

Калюжный А.Б.¹,
Платков В.Я.²

¹Харьковский национальный
технический университет
сельского хозяйства
имени Петра Василенко,
г. Харьков, Украина,
E-mail: albokal@ukr.net

²Луганский национальный
аграрный университет,
г. Харьков, Украина,
E-mail: vplatkov@gmail.com

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМЫХ
ПОРОВЫХ КАНАЛОВ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ
ПО РАЗМЕРАМ ИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК

УДК 539.217

Предложен метод оценки распределения коэффициентов проницаемости по размерам поровых каналов фильтроматериалов на основе анализа параметров касательных к кривой вытеснения. Получено распределение коэффициентов проницаемости по размерам поровых каналов в полимерном фильтрующем материале с толщиной фильтрации 3 мкм. Показано, что в указанном фильтроматериале наиболее проницаемые поровые каналы, через которые проходит основной поток (более 75% общего расхода газа) имеют диаметры в интервале 13,8 – 22,4 мкм.

Ключевые слова: пористый политетрафторэтилен, распределение поровых каналов по размерам, коэффициент проницаемости.

Введение. Развитие сельского хозяйства в Украине предусматривает широкое использование материалов стойких к агрессивной среде, в том числе пористых полимерных материалов. Одной из существенных тенденций в области полимерного материаловедения является разработка и изучение пористых материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Важнейшими эксплуатационными характеристиками фильтрующих материалов являются их толщина очистки и проницаемость [1]. Проницаемость фильтроматериала – интегральная характеристика, отражающая пропускную способность и количество поровых каналов определенного диаметра. В фильтроматериалах имеет место распределение поровых каналов по их проницаемости. Для практических целей в указанном распределении целесообразно выделить группу поровых каналов, на которую приходится основной поток фильтруемой среды. Отметим, что эта группа определяет и толщину очистки фильтра. Для изучения распределения проницаемости поровых каналов и выделения интервала диаметров поровых каналов, обеспечивающих основной поток фильтруемой среды, целесообразно использовать метод вытеснения жидкости из пор [2]. Ранее [3] данным методом было установлено распределение поровых каналов по их диаметрам, которое лишь косвенным образом позволяет судить о фильтрующей способности этого материала. Отметим, что при анализе этих данных авторы [4] методом “секущих” через точки кривой вытеснения аналитически определяли приращение расхода газа, вызванное открывающимися новыми поровыми каналами. Однако, такой подход не вполне корректен, так как не отражает физическую сущность процесса вытеснения жидкости из пор с последующей продувкой открывшихся поровых каналов сжатым газом, что, в конечном счете, приводит к резкому искажению данных о распределении поровых каналов по их диаметрам.

В данной работе предложен метод оценки распределения коэффициентов проницаемости по диаметрам поровых каналов на основе аналитического определения параметров касательных к точкам кривой вытеснения, что, в частности, позволило определить диапазон поровых каналов, обеспечивающих основной поток фильтруемой среды. Предложенный подход целесообразно использовать для анализа экспериментальных данных поровой структуры и получения распределения коэффициентов проницаемости

по размерам пор в конкретных фильтрующих материалах и продемонстрировать возможности такого подхода при анализе проницаемости полимерного фильтрующего материала.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 схематично показана зависимость расхода воздуха через фильтрующий материал Θ от перепада давления ΔP (кривая вытеснения) и приведены построения, поясняющие сущность предлагаемого метода.

