

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНОГО ЯЧЕИСТОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

В.М. КАПЦЕВИЧ, А.Н. ЛЕОНОВ, Д.И. КРИВАЛЬЦЕВИЧ, И.В. ЗАКРЕВСКИЙ

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для рассматриваемой модели элементарной ячейки выведены уравнения, которые связывают ее параметры со структурными и гидродинамическими свойствами фильтрующего материала.

For considered model of an elementary cell the equations which connect its parameters with structural and hydrodynamical properties of a filtering material are deduced.

Введение

Фильтрация – наиболее простой и надежный способ очистки горюче-смазочных материалов, который представляет собой процесс отделения взвешенных частиц загрязнителя при прохождении очищаемой многофазной суспензии через пористый материал. Материалы, применяемые для очистки нефтепродуктов, относятся к классу пористых сред, характеризующихся наличием статистической совокупности пустот (пор) в квазисплошных телах. Наличие сквозных пор обуславливает способность пористых сред пропускать жидкости и задерживать находящиеся в них примеси (загрязнения).

Фильтрующие материалы (ФМ) являются самой ответственной частью фильтров. От правильного их выбора зависит производительность и качество получаемого фильтрата. Для надежной очистки нефтепродукты должны фильтроваться через перегородки: фильтрующую, на которой задерживаются твердые частицы; коагулирующую, на которой коалесцируют капли воды; водоотталкивающую – для отделения свободной воды из топлив и масел.

Основная часть

Качество фильтрации в наибольшей степени зависит от применяемого фильтрующего материала. Правильный его выбор влияет на производительность фильтрации и качество получаемого фильтрата. В настоящее время для очистки нефтепродуктов применяются различные фильтрующие материалы (специальные бумаги и картоны, сетчатые материалы, пористые порошковые материалы и др.), отличающиеся по стоимости и фильтрующим свойствам. Одной из задач, связанной с обеспечением долговечности работы сельскохозяйственной техники при минимизации эксплуатационных расходов, является применение для очистки нефтепродуктов недорогих и недефицитных фильтрующих материалов, обеспечивающих заданную тонкость очистки, имеющих достаточно высокий ресурс работы и грязеемкость, не подвергающихся разрушающему воздействию очищаемого нефтепродукта и не ухудшающих свойства этого продукта при контакте с ним, а также обладающих способностью восстанавливать свои фильтрационные и гидравлические свойства после выработки ими ресурса с помощью многократной регенерации.

Проницаемость пористых тел для жидкостей и

задерживающая способность для загрязнений существенно зависят от характера их поровой структуры. Поэтому повышение общей эффективности очистки нефтепродуктов должно базироваться на комплексном изучении структурных, гидравлических и фильтрующих свойств ФМ. К пористым средам относят как естественные образования, так и искусственные, получаемые в результате агрегации дисперсного материала (порошков, волокон) или другими способами, позволяющими образовывать совокупность большого числа взаимно связанных пустот в сплошных средах. В этой связи известные классификации пористых сред позволяют разделить их на корпускулярные, волокнистые и ячеистые [1–3]. На рис.1 представлены микрофотографии порошковых, волокнистых и ячеистых ФМ.

Фильтрующие материалы на основе полимеров в последнее время все шире используются для очистки газообразных и жидких сред, в том числе нефтепродуктов. Одним из таких материалов является ретикулированный пенополиуретан (ППУ), относящийся к классу ячеистых фильтрующих материалов [3,4]. Отличительной его особенностью от других видов ППУ является наличие открытых пор. На рисунке 2 приведено реальное строение (2а) и схематическое изображение ячеек (2б) ППУ. Ретикулированный ППУ со множеством ребер формирует структуру со сложными траекториями для потоков очищаемой жидкости, имея при этом большую удельную поверхность и пористость.

Размер ячеек и характер структуры материала являются самыми важными параметрами ППУ при его использовании для фильтрации. Основным показателем, которым характеризуется ППУ – ppi (количество пор на дюйм (pores per inch)). Он лежит в пределах от 8 до 110 ppi . Поскольку размер ячеек может меняться, то весьма важным показателем применимости ППУ для фильтрации является пористость. Этот параметр колеблется от 99 % при плотности 10 $кг/м^3$ до 91,1 % при плотности 96 $кг/м^3$.

