

УДК 544.034

## МОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ДИФФУЗИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БИСЛОЙНЫХ ИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН

© 2020 г. И. В. Фалина<sup>1</sup>\*, О. А. Демина<sup>1</sup>, Н. А. Кононенко<sup>1</sup>, И. А. Мякинченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный университет,  
ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040 Россия

\*e-mail: irina\_falina@mail.ru

Поступила в редакцию 12.07.2019 г.

После доработки 12.08.2019 г.

Принята к публикации 21.08.2019 г.

Развит модельный подход, позволяющий на основе концентрационной зависимости диффузионной проницаемости отдельных слоев оценить величину плотности диффузионного потока через бислойную мембрану, найти концентрацию виртуального раствора на границе между слоями мембраны и определить толщину каждого слоя, имеющего постоянные диффузионные характеристики. Верификация предложенного подхода проведена на примере перфторированной мембраны МФ-4СК, поверхность которой модифицирована полианилином в различных условиях. Адекватность применения данного подхода подтверждена удовлетворительным совпадением толщины модифицированного слоя, рассчитанной по модели и найденной из результатов изучения срезов мембран оптическим методом.

DOI: 10.31857/S0023291220010048

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ионообменные мембраны с асимметричными свойствами привлекают внимание исследователей из-за возможности управлять их транспортными свойствами путем изменения характеристик и толщины отдельных слоев. Для создания полимерных пленок с анизотропной структурой используют как соединение двух разнородных слоев, например, путем прессования двух мембран, так и нанесение модифицирующего слоя на поверхность промышленной мембраны [1–4]. Одним из перспективных модификаторов для получения мембран с анизотропной структурой является полианилин, благодаря его способности к формированию барьерного слоя на поверхности мембраны. Следствием этого является снижение диффузионной проницаемости и появление эффекта асимметрии мембраны [5], а также снижение ее электроосмотической проницаемости [6]. Указанная совокупность свойств мембран позволяет существенно увеличить степень концентрирования растворов электролитов в условиях электродиализа [7].

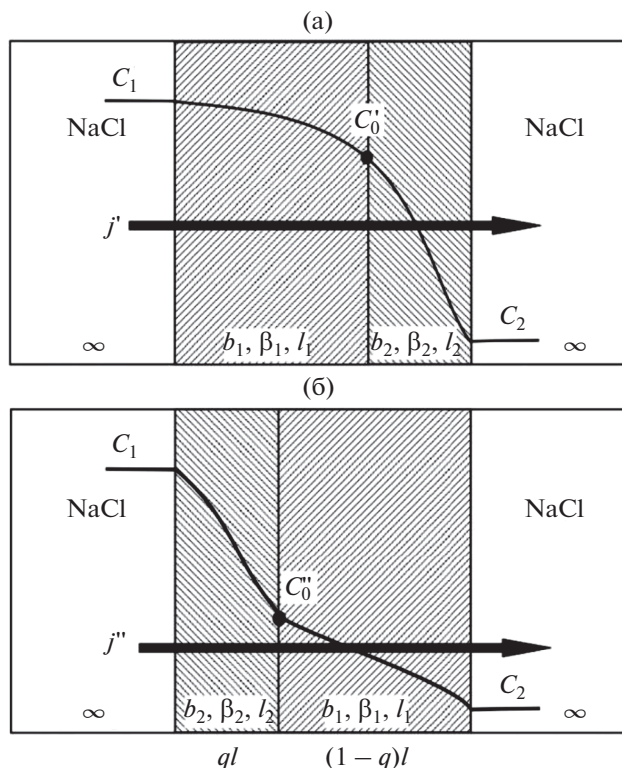
Важной задачей является теоретическое описание транспортных свойств бислойных мембран, в том числе диффузионной проницаемости, с целью их прогнозирования. Моделирование свойств анизотропных мембран, как правило, основано на предположении, что они представляют

собой би- или полислоиные структуры, при этом граница между слоями может быть как четкой, так и размытой, однако обязательным условием является непрерывность концентрационного профиля на границе слоев.

