Экология

УДК 574.5(28)

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФАЗОВОЙ ПЕРКОЛЯЦИИ В ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИММУНОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА[1]

И. Ф. Образцов[2], ***Ю. Г. Яновский***[3], ***Ю. Н. Карнет***[4], ***Г. Н. Ковалев***[5], ***Е. И. Зарайский***[6], ***Н. С. Снегирева***[7]

SOME PECULIARITIES OF PHASE PERCOLATION IN POROUS SYSTEMS FOR IMMUNO-CHROMOTOGRAPHICAL ECOLOGICAL MONITORING

Obraztsov I. F., Yanovsky Yu. G., Karnet Yu. N., Kovalev G. N., Zaraisky E. I., Snegireva N. S.

The work adduces the data obtained in the course of theoretical and experimental research into the interaction of fluid media with polymeric porous carriers, which are the matrix of bioactive composite materials.

Percolation thresholds have been determined for normal phase water flow, which goes through the system: polymer — pores filled with air, and phase permeability of the air through porous polymer filled with water. New equations, different from classical ones, have been obtained. These equations relate values of phase water permeability and pressure difference in the point of a vesicle with porous media.

The work resulted in the development of a complex conjugate of monospecific antibodies to E. Coli with peroxidaze, which maintains ferment activity of peroxidaze. The method has been developed aimed at quantitative evaluation of intensity of color reaction in the operational zone.

Введение

Одним из важнейших направлений экологического мониторинга окружающей среды является контроль состояния источников водоснабжения, для чего необходимы средства проведения экспресс-анализов проб воды. В работе [1] был обоснован выбор иммунохроматографического метода экспресс-определения бактерий *Escherichia coli* в воде и найдены подходы к разработке новой технологии получения специфичных антител к этому санитарно значимому виду бактерий.

Основная задача, решаемая в первой части работы — изучение закономерностей течения жидкостей в тонких плоскопараллельных искусственно созданных полимерных системах с разными пористыми структурами, что необходимо для оптимизации работы конкретного целевого изделия — тест-

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ (03-01-96602).

[2]Образцов Иван Филиппович, академик РАН, д-р техн. наук, советник Института прикладной механики РАН.

[3]Яновский Юрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, директор Института прикладной механики РАН.

[4]Карнет Юлия Николаевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

[5]Ковалев Геннадий Николаевич, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

[6]Зарайский Евгений Ильич, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института морфологии человека РАМН.

[7]Снегирева Наталия Сергеевна, д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

полоски для экспресс-определения бактерий *Escherichia coli* в воде. Во второй части работы обсуждаются результаты, связанные с технологией получения высокоспецифических иммуннобиологических «реагентов», чувствительных к указанной бактерии.

1. Фазовая проницаемость тонких плоскопараллельных пористых полимерных слоев

Течение жидкости через протяжённые пористые среды природного происхождения (геологические пласты, вопросы нефтедобычи) изучается достаточно давно [2,3]. Появление полимерных материалов привело к созданию нового направления, которое можно назвать мембранной технологией [4,5]. В рамках этого направления можно выделить достаточно большой (судя по практическому применению и количеству печатных работ) раздел мембранная фильтрация [5]. Технические и технологические достижения в указанной области (особенно для стерилизации воды и очистки промышленных стоков, концентрирования частиц, в том числе биологического происхождения и других) хорошо известны [5]. В то же время систематические фундаментальные исследования в этом направлении практически отсутствуют. Таким образом, возникает ситуация, когда, с одной стороны, рынок располагает широким ассортиментом (по химическому составу и размеру пор) пористых полимерных плёнок, а с другой стороны, критерии их выбора для конкретных задач отсутствуют. Ниже анализируются наиболее надёжные (по нашему мнению), опубликованные в литературе экспериментальные данные по свойствам пористых фильтров из смесей нитратов и ацетатов целлюлозы фирмы «Миллипор». При этом предполагается, что химический состав полимерного сырья для фильтров одинаков, технологические условия их получения однотипны или постоянны, методики определения показателей фильтров одни и те же и соответствуют стандартам. Иначе говоря, предполагается, что характеристики фильтров в пределах выбранной серии должны образовывать плавные кривые.

