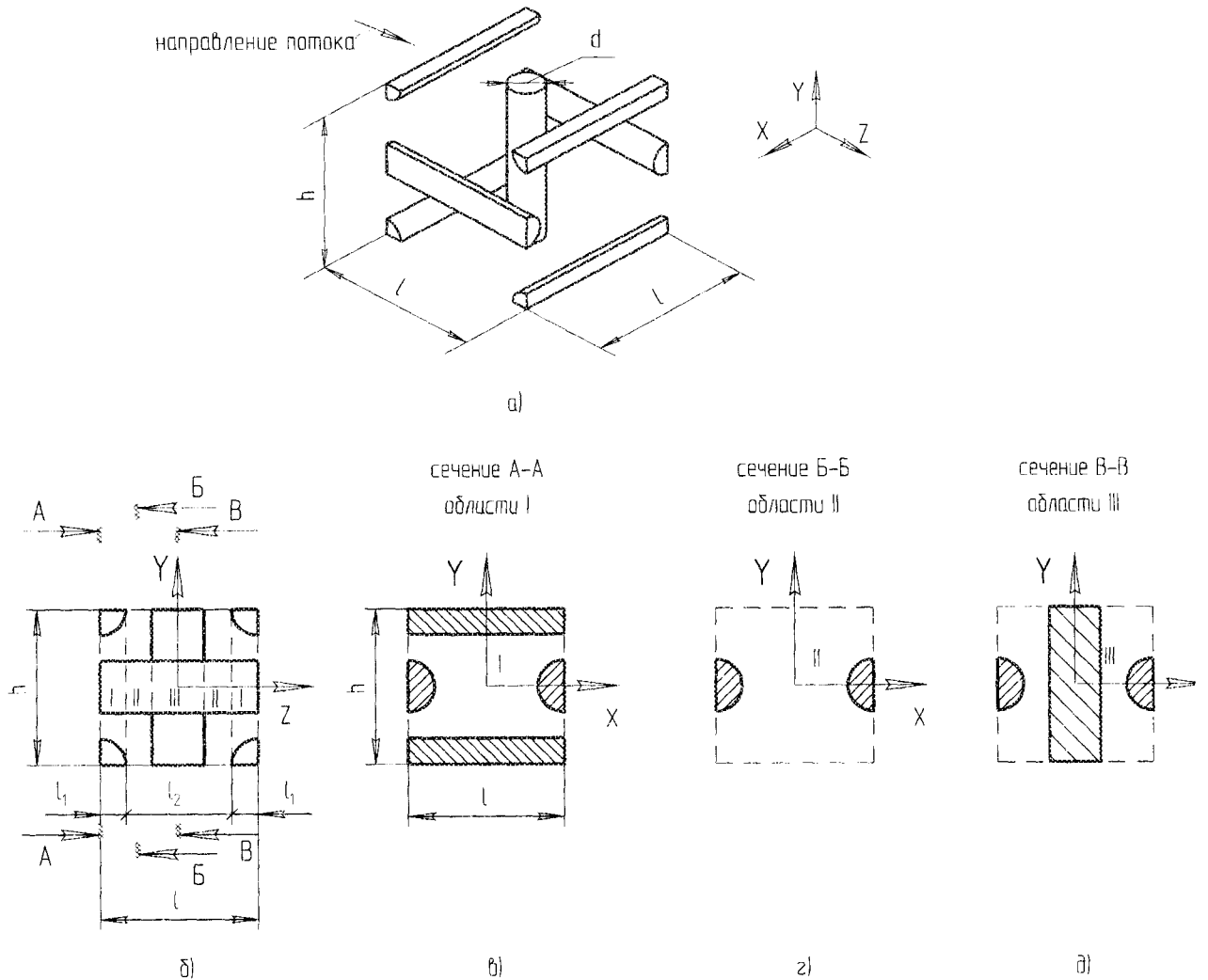


Рис. 5. Схема течения жидкости или газа через элементарную ячейку: а) – общий вид элементарной ячейки; б) – деление ячейки на области; в) – сечение области I – А-А; г) – сечение области II – Б-Б; д) – сечение области III – В-В

Для определения значений $K_{\eta z}$ и $K_{\rho z}$ необходимо рассчитать ряд вспомогательных величин.

