

УДК 541.182.65+537.311+621.359.2

Л.Л.Лысенко, Н.А.Мищук, Т.А.Несмеянова, Н.О.Барина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН, ДИАФРАГМЫ И ИОНИТА

Проведены экспериментальное исследование и качественный анализ временных зависимостей распределения напряжения в системе ионообменные мембраны—диафрагма—ионит и электроосмоса через диафрагму и ионит. Показано, что степень поляризации элементов изучаемой системы зависит не только от величины используемого напряжения, но и от взаимного расположения диафрагмы и ионита, что в свою очередь отражается на скорости электроосмоса.

**ВВЕДЕНИЕ.** Развитие современных технологий требует миниатюризации различных составляющих оборудования, в том числе создания микронасосов, не требующих для перекачивания жидкости громоздких механических частей. Одним из эффективных путей решения этой задачи является использование электроосмоса. Если классический электроосмос давно применяется в решении разнообразных технологических проблем [1, 2], то использование нелинейного полю электроосмоса находится в начальной стадии [3—5]. Вместе с тем нелинейный электроосмос [2—4] и, в особенности, электроосмос второго рода [6, 7] позволяют при той же напряженности поля получить в десятки раз большие скорости течения жидкости, чем при классическом электроосмосе, что, безусловно, представляет как научный, так и практический интерес.

Многочисленные исследования концентрационной поляризации ионообменных мембран [8, 9] и проводящих сферических частиц [6, 7] продемонстрировали возникновение области индуцированного заряда, величина и протяженность которого существенно зависит от концентрации электролита, размера и химической природы поляризуемых объектов и напряженности приложенного электрического поля. В частности, показано, что при поляризации заряженных непроводящих частиц скорость электроосмоса, обусловленного индуцированным зарядом, может заметно отличаться от скорости электроосмоса, связанного с двойным электрическим слоем, и возрастать при увеличении напряженности электрического поля  $E$  как  $aE^{3/2}$  [10], а проводящих частиц — как  $aE^2$  [6, 7, 11], где  $a$  — радиус поляризуемой частицы.

Естественно, что для возникновения нелинейного электроосмоса необходимо соблюдение ряда условий, создающих требуемое распределение поля вокруг поляризуемых частиц, способствующее созданию максимально возможного индуцированного заряда и обусловленного им электроосмоса. Это низкая электропроводность раствора, селективная электропроводность материала частиц (ионообменные материалы, металлические или полупроводящие частицы) и достаточно высокая напряженность электрического поля  $E \gg RT/Fa$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура,  $F$  — постоянная Фарадея [6, 7].

Кроме указанных выше характеристик раствора и частиц, важным является также их взаимное расположение. Если в случае отдельных частиц, расположенных на большом расстоянии друг от друга, скорость классического электроосмоса и электроосмоса второго рода при одной и той же напряженности поля может отличаться в десятки раз [7], то по мере сближения частиц их поляризация ослабляется, что приводит к постепенному снижению скорости течения жидкости [12]. Однако даже в случае плотной упаковки частиц, когда их поляризация тесно взаимосвязана, скорость электроосмоса остается нелинейной [3, 4], то есть представляет интерес для микрофлюидики.

Такое поведение поляризации и электроосмоса ставит вопрос о возможности их интенсификации, в частности, за счет конструктивных особенностей микронасосов. Одним из возможных путей ускорения электроосмоса является сочетание системы, позволяющей обеспечить классический электроосмос (например, диафрагмы и

достаточно высоким зарядом пор), и системы, обеспечивающей нелинейный электроосмос (например, гранулы ионита). Такая идея была впервые высказана в работе [13], где использование прилегающих друг к другу пористой диафрагмы и слоя ионита привело к заметному возрастанию скорости электроосмоса через диафрагму.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию и теоретическому анализу поляризационных процессов и электроосмоса в системе ионообменных мембран—диафрагма—ионит. В частности, будет показано, что степень взаимной поляризации ионообменных мембран, диафрагмы и ионита зависит не только от напряженности приложенного поля, но и от их взаимного расположения. Более того, будет показано, что сочетание диафрагмы и ионита влияет не только на величину электроосмоса, но и на его стабильность.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.** Исследование зависимостей распределения напряжения и скорости электроосмоса в системе ионообменных мембран—диафрагма—ионит проводили с использованием электрохимической установки, блочная схема которой представлена на рис. 1.