Одним из подходов является описание транспорта ионов через би- или полислоиную мембрану с использованием уравнений Нернста–Планка [8, 9]. В случае если один из слоев является достаточно тонким, его влияние на характеристики мембраны в уравнении Нернста–Планка учитывается с помощью феноменологического коэффициента проводимости [10]. Данный подход позволяет оценить не только транспортные характеристики ионообменной мембраны, но и концентрационные профили в мембранной системе.

Другим подходом является модель тонкопористой мембраны [11], согласно которой мембрана состоит из двух четко разделенных слоев, имеющих заданную толщину, а асимметрия транспортных характеристик обусловлена различием в плотности объемного заряда слоев. При этом характеристики слоев определяются в процессе подгонки расчетных значений к экспериментальным результатам.

В работе [12] предложен подход к описанию электромассопереноса в бислойных ионообменных мембранах, основанный на концепции вир-



**Рис. 1.** Схематическое изображение системы бислойная мембрана–раствор NaCl при различной ориентации мембраны к потоку электролита: (а) немодифицированной стороной к потоку, (б) обратная ориентация.

туального раствора и учитывающей особенности строения слоев. Проведенная авторами количественная оценка эффекта асимметрии интегрального коэффициента диффузионной проницаемости бислойных мембран различного структурного типа показала, что данный подход адекватно описывает этот эффект у мембран с четкой границей между слоями и устойчивыми характеристиками последних, например обратноосмотических и ультрафильтрационных мембран. Однако в случае анизотропных мембран, модифицированных поверхностно-активными органическими веществами, у которых четкая граница отсутствует, имеет место несовпадение теоретически рассчитанного и экспериментально найденного коэффициента асимметрии диффузионной проницаемости. Указанное различие авторы объяснили размытостью границы между слоями мембраны, которая обуславливает неопределенность в выборе толщины слоев и затрудняет формирование в них фиксированных концентрационных профилей.

Целью данного исследования было развитие модельного подхода, позволяющего на основе концентрационной зависимости диффузионной проницаемости отдельных слоев не только оценить величину диффузионного потока через бис-

лойную мембрану и найти концентрацию виртуального раствора на границе между слоями, но и определить толщину каждого слоя, имеющего постоянные диффузионные характеристики.

### ТЕОРИЯ

Рассмотрим мембранную систему, аналогичную системе, изученной в работе [12] и представленную на рис. 1. В данной системе бислойная мембрана омывается с двух сторон раствором электролита с концентрациями  $C_1$  и  $C_2$  ( $C_1 > C_2$ ), который интенсивно перемешивается с целью исключения влияния диффузионного слоя у межфазных границ мембрана/раствор на процесс диффузии электролита через мембрану. В процессе диффузионного переноса на границе между слоями мембраны имеет место непрерывность концентрации виртуального раствора ( $C'_0$  и  $C''_0$ ), величина которой зависит от ориентации мембраны по отношению к потоку электролита, при этом  $C'_0 \neq C''_0$ .

Мембрана состоит из двух слоев, имеющих разные свойства (параметры  $b_i$  и  $\beta_i$ , где  $i = 1$  или  $2$ ) и толщины  $l_1$  и  $l_2$  соответственно. В области разбавленных и умеренно концентрированных растворов (до 1 М) указанные параметры в соответствии с уравнением [13]

$$j = bC^\beta, \tag{1}$$

где  $j$  – плотность диффузионного потока (моль  $m^{-2} c^{-1}$ ),  $C$  – безразмерная концентрация, равная отношению реальной концентрации раствора к вспомогательной концентрации 1 М, являются константами для конкретной мембраны и могут быть получены путем обработки концентрационной зависимости диффузионного потока через мембрану в воду ( $C_2 = 0$ ) в билогарифмических координатах  $lg j - lg C$ . Параметр  $\beta$ , равный тангенсу угла наклона указанной линейной зависимости, характеризует форму концентрационного профиля внутри мембраны: при  $\beta > 1$  профиль выпуклый, при  $\beta < 1$  – вогнутый, а при  $\beta = 1$  – линейный [13]. Параметр  $b$  (моль  $m^{-2} c^{-1}$ ) характеризует совокупность свойств мембраны, выраженных в неявном виде и влияющих на диффузионный процесс, и также может быть определен путем обработки концентрационных зависимостей плотности диффузионного потока в координатах  $lg j - lg C$ .