Площади поперечных сечений области I – S_{1z} , II – S_{2z} и области III – S_{3z} :

$$S_{1z} = hl - \pi d^2 / 4 - dl, \quad S_{2z} = hl - \pi d^2 / 4,$$

$$S_{3z} = hl - \pi d^2 / 4 - dh.$$

Периметры сечений области I – N_{1z} , II – N_{2z} и области III – N_{3z} :

$$N_{1z} = \pi d + 2l, \quad N_{2z} = \pi d, \quad N_{3z} = \pi d + 2h.$$

Длины области I – l_{1z} , II – l_{2z} и области III – l_{3z} определяются как

$$l_{1z} = d, \quad l_{2z} = l - 2d, \quad l_{3z} = d. \quad (6)$$

Из условия непрерывности потока, $V_{s0} = V_{1z}S_{1z} = V_{2z}S_{2z}$, находим скорости жидкости V_{1z} , V_{2z} , V_{3z} соответственно в областях I, II и III:

$$V_{1z} = V \frac{hl}{hl - \pi d^2 / 4 - dl}, \quad V_{2z} = V \frac{hl}{hl - \pi d^2 / 4},$$

$$V_{3z} = V \frac{hl}{hl - \pi d^2 / 4 - dh}. \quad (7)$$

Гидравлические радиусы сечений области I – R_{1z} , области II – R_{2z} и области III – R_{3z} равны:

$$R_{1z} = \frac{S_{1z}}{N_{1z}} = \frac{hl - \pi d^2 / 4 - dl}{\pi d + 2l},$$

$$R_{2z} = \frac{S_{2z}}{N_{2z}} = \frac{hl - \pi d^2 / 4}{\pi d}, \quad (8)$$

$$R_{3z} = \frac{S_{3z}}{N_{3z}} = \frac{hl - \pi d^2 / 4 - dh}{\pi d + 2h}.$$

Критерии Рейнольдса Re_{1z} , Re_{2z} , Re_{3z} для потока в областях I, II и III равны:

$$Re_{1z} = \frac{V_{1z}\rho R_{1z}}{\eta} = \frac{V\rho}{\eta} \cdot \frac{hl}{\pi d + 2l},$$

$$Re_{2z} = \frac{V_{2z}\rho R_{2z}}{\eta} = \frac{V\rho}{\eta} \cdot \frac{hl}{\pi d},$$

$$Re_{3z} = \frac{V_{3z}\rho R_{3z}}{\eta} = \frac{V\rho}{\eta} \cdot \frac{hl}{\pi d + 2h}. \quad (9)$$

Потеря давления на вязкое трение в пределах элементарной ячейки определяем по формуле Дарси-Вейсбаха [5]:

$$\Delta P_{\eta z} = \frac{8l_{1z}\rho V_{1z}^2}{Re_{1z} R_{1z}} + \frac{8l_{2z}\rho V_{2z}^2}{Re_{2z} R_{2z}} + \frac{8l_{3z}\rho V_{3z}^2}{Re_{3z} R_{3z}} \quad (10)$$

Тогда, подставляя в (10) выражения (6) – (9), получим

$$\Delta P_{\eta z} = 8Vhl\eta \left[\frac{d(\pi d + 2l)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - ld)^3} + \frac{\pi^2 d^2 (l - 2d)}{(hl - \pi d^2 / 4)^3} + \frac{d(\pi d + 2h)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - dh)^3} \right] \quad (11)$$

С учетом этого потери давления на вязкое трение в пористом теле толщиной H возрастают в H/h раз, выражение (11) примет следующий вид:

$$\frac{\Delta P_{\eta z}}{H} = 8Vl\eta \left[\frac{d(\pi d + 2l)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - ld)^3} + \frac{\pi^2 d^2 (l - 2d)}{(hl - \pi d^2 / 4)^3} + \frac{d(\pi d + 2h)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - dh)^3} \right] \quad (12)$$

