

С 350 1563/89

3 жз

АПЕЛЬ П. Ю. и др.

Б1-18-88-857.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 1-18-88-857 е

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1988

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

51-18-88-857

П.Ю.Апель, Т.И.Соболева, А.И.Соловьев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ПОР В ЯДЕРНЫХ  
ФИЛЬТРАХ МЕТОДОМ "ГУЗЫРЬКА"

13 12. 88

Дубна, 1988 г.

13.12.88

## I. Введение

Основной величиной, определяющей свойства ядерных фильтров и, соответственно, область их применения, является диаметр пор. Существует несколько методов определения этого параметра. Одним из традиционных и наиболее простых в аппаратном оформлении является метод "пузырька", который основан на продавливании при постепенно повышающемся давлении газа через мембрану, пропитанную какой-либо жидкостью. Если при этом сверху поместить слой этой же жидкости, то при определенном перепаде давления  $P$  над поверхностью мембраны появляются пузырьки газа. Образование первых пузырьков происходит над порами с наибольшим диаметром. Перепад давления, при котором происходит "вскипание", характеризует диаметр пор, имеющих в большом количестве.

Применение этого метода основано на ряде предположений. В частности, предполагается, что фильтр пронизан цилиндрическими порами. Если же диаметр поры непостоянен по ее длине, то метод "пузырька" определяет диаметр только наиболее узкой ее части.

Определив значение  $P$ , соответствующее моменту "вскипания", можно вычислить диаметр пор по формуле /1/:

$$D = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P} \cdot K \quad (I)$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$\theta$  - краевой угол смачивания на границе стенка капилляра - жидкость - газ;

$K$  - коэффициент формы поры; он вводится потому, что форма поперечного сечения поры в реальном случае может отличаться от окружности из-за наличия шероховатостей на поверхности модифицированного травлением лавсана /2/.

Величина  $K$  численно характеризует это отклонение.

## II. Цель работы

Целью данной работы явилось проведение калибровки метода "пузырька" применительно к полиэтилентерефталатных (лавсановым) ядерным фильтрам. В ходе решения этой задачи предполагалось выяснить следующие вопросы:

1. определить величину  $\cos \theta$  на границе стенка поры - жидкость - газ;
2. выяснить необходимость введения коэффициента  $K$  в формулу (I) и определить его численное значение для ядерных фильтров;
3. выяснить зависимость результатов измерений от чистоты используемой жидкости (этанола);
4. выяснить зависимость результатов измерений от пористости ядерных фильтров.

## III. Методика проведения эксперимента

Эксперименты проводились по стандартному для микрофильтрационных мембран методу, описанному во многих литературных источниках /1,5/. Сравнение данных, полученных этим методом для ядерных фильтров с одинаковым диаметром, но с различной плотностью пор (рис. I), показывает, что с увеличением последней уменьшается давление проскока пузырька, и, соответственно, возрастает величина кажущегося диаметра пор. Это происходит вследствие увеличения числа наложений (множественных пор).

## II. Цель работы

Целью данной работы явилось проведение калибровки метода "пузырька" применительно к полиэтилентерефталатных (лавсановым) ядерным фильтрам. В ходе решения этой задачи предполагалось выяснить следующие вопросы:

1. определить величину  $\cos \theta$  на границе стенка поры - жидкость - газ;

2. выяснить необходимость введения коэффициента  $K$  в формулу (I) и определить его численное значение для ядерных фильтров;

3. выяснить зависимость результатов измерений от чистоты используемой жидкости (этанола);

4. выяснить зависимость результатов измерений от пористости ядерных фильтров.

## III. Методика проведения эксперимента

Эксперименты проводились по стандартному для микрофильтрационных мембран методу, описанному во многих литературных источниках /1,5/. Сравнение данных, полученных этим методом для ядерных фильтров с одинаковым диаметром, но с различной плотностью пор (рис. I), показывает, что с увеличением последней уменьшается давление протекания пузырька, и, соответственно, возрастает величина кажущегося диаметра пор. Это происходит вследствие увеличения числа наложений (множественных пор).