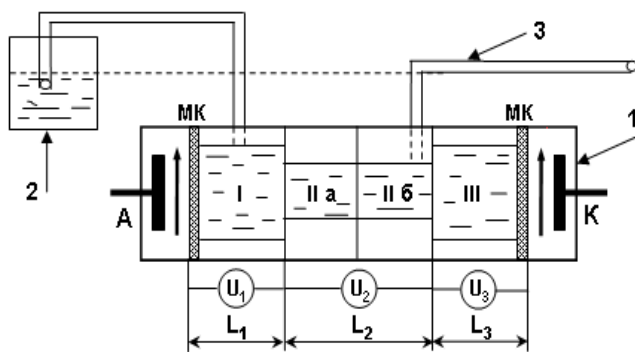


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 — электрохимическая ячейка; 2 — компенсационная емкость; 3 — микробюретка.

Электрохимическая ячейка (1) состояла из шести камер — двух электродных и четырех рабочих (I, IIa, IIб, III). Площадь поперечного сечения электродных камер составляла  $6.4 \text{ см}^2$ , расстояние от электрода до мембраны — 1 см. Электроды представляли собой платиновые пластины, размер которых соответствовал поперечному сечению электродных камер. Площадь поперечного сечения рабочих камер I и III составляла  $6.4 \text{ см}^2$ ,

толщина — 2.2 см, площадь поперечного сечения рабочих IIa и IIб —  $3.2 \text{ см}^2$ , толщина — 1.5 см. Электродные камеры были ограничены двумя катионообменными мембранами (МК), что обеспечивало так называемый режим сквозного переноса катионов [14], при котором не происходит обессоливание раствора. Помимо этого в работе была использована скоростная промывка электродных камер 0.1 н. раствором  $\text{NaNO}_3$  (направление подачи электролита указано стрелками), которая не только препятствует пассивации электродов пузырьками газа, но и предотвращает поступление из анодной в рабочие камеры ионов водорода, сохраняя такую возможность для ионов натрия [15]. Промывку электродных камер осуществляли раздельно, со сбросом раствора. Таким образом в результате сквозного переноса только ионов натрия исходный состав электролита, заполняющего рабочие камеры (0.001 н. раствор нитрата натрия), практически не изменялся во времени.

В зависимости от условий эксперимента в рабочие камеры электрохимической ячейки устанавливали отрицательно заряженную стеклянную пористую диафрагму, загружали катионит или использовали их комбинацию (варианты компоновки см. далее). Диафрагма имела следующие характеристики: толщина — 0.3 см, радиус пор — 8 микрон, пористость — 40 %, электрокинетический потенциал — 45 мВ. В исследованиях использовали катионит марки КУ 2-8, полная статическая обменная емкость которого составляла  $1.8 \text{ мг-экв/см}^3$ , диаметр зерна — 0.5–1.0 мм, электрокинетический потенциал — 50 мВ. В соответствии с вышесказанным о постоянстве катионного состава рабочего раствора, исходная Na-форма катионита также не претерпевала изменений в ходе эксперимента.

Для того чтобы исключить влияние гидростатического давления на измерение скорости электроосмотического потока, в схему экспериментальной установки была включена компенсационная емкость (2), которую так же, как и рабочие камеры заполняли 0.001 н. раствором нитрата натрия. Уровень жидкости в компенсационной емкости поддерживали на уровне микробюретки (3), с помощью которой определяли скорость электроосмотического потока. Для измерения падения напряжения  $U_1, U_2, U_3$  (рис. 1) в электрохимической ячейке были установлены пла-

тиновые электроды диаметром 0.5 мм (расстояние между электродами соответственно  $L_1 = 25$ ,  $L_2 = 33$ ,  $L_3 = 25$  мм) [16]. Учитывая, что электропроводность мембран на несколько порядков выше электропроводности используемого раствора, измеренные падения напряжения  $U_1$ ,  $U_3$  фактически соответствовали падению напряжения на рабочих камерах I и III. Вместе с тем такое расположение электродов позволяло однозначно учитывать изменение напряжения в областях концентрационной поляризации мембран, протяженность которых может составлять всего несколько микрон [8, 9], и может быть утеряна при другом расположении электродов.

Исследования проводили для 5 вариантов компоновки электрохимической ячейки. Базовую модификацию (вариант 1) с использованием только катионообменных мембран (рис. 1) дополняли диафрагмой и катионитом в различных сочетаниях (рис. 2, *a-d* — варианты 2–5 соответственно). Местоположение электродов для всех вариантов соответствует указанному на рис. 1. Эксперименты выполнены в потенциостатическом режиме. Общее падение напряжения на ячейке составляло 150 В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ В ЯЧЕЙКЕ.** Поляризацию элементов, входящих в экспериментальную ячейку, а именно, катионообменных мембран, диафрагмы, катионита и диафрагмы с катионитом исследовали поэтапно. В начальный момент распределение напряжения по секциям ячейки  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  соответствует теоретическим расчетам, выполненным на основе закона Ома с учетом характерных размеров ячейки. Однако со време-