Необходимо отметить, что объектами нашего рассмотрения являются искусственно созданные человеком системы, которые практически не имеют аналогов в окружающем внешнем мире. Мембранные фильтры — это некоторая геометрическая, разделённая полимерными молекулами, система пор, ограниченная двумя параллельными плоскостями, находящимися на весьма малом расстоянии друг от друга (порядка 100 мкм).

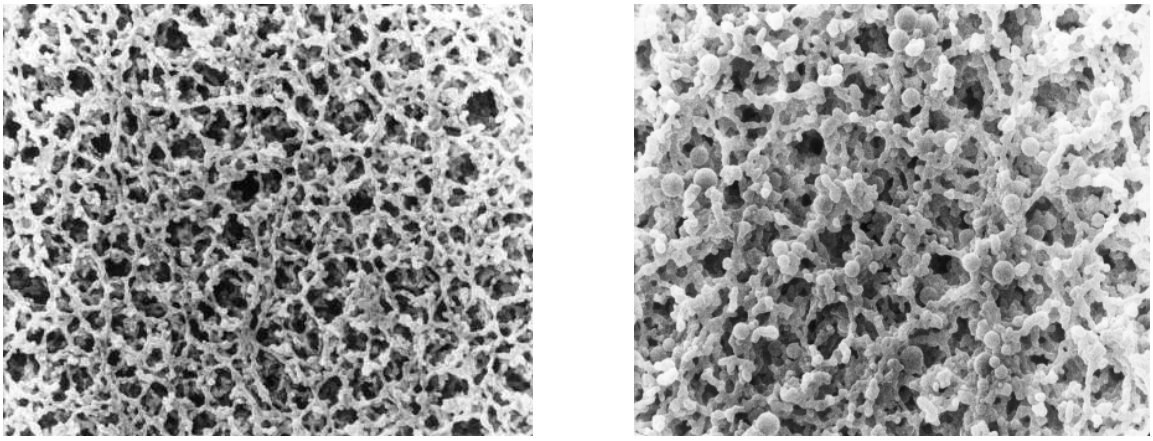
Исходное назначение этих фильтров — выделение твёрдых частиц из потока жидкости, направленного перпендикулярно плоскостям фильтра и возникающего вследствие разности давлений на них. Будем далее называть такой поток *нормальным* потоком. Кроме того, фильтры можно рассматривать как гетерогенные системы с высокоразвитой межфазной поверхностью, что придаёт им уникальные свойства, в частности, способность движения смачивающей жидкости в *тангенциальном* направлении. Это свойство целесообразно использовать для перемещения и организации взаимодействия иммунохимических и биологических объектов. К сожалению, тангенциальные потоки в рассматриваемых ниже полимерных системах совершенно не изучены. В литературе удалось найти лишь одну работу, в которой подробно изучался процесс тангенциального течения — впитывания капель силиконовых масел в некоторые пористые пленки из нитрата целлюлозы [6].

Представляется справедливым предположение о том, что между параметрами нормального и тангенциального течений жидкой среды в пористой структуре существует взаимосвязь. Для ее анализа рассмотрим коротко некоторые закономерности нормальной фазовой водопроницаемости фильтров, а затем — данные по вытеснению воды из заполненного водой пористого фильтра газовым давлением (начальная стадия перколяции газа). Поскольку вытеснение жидкости газами является процессом, обратным ее впитыванию, эти данные рассмотрены более подробно.

Прежде всего, рассмотрим основные параметры, характеризующие структуру и физико-механические свойства фильтров.

Номинальный размер пор (d). Эта характеристика фильтра, как правило, заявляется фирмой-производителем, хотя не вполне ясно, в каком соответствии она находится с истинными геометрическими размерами пор. В [5] приведен критический анализ этой характеристики, однако с физической точки зрения она все же достаточно объективна (оценка границ распределения пор по размерам, обеспечивающая определенный уровень удерживания частиц конкретного размера).