Структура ППУ весьма однородна, при этом многими параметрами материала, такими как размер ячеек, жесткость, толщина и простота придания ей необходимой формы, можно управлять. В настоящее время разработанная модель, описывающая основные свойства изотропного материала с такой структурой. Для этого материала используют модель элементарной ячейки, представляющей объемный каркас, в котором ребра выполнены в виде стержней квадратного сечения [2].

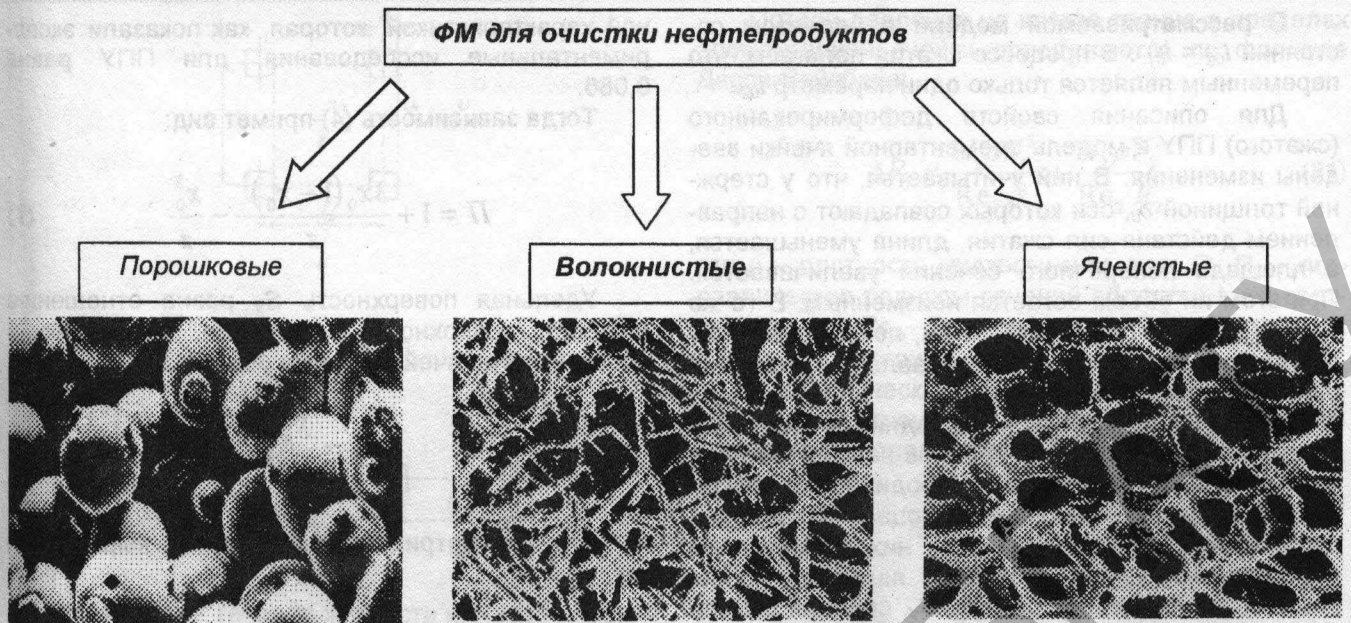
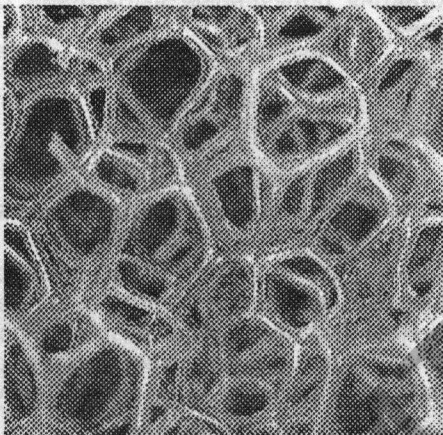
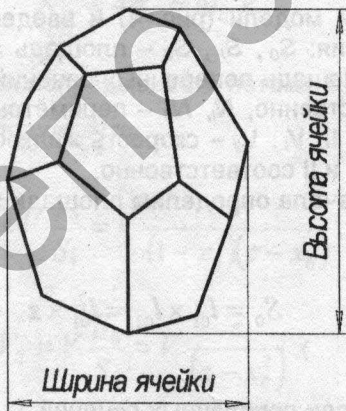