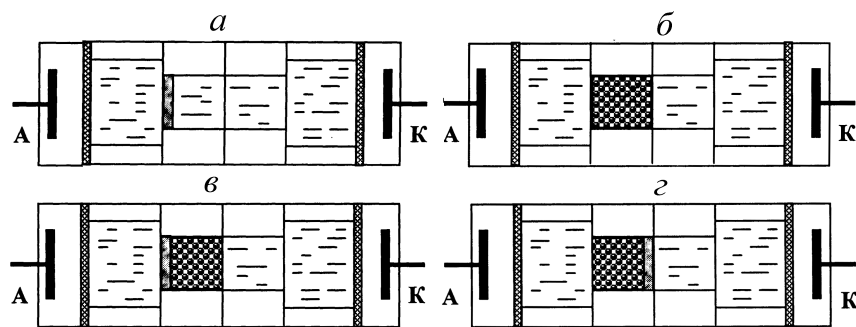


Рис. 2. Варианты 2–5 компоновки электрохимической ячейки: *a* — с диафрагмой (вариант 2); *б* — с катионитом (вариант 3); *в, г* — с диафрагмой и катионитом, расположенным со стороны катода (вариант 4) и со стороны анода (вариант 5).

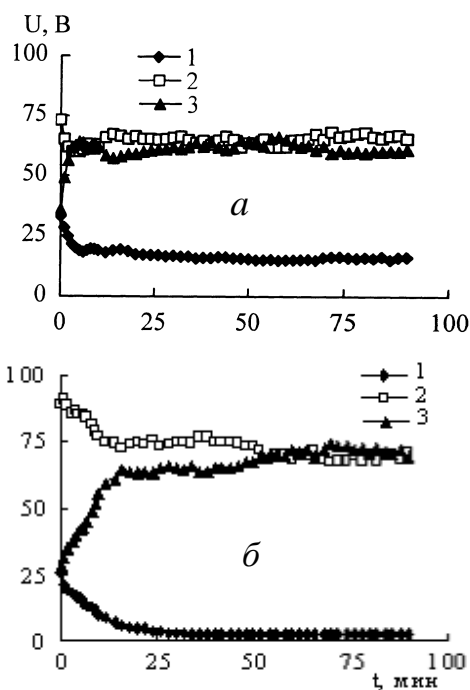


Рис. 3. Временная зависимость падения напряжения в ячейке: *a* — вариант компоновки 1; *б* — вариант компоновки 2. 1 —  $U_1$ , 2 —  $U_2$ , 3 —  $U_3$ .

нем падение напряжения по секциям ячейки изменяется. Временные зависимости падения напряжения в ячейке, содержащей только катионообменные мембраны, представленные на рис. 3, *a*, могут быть объяснены согласно стандартным представлениям о поляризации мембран [8, 9].

Концентрация электролита у катионообменной мембраны, отдающей катионы (расположенной возле анода), повышается (рис. 4, *a*, кривая 1), а падение напряжения понижается (рис. 3, кривая 1). В то же время у катионообменной мембраны, принимающей катионы (расположенной возле катода) концентрация электролита снижается (рис. 4, *a*, кривая 2), а падение напряжения повышается (рис. 3, кривая 3).

Поскольку увеличение падения напряжения в области сниженной концентрации электролита заметно превышает его снижение в области повышенной концентрации [7], падение

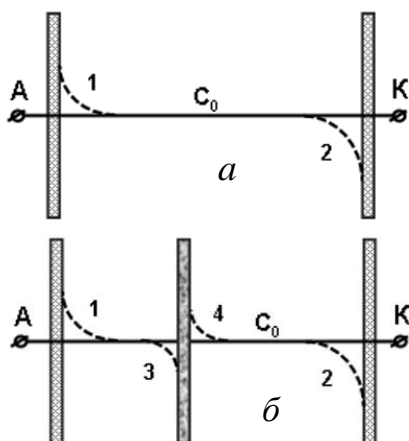


Рис. 4. Схематическое представление поляризации ионообменных мембран (а) и ионообменных мембран и диафрагмы (б).

напряжения за областями поляризации мембран должно уменьшаться. Действительно, проведенные измерения показали, что через несколько минут в центральной части ячейки устанавливается падение напряжения (рис. 3, а) более низкое, чем его начальное значение. Необходимое для этих изменений время качественно согласуется с оценками длительности переходных процессов у поверхностей ионообменных мембран, выполненными в работах [17].