Инерционные потери давления при прохождении жидкости сквозь элементарную ячейку можно оценить по формуле Вейсбаха [4]:

$$\Delta P_{\rho z} = \frac{w_1 \rho (V - V_{1z})^2}{2} + \frac{w_2 \rho (V_{1z} - V_{2z})^2}{2} + \frac{w_3 \rho (V_{2z} - V_{3z})^2}{2} \quad (13)$$

где w_1, w_2, w_3 – коэффициенты потери напора. При этом полагаем, что $w_1 = w_2 = w_3 = w$.

Тогда, подставляя в (13) выражения (7), получим

$$\Delta P_{\rho z} = \frac{w\rho V^2 h^2 l^2}{2} \left[\left(\frac{1}{hl} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} \right)^2 + \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} \right)^2 \right] + \frac{w\rho V^2 h^2 l^2}{2} \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - hd} \right)^2 \quad (14)$$

Аналогично с потерями давления на вязкое трение инерционные потери в пористом теле толщиной H также возрастут в H/h раз. С учетом этого выражение (14) примет следующий вид:

$$\frac{\Delta P_{\rho z}}{H} = \frac{w\rho V^2 h l^2}{2} \left[\left(\frac{1}{hl} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} \right)^2 + \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} \right)^2 \right] + \frac{w\rho V^2 h l^2}{2} \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - hd} \right)^2 \quad (15)$$

Тогда общие потери давления в пористом теле составят

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\Delta P_{\eta}}{H} + \frac{\Delta P_{\rho}}{H} = \frac{\eta}{K_{\eta}} V + \frac{\rho}{K_{\rho}} V^2 \quad (16)$$

Подставим (12) и (15) в выражение (16) и определим $K_{\eta z}$ и $K_{\rho z}$ в виде

$$\frac{1}{K_{\eta z}} = 8ld \left[\frac{(\pi d + 2l)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - ld)^3} + \frac{\pi^2 d (l - 2d)}{(hl - \pi d^2 / 4)^3} + \frac{(\pi d + 2h)^2}{(hl - \pi d^2 / 4 - hd)^3} \right] \quad (17)$$

$$\frac{1}{K_{\rho z}} = \frac{whl^2}{2} \left[\left(\frac{1}{hl} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} \right)^2 + \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - ld} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} \right)^2 \right] + \frac{whl^2}{2} \left(\frac{1}{hl - \pi d^2 / 4} - \frac{1}{hl - \pi d^2 / 4 - hd} \right)^2 \quad (18)$$

Аналогичным образом рассчитаны гидродинамические свойства ПВМ, когда поток жидкости направлен вдоль оси OY . Для этого случая схема течения жидкости через элементарную ячейку представлена на рис. 6, а расчет вязкостного $K_{\eta y}$ и инерционного $K_{\rho y}$ коэффициентов проницаемости приведены в формулах (19) и (20):

$$\frac{1}{K_{\eta y}} = \frac{8dl^2}{h} \left[\frac{2(\pi d + 2l)^2}{(l^2 - \pi d^2 / 4 - ld)^3} + \frac{\pi^2 d (h - 2d)}{(l^2 - \pi d^2 / 4)^3} \right] \quad (19)$$

$$\frac{1}{K_{\rho y}} = \frac{w}{h} \left(\frac{dl + \pi d^2 / 4}{l^2 - dl - \pi d^2 / 4} \right)^2 + \frac{wl^4}{2h} \left[\frac{dl}{(l^2 - dl - \pi d^2 / 4)(l^2 - \pi d^2 / 4)} \right]^2 \quad (20)$$