Пористость (ε). Под этим параметром понимают отношение объема пор к объему образца в целом. К сожалению, существующие



а) б)

Рис. 1. Примеры структур фильтров с номинальными размерами пор:
а) 0,3 мкм и б) 8,0 мкм (электронные микрофотографии).
Ширина фотографии соответствует: а) 30 мкм, б) 90 мкм

в настоящее время экспериментальные методики определения этой очень важной характеристики недостаточно точны.

Водопроницаемость (*коэффициент водопроницаемости* V) — классический коэффициент Дарси [4], применённый к данному частному случаю, т.е. искусственно созданным тонким пористым полимерным плёнкам. Ниже будут использованы единицы, пропорциональные единицам Дарси (см. нормировку скоростей водопроницаемости на толщину фильтра в контексте). Нет необходимости пояснять, что вместо воды может быть использована любая другая смачивающая жидкость.

Разность давлений в «точке пузырька». Определение этого параметра будет приведено ниже. Дополнительные сведения можно найти в [4, 5].

Отметим, что при обработке экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов и другие средства программных вычислений, предоставляемые в отечественном пакете программ "Scientific Interactive Graphics" (авторы Некрасов А. Н. и Ющенко В. С.). Мы благодарим авторов за предоставление пакета.

1.1. Анализ нормальной фазовой водопроницаемости пористых полимерных фильтров

На рис. 2 представлены результаты обработки имеющихся в литературе [5] данных по фазовой водопроницаемости V и пористости ε фильтров, выпускаемых фирмой «Миллипор» (США), в зависимости от номинального размера пор. Под термином «фазовая проницаемость» подразумевается, что в процессе прохождения через фильтр вода не изменяет свои основные термодинамические свойства. Этот признак существенным образом отличает область микрофильтрации от граничащей с ней области ультрафильтрации. Отметим, что в целом это весьма широкая область, т.к. скорости фазовой проницаемости воды при номинальных размерах пор 8 и 0,025 мкм различаются приблизительно в 5 300 раз.

Из рис. 2 видно, что фазовая проницаемость воды V приближается к нулю при очень высоком значении объёмной доли пор $\varepsilon = 0,715$. В соответствии с современными (кластерными) теориями перколяции [7] критическую величину пористости $\varepsilon_k = 0,715$, отвечающую $V = 0$, назовем *порогом перколяции*. Данный факт ранее отмечен не был. Например, в современном издании [4] большое место отводится анализу уравнений Козени-Кармана и Хагена-Пуазейля как основных для описания процессов фазовой проницаемости пористых сред, в том числе и полимерных фильтров. Однако можно показать, что эти основные теоретические законы (и так называемая капиллярная модель проницаемости) к рассматриваемым нами тонкослойным полимерным системам не применимы.

Основываясь на данных рис. 2 можно построить зависимость V от ε, анализ которой позволяет получить следующее соотношение

$$V = 10^{(6,3\pm0,05)}(\varepsilon - 0,715)^{(3,83\pm0,05)}.$$

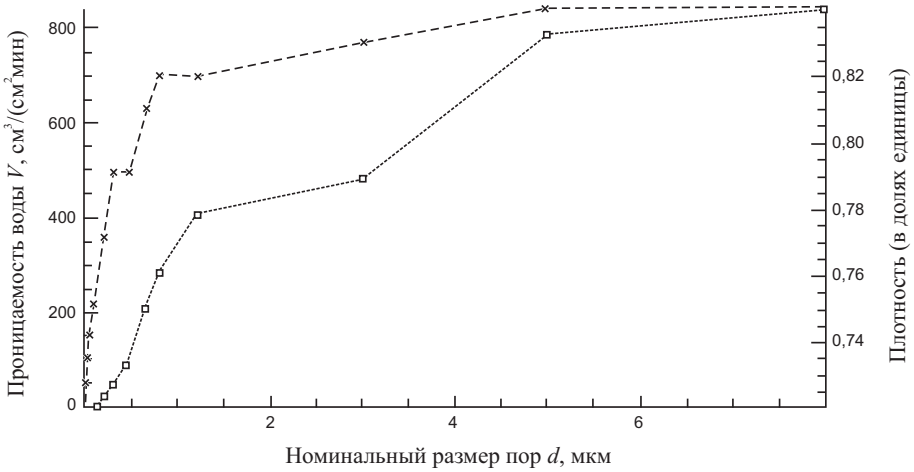


Рис. 2. Зависимость нормальной фазовой водопроницаемости фильтров (□ ··· □ ··· □, ось ординат слева) и пористости (×—×—×, ось ординат справа) от номинального размера пор. Измерения проведены при 20°C и перепаде давления 0,7 бар. Исходные значения скоростей потока для фильтров разной толщины (l) пересчитаны на l=100 мкм