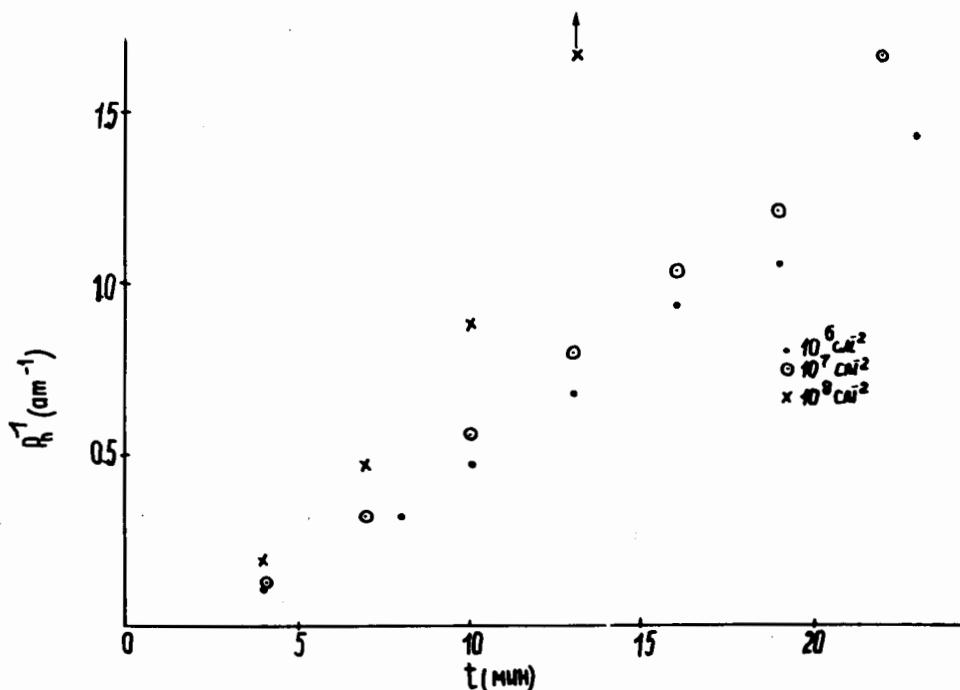


Рис. 1. Зависимость величины обратной давлению продавливания первого пузырька от времени травления лавсановой пленки с различной плотностью пор:  $10^6$ ,  $10^7$  и  $10^8$   $\text{см}^{-2}$ . Условия травления:  $1,8 \text{ N}$  *на*  $80^\circ\text{C}$ .

Чтобы устранить влияние пористости на величину измеренного эффективного диаметра, эксперименты проводились с "модельными" образцами, пористость которых была намного ниже стандартной для ядерных фильтров величины. Объектами исследований служили ядерные фильтры следующих трех типов:

а) Образцы с порами цилиндрической формы, полученные из лавсановой пленки толщиной 10 мкм, по специальной технологии, обеспечивающей высокую избирательность травления треков ( $\sim 10^4$ ). Пористость данных образцов составляла  $< 1\%$ . Диаметр и плотность пор определяли при помощи электронного микроскопа ЭММА-2; при этом использовали метод реплик. Каналы пор имели "стандартное" угловое распределение в пределах  $\pm 30^\circ$  к нормали.

б) Мембраны с единичными порами, которые были сделаны из лавсановой пленки толщиной 10 мкм и пленки "хостафан" (ФРГ, фирма "Kalle") толщиной 5 мкм. Мембраны изготавливали, облучая



ионами Хе движущуюся пленку через диафрагму с отверстием ~15 мкм. В результате облучения на пленке получали "дорожку" из одиночных треков, отделенных друг от друга промежутками по 1-2 см. Далее пленку обрабатывали в растворе едкого натра, находили и вырезали участки, содержащие по одной поре. Химическую обработку проводили таким образом, чтобы обеспечить отсутствие конусности пор. Диаметр пор определяли при помощи сканирующего электронного микроскопа *USM -840*.

в) Мембраны, содержащие несколько десятков пор. Эти мембраны были получены по такой же методике, как и мембраны с одиночными отверстиями, с тем отличием, что облучение проводилось ионами  $^{40}\text{Ar}$ . Поскольку интенсивность ионного пучка была выше, то на пленке оставались не одиночные треки, а "островки" треков. Каждый "островок" соответствовал отдельному импульсу работы ускорителя и содержал десятки треков, практически параллельных друг другу. Образцы мембран такого типа были изготовлены из лавсана толщиной 20 мкм и хостафана толщиной 5 мкм. Диаметр пор измеряли при помощи электронного микроскопа *USM -840*.