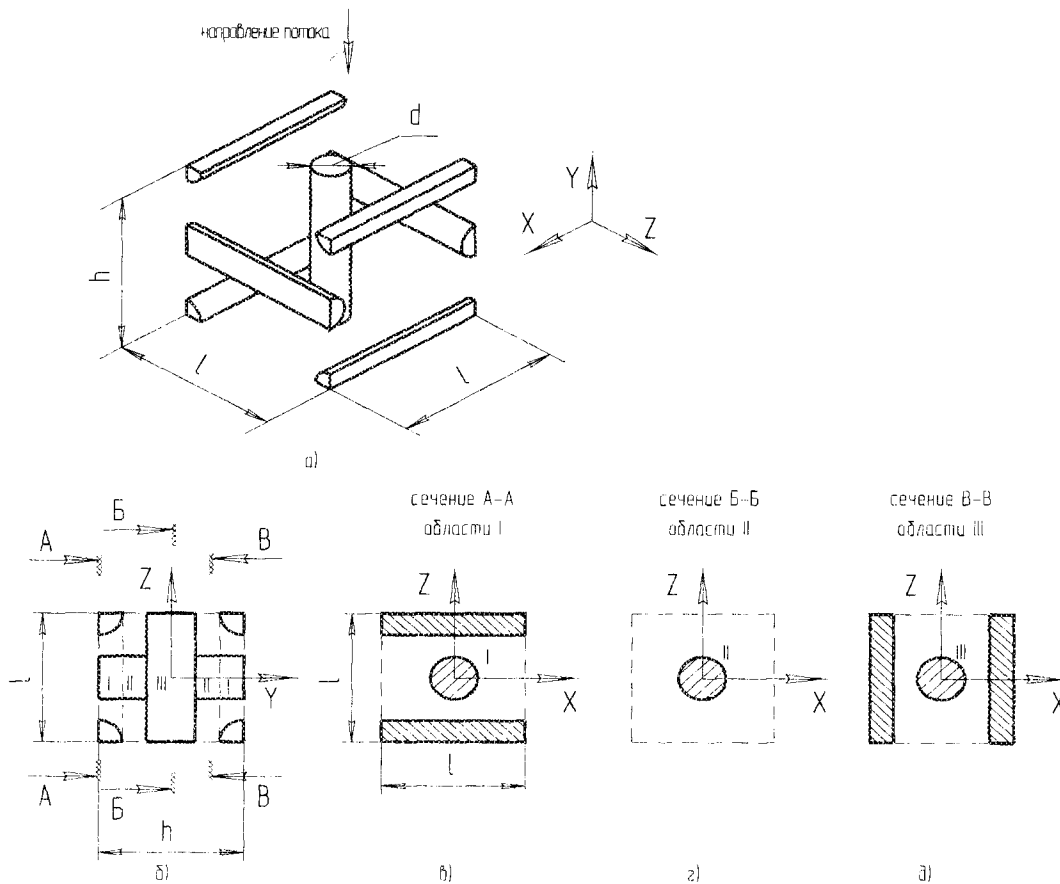


Рис. 6. Схема течения жидкости или газа через элементарную ячейку модели: а) – общий вид элементарной ячейки; б) – деление ячейки на области; в) – сечение области I – А-А; г) – сечение области II – Б-Б; д) – сечение области III – В-В

Основываясь на аналогичном подходе, были определены структурные и гидродинамические свойства для ОСМ и ДВПЯМ [2].

Анализ структурных и гидродинамических свойств различных классов АФМ показывает, что:

- ПВМ характеризуется пористостью 30...80 %, размерами пор 20...300 мкм, коэффициентом проницаемости $K \sim 10^{-12} \dots 10^{-9} \text{ м}^2$;

- ОСМ характеризуется пористостью 20...75 %, размерами пор 20...200 мкм, коэффициентом проницаемости $K \sim 10^{-16} \dots 10^{-10} \text{ м}^2$;

- ДВПЯМ – пористостью 75...98 %, размерами пор 200...5000 мкм, коэффициентом проницаемости $K \sim 10^{-8} \text{ м}^2$.