Рис. 1. Классификация фильтрующих материалов



а



б

Рис. 2. Строение ячеек ретикулированного РПУ

При упругом деформировании (сжатии) РПУ возможно управлять его пористой структурой и создавать материал с анизотропной структурой пор, размеры которых могут изменяться в направ-

лении фильтрации, т.е. обладать переменной пористостью, определяющей эффект глубинного, а не поверхностного фильтрования.

Из приведенного рис. 2 следует, что математически описать такую структуру достаточно сложно. Поэтому нами в качестве модели для ячеистого материала была выбрана кубическая модель, представленная на рис. 3. Кубическая модель, на первый взгляд, мало похожа на реальную его структуру, основным элементом которой является пентагондодокаэдр. Однако эта модель достаточно точно отражает основные закономерности, свойственные структуре РПУ. К достоинствам данной модели относятся наглядность, простота инженерных расчетов и возможность расчета на ее основе структурных и гидродинамических свойств материала, и, самое главное, возможность определять изменение этих свойств при сжатии РПУ.

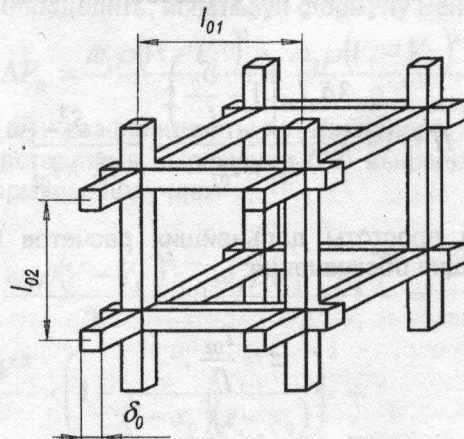


Рис. 3. Кубическая модель ячейки ретикулированного РПУ

В рассматриваемой модели в несжатом состоянии $l_{02} = l_{01}$. В процессе сжатия полагаем, что переменным является только один параметр l_{02} .

Для описания свойств деформированного (сжатого) ППУ в модель элементарной ячейки введены изменения. В ней учитывается, что у стержней толщиной δ_0 , оси которых совпадают с направлением действия сил сжатия, длина уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. При этом их объем остается неизменным. В то же время длины и форма стержней, лежащих в плоскостях, перпендикулярных направлению действия сил, остаются неизменными.

Знание структурных и гидродинамических характеристик пористых материалов необходимо для описания фильтрационной гидродинамики, физических и физико-химических процессов задержки загрязнений, протекающих в них. Основными структурными характеристиками являются пористость Π , удельная поверхность S_V , средний размер пор $d_{пср}$, а гидродинамическими – коэффициент проницаемости K . Рассмотрим методы определения этих характеристик.

Пористость материала ячеистой структуры характеризуется отношением объема пор V_n в элементарной ячейке к ее полному объему V_0 и определяется выражением:

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

Объем элементарной ячейки равен

$$V_0 = l_{01}^2 \times l_{02} \quad (2)$$

а объем пор

$$V_n = l_{01}^2 \times l_{02} + 3\delta_0(l_{01} - \delta_0)^2 - \delta_0^3 \quad (3)$$

Тогда, подставляя в формулу (1) выражения (2) и (3) и выполнив преобразования, можно записать:

$$\Pi = 1 + \frac{3\delta_0 l_{01} \left(1 - \frac{\delta_0}{l_{01}}\right)^2}{l_{01} \times l_{02}} - \frac{\delta_0^3}{l_{01}^2 \times l_{02}} \quad (1.4)$$

Для простоты дальнейших расчетов введем следующие обозначения:

$$z = \frac{l_{02}}{l_{01}} \quad (5)$$

$$x_0 = \frac{\delta_0}{l_{01}} \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) величина z характеризует степень сжатия ППУ, а x_0 является структур-

ной характеристикой, которая, как показали экспериментальные исследования, для ППУ равна 0,086.