Полученное выражение показывает, что фазовая проницаемость сильно зависит от пористости и обязательно должна превышать критическое значение пористости, отвечающее порогу перколяций.

1.2. «Точка пузырька» как структурная характеристика тонких плоскопараллельных полимерных пористых тел

В работе [8] авторами был рассмотрен вопрос о взаимосвязи тангенциального движения жидкости в пористой среде с уравнением Лапласа. Далее основное внимание будет уделено анализу конкретных экспериментальных данных и более широкой трактовке такой характеристики пористых тел как «точка пузырька», в том числе с учётом существования порога перколяции.

При использовании метода, получившего название «точка пузырька» (bubble-point), определяют величину

$$\Delta P = P_{\text{г}} - P_{\text{атм}},$$

где $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, а $P_{\text{г}}$ — давление газа на нижней стороне фильтра (полностью заполненном смачивающей жидкостью), при котором на верхней стороне фильтра в тонком слое жидкости при $P = P_{\text{атм}}$ начинают появляться пузырьки газа.

По аналогии с явлениями, наблюдаемыми в капиллярах, величину ΔP часто называют капиллярным давлением, предполагая выполнение соотношения Лапласа [5]

$$r = 2\sigma \cos\Theta/\Delta P, \qquad (1.1)$$

где r — радиус цилиндрического капилляра, м; σ — поверхностное натяжение жидкости, Н·м$^{-1}$; Θ — краевой угол смачивания на границе жидкость – поверхность твёрдого тела – газ в состоянии равновесия.

Для пористых материалов с одним и тем же химическим составом и одной и той же тестирующей жидкости величины σ и Θ считают постоянными, что позволяет записать соотношение (1.1) в виде

$$r = K_{\text{л}}/\Delta P, \qquad (1.2)$$

где $K_{\text{л}} = 2\sigma \cos\Theta$ — постоянная.

Поскольку газовый «пробой» гетерогенной среды: полимер – вода происходит в наиболее слабом месте, полагают, что величина $1/\Delta P$ пропорциональна среднему значению радиуса r (извилистого) канала максимального сечения.

Величина $K_{\text{л}}$ — важная термодинамическая характеристика, поскольку она определяет не только характер межфазного взаимодействия полимер – вода – газ, но и структуру заполненного водой полимерного каркаса фильтра. Важно подчеркнуть, что если повышение давления при приближении к точке «пробоя» производить достаточно медленно, то эта характеристика имеет почти равновесный характер. Можно констатировать,

что применительно к конкретному фильтру она хорошо воспроизводима и может быть измерена с достаточно высокой точностью. Поскольку микроскопическая картина явлений, происходящих в момент «пробоя», неизвестна, величину $1/\Delta P$ назовем *термодинамическим параметром* структуры фильтра, базирующимся на взаимодействии трех фаз: полимер – вода – газ.

1.2.1. Связь номинальных размеров пор с разностью давлений, определяемой в «точке пузырька»

На рис. 3 представлены данные, позволяющие сопоставить номинальные размеры пор с размерной характеристикой, основанной на соотношении (1.2).

Вся совокупность экспериментальных данных на рис. 3 аппроксимирована двумя прямыми линиями, существенно различающимися углами наклона к оси абсцисс. Точка пересечения продолжений линий отвечает координатам $d = 0,85$ мкм и $1/\Delta P = 1,02$ бар$^{-1}$. Характеристики пунктирной линии в области больших номинальных размеров пор приведены ниже (коэффициент корреляции равен 1)

$$d = (-4,508 \pm 0,013) + (5,247 \pm 0,014)(1/\Delta P). \quad (1.3)$$

Анализ точек с номинальными размерами менее 0,85 мкм позволяет подразделить ось абсцисс на два участка (рис. 4).