Распределения напряженности поля в ячейке, содержащей не только катионообменные мембраны, но и диафрагму (рис. 3, б), заметно отличается от распределения напряжения, представленного на рис. 3, а. Это, прежде всего, связано с тем, что диафрагма имеет более высокое сопротивление, чем используемый раствор (в 3.93 раза), что приводит к повышению падения напряжения  $U_2$  на центральной части ячейки II. Полученные величины в начальный момент полностью согласуются с теоретически рассчитанными. Диафрагма, как и ионообменные мембраны, также подвержена поляризации (рис. 4, б), то есть у одной ее стороны концентрация электролита снижается (кривая 3), а у другой — повышается (кривая 4), что, естественно, отражается на локальном падении напряжения.

Однако, как было показано ранее [18], поляризация диафрагмы, характеристики которой примерно соответствуют характеристикам диафрагмы, использованной в настоящей работе, относительно невелика, что и подтверждается

экспериментальными данными: снижение падения напряжения на центральной части ячейки (рис. 3, б, кривая 2) обусловлено не только влиянием поляризации диафрагмы, но и существенным изменением падения напряжения в приэлектродных областях (рис. 3, б, кривые 1, 3).

Введение в ячейку вместо диафрагмы катионита, электропроводность которого выше, чем электропроводность как диафрагмы, так и раствора электролита, приводит к снижению падения напряжения на центральной части ячейки (рис. 5, кривая 2) по сравнению как с аналогич-

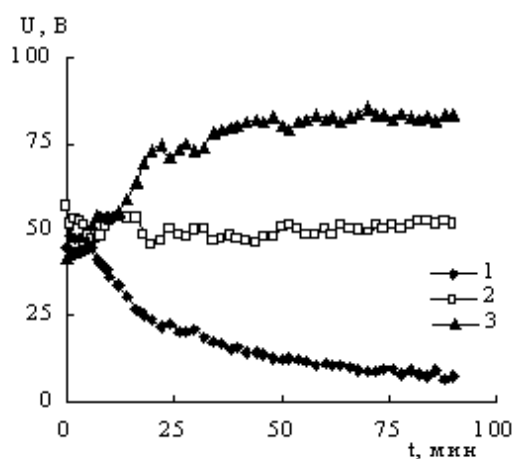


Рис. 5. Временная зависимость падения напряжения в ячейке (вариант компоновки 3): 1 —  $U_1$ ; 2 —  $U_2$ ; 3 —  $U_3$ .

ным падением напряжения в присутствии диафрагмы (рис. 3, б, кривая 2), так и с ячейкой, содержащей только катионообменные мембраны (рис. 3, а, кривая 2). Начальное падение напряжения возле мембран (рис. 5, кривые 1, 3) возрастает по сравнению с падением, представленным на рис. 3 (кривые 1, 3), что приводит к их более сильной поляризации, и в результате к более сильному временному изменению величин  $U_1$ ,  $U_3$ , чем в предыдущих случаях. Однако следует отметить, что полученное снижение падения напряжения на центральной части ячейки за счет введения катионита больше, чем следовало ожидать на основе его электропроводности. Это связано с поляризацией гранул.

В случае единичной гранулы катионита у ее поверхности формируется конвективно-диффузионный слой, то есть область с концентрацией электролита, отличающейся от объемных значений [6, 7]. При перемещении вдоль поверхности

гранулы происходит плавное изменение концентрации электролита от сниженного значения со стороны анода до повышенного значения со стороны катода. Одновременно происходит и перераспределение локального падения напряжения. В области сниженной концентрации электролита падение напряжения заметно больше, чем с противоположной стороны гранулы, где концентрация электролита повышена. При этом с анодной стороны возникает большой положительный заряд, а с катодной стороны — небольшой отрицательный заряд. Степень изменения концентрации электролита, протяженность области, в которой происходят такие изменения, а также протяженность и величина положительного и отрицательного индуцированного заряда зависят от размера частиц, напряженности электрического поля и скорости возникающего электроосмотического течения жидкости [6, 7].

При использовании нескольких гранул ионита, расположенных друг за другом в направлении поля, по мере их сближения концентрационная поляризация гранул ослабляется [12]. Предельным случаем сближения гранул ионита является насыпной слой, в котором гранулы катионита контактируют друг с другом, максимально ослабляя концентрационную поляризацию. Этот вывод, в частности, подтверждается визуализацией перепадов концентрации в системе контактирующих ионообменных частиц с помощью флуоресцентных ионов [7, 19]. Таким образом, поляризация насыпного слоя ионита, так же, как и диафрагмы, не очень велика. Это видно из рис. 5, где временные изменения падения напряжения на катионите незначительны и обусловлены, прежде всего, перераспределением напряжения по длине ячейки за счет поляризации катионообменных мембран.