Тогда зависимость (4) примет вид:

$$\Pi = 1 + \frac{3x_0(1-x_0)^2}{z} - \frac{x_0^3}{z} \quad (7)$$

Удельная поверхность S_V равна отношению площади поверхности материала, входящего в элементарную ячейку S_n , к ее объему V_0 :

$$S_V = \frac{S_n}{V_0} \quad (8)$$

Для рассматриваемой модели S_n выражается как

$$S_n = 12(l_{01} - \delta_0)\delta_0 \quad (9)$$

Подставляя полученные выражения (2), (9) в (8) получаем, что

$$S_V = \frac{12x_0(1-x_0)}{l_{01}z} \quad (10)$$

Размеры пор d_n определяются минимальными диаметрами окружности, вписанными в сечения пор. Полагаем, что при сжатии размеры пор будут изменяться только в направлении, совпадающем с направлением сжатия. Тогда размеры пор в направлении, параллельном усилию сжатия $d_{n\parallel} = l_{02}z$, а размеры пор в направлении, перпендикулярном усилию сжатия $d_{n\perp}$, равны l_{01} .

Рассчитаем вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости. Выделим две области прохождения жидкости через элементарную ячейку кубической модели (рис. 4) и введем следующие обозначения: S_0 , S_I , S_{II} – площадь элементарной ячейки, площадь поперечных сечений областей I и II соответственно, N_I , N_{II} – периметры сечений областей I и II, V_I , V_{II} – скорость жидкости или газа в областях I и II соответственно.

Для начала определим площадь элементарной ячейки:

$$S_0 = l_{01} \times l_{02} = l_{01}^2 \times z \quad (11)$$

Площади поперечных сечений S_I , S_{II} областей I и II определяются следующими выражениями:

$$S_I = (l_{01} - \delta_0)(l_{02} - \delta_0) = l_{01}^2(1-x_0)(z-x_0) \quad (12)$$

$$S_{II} = l_{01}l_{02} - \delta_0^2 = l_{01}^2(z-x_0^2) \quad (13)$$

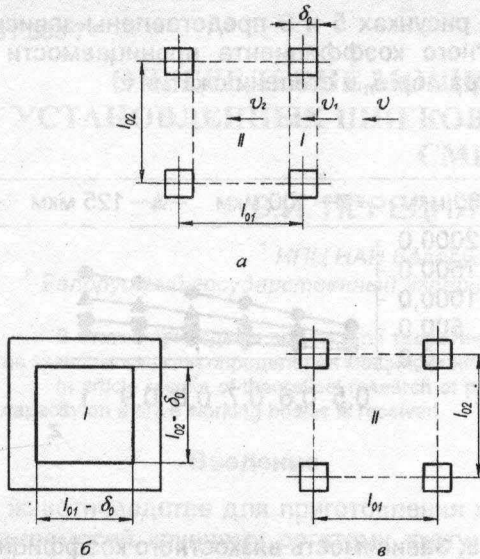


Рис. 4. Схема течения жидкости или газа через элементарную ячейку кубической модели: а – общий вид, б – сечение области I, в – сечение области II

Длины l_1, l_2 областей I и II равны:

$$l_1 = \delta_0 = l_{01} x_0, \quad (14)$$

$$l_2 = l_{01} - \delta_0 = l_{01} \left(1 - \frac{\delta_0}{l_{01}}\right) = l_{01} (1 - x_0). \quad (15)$$