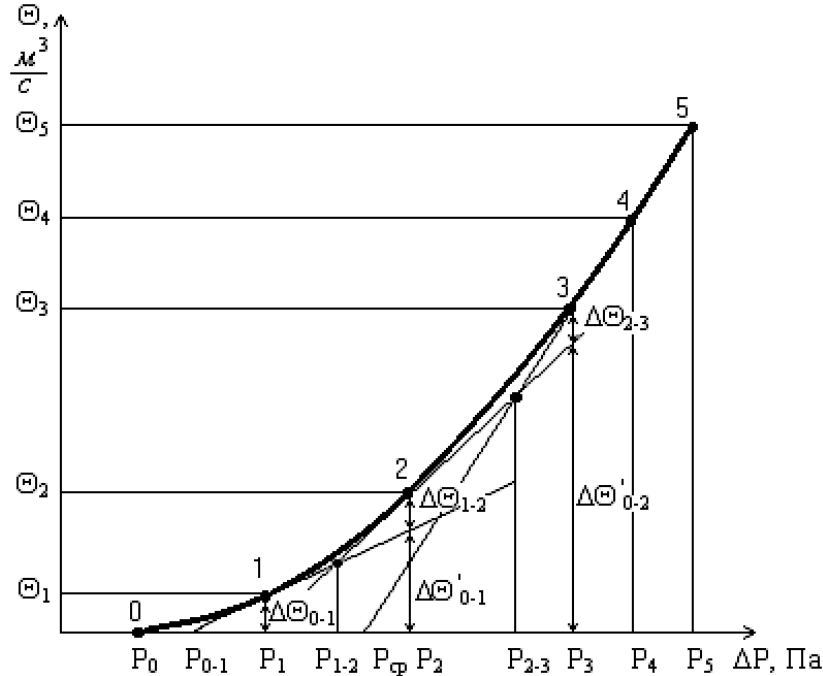


Рис. 1 – Зависимость изменения расхода воздуха через пропитанный жидкостью фильтрующий материал от перепада давления

В процессе продувки пористого материала, предварительно насыщенного жидкостью, на участке кривой вытеснения 0-1 открываются поровые каналы диаметрами от d_0 до d_1 , соответствующие давлениям от P_0 до P_1 , и описываемые выражением [3]:

$$d = \frac{4\sigma \cos \alpha}{\Delta P}, \quad (1)$$

где d – диаметр порового канала, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; α – краевой угол смачивания жидкостью поверхности поровых каналов, град; ΔP – перепад статического давления на образце, Па;

При перепаде давления P_1 через эту группу поровых каналов и через избыточный слой смачивающей жидкости, находящейся над исследуемым материалом, реализуется расход воздуха $\Delta\Theta_{0-1} = \Theta_1$. Часть перепада давления P_1 затрачивается на продувку пузырьков воздуха через слой жидкости, причем P_{0-1} равно давлению продавливания жидкости через поровые каналы, размер которых равен среднему гидравлическому диаметру совокупности поровых каналов с диаметрами в диапазоне от d_0 до d_1 . Таким образом, перепад давления, обеспечивающий расход воздуха $\Delta\Theta_{0-1}$ через группу поровых каналов от d_0 до d_1 , равен $P_0 - P_{0-1}$, а коэффициент проницаемости K_{0-1} этой группы поровых каналов, согласно уравнению Дарси (см., например, [5]), описывается как:

$$K_{0-1} = \frac{\Delta\Theta_{0-1} \mu H}{(P_1 - P_{0-1}) S}, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость газа, Па·с; H – толщина фильтра, м; S – площадь фильтра, м².

Перепад давления P_{0-1} определяется как точка пересечения с осью абсцисс касательной к кривой вытеснения, проведенной через точку 1, причем эта касательная может быть описана уравнением $\Delta\Theta = a_1P + b_1$ и при нахождении параметров a_1 и b_1 , перепад давления будет равен $P_{0-1} = -b_1/a_1$.

При дальнейшем повышении давления (участок кривой вытеснения 1-2) расход воздуха возрастает как за счет увеличения количества воздуха, проходящего через уже открывшиеся поры ($\Delta\Theta_{0-1}$), так и в результате открытия поровых каналов меньшего диаметра ($\Delta\Theta_{1-2}$). Приращение расхода газа $\Delta\Theta_{1-2}$ через группу поровых каналов диаметрами от d_1 до d_2 определяется из соотношения $\Theta_2 = \Delta\Theta_{1-2} + \Delta\Theta_{0-1}$, при этом $\Delta\Theta_{0-1} = a_1P_2 + b_1$. Перепад давления, обеспечивающий расход воздуха $\Delta\Theta_{1-2}$ через группу поровых каналов диаметрами от d_1 до d_2 равен $P_2 - P_{1-2}$, а коэффициент их проницаемости:

$$K_{1-2} = \frac{\Delta\Theta_{1-2}\mu H}{(P_2 - P_{1-2})S} \quad (3)$$

Перепад давления P_{1-2} определяется, как точка пересечения касательных к кривой вытеснения в точках 1 и 2, причем касательная в точке 2 может быть описана зависимостью вида $\Theta = a_2P + b_2$. При нахождении параметров a_2 и b_2 , перепад давления P_{0-1} будет равен $P_{0-1} = -(b_1 - b_2)/(a_2 - a_1)$.