Более сложным оказывается перераспределение напряжения за счет одновременной поляризации мембран, диафрагмы и катионита (рис. 6, а,б). В начальный момент распределения напряжения по секциям ячейки  $U_1-U_3$  для вариантов компоновки системы 4 и 5 практически совпадают, а также полностью соответствуют теоретическим расчетам. Однако временные зависимости распределения напряжения в ячейке определяются взаимным расположением катионита и диафрагмы (рис. 2, в,г). Если катионит находится с катодной стороны, падение напряже-

ния на центральной секции ячейки резко возрастает (рис. 6, а), что свидетельствует о сильной взаимной поляризации диафрагмы и катионита. В противоположной ситуации падение напряжения на центральной части ячейки (рис. 6, б) приближается к падению напряжения на диафрагме (рис. 3, б), свидетельствуя о незначительном взаимовлиянии поляризации катионита и диафрагмы.

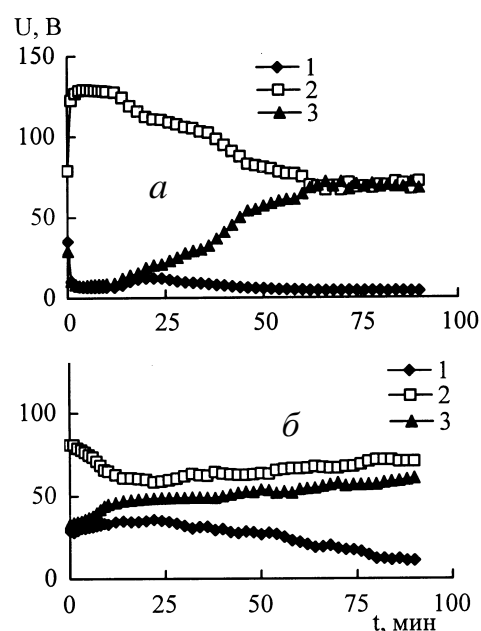


Рис 6. Временная зависимость падения напряжения в ячейке при различном взаимном расположении диафрагмы и катионита: а — вариант компоновки 4; б — вариант компоновки 5. 1 —  $U_1$ , 2 —  $U_2$ , 3 —  $U_3$ .

Полученные экспериментальные данные могут быть интерпретированы следующим образом. Если в отсутствие диафрагмы толщина конвективно-диффузионного слоя у поверхности катионита задается ничем не ограниченным тангенциальным электроосмотическим течением, то присутствие диафрагмы тормозит электроосмотическое течение вдоль поверхности гранул катионита, что приводит к расширению области их концентрационной поляризации (рис. 7, а,б) по сравнению с областью поляризации отдельной частицы. Это, в свою очередь, означает, что расширяется область индуцированного заряда, протяженность которой тесно взаимосвязана с протяженностью конвективно-диффузионного слоя гранул [6, 7] и происходит перераспределение па-

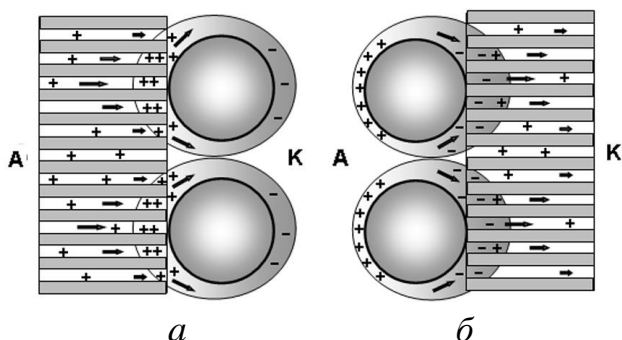


Рис. 7. Схематическое представление поляризации диафрагмы и катионита при их различном взаимном расположении: *a* — вариант компоновки 4; *б* — вариант компоновки 5. Стрелки указывают направление электроосмоса (от анода к катоду).