Периметры сечений N_I, N_{II} областей I и II равны:

$$N_I = 2(l_{01} - \delta_0) + 2(h - \delta_0) = 2l_{01} (1 + z - 2x_0), \quad (16)$$

$$N_{II} = 4\delta_0 = 4l_{01} x_0. \quad (17)$$

Из условия непрерывности потока $V_1 S_1 = V S_0$ и $V_2 S_2 = V S_0$ следует, что:

$$V_1 = V \frac{S_0}{S_1} = V \frac{z}{(1-x_0)(z-x_0)}, \quad (18)$$

$$V_2 = V \frac{S_0}{S_2} = V \frac{z}{(z-x_0^2)}. \quad (19)$$

Для расчета коэффициентов проницаемости используем выражение, описывающее течение жидкости или газа в пористой среде:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = \frac{\eta_z}{K_\eta} V + \frac{\rho_z}{K_\rho} V^2. \quad (20)$$

Потери давления на вязкое трение в пределах элементарной ячейки определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_\eta = \frac{8l_1 \rho V_1^2}{Re_1 R_1} + \frac{8l_2 \rho V_2^2}{Re_2 R_2}, \quad (21)$$

где ρ – плотность жидкости или газа; R_I, R_{II} – гидравлические радиусы сечений областей I и II соответственно; Re_1, Re_2 – критерии Рейнольдса для потока в областях I и II соответственно.

Гидравлические радиусы сечений I и II характеризуются отношением площади сечения к его периметру и определяются выражениями:

$$R_I = \frac{S_I}{N_I} = l_{01} \frac{(1-x_0)(z-x_0)}{2(1+z-2x_0)}, \quad (22)$$

$$R_{II} = \frac{S_{II}}{N_{II}} = l_{01} \frac{(z-x_0^2)}{4x_0}. \quad (23)$$

Критерии Рейнольдса для потока жидкости или газа в областях I и II равны:

$$Re_1 = \frac{V_1 \rho R_1}{\eta} = \frac{V \rho l_{01}}{\eta} \times \frac{z}{2(1+z-2x_0)}, \quad (24)$$

$$Re_2 = \frac{V_2 \rho R_2}{\eta} = \frac{V \rho l_{01}}{\eta} \times \frac{z}{4x_0}. \quad (25)$$

Тогда, подставляя (14), (15), (18), (19), (22–26) в выражение (21), получим данные потери давления на вязкое трение:

$$\Delta P_\eta = \frac{8l_1 \rho V_1^2}{Re_1 R_1} + \frac{8l_2 \rho V_2^2}{Re_2 R_2} = \frac{\eta V}{l_{01}} \times \times 32x_0 z \left[\frac{(1+z-2x_0)^2}{(1-x_0)^3(z-x_0)^3} + \frac{4x_0(1-x_0)}{(z-x_0^2)^3} \right]. \quad (26)$$

Инерционные потери давления при прохождении жидкости или газа сквозь элементарную ячейку можно определить, используя формулу Вейсбаха:

$$\Delta P_\rho = \frac{\omega_1 \rho (V - V_1)^2}{2} + \frac{\omega_2 \rho (V_1 - V_2)^2}{2}, \quad (27)$$

где ω_1, ω_2 – коэффициенты потери напора.

Подставляя в выражение (28) вышеприведенные формулы, получаем:

$$\Delta P_\rho = \frac{\omega_1 \rho (V - V_1)^2}{2} + \frac{\omega_2 \rho (V_1 - V_2)^2}{2} = \frac{\omega_1 \rho V^2}{2} \times \left(1 - \frac{z}{(1-x_0)(z-x_0)}\right)^2 + \frac{\omega_2 \rho V^2}{2} \times \left(\frac{z}{(1-x_0)(z-x_0)} - \frac{z}{(z-x_0^2)}\right)^2. \quad (28)$$