Известно, что между величиной плотности диффузионного потока электролита через мембрану  $j$  и дифференциальным коэффициентом ее диффузионной проницаемости  $P^*$ , существует прямо пропорциональная зависимость, вытекающая из первого закона Фика:

$$j = \frac{1}{l} \int_{c_1}^{c_2} P^* dC, \quad (2)$$

где  $l$  – толщина мембраны.

В соответствии с уравнением (2) величина плотности потока электролита через каждый из слоев бислойной мембраны, ориентированной немодифицированной стороной к потоку (рис. 1а), равна

$$j' = \frac{1}{l_1} \int_{c_1}^{c_0'} P_1^* dC, \quad (3)$$

$$j'' = \frac{1}{l_2} \int_{c_0'}^{c_2} P_2^* dC. \quad (4)$$

Так как диффузионный перенос в каждом слое определяется не только его свойствами, но и концентрацией виртуального раствора на границе слоев, для противоположной ориентации бислойной мембраны в измерительной ячейке (рис. 1б) вместо потока  $j'$  имеем  $j''$ :

$$j'' = \frac{1}{l_2} \int_{c_1}^{c_0''} P_2^* dC, \quad (5)$$

$$j''' = \frac{1}{l_1} \int_{c_0''}^{c_2} P_1^* dC. \quad (6)$$

На основании экспериментальных данных можно определить интегральный коэффициент диффузионной проницаемости  $P$  в соответствии с уравнением

$$j = -P \frac{C_2 - C_1}{l}. \quad (7)$$

Принимая во внимание выражение, отражающее связь между дифференциальным и интегральными коэффициентами диффузионной проницаемости [14]

$$P^* = P\beta = \beta b l C^{\beta-1}, \quad (8)$$

и условие непрерывности концентрации виртуального раствора на границе между слоями, авторы работы [12] получили аналитическое решение интегральных уравнений (3)–(6) в виде (9)–(12):

$$j' = b_2 (C_2^{\beta_2} - C_0'^{\beta_2}), \quad (9)$$

$$j' = b_1 (C_0'^{\beta_1} - C_1^{\beta_1}), \quad (10)$$

$$j'' = b_1 (C_2^{\beta_1} - C_0''^{\beta_1}), \quad (11)$$

$$j'' = b_2 (C_0''^{\beta_2} - C_1^{\beta_2}). \quad (12)$$

В условиях стационарного диффузионного переноса плотность потока электролита через мембрану и плотности потоков, проходящие через ее отдельные слои, равны при фиксированном положении мембраны относительно потока. Поэтому данный подход позволяет рассчитать концентрацию на внутренней границе слоев, зная концентрацию электролита по обе стороны от мембраны и параметры  $b_i$  и  $\beta_i$  для каждого ее слоя. При решении подбирается такое значение концентрации раствора на границе слоев  $C_0$ , при котором потоки через отдельные слои одинаковы.

Следует отметить, что в уравнениях (9)–(12) толщины слоев  $l_1$  и  $l_2$  не содержатся в явном виде. Их влияние учитывается косвенно при расчете дифференциального коэффициента диффузионной проницаемости по уравнению (8) на основании экспериментальных данных о диффузии электролита через мембрану в воду.

На рис. 2а представлены концентрационные зависимости плотности диффузионного потока HCl через мембраны МФ-4СК различной толщины. Видно что, величина плотности потока обратно пропорциональна толщине мембраны. Подобный эффект ранее отмечался авторами [15] при теоретическом анализе диффузионной проницаемости мембран для электролитов различной природы. На рис. 2б эти же концентрационные зависимости представлены в билогарифмических координатах, что позволяет оценить значения параметров  $b$  и  $\beta$  согласно уравнению (1). Как следует из уравнений прямых, приведенных на рис. 2б, значения параметра  $\beta$  имеют близкие величины, в то время как значения параметра  $b$  различаются примерно в 1.5 раза и составляют  $2.26 \times 10^{-9}$  и  $3.77 \times 10^{-9}$  моль  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  для образцов толщиной 0.226 и 0.145 мм соответственно.