дения напряжения. Следует ожидать, что расширение области сниженной концентрации электролита (рис. 7, *a*) приводит к повышению падения напряжения на диафрагме и катионите, а расширение области повышенной концентрации электролита (рис. 7, *б*) — к снижению падения напряжения в этой области. Действительно, проведенные измерения (рис. 6, *a, б*, кривые 2) показали именно такой характер изменения падения напряжения. Понятно, что полученные изменения в распределении падения напряжения отражаются на измеренной скорости электроосмоса.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРООСМОСА.** Результаты измерения скорости электроосмоса на отдельно взятых диафрагме и катионите, а также в ячейке, содержащей одновременно диафрагму и катионит, представлены на рис. 8. Из-за инерционных свойств жидкости электроосмотическое течение через диафрагму и/или ионит устанавливается не сразу. Известно, например, что в длинном цилиндрическом канале радиусом  $R$  и кинематической вязкости жидкости  $\nu$  стационарное течение устанавливается через время  $\tau \approx R^2/\nu$  [20]. Так, при радиусе канала 1 см стационарная скорость течения воды устанавливается за 1.5 мин. В нашем случае экспериментальной ячейки, содержащей короткие элементы разной формы, рассчитать время достижения стационарного течения сложно. Вместе с тем, учитывая, что эффективный радиус ячейки с прямоугольным сечением [21] в разных секциях составляет от 1 до 2.5 см, следует ожидать, что скорость течения должна достигать максималь-

ного значения через 2—10 мин, что и наблюдается экспериментально. Однако из-за постоянно нарастающей поляризации мембран, диафрагмы и/или катионита после достижения максимума скорости течения наблюдается ее быстрое снижение. Временную зависимость скорости электроосмотического течения рассмотрим далее. Здесь же проанализируем ее возможные и реально полученные максимальные значения.

Используя известное значение электрокинетического потенциала диафрагмы, скорость электроосмоса через диафрагму можно записать на основе формулы для линейного электроосмоса Смолуховского [22] с поправочным коэффициентом на пористость диафрагмы  $W$ :

$$V_{eo} = W \frac{\epsilon}{\eta} \zeta E, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость раствора;  $\eta$  — ее динамическая вязкость;  $\zeta$  — электрокинетический потенциал стенок поры диафрагмы.

После несложных расчетов на основе закона Ома находим, что в момент включения ячейки напряженность электрического поля в диафрагме  $E$  равна 62 В/см, а скорость электроосмоса должна составлять 0.005 см/с, что на 25 % выше полученного экспериментального максимума. Различие между рассчитанной и измеренной максимальной скоростью электроосмоса связано с двумя противоположно направленными факторами: с одной стороны, из-за инерционных свойств жидкости электроосмотическое течение еще не вышло на максимально возможное стационар-

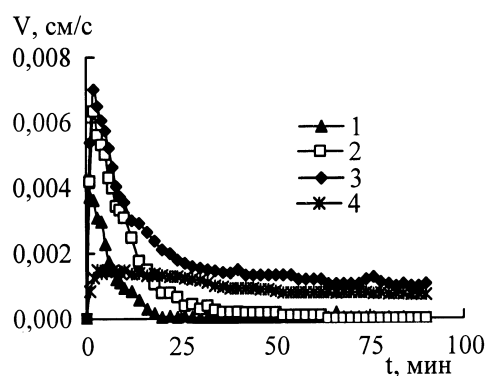


Рис. 8. Временная зависимость скорости электроосмоса в ячейке при различных вариантах ее компоновки: 1 — диафрагма; 2 — катионит; 3 — диафрагма и катионит со стороны катода; 4 — диафрагма и катионит со стороны анода.

ное значение, а, с другой, с момента подачи на ячейку напряжения в системе нарастает поляризация, снижающая скорость электроосмоса.

Применив выражение (1) для расчета скорости течения через слой ионита, находим, что при установившейся в области ионита напряженности электрического поля 15 В/см скорость электроосмоса должна составлять 0.00335 см/с. Таким образом, измеренная максимальная скорость электроосмоса примерно в 2 раза превышает рассчитанное значение. Отличие между расчетными и максимальными экспериментальными значениями электроосмоса для слоя гранул катионита обусловлено особенностями их концентрационной поляризации.

При используемых нами напряженностях электрического поля поляризация гранул катионита является достаточно сильной для того, чтобы у единичной гранулы возник электроосмос второго рода [6, 7]. Действительно, согласно теории электроосмоса второго рода у гранулы ионита с радиусом  $a=0.4$  мм в области концентрационной поляризации со сниженной концентрацией электролита создается эффективный электрокинетический потенциал  $\zeta_{ef}=2Ea=1.2$  В, превышающий обычный электрокинетический потенциал ионита в 13 раз. С учетом полученного эффективного электрокинетического потенциала скорость электроосмотического течения между парой гранул

$$V_{eo,2} \approx \frac{5\epsilon}{14\eta} \zeta_{ef} E \quad (2)$$

должна достигать 0.0154 см/с, то есть в 2.5 раза превышать полученное нами экспериментальное значение скорости.

Таким образом, хотя измеренная скорость течения жидкости выше линейной скорости электроосмоса, она заметно ниже скорости электроосмоса второго рода. Следовательно, мы получили экспериментальное подтверждение представленных выше аргументов в пользу существования концентрационной поляризации и формирования индуцированного заряда не только для отдельной гранулы ионита, но и в насыпном слое ионообменных гранул.