При сжатии вязкостные и инерционные потери при прохождении жидкости или газа через элементарную ячейку пористого тела высотой H_0 возрастут в $\frac{H_0}{l_0}$, т.е. на величину степени сжатия:

$$\frac{\Delta P_\eta}{H_0} = \frac{1}{l_{01}} \times \frac{\eta V}{l_{01}} \times 32x_0 z \left[\frac{(1+z-2x_0)^2}{(1-x_0)^3(z-x_0)^3} + \frac{4x_0(1-x_0)}{(z-x_0^2)^3} \right] \quad (30)$$

$$\frac{\Delta P_\rho}{H_0} = \frac{1}{l_{01}} \times \frac{\omega \rho V^2}{2} \times \left[\left(1 - \frac{z}{(1-x_0)(z-x_0)} \right)^2 + \left(\frac{z}{(1-x_0)(z-x_0)} - \frac{z}{(z-x_0^2)} \right)^2 \right] \quad (31)$$

Общие потери давления в пористом теле ячеистой структуры составят:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = \frac{\Delta P_\eta}{H_0} + \frac{\Delta P_\rho}{H_0} = \frac{\eta}{K_\eta} V + \frac{\rho}{K_\rho} V^2 \quad (32)$$

Из выражения (1.32) определяем K_η и K_ρ и, подставляя (1.30), (1.31), получаем:

$$\frac{1}{K_\eta} = \frac{128x_0 z}{l_{01}^2} \times \left[\frac{(1+z-2x_0)^2}{4(1-x_0)^3(z-x_0)^3} + \frac{4x_0(1-x_0)}{(z-x_0^2)^3} \right] \quad (33)$$

$$\frac{1}{K_\rho} = \frac{\omega}{2l_{01}} \times \frac{x_0^2}{(1-x_0)^2} \times \left[(1+z-x_0)^2 + \frac{z^2(1+z-2x_0)^2(1-x_0)^2}{(z-x_0)^4(1+x_0)^2} \right] \quad (34)$$

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости вязкостного коэффициента проницаемости K_η от диаметра пор d_n и степени сжатия z .

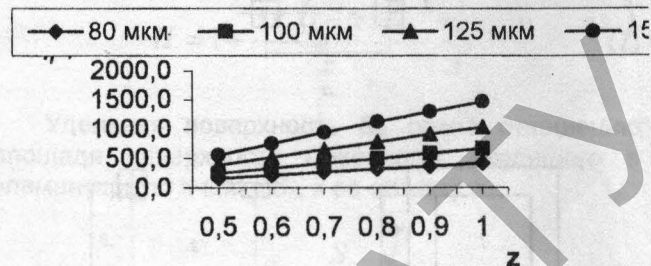


Рис. 5. Зависимость вязкостного коэффициента проницаемости K_η от степени сжатия z

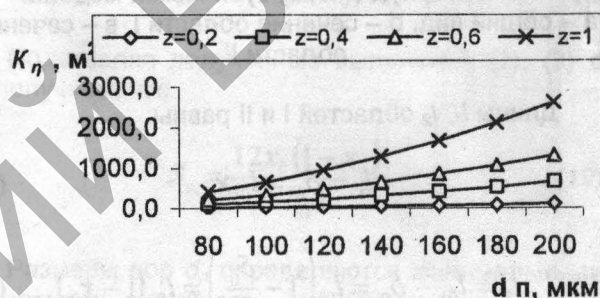


Рис. 6. Зависимость вязкостного коэффициента проницаемости K_η от размеров пор d_n

Заключение

Для рассматриваемой модели элементарной ячейки выведены уравнения, которые связывают ее параметры (длины и площади поперечного сечения стержней в направлении, перпендикулярном действию сил сжатия) со структурными (размеры пор, удельная поверхность, пористость) и гидродинамическими (коэффициент проницаемости) свойствами ФМ. Полученные выражения описывают процесс фильтрования в анизотропном ФМ. На их основе можно рассчитывать такие важные эксплуатационные параметры изделия, как тонкость фильтрования, грязеемкость и ресурс работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удлер Э.И. Фильтрация нефтепродуктов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988. – 216 с.
2. Витязь П.А., Капцевич В.М., Кусин Р.А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
3. Прикладная механика ячеистых пластмасс: Пер. с англ. / Под ред. Н.К. Хильярда. – М.: Мир, 1985. – 360 с., ил.
4. Пористые проницаемые материалы: теория проектирования изделий и технологий / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.К. Шелег. – Минск: Тонпик, 2003. – 220 с.