После вытеснения жидкости из всех проницаемых поровых каналов фильтра (точка 3 на рис.1) кривая вытеснения переходит в прямолинейную зависимость расхода воздуха от перепада давления на фильтре, определяемую гидравлическим сопротивлением совокупности поровых каналов. Параметры a_3 и b_3 могут быть установлены методом наименьших квадратов. Тогда перепад давления, обеспечивающий расход воздуха $\Delta\Theta_{2-3}$ через группу поровых каналов с диаметрами от d_2 до d_3 равен $P_3 - (b_2 - b_3)/(a_3 - a_2)$. Средний гидравлический диаметр совокупности всех проницаемых пор (от d_0 до d_3) соответствует давлению $P_{cp} = -b_3/a_3$.

Таким образом, в общем виде коэффициент проницаемости для группы поровых каналов с диаметрами в диапазоне от d_{i-1} до d_i описывается как

$$K_i = \frac{[\Theta_i - (a_{i-1}P - b_{i-1})]\mu H}{[P_i - (b_{i-1} - b_i)/(a_i - a_{i-1})]S} \quad (4)$$

где P_i и Θ_i – координаты i -той точки кривой вытеснения; a_{i-1} , b_{i-1} и a_i, b_i – параметры касательных в точках $(i-1)$ и (i) кривой вытеснения, соответственно.

Для определения параметров касательных использован полином Лагранжа, описывающий участок кривой вытеснения по трем точкам этой кривой. Так, например, для точек кривой вытеснения 1,2,3 эта зависимость примет вид:

$$\Theta(P) = \Theta_1 \frac{(P - P_2)(P - P_3)}{(P_1 - P_2)(P_1 - P_3)} + \Theta_2 \frac{(P - P_1)(P - P_3)}{(P_2 - P_1)(P_2 - P_3)} + \Theta_3 \frac{(P - P_1)(P - P_2)}{(P_3 - P_1)(P_3 - P_2)} \quad (5)$$

Угловым коэффициентом a_2 наклона касательной в точке 2 равен производной функции $\Theta = f(P)$:

$$a_2 = \Theta_1 \frac{(P_2 - P_3)}{(P_1 - P_2)(P_1 - P_3)} + \Theta_2 \frac{(2P_2 - P_1 - P_3)}{(P_2 - P_1)(P_2 - P_3)} + \Theta_3 \frac{(P_1 - P_2)}{(P_3 - P_1)(P_3 - P_2)} \quad (6)$$

Параметр b_2 определяется по a_2 и координатам точки 2 кривой вытеснения (Θ_2 и P_2) как $b_2 = \Theta_2 - a_2P_2$.

Для определения координат точки перехода кривой вытеснения в прямую определяется вторая производная функции $\Theta = f(P)$, которая в этой точке становится равной нулю. С учетом погрешности определения расхода газа ε вторая производная в точке 2 имеет вид:

$$\Theta''(P) = \frac{2(\Theta_1 - \varepsilon)}{(P_1 - P_2)(P_1 - P_3)} + \frac{2(\Theta_2 + \varepsilon)}{(P_2 - P_1)(P_2 - P_3)} + \frac{2(\Theta_3 - \varepsilon)}{(P_3 - P_1)(P_3 - P_2)}. \quad (7)$$

Изложенный подход используем для определения ряда коэффициентов проницаемости для групп пор разных интервалов диаметров в полимерном фильтрующем материале типа ФЭП с номинальной толщиной фильтрации 3 мкм. Данные для расчета K_i по уравнению (4) приведены в табл.1.