Сочетание диафрагмы и катионита приводит к скорости электроосмоса, существенно большей, чем в случае одной диафрагмы, и несколько большей, чем в случае одного катионита. Полу-

ченный результат хорошо согласуется с известными теоретическими и экспериментальными результатами, касающимися электроосмотического течения через системы с переменным размером пор [1].

Присутствие в экспериментальной ячейке диафрагмы с небольшим радиусом пор создает настолько высокое гидродинамическое сопротивление, что скорость электроосмоса, возникшего на ионите, может уменьшиться в сотни раз. Известно, что при течении жидкости из активной (заряженной) диафрагмы в пассивную (незаряженную) диафрагму, содержащую цилиндрические поры разного радиуса, скорость течения уменьшается в  $K$  раз [1]:

$$K = \frac{\beta_n R_n^2 l_a}{\beta_n R_n^2 l_a + \beta_a R_a^2 l_n} \quad (3)$$

где  $\beta_{a,n}$ ,  $l_{a,n}$ ,  $R_{a,n}$  — пористость, толщина и радиус пор активной (а) и пассивной (п) диафрагмы.

Предполагая, что диафрагма незаряжена, по формуле (3) можно было бы оценить снижение скорости течения при переходе из межгранульного пространства в диафрагму. С учетом характеристик диафрагмы и насыпного слоя катионита на основе формулы (3) получаем  $K \approx 0.01$ . Используя полученные максимальные значения экспериментальной скорости электроосмоса через катионит (рис. 8, кривая 2) и коэффициент  $K$ , находим, что составляющая скорости электроосмоса через диафрагму, обусловленная присутствием катионита, составляет около 0.0001 см/с, что заметно меньше, чем разность скоростей, представленных на кривых 1 и 3 (рис. 8). Таким образом, мы получили доказательство существования сильной взаимной поляризации диафрагмы и слоя катионита.

Более того, в отсутствие взаимной концентрационной поляризации диафрагмы и катионита измеренные скорости (рис. 8, кривые 3 и 4) для обоих вариантов расположения диафрагмы и катионита (рис. 2, в,г) должны совпадать. Однако при расположении катионита со стороны анода скорость электроосмоса (кривая 4) не только ниже скорости, полученной при расположении катионита со стороны катода (кривая 3), но и ниже скорости, полученной при использовании диафрагмы без ионита (кривая 1). Это может быть связано только с проанализированным выше про-

никновением в поры диафрагмы отрицательно индуцированного заряда, снижающего измеряемую скорость электроосмоса.

Таким образом, полученные значения скорости течения через диафрагму и катионит в сочетании с измеренным распределением напряжения (рис. 6) подтверждают гипотезу о проникновении поляризованной области и индуцированного заряда возле поверхности катионита внутрь пор диафрагмы (рис. 7) и их влияние на скорость электроосмоса [13]. Если в поры проникает положительный индуцированный заряд, совпадающий со знаком противоионов диафрагмы (катионит находится со стороны катода), скорость электроосмоса возрастает, а если в поры проникает отрицательный индуцированный заряд (катионит находится со стороны анода) — она падает.

Проведенный выше анализ касается полученных максимальных значений скорости электроосмоса. Но, поскольку поляризация диафрагмы и катионита сочетается с поляризацией катионообменных мембран, со временем скорость электроосмоса падает. Частично такое поведение электроосмоса объясняется полученным выше перераспределением напряженности поля (рис. 3, 5, 6), которое приводит к снижению напряженности поля в центральной части ячейки, то есть в области диафрагмы или катионита. Используя экспериментальные значения падения напряжения на центральной части ячейки для расчета электроосмотической скорости, мы установили, что скорость электроосмоса в ячейке может упасть в несколько раз. Действительно, в случае сочетания диафрагмы и ионита (рис. 8, кривые 3, 4) резкое изменение скорости электроосмоса происходит только в начале измерений, после 20—30 мин работы скорость течения почти стабилизируется, а ее значения соответствуют измеренному падению напряжения.

Однако в случае применения диафрагмы и катионита (рис. 8, кривые 1, 2) через несколько десятков минут от начала эксперимента, несмотря на достаточно высокую напряженность поля в центральной части ячейки, наблюдается падение скорости течения почти до нуля. Безусловно, такое снижение скорости электроосмоса является доказательством развития сильной концентрационной поляризации диафрагмы и ионита, которая приводит к еще более неравно-

рному распределению напряженности поля в каждой из секций ячейки и соответствующему снижению напряженности поля внутри диафрагмы и слоя катионита, то есть к снижению скорости течения.