Для примера на рис. 2 представлены электронные микрофотографии мембран с одиночной порой и с "островками" пор. При исследовании последних в электронном микроскопе было установлено, что в них имеются двойные наложения отверстий.



Рис. 2а. Электронная микрофотография поверхности мембраны с единственным отверстием. Увеличение 550X.



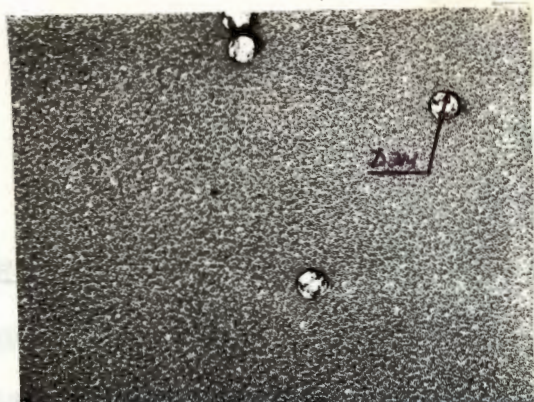


Рис. 2б. Пример измерения диаметров пор на электронных микрофотографиях реплик с ядерных фильтров.



Рис. 2в. Электронная микрофотография участка поверхности мембраны, содержащей несколько десятков пор.

Наряду с образцами типов а), б) и в) в экспериментах использовали образцы стандартных ядерных фильтров. Данные о них приведены в таблице I (№№ I и I2).

Таблица I. Характеристики образцов ядерных фильтров с малой пористостью (серия а).

№№ п/п	Диаметр поры по электронному микроскопу (мкм)	Пористость (%)
I.	0,14	0,03
2.	0,21	0,07
3.	0,27	0,11
4.	0,47	0,35
5.	0,51	0,41
6.	0,62	0,61
7.	0,65	0,66
8.	1,0	0,13
9.	1,15	0,17
10.	1,7	0,36
II.	0,37*	~ 20
I2.	0,45*	~ 20

\* Образцы ядерных фильтров, полученные по стандартной технологии и, возможно, имеющие конусообразные поры. Значения пористости, приведенные в таблице, рассчитаны по формуле  $\Pi = n \frac{\pi d^2}{4} \cdot 100\%$ , где  $n$  - число пор на  $1 \text{ см}^2$ .



#### IV. Результаты и обсуждение

##### 4.1. Определение косинуса угла смачивания.

Известно /3/, что  $\cos \theta$  для этанола и гладкой плоской поверхности лавсана равен 1. Измерить эту величину непосредственно в поре диаметром меньше 1 мкм не представляется возможным, но ее можно определить косвенным путем. С этой целью были проведены измерения со следующими органическими жидкостями: гексан, этилацетат, тетрахлорэтилен, анилин; по данным /4/, эти жидкости хорошо смачивают лавсан и имеют различное поверхностное натяжение. Пропорциональность между величинами  $P$  и  $\sigma$  в серии опытов с одним и тем же ядерным фильтром может служить критерием, отражающим степень смачиваемости стенок пор выбранными жидкостями. В этой серии опытов использовались фильтры с диаметром пор от 0,14 до 0,65 мкм (образцы серии а).

Экспериментальные точки аппроксимировались прямыми в координатах  $P-\sigma$  (рис. 3).