Таблица 1

Распределение коэффициентов проницаемости по размерам пор в полимерном фильтрующем материале с номинальной толщиной фильтрации 3 мкм

$P_i \cdot 10^{-3}$, Па	$\Theta_i \cdot 10^6$, м ³ /с	$\Theta'' \cdot 10^6$	d_{i-1} , мкм	d_i , мкм	$a_i \cdot 10^3$	b_i	$K_i \cdot 10^{13}$, м ²	$\frac{K_i}{\sum K_i}$
2,4	0,00	-	-	-	0,000	0,397	-	-
2,8	0,06	0,66	36,3	31,1	0,163	-0,397	0,569	0,043
3,3	0,15	1,51	31,1	26,4	0,219	-0,574	0,201	0,015
3,9	0,31	8,80	26,4	22,4	0,533	-1,767	1,093	0,082
4,6	0,90	19,60	22,4	19,0	1,530	-6,132	3,535	0,266
5,4	2,75	10,80	19,0	16,1	2,750	-12,08	4,267	0,321
6,3	5,65	2,80	16,1	13,8	3,450	-16,10	2,599	0,195
7,3	9,36	-1,12	13,8	11,9	3,731	-17,87	1,019	0,077
8,4	13,49	-	11,9	10,4	-	-	-	-
9,6	17,95	-	10,4	9,1	-	-	-	-
10,9	22,80	-	9,1	8,0	-	-	-	-

Из табл.1 следует, что через поровые каналы с диаметрами в интервале 22,4 ÷ 13,8 мкм фильтруется 75% общего потока фильтруемой среды, что можно считать основной частью потока. Соотношение среднего диаметра поровых каналов (18,1 мкм) и номинальной толщины очистки (3 мкм) равно ≈ 6.

Выводы. Таким образом, предложенный метод анализа позволяет получить интервал диаметров поровых каналов, обеспечивающих фильтрацию основного потока, что, в свою очередь, дает возможность оценить номинальную толщину очистки фильтроматериала.

Литература:

1. A.V. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov. Structure of porous materials and their permeability: determination by computer-aided simulation // Functional Materials. – 2001. – Vol.8, №1. – P. 90-93.
2. ГОСТ Р 50516-93. Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран.
3. Kalyuzhny A.V., Karpova T.L., Kalyuzhny B.G., Platkov V.Ya. Structure and functional properties of high-porosity material based on Fluoroplast-4 // Functional Materials. – 1999. – Vol. 6, №2. – P. 25-30
4. Белов С. В., Спиридонов В. С., Приходько Н. Г. Распределение пор по размерам в пористых материалах из металлических сеток. Порошковая металлургия, 1983. – №9. – с. 66-72.
5. Pal L, Joyce M, Fleming P.D., "A Simple Method for Calculation of Permeability Coefficient of Porous Media", TAPPI J, pp 10-16. September 2006.

Summary

A. Kalyuzhniy, V. Platkov Distribution of permeable porous channels of porous medium sizes from pneumatic characteristics

A method for estimation of the permeability coefficients distribution by the sizes of the pore channels of filter materials based on the analysis of parameters tangent to the displacement curve is proposed. The distribution of permeability coefficients by the sizes of pore channels in a polymer filtering material with a filtration fineness of 3 μm is obtained. It is shown that in the specified filter material, the most permeable pores through which the main stream passes (more than 75% of the total gas flow) are in the range of their diameters 13.8 - 22.4 μm .

Keywords: porous PTFE, pore size distribution, permeability coefficients

References

1. A.B. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov. Structure of porous materials and their permeability: determination by computer-aided simulation // Functional Materials. – 2001. – Vol. 8, №1. – P. 90-93.
2. GOST R 50516-93. Polymer membranes. Membrane Bubble Point Determination Technique.
3. Kalyuzhny A.B., Karpova T.L., Kalyuzhny B.G., Platkov V.Ya. Structure and functional properties of high-porosity material based on Fluoroplast-4 // Functional Materials. - 1999. - Vol. 6, №2. - P. 25-30
4. Belov S. V., Spiridonov V. S., Prikhod'ko N. G. Raspredelenie por po razmeram v poristykh materialakh iz metallicheskikh setok. Poroshkovaya metallurgiya, 1983. – № 9. – с. 66-72.
5. Pal L, Joyce M, Fleming P.D., “A Simple Method for Calculation of Permeability Coefficient of Porous Media”, TAPPI J, pp 10-16. September 2006.