Как отмечено в работе [5], еще одной важной характеристикой является критическое число Рейнольдса, величина которого определяет режим течения жидкости или газа в пористых проницаемых материалах (при $Re < R_{кр1}$ реализуется ламинарный режим течения; при $R_{кр1} < Re < R_{кр2}$ – переходный; при $Re > R_{кр2}$ – турбулентный режим течения). На рисунке 7 показаны интервалы изменения чисел Рейнольдса для различных классов АФМ.

При этом параметр $R_{кр}$ связан со структурными факторами пористого материала и уменьшается по мере искажения геометрии пор относительно гладкого цилиндра. Как видно из рис. 7, более высокие значения $R_{кр}$ характерны для ДВПЯМ. В то же время на практике при очистке жидкостей и газов через пори-

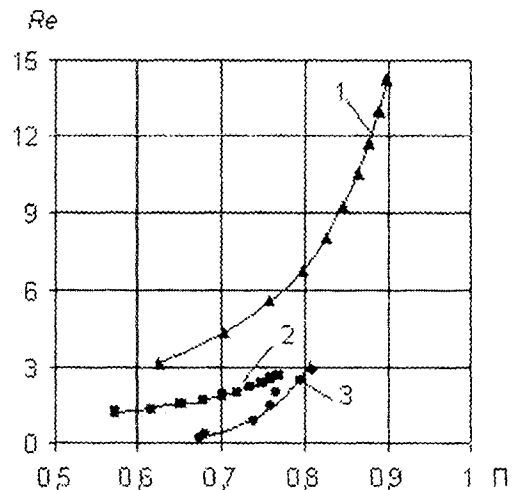


Рис. 7. Зависимость числа Рейнольдса вдоль оси OX от пористости для различных классов АФМ: 1 – ДВПЯМ; 2 – ПВМ; 3 – ОСМ

стые материалы числа Рейнольдса лежат в диапазоне 100...500 [5], поэтому в структурах АФМ, как правило, реализуется турбулентный режим течения.

На основании полученных выражений для определения структурных и гидродинамических свойств различных классов АФМ построены зависимости

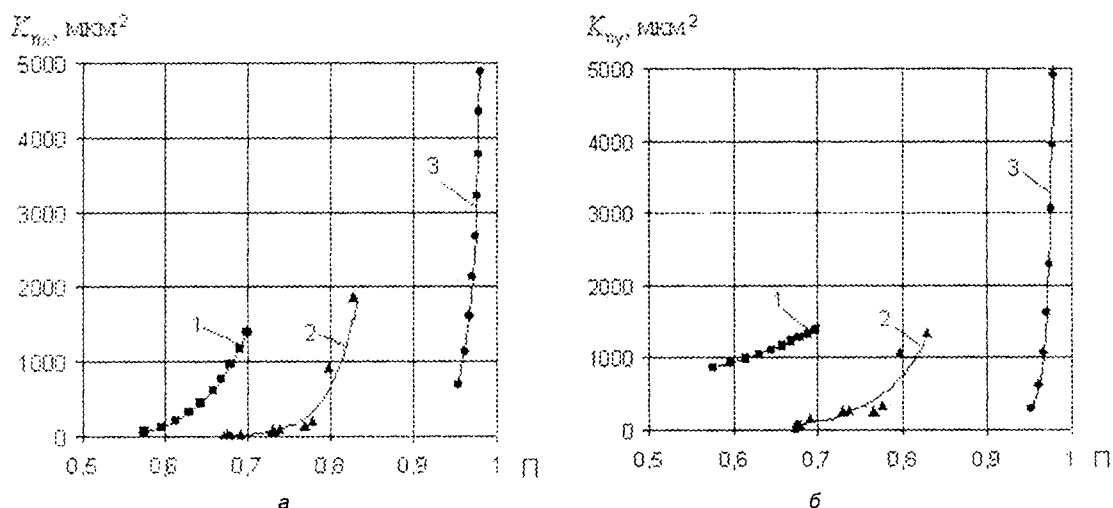


Рис. 8. Зависимость вязкостных коэффициентов проницаемости K_{η} от пористости Π для различных классов АФМ: а – вдоль оси ОХ; б – вдоль оси ОУ; 1 – ПВМ; 2 – ОСМ; 3 – ДВПАМ

