

**Калужный А.Б.**

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

**Платков В.Я.**

Луганский 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

*Калужный А.Б., Платков В.Я. «Распределение проницаемых поровых каналов пористой среды по размерам из пневматических характеристик»*

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 тонкость очистки и проницаемость. 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 тонкость 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. Ранее 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 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.

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 тонкостью 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.

*Калужний А.Б., Платков В.Я. «Розподіл прониклих порових каналів пористого середовища за розмірами з пневматичних характеристик»*

Запропоновано метод оцінки розподілу коефіцієнтів проникності за розмірами порових каналів фільтроматеріалів на основі аналізу параметрів дотичних до кривої витіснення. Отримано розподіл коефіцієнтів проникності за розмірами порових каналів в полімерному фільтруючому матеріалі з тонкістю фільтрування 3 мкм. Показано, що в зазначеному фільтроматеріалі найбільш проникні порові канали, через які проходить основний потік (понад 75% загальної витрати газу) мають діаметри в інтервалі 13,8 - 22,4 мкм.

Розвиток сільського господарства в Україні передбачає широке використання матеріалів стійких до агресивного середовища, в тому числі пористих полімерних матеріалів. Однією з істотних тенденцій в області полімерного матеріалознавства є розробка і вивчення пористих матеріалів на основі политетрафторетилену (ПТФЕ). Найважливішими експлуатаційними характеристиками фільтруючих матеріалів є їх тонкість очищення і проникність [1]. Проникність фільтроматеріала - інтегральна характеристика, що відображає пропускну здатність і кількість порових каналів певного діаметру. У фільтроматеріалі має місце розподіл порових каналів по їх проникності. Для практичних цілей в зазначеному розподілі доцільно виділити групу порових каналів, на яку припадає основний потік

фільтрованої середовища. Відзначимо, що ця група визначає і тонкість очищення фільтра. Для вивчення розподілу проникності порових каналів і виділення інтервалу діаметрів порових каналів, що забезпечують основний потік фільтрованої середовища, доцільно використовувати метод витіснення рідини з пор [2]. Раніше [3] даним методом було встановлено розподіл порових каналів по їх діаметрам, яке лише непрямим чином дозволяє судити про здатності, що фільтрує цього матеріалу. Відзначимо, що при аналізі цих даних автори [4] методом "січних" через точки кривої витіснення аналітично визначали приріст витрати газу, викликане відкриваються новими поровими каналами. Однак, такий підхід не зовсім коректним, оскільки не відображає фізичну сутність процесу витіснення рідини з пір з наступною продувкою відкрилися порових каналів стисненим газом, що, в кінцевому рахунку, призводить до різкого спотворення даних про розподіл порових каналів по їх діаметрами.

**Ключові слова:** пористий політетрафторетилен, розподіл порових каналів за розмірами, коефіцієнт проникності.

*Kalyuzhniy A.B., Platkov V.Y. «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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ .

The development of agriculture in Ukraine provides for the widespread use of materials resistant to aggressive media, including porous polymeric materials. One of the significant trends in the field of polymer materials is the development and study of porous materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE). The most important performance characteristics of filter materials are their fineness and permeability [1]. The permeability of the filter material is an integral characteristic reflecting the capacity and the number of pore channels of a certain diameter. In the filter materials there is a distribution of pore channels according to their permeability. For practical purposes in the specified distribution it is advisable to allocate a group of pore channels, which accounts for the main stream of the filtered medium. Note that this group also determines the fineness of cleaning the filter. To study the distribution of permeability of the pore channels and the selection of the interval of pore channel diameters that provide the main flow of the medium being filtered, it is advisable to use the method of liquid displacement from the pores [2]. Earlier [3], this method established the distribution of pore channels according to their diameters, which only indirectly allows us to judge the filtering ability of this material. Note that when analyzing these data, the authors [4] using the method of "crossing" through points of the displacement curve analytically determined the gas flow increment caused by the opening new pore channels. However, this approach is not completely correct, because it does not reflect the physical essence of the process of displacing fluid from the pores with subsequent purging of the opened pore channels with compressed gas, which ultimately leads to a sharp distortion of data on the distribution of pore channels in their diameters.