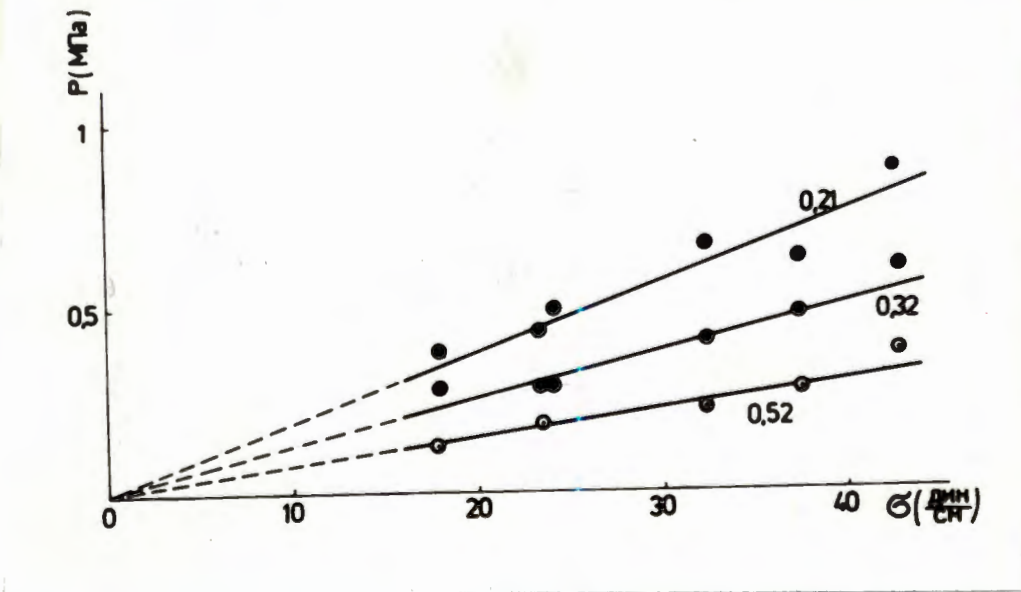


Рис. 3. Зависимость давления продавливания пузырька от поверхностного натяжения смачивающих жидкостей. Числа на графиках указывают диаметр пор соответствующих образцов (мкм).

Рассчитанные по тангенсу угла наклона ( $\operatorname{tg} d$ ) прямых средние значения диаметров  $\Phi_n$  приведены в таблице 2. Для сравнения здесь же указаны соответствующие величины, измеренные на электронных микрофотографиях. При расчетах значений  $\Phi_n$  предполагалось, что  $K=1$  и  $\cos \theta = 1$ .

Как видно из таблицы 2, для всех образцов выполняется неравенство  $\Phi_{эм} > \Phi_n$ . Подчеркнем, что если бы угол смачивания стенок пор ядерных фильтров был бы отличен от нуля, а коэффициент  $K$  равнялся 1, то имело бы место неравенство  $\Phi_{эм} < \Phi_n$ . При этом разница между величинами  $\Phi_{эм}$  и  $\Phi_n$  была бы тем больше, чем меньше  $\cos \theta$ .

На опыте мы имеем  $\Phi_{эм} > \Phi_n$ . Этот факт в совокупности с тем обстоятельством, что в опытах с разными хорошо смачивающими лавсан жидкостями наблюдается примерная пропорциональность между величинами  $\rho$  и  $\sigma$ , позволяет предположить, что для всех исследованных жидкостей  $\cos \theta = 1$ , а  $K > 1$ .

Таблица 2. Результаты измерений диаметров пор при помощи метода "пузырька" и электронной микроскопии

№ п/п	$\Phi_n = \frac{4}{\operatorname{tg} d}$ (мкм)	$\Phi_{эм}$ (мкм)
1.	0,13	0,14
2.	0,19	0,21
3.	0,21	0,27
4.	0,42	0,47
5.	0,47	0,51
6.	0,50	0,62
7.	0,52	0,65

Примечание: Изображение отверстий на электронных микрофотографиях фильтров с малым диаметром окружены темными ореолами. При анализе таких микрофотографий в качестве  $\Phi_{эм}$  брали внутренний диаметр ореола (см. рис. 26).



#### 4.2. Определение коэффициента формы К.

Для нахождения численного значения величины К необходимо установить количественное соотношение между истинным диаметром пор и давлением проскока пузырька. С этой целью была проведена аппроксимация экспериментальных данных линейными функциями вида

$$D_{эм} = A \cdot \frac{1}{P} \quad (\text{рис. 4}) \text{ при помощи метода наименьших квадратов.}$$

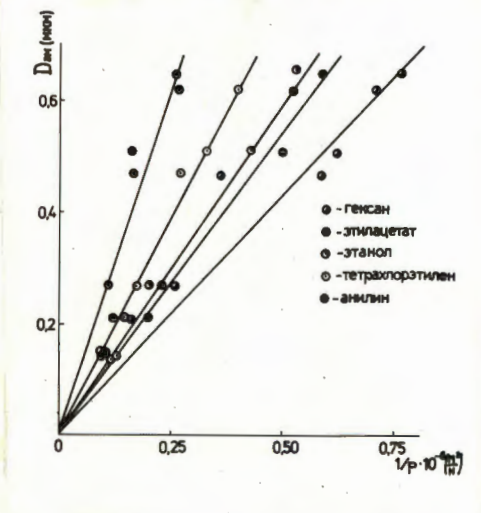


Рис. 4. Соотношение между величинами  $D_{эм}$  и  $1/P$  при использовании различных жидкостей. Тангенс угла наклона прямых дает значение  $4\sigma K$ .