Формальная линеаризация экспериментальных точек с $d < 0,85$ мкм в рассматриваемых координатах приводит к положительному значению d при значении давления в «точке пузырька», равном бесконечности. Это означает, что при $d = 0$ величина ΔP отрицательна. Разрешить данное противоречие можно, по нашему мнению, следующим образом. Анализ значений давлений показывает, что для трёх фильтров с номинальными размерами пор меньшими 0,1 мкм величины ΔP составляют 14–21 бар, в то время как для остальных точек они порядка 1–3 бар. Таким образом, можно полагать, что значения ΔP для этой группы фильтров сильно завышены в результате сжатия пористых мембран под влиянием внешнего давления. С другой стороны уместно предположить, что значения ΔP внутренне согласованы (искажения структуры пропорциональны ΔP). Это позволяет определить методом экстраполяции величину $\Delta P_{\text{пред}} = 24,9 \pm 1,2$ бар, отвечающую условию $d = 0$, из коэффициентов пунктирной линии (рис. 3)

$$d = (-0,129 \pm 0,002) + (3,21 \pm 0,11)(1/\Delta P).$$

По-видимому, следует ожидать, что величины $\Delta P_{\text{пред}}$ будут одинаковы как для структур, измененных прилагаемым давлением, так и неизмененных структур (после экстраполяции экспериментальных данных).

Величина $\Delta P_{\text{пред}}$ несет в себе важный физический смысл. Она представляет собой порог фазовой перколяции газа через гетерогенную систему: полимер – вода и эквивалентна значению $1/\Delta P = 0$ в (1.2).

Исключив точки с номинальными размерами пор, меньшими 0,1 мкм, и придав точке с координатами $d = 0$ и $1/\Delta P_{\text{пред}}$ увеличенный статистический вес, для всех остальных точек получаем линейную аппроксимацию (с коэффициентом корреляции не менее 0,985)

$$d = (-0,033 \pm 0,002) + (0,88 \pm 0,03)(1/\Delta P). \quad (1.4)$$

Отсюда следует, что величина $\Delta P_{\text{пред}} = 26,6$ бар, то есть близка к полученной выше оценке.

Отметим, что соотношения (1.3) и (1.4) можно использовать для определения номинальных размеров пор по экспериментальным значениям ΔP при $\Delta P < 6$ бар.

К наиболее важным результатам приведённого выше анализа данных следует отнести, во-первых, определение величины $\Delta P_{\text{пред}}$, а во-вторых, обнаруженный экспериментально принцип разделения всей гаммы фильтров на две группы по признаку резкого (в 6 раз) уменьшения тангенса углов наклона прямых, показанных на рис. 3.

1.2.2. Связь разности давлений, определяемой в «точке пузырька», с пористостью тонких полимерных пленок

В предыдущем разделе было показано, что величина r, пропорциональная значениям $1/\Delta P$, зависит от структуры пористой среды. С другой стороны, сама структура фильтра определяет значение его пористости (ε). Интерес представляет установление взаимосвязи этих величин. К сожалению, точность определения величин ε недостаточна (рис. 2), поэтому применялась операция «сглаживания» экспериментальных данных по этой переменной. Для этого использовали следующую методику. Была построена зависимость ε от d,

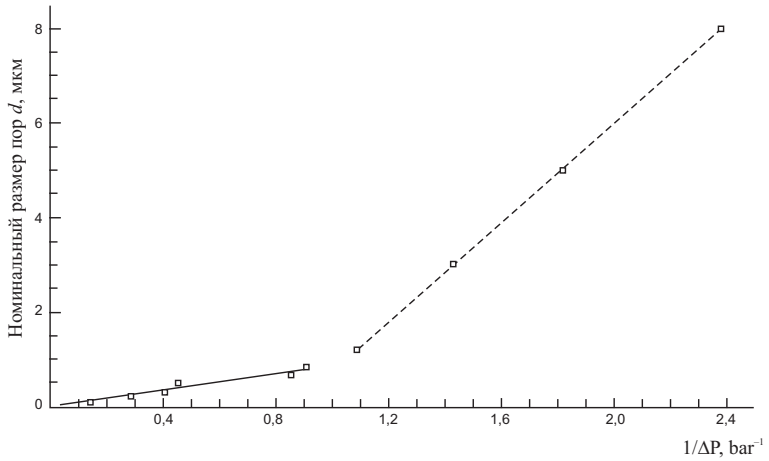


Рис. 3. Зависимость номинального размера пор от обратной величины разности давлений, определённой по «точке пузырька»