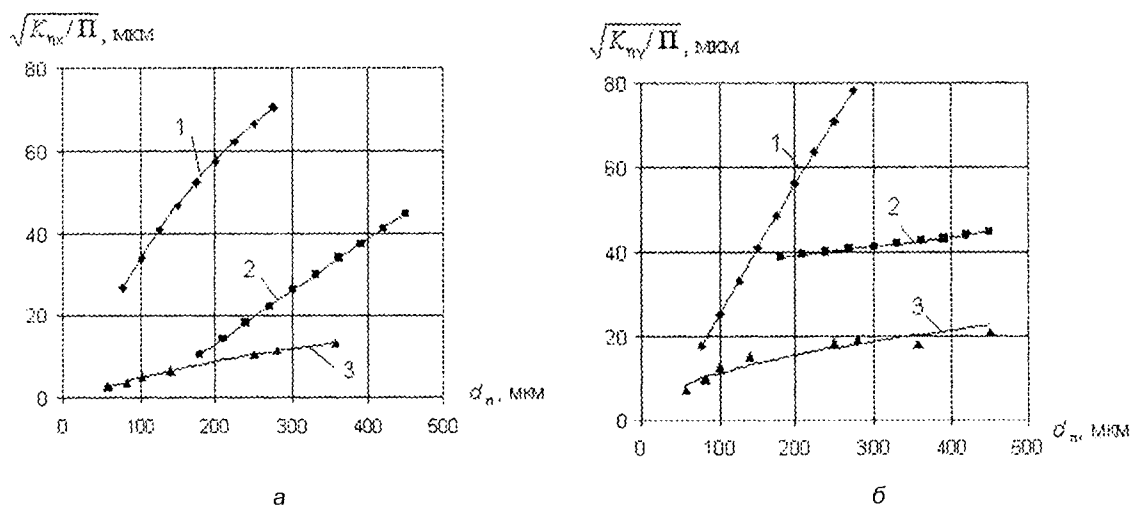


Рис. 9. Зависимость величины $\sqrt{K_{\eta}/\Pi}$ от диаметров пор: а – вдоль оси ОХ; б – вдоль оси ОУ для различных классов АФМ: 1 – ДВПАМ; 2 – ПВМ; 3 – ОСМ

вязкостных коэффициентов проницаемости вдоль оси ОХ от пористости и параметра $\sqrt{K_{\eta}/\Pi}$ от пористости в различных направлениях течения жидкости. На рисунках 8, 9 представлены результаты проведенных расчетов.

Заключение

Разработаны модели анизотропных фильтрующих материалов, учитывающие анизотропную структуру пор и позволяющие устанавливать взаимосвязь структурных и гидродинамических свойств в различных направлениях течения жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витязь, П.А. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, А.Г. Косторнов и др. М.: Металлургия, 1993. 240 с.
2. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В.М. Капцевич [и др.]. Минск: БГАТУ, 2007. 232 с.
3. Капцевич, В.М. Новые конструкции фильтров для очистки рабочих жидкостей гидравлических систем / В.М. Капцевич [и др.] // Инженерный вестник. № 1. 2007. С. 67–71.
4. Моделирование структурных и гидродинамических свойств пористых фильтрующих материалов с анизотропной структурой пор. Сообщение 1. Объемно-сетчатые материалы / В.М. Капцевич [и др.] // Порошковая металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов: Вып. 30. Минск, 2007. С. 110–113.
5. Леонов, А.Н. Пористые проницаемые материалы: теория проектирования изделий и технологий / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.К. Шелег. Мн.: Тонпик, 2003. 220 с.
6. Капцевич, В.М. Прогнозирование структурных и гидродинамических и свойств высокопористых ячеистых материалов / В.М. Капцевич, Д.И. Кривальцевич, А.Н. Леонов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов 8-й международной научно-технической конференции: г. Минск, 27–28 мая 2008 г.; Институт порошковой металлургии, 2008. С. 89–91.