Далее коэффициент формы поры К находили по формуле:

$$K = \frac{A}{4\sigma} \quad (2)$$

Найденные численные значения К приводятся в таблице 3.

Таблица 3. Численные значения коэффициента формы поры

№ п/п	Жидкость	$\sigma \times 10^2 \frac{Н}{М}$	$tg \alpha (=A)$	$K \pm \Delta K (\alpha = 95\%)$
1.	Гексан	18,51	0,847	$1,14 \pm 0,07$
2.	Этилацетат	23,9	1,128	$1,21 \pm 0,10$
3.	Этанол 98% об.	24,5	1,241	$1,27 \pm 0,11$
4.	Тетрахлорэтилен	32,9	1,579	$1,20 \pm 0,18$
5.	Анилин	43,3	2,117	$1,22 \pm 0,31$

Из таблицы 3 видно, что коэффициент формы поры колеблется в интервале 1,14–1,27. При этом не наблюдается какой-либо зависимости его от коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Видимо, целесообразно принять  $K$  равным среднему значению  $\sim 1,21$  (для серии образцов 10 мкм лавсан с  $\Pi < 0,5\%$ ).

Заметим, что  $K$ , вообще говоря, может изменяться в зависимости от размера пор. Рассчитанная в наших опытах величина  $1,21$  является усредненной для рассматриваемого диапазона диаметров. По физическому смыслу  $K$  представляет собой коэффициент шершавости поверхности. По литературным данным [2] он равен  $1,1$ .

#### 4.3. Эксперименты с образцами, содержащими малое число пор, и построение калибровочной прямой.

Практически измерения диаметра пор методом "пузырька" наиболее целесообразны с применением этанола, как наименее токсичной жидкости. Поэтому все последующие эксперименты проводили с этанолом.

При продавливании газа через одиночное отверстие малого диаметра при постоянно повышающемся перепаде давления может оказаться, что появление видимого глазом пузырька на поверхности мембраны не соответствует тому перепаду давления, при котором начался процесс вытеснения жидкости из пор.

Рассчитаем, не может ли запаздывание появления газового пузырька привести к ошибкам в экспериментах с одиночными порами. Запаздывание складывается из времени движения мениска жидкости по микрокапилляру  $t_w$  и времени образования визуально регистрируемого пузырька  $t_{н.п}$ . Время движения мениска рассчитывали по формуле, приведенной в [1]:

$$t_w = \frac{4\eta^2(\zeta_1 + \zeta_2)}{\zeta^2 \Delta P} \quad (3)$$

где  $\zeta_1$  - вязкость этилового спирта,  
 $\zeta_2$  - вязкость газообразного азота,  
 $\zeta$  - толщина мембраны,



$r$  - радиус капилляра,

$\Delta P$  - перепад давления за вычетом капиллярного давления.

Подставляя наши данные  $\eta_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  Пас;  $\eta_2 = 1,7 \cdot 10^{-5}$  Па.с.  
 $\ell = 4 \cdot 10^{-6}$  м;  $r = 10^{-6}$  м;  $\Delta P = 0,5 \cdot 10^3$  Па, получаем  $t_w = 1,5 \cdot 10^{-4}$  с.

Величину  $t_{н.п}$  рассчитываем как

$$t_{н.п} = \frac{V}{Q}, \text{ где}$$

$V$  - объем видимого глазом пузырька (при радиусе  $\sim 0,1$  мм

$V \approx 4 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>),  $Q$  - расход азота через мембрану с единичным

отверстием. Используя формулу Пуазейля  $Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta_2 \ell}$  и, подставляя

наши данные, находим, что  $Q \approx 0,3$  мм<sup>3</sup>/с. Отсюда получаем

$t_{н.п} \approx 10^{-2}$  с. Следовательно, при обычной для пузырькового теста

скорости повышения давления  $\sim 10^{-2}$  МПа/с (0,1 ат/с) величины

$t_w$  и  $t_{н.п}$  достаточно малы, чтобы не повлиять на правильность измерений, если радиус одиночной поры достаточно велик ( $\geq 1$  мкм).