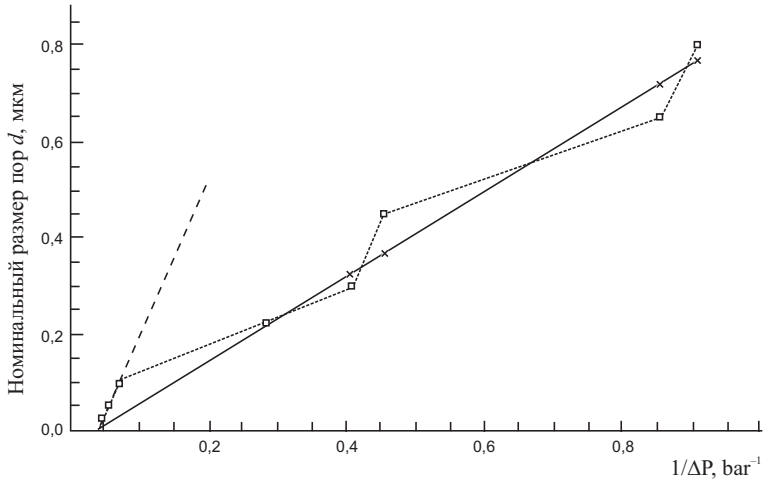


Рис. 4. Аппроксимации зависимостей величин d от $1/\Delta P$ в области малых размеров пор: $\square \cdots \square \cdots \square$ — данные, приводимые в каталоге фирмы «Миллипор», $\times — \times — \times$ — расчётные значения

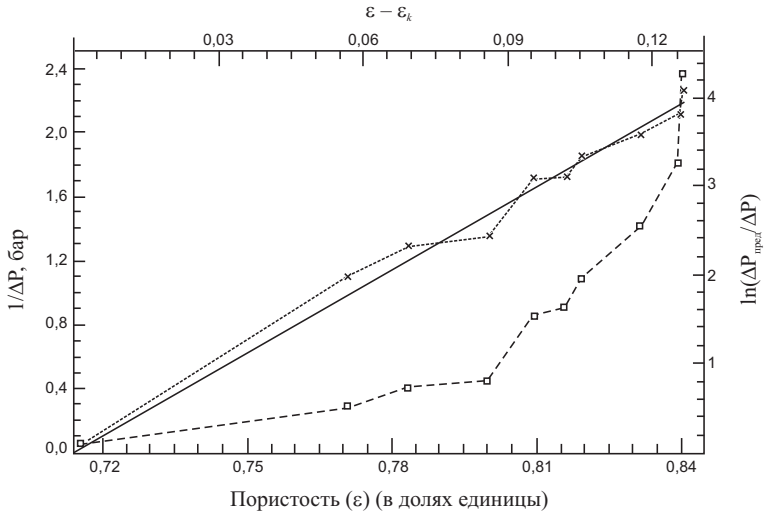


Рис. 5. Зависимость обратной величины разности давлений в «точке пузырька» от пористости системы ($\square — \square — \square$, оси координат снизу и слева) и её полулогарифмическая анаморфоза ($\times \cdots \times \cdots \times$, оси координат сверху и справа); $\varepsilon_k = 0,714$