**Keywords:** porous PTFE, pore size distribution, permeability coefficients

### Актуальность проблемы

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 тонкость 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 тонкость 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.

### Изложение основного материала

На рис. 1 схематично показана зависимость расхода воздуха через фильтрующий материал  $\theta$  от перепада давления  $\Delta P$  (кривая вытеснения) и приведены построения, поясняющие сущность предлагаемого метода.

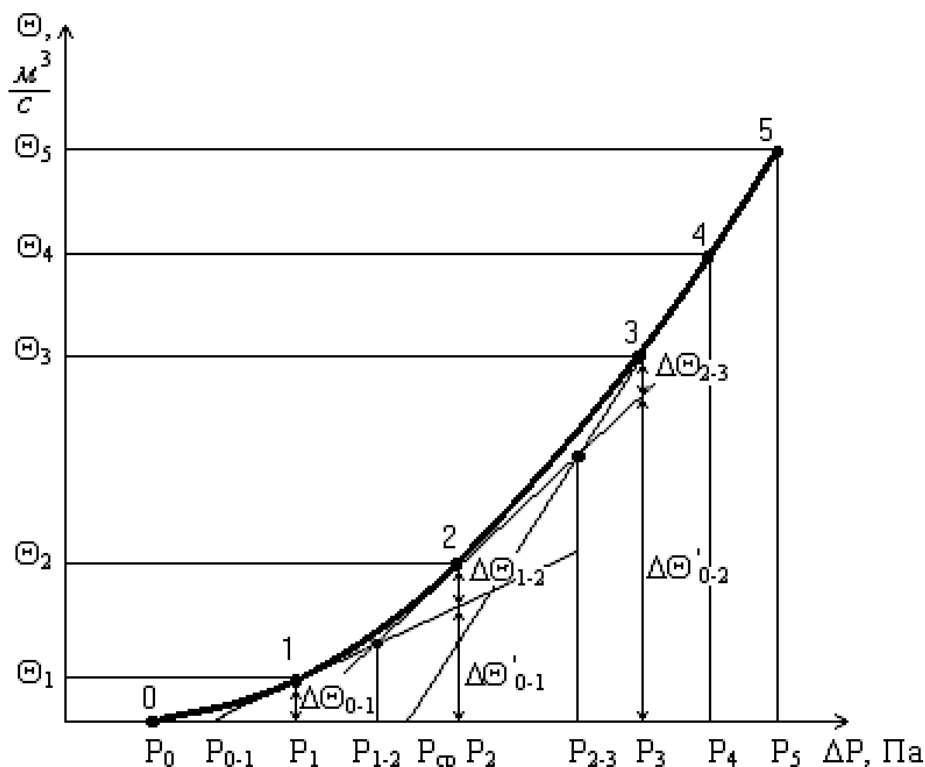


Рис.1. Зависимость изменения расхода воздуха через пропитанный жидкостью фильтрующий материал от перепада давления.

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.

$\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения, н/м;

$\alpha$  - краевой угол смачивания жидкостью поверхности поровых каналов, град;

$\Delta P$  – 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  $\mu$  - динамическая вязкость газа, Па·с;

$H$  – толщина фильтра, м;

$S$  – площадь фильтра, м<sup>2</sup>;

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  $\Theta_i$  – 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:

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

Угловой коэффициент  $a_2$  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 ( $\Theta_2$  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  $\varepsilon$  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 <sup>3</sup> /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 <sup>2</sup>	$\frac{K_i}{\sum K_i}$
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  $22,4 \div 13,8$  мкм фильтруется 75% общего потока фильтруемой среды, что можно считать основной частью потока. Соотношение среднего диаметра поровых каналов (18,1 мкм) и номинальной тонкости очистки (3 мкм) равно  $\approx 6$ .

### **Выводы**

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

### **Список использованных источников**

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. ГОСТ Р 50516-93. Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран.
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. 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.

### **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 poristyx materialakh iz metallicheskih 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.