Для построения калибровочного графика были использованы данные экспериментов с модельными образцами всех трех типов.

Результаты представлены в координатах  $\Phi_{ЭМ} - 1/P$  на рис. 5.

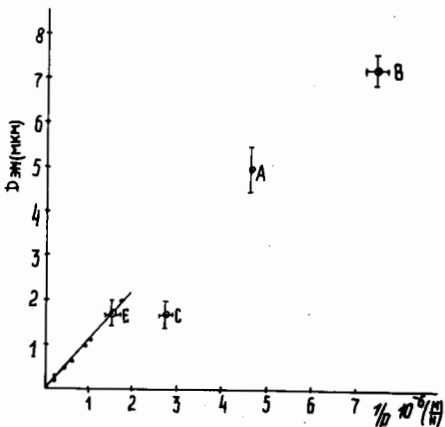


Рис. 5. Соотношение между величинами  $\Phi_{ЭМ}$  и  $1/P$  при использовании этансла в качестве смачивающей жидкости. Точки А и С получены на образцах с единичными порами. Точки Е и В получены на мембранах с десятками треков.

Точки, соответствующие образцам с малой пористостью и угловым распределением пор, аппроксимированы прямой линией. Ей соответствует калибровочная зависимость

$$\Phi_n = \frac{1.18}{P} \quad (4)$$

где  $\Phi_n$  измеряется в мкм, а  $P$  - в ат.

Точка А, полученная в опытах с одиночными порами, и точка Е, полученная в опытах с "островками" пор, также лежат на данной прямой. Точка В, соответствующая образцам с десятками треков большого диаметра ( $\sim 7$  мкм) лежит несколько ниже, что может быть обусловлено вкладом двойных наложений. В целом можно считать, что все эти данные хорошо согласуются между собой.

Лишь точка С существенно выпадает из массива данных.

Наиболее вероятной причиной этого является то, что оценку диаметра одиночных пор в образцах, соответствующих точке С, проводили косвенным путем. Поскольку одиночную пору диаметром  $\sim 2$  мкм весьма трудно найти на площади несколько квадратных миллиметров, просматривая ее в электронном микроскопе, мы использовали для определения диаметра одиночных пор данные об изменении толщины пленки в процессе травления. При этом полагали, что пленка изотропна, и поэтому уменьшение толщины пленки после травления равно диаметру протравливаемых пор. Однако, для двухосноориентированных пленок это равенство не всегда выполняется, так как радиальная скорость травления пор может быть выше скорости травления пленки с поверхности /6/. По-видимому, здесь мы имели дело с подобной ситуацией.

#### 4.4. Исследование влияния примесей воды в этаноле на результаты измерения диаметра пор.

Для выяснения зависимости результатов измерений от чистоты используемого этанола, были проведены измерения с водноспиртовыми смесями в широком диапазоне концентраций. Результаты, полученные в этих опытах, представлены на рис. 6 в координатах "отношение давления продавливания к поверхностному натяжению водно-спиртовой смеси" - "концентрация воды". Сравнение этих кривых с кривой

зависимости косинуса краевого угла смачивания от концентрации воды в смеси /3/ (рис.7) показывает, очевидно, что поведение величины  $P/\sigma$  коррелирует с поведением  $\cos \theta$ .

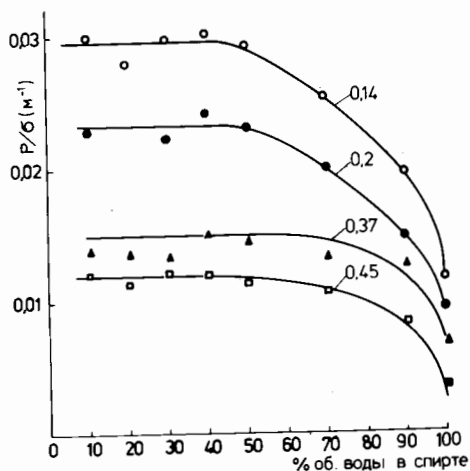


Рис. 6. Зависимость отношения  $P/\sigma = k \cdot \cos^2 \theta$  от концентрации воды в водно-спиртовой смеси. Числа при кривых указывают средний диаметр пор фильтра по данным электронного микроскопа (в мкм).