**ВЫВОДЫ.** Исследование распределения падения напряжения в экспериментальной ячейке, содержащей катионообменные мембраны, диафрагму и катионит, продемонстрировало его существенную зависимость от компоновки изучаемой системы. Полученные данные свидетельствуют, что степень поляризации элементов исследуемой системы зависит от взаимного расположения диафрагмы и катионита, что в свою очередь отражается на измеряемом максимальном значении скорости электроосмоса и ее зависимости от времени проведения исследования.

**РЕЗЮМЕ.** Проведено експериментальне дослідження та якісний аналіз часових залежностей розподілу напруги в системі іонообмінні мембрани—діафрагма—іоніт і електроосмосу через діафрагму та іоніт. Показано, що ступінь поляризації елементів даної системи залежить не тільки від величини використовуваної напруги, але і від взаємного розташування діафрагми та іоніту, що в свою чергу відбивається на швидкості електроосмосу.

**SUMMARY.** The experimental investigation and the qualitative analysis of the time dependences of the electric potential distribution in the system of an ion-exchange membranes—a diaphragm—an ionite and the electroosmosis through a diaphragm and an ionite is carried out. It is shown that the degree of polarization of the elements of investigated system depends not only on the value of the used voltage, but also on the relative position of a diaphragm and an ionite, that in turn affects the velocity of electroosmosis.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомолова К.П. Электроосмос. -Л.: Химия, 1989.
2. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. -Киев: Наук. думка, 1975.
3. Rathore A.S., Horvath C. // J. Chromatogr. A. -1997. **781**, № 1–2. -P. 185—195.
4. Stol R., Kok W.T., Poppe H. // J. Chromatogr. A. -2000. -**914**, № 1–2. -P. 201—209.
5. Mishchuk N.A., Heldal T., Volden T. et al. // Microfluidics and Nanofluidics. -2011. -**11**, № 6. -P. 675—684.
6. Mishchuk N.A. // Encyclopedia of Surface and Colloid Science / Ed. Arthur Hubbard. -New York/London:



- Taylor and Francis, 2002.
7. *Mishchuk N.A.* Advances in Colloid and Interface Science. -2010. -**160**, № 1–2. -P. 16–39.
  8. *Заболоцкий В.И., Никоненко В.В.* Перенос ионов в мембранах. -М.: Наука, 1996.
  9. *Zaltzman B, Rubinstein I.* // J. Fluid Mech. -2007. -**579**, № 1. -P. 173–226.
  10. *Mishchuk N.A., Dukhin S.S.* // Electrophoresis. -2002. -**13**, № 13. -P. 2012–2022.
  11. *Ben Yu., Demekhin E.A., Chang H.-Ch.* // J. Colloid and Interface Science. -2004. -**276**, № 2. -P. 483–497.
  12. *Баринова Н.О., Мищук Н.А.* // Коллоид. журн. -2008. - **70**, № 1. -С. 743–747.
  13. *Мищук Н.А., Лысенко Л.Л.* // Химия и технол. воды. -2004. -**26**, № 4. -С. 360–377.
  14. *Гаровский А.А., Мищук Н.А., Рогов В.М.* // Там же. -1992. -**14**, № 8. -С. 563–582.
  15. *Лысенко Л.Л., Мищук Н.А., Рында Е.Ф.* // Там же. -2011. -**33**, № 3. -С. 243–255.
  16. *Amatore Ch., Szunerits S., Thouin L.* // Electrochemistry Communications. -2000. -**2**, № 4. -P. 248–253.
  17. *Mishchuk N.A., Koopal L.K, Gonzalez-Caballero F.* // Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects. -2001. -**176**, № 2–3. -P. 195–212.
  18. *Мищук Н.А., Лысенко Л.Л., Корнилович Б.Ю., Баринова Н.О.* // Химия и технол. воды. -2002. -**24**, № 4. -С. 328–351.
  19. *Nischang I., Reichl U., Seidel-Morgenstern A., Tallarek U.* // Langmuir. -2007. -**23**, № 18. -P. 9271–9281.
  20. *Mishchuk N.A., Gonzalez-Caballero F.* // Electrophoresis. -2006. -**27**, № 3. -P. 650–659.
  21. *Marcos, Yang C., Wong T.N., Ooi K.T.* // Int. J. Engineering Sci. -2004. -**42**, № 13–14. -P. 1459–1481.
  22. *Дерягин Б.В., Духин С.С.* Электрофорез. -М.: Наука, 1975.

Институт коллоидной химии и химии воды  
им. А.В.Думанского НАН Украины, Киев

Поступила 03.09.2012