а затем значения d были разделены на два интервала 0,025 – 0,65 и 0,65 – 8 мкм. В каждом из интервалов величины ε были аппроксимированы полиномами второй степени, по коэффициентам которых были рассчитаны «сглаженные» значения ε, исключая точку $d = 0,65$ мкм. Значение $\varepsilon = 0,809$ для этой точки найдено линейной интерполяцией между расчётными значениями ε соседних точек при $d = 0,45$ и $d = 0,8$ мкм. Оно оказалось очень близким к экспериментальной величине $\varepsilon = 0,81$. Затем из наборов данных ε как функции d (сглаженные значения) и $1/\Delta P$ как функции d (перестроенный рис.3) был получен набор данных $1/\Delta P$ как функции ε. Полученная вышеуказанным методом зависимость в графическом виде представлена на рис. 5 (квадратные точки). Из совокупности рассматриваемых данных были исключены 3 экспериментальные точки (искажение результатов из-за приложенного давления), а вместо них подставлена экстраполированная величина $1/\Delta P_{\text{пред}}$.

Далее были предприняты попытки найти координаты, позволяющие представить зависимость $1/\Delta P$ от ε в виде прямой. Наилучший вид аппроксимации из различных использованных вариантов представлен на дополнительных осях координат рис. 5.

В процессе поиска оптимальной аппроксимации опирались, прежде всего, на описанные выше результаты. Учитывали, что нормальная фазовая проницаемость воды имеет место лишь при значениях пористости, превышающих порог перколяции $\varepsilon_k = 0,715$. Полагали, что величина ε_k зависит только от структуры пористой среды и имеет одно и то же значение как для водопроницаемости, так и для проницаемости газа через заполненный водой пористый полимер, т.е. любой вид проницаемости реализуется лишь в области значений $\varepsilon > \varepsilon_k$; считали, что при $\varepsilon = \varepsilon_k$ величина $\Delta P = \Delta P_{\text{пред}}$ (последнее условие позволило уточнить величину $\varepsilon_k = 0,714$).

Прямая линия на рис. 5 описывается выражением (нулевая точка с величиной $\Delta P = \Delta P_{\text{пред}}$ введена троекратно)

$$\ln(\Delta P_{\text{пред}}/\Delta P) = \\ = (0 \pm 0,038) + (31,20 \pm 0,24)(\varepsilon - 0,714).$$

После преобразований имеем

$$1/\Delta P = 1/\Delta P_{\text{пред}} 10^{(13,55 \pm 0,17)(\varepsilon - 0,714)}.$$

Полученные соотношения показывают, что «точка пузырька» в рассматриваемых нами системах является весьма чувствительной к малейшим изменениям структуры пор и сил смачивания. При выборе носителя для иммунохроматографии крайне важно учесть найденную зависимость. Без подобного учета сложно прогнозировать скорости перемещения фронта тангенциального движения белковых растворов.

2. Изучение взаимодействия биополимеров с носителями методом анализа электронных микрофотографий

Проведен анализ электронно-микроскопического изображения конъюгатов в образцах носителей с размерами пор 10 мкм (фильтр из нитроцеллюлозы). Конъюгаты коллоидного золота с белками — плацентарным α-микроглобулином (ПАМГ) и хориогонадотропином (ХГЧ) изучали с помощью растрового электронного микроскопа TESLA BS-340 (Чехия) в тест-зонах до и после иммунохроматографической реакции. В область введения пробы [8] был внесен раствор соответствующего антигена (АГ) (растворы белков ПАМГ-1 в концентрации 100 нг/мл или раствор ХГЧ в концентрации 1000 мМЕ/мл). Следует отметить, что конъюгаты — более сложная система, чем изученная в [9] группа антител к растительным вирусам. После прохождения реакции рабочую среду — тест-полоски высушивали и вырезали фрагменты рабочих зон, а затем проводили напыление металла в вакуумной установке и электронную микроскопию. Наблюдали распределение комплексов с коллоидным золотом на микрофотографиях тест-зон, куда под действием капиллярных сил мигрирует коньюгат после соединения с АГ [10, 11]. В тест-зоне происходит «заякоривание» комплекса конъюгат-антиген с помощью антител ко второму эпитопу АГ [12]. После реакции хорошо различимо появление конгломератов диаметром 10–15 мкм. Их количество составляет примерно 20 000 на см^2, что позволяет проводить оптическую визуализацию сигнала на иммунохроматограмме. Основной вклад в визуализацию вносят конгломераты, а не диффузно распределенные коллоидные частицы. При этом движение идет внутри полимерного пористого носителя в тангенциальном направлении, в отличие от других экспресс-тестов, где могут быть потоки биологических жидкостей в нормальном направлении [13]. Полученные данные свидетельствуют о возможности коли-

чественной оценки интенсивности окрашивания полос рабочей зоны [14].