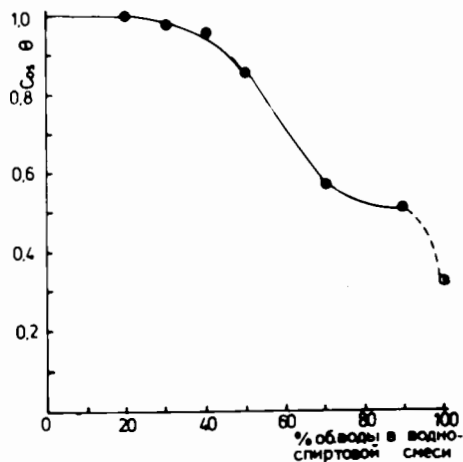


Рис. 7. Зависимость косинуса краевого угла смачивания от содержания воды в водно-спиртовой смеси по данным работы /3/.

Присутствие воды в спирте вплоть до концентрации  $\sim 40\%$  об. практически не сказывается на результатах измерений, если учитывать небольшое изменение поверхностного натяжения в данном диапазоне концентраций.

#### У. Влияние наложений пор на измерения диаметра методом пузырька.

После калибровки метода на модельных объектах необходимо рассмотреть вопрос о том, в какой степени метод пригоден для "стандартных" ядерных фильтров с пористостью около 10%. Как известно, при таком уровне пористости в фильтре имеются двойные, тройные и т.д. поры, образовавшиеся за счет слияния нескольких

одиночных пор. Необходимо определить, какой кажущийся диаметр "по пузырьку" будут иметь множественные поры.

Формула (I) справедлива для поры, имеющей форму круглого цилиндра. Этот случай является частным случаем более общего, когда образующая цилиндра представляет собой произвольную замкнутую кривую. В общем случае давление вытеснения жидкости из поры определяется отношением длины периметра поперечного сечения поры  $l$ , к его площади  $S$  :

$$p = \frac{L \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{S} \quad (5)$$









(Для круглого цилиндра имеем  $L = \pi D$  и  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ , откуда и вытекает формула (I)). Отсюда легко вывести, что кажущийся диаметр поры с сечением произвольной формы будет равен  $4S/L$ . Рассмотрим несколько возможных вариантов множественных пор.

Двойная пора. Кажущийся диаметр зависит от расстояния между осями единичных пор. Несложно показать, что его максимальное значение составляет около 1,22 диаметра единичных пор, при этом расстояние между осями слившихся единичных пор составляет примерно 1,2 радиуса.

Множественные поры более высокого порядка. В таблице 4 приведено несколько возможных конфигураций пор, образованных слиянием трех, четырех, шести и двенадцати единичных пор круглого сечения. Были выбраны осесимметричные фигуры, так как несимметричные множественные наложения (например, цепочечные) характеризуются меньшим отношением площади к периметру и поэтому в меньшей степени влияют на результаты пузырькового теста. В таблице приведены значения кажущегося диаметра пор "по пузырьку", рассчитанные в соответствии с (5), а также значения "проходного" диаметра, определяемого как диаметр наибольшей сферической частицы, которая может пройти сквозь пору.



Таблица 4. Расчетные значения кажущегося диаметра отверстий для множественных пор различной конфигурации

Конфигурация	Кажущийся диаметр по пузырьку $D = \frac{4S}{L}$	Проходной диаметр пор
1.  Максимальное значение кажущегося диаметра по пузырьку при $\sigma \approx 0,6D$	1,22 D	1 D
2.  m=3	1,37 D	1,15 D
3.  m=3	1,22 D	1 D
4.  m=4	1,42 D	1 D
5.  m=4	1,64 D	1,41 D
6.  m=6	1,83 D	1,74 D
7.  m=6	1,83 D	1,74 D
8.  m=12	2,8 D	2,8 D

Очевиден факт, что кажущийся диаметр "по пузырьку" слабо растет с увеличением кратности наложений  $m$ , а именно этот рост можно приближенно описать функцией  $\ln(m+1)$ .

Теперь рассчитаем вероятное число множественных пор в образце обычного ядерного фильтра с наиболее часто встречающимися параметрами: плотность пор  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , пористость 10%, площадь

образца  $1 \text{ см}^2$ . Поры в ядерном фильтре имеют угловое распределение, которое снижает вероятность перекрытий соседних пор по всей длине. Угловое распределение пор дискретно: в образце столько различных ориентаций пор, сколько макроимпульсов ионов попало на каждый элемент пленки при облучении. Например, при скорости протяжки пленки  $0,4 \text{ м/с}$  и высоте цели-коллиматора  $6 \text{ см}$  число макроимпульсов составляет 15. Для простоты положим, что могут слиться по всей длине поры, принадлежащие только одному и тому же макроимпульсу ("банчу"). В этом случае вероятности образования множественных пор следует считать исходя не из общей пористости, а из "парциальной" пористости, относящейся к порам одной ориентации, а затем полученные значения вероятностей умножить на 15.

Расчет, проведенный на основе данных предпосылок и приведенных в работе /7/, формул, дал следующие значения вероятного количества множественных пор на  $1 \text{ см}^2$  рассматриваемого нами фильтра:

$$m = 4 \quad N = 16870$$

$$m = 5 \quad N = 315$$

$$m = 6 \quad N = 7$$

$$m = 8 \quad N \ll 1$$

Здесь можно заметить, что в случае массива параллельных пор мы получили бы на несколько порядков более высокие значения  $N$ , однако и в этом случае в образце отсутствовали бы поры с кратностью более 15, которым соответствует максимальное увеличение кажущегося диаметра пор примерно в 3 раза. В реальном случае мы, по-видимому, имеем дело с промежуточной по отношению к рассмотренным двум вариантам ситуацией, поскольку каналы, угол между осями которых мал, также могут сливаться по всей длине.

Отсюда следует, что при проведении пузырькового теста на обычном ядерном фильтре наблюдаемый сигнал (образование пузырьков,

"вскипание") обусловлен в первую очередь множественными порами. Вследствие этого, регистрируемое давление должно быть в 1,5-3 раза меньше того, которое бы наблюдалось для единичных пор.

Однако, поскольку кажущийся диаметр пор слабо зависит от кратности наложений, а пористость стандартных ядерных фильтров меняется в довольно узких пределах, отношение кажущегося диаметра пор к истинному диаметру одиночных пор сохраняется более или менее постоянным. Благодаря этому метод пузырька, откалиброванный на стандартных ядерных фильтрах, дает до некоторой степени близкую к истине информацию о диаметре одиночных пор. При этом расчетная формула отличается от найденной нами для модельных фильтров формулы величиной числителя:

$$D_{п} \cong \frac{0.5}{P} \quad (6)$$

Эта формула может служить для приближенной оценки диаметров пор в ядерных фильтрах при экспрессном контроле. Следует однако помнить, что правильность результатов зависит в этом случае от пористости фильтров и углового распределения каналов пор, которое может, вообще говоря, изменяться в зависимости от условий облучения пленки на ускорителе.

Если же пузырьковый тест используется для прогноза в отношении максимального размера частиц, которые могут проникнуть через фильтр, то, очевидно, необходимо использовать формулу (4), найденную нами для модельных объектов, и, кроме того, регистрировать давление появления первого пузырька.

1/025  
Физ. А

## Литература

1. Григоров О.Н., Козьмина З.П., Маркович А.В.  
Электрические свойства капиллярных систем. Л.: Химия, 1958.
2. Рудакова Т.Е. и др. - ВС, 1975, Т.(А), ХУП, № 8.
3. Dann Y.R. - J.Col. and Inter.Sci., 1970, 32, No. 2,  
p. 302.
4. Knox B.H., Weigmann H.D., Scott M.G. - Text. Res., 1975,  
v.45, No.3, p. 203.
5. Дубяга и др. Полимерные мембраны. М.: Химия, 1981.
6. Lück H.B. - Nucl. Instrum. Meth., 1982, 200, p. 517-523.
7. Riedel C., Spohr R. - Nucl. Tracks, 1981, 5, N 3, p. 265-270.