В дальнейшем предполагается провести оценку реологических свойств белков и их конъюгатов с коллоидным золотом, а также изучить влияние структуры пористых носителей на взаимодействие с этими сложными коллоидными системами. При этом при заборе проб растворов, потенциально содержащих бактерии, особую роль играет предварительный анализ взаимодействия бактерий с микрофильтрами [15].

Выводы

1. Установлены пороги перколяции при движении нормального фазового потока воды через систему: полимер — поры, заполненные воздухом, а также фазовой проницаемости воздуха через пористый полимер, заполненный водой.
2. Получены новые, отличные от классических, уравнения, связывающие величины фазовой водопроницаемости и разности давлений в «точке пузырька» с пористостью системы.
3. Разработан комплексный конъюгат моноспецифических антител к E. Coli с пероксидазой, не ингибирующий ферментативную активность пероксидазы. Разработан метод количественной оценки интенсивности цветовой реакции в рабочей зоне.

Литература

1. *Ковалев Г. Н., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н., Зарайский Е. И., Снегирева Н. С., Образцов И. Ф.* Новая технология получения специфичных антител к Escherichia coli при разработке изделий для экологического мониторинга // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. № 2. С. 61–68.
2. *Коллинз Р.* Течения жидкостей через пористые материалы. М.: Мир, 1964. 350 с.
3. *Хейфец Л. И., Неймарк А. В.* Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.
4. *Мулдер М.* Введение в мембранную технологию. Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 495 с.
5. *Брок Т.* Мембранная фильтрация. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 462 с.
6. *Starov V. M., Zhdanov S. A., Sobolev V. D. at all.* Spreading of liquid drops over porous substrates // Advances in Colloid and Interface Science. 2003. 104. P. 123–158.
7. *Stauffer D.* Introduction to percolation theory. Taylor & Francis. London, 1985.
8. *Ковалев Г. Н., Зарайский Е. И., Ковалев А. Г., Снегирева Н. С.* Некоторые закономерности движения белковых растворов под влиянием сил поверхностного натяжения в горизонтально расположенных микропористых полосках из нитрата целлюлозы // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9. № 3. С. 321–332.
9. *Блинцов А. Н., Снегирева Н. С., Изумрудов В. А. и др.* Ферментный иммунохроматографический анализ растительных вирусов // ДАН. 1997. Т. 356. № 2. С. 264–267.
10. *Снегирева Н. С., Петрова Е. Б., Науменко А. В., Зарайский Е. И.* Биомеханические основы иммунохроматографии — микромеханика капиллярного движения растворов биополимеров и модельных вязких сред // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 1. С. 74–75.
11. *Зарайский Е. И., Снегирева Н. С., Науменко А. В., Науменко В. Ю.* Скорость миграции белковых растворов в пористых носителях при работе биосенсоров // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 1. С. 220.
12. *Зарайский Е. И., Снегирева Н. С.* Комбинированные коньюгаты для иммунохроматограмм на основе нитроцеллюлозных мембран // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 1. С. 221.
13. *Науменко А. В., Ковалев Г. Н., Снегирева Н. С., Загорский Д. Л.* Взаимодействие гидрогелей с пористыми мембранами // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 1. С.100.
14. *Зарайский Е. И, Маркин А. А., Снегирева Н. С.* Количественная оценка иммунохроматограмм // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 1. С. 222.
15. *Науменко А. В., Гунар О. В., Снегирева Н. С.* Роль биомеханических характеристик бактерий при фильтрационном анализе стерильности лекарственных средств // Биомеханика-2004: Сб. трудов VII Всерос. конф. Н. Новгород, 2004. Т. 2. С. 81–82.

Статья поступила 5 ноября 2004 г.
Кубанский государственный университет
© Образцов И. Ф., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н., Ковалев Г. Н., Зарайский Е. И., Снегирева Н. С., 2005