В данной работе мы предположили, что величина параметра  $b$  зависит от толщины мембраны согласно формуле

$$b = d/l, \quad (13)$$

где  $d$  – эмпирический коэффициент, который по физическому смыслу соответствует плотности диффузионного потока через мембрану единичной толщины при единичной концентрации и характеризует свойства материала. Оценка значений  $d$  для образцов, представленных на рис. 2, показала, что они близки и составляют 5.4 и 5.1 моль  $\text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$  для образцов толщиной 0.226 и 0.145 мм, что подтверждает сделанное предположение.

Подстановка уравнения (13) в (8) и замена  $l_1$  и  $l_2$  на  $(1-q)l$  и  $ql$ , где  $q$  – параметр, характеризующий долю толщины модифицированного слоя от общей толщины мембраны  $l$ , приводит к выражениям вида

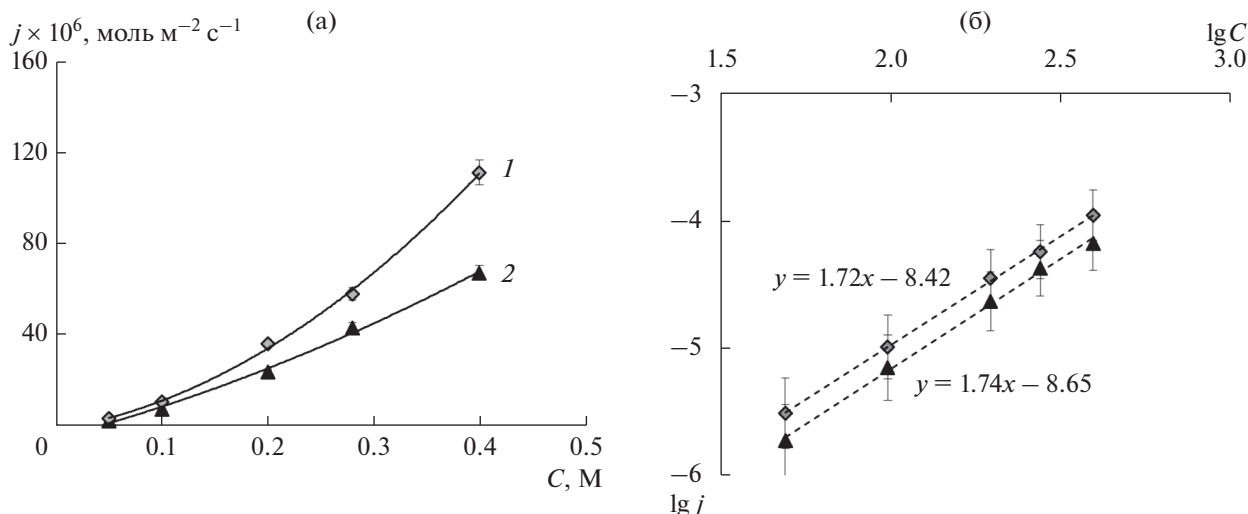


Рис. 2. Концентрационные зависимости плотности диффузионного потока раствора HCl через мембрану МФ-4СК толщиной 0.145 (1) и 0.226 мм (2) в прямых (а) и билогарифмических координатах (б).

$$j' = \frac{d_2}{ql} (C_2^{\beta_2} - C_0^{\beta_2}), \quad (14)$$

$$j' = \frac{d_1}{(1-q)l} (C_0^{\beta_1} - C_1^{\beta_1}), \quad (15)$$

$$j'' = \frac{d_1}{(1-q)l} (C_2^{\beta_1} - C_0^{\beta_1}), \quad (16)$$

$$j'' = \frac{d_2}{ql} (C_0^{\beta_2} - C_1^{\beta_2}). \quad (17)$$

В этом случае при расчете плотности диффузионного потока через бислойную мембрану в качестве подгоночного параметра выступает не только концентрация виртуального раствора на границе слоев мембраны, но и доля модифицированного слоя. При диффузии электролита в воду ( $C_2 = 0$ ) уравнения (14) и (16) упрощаются и принимают вид

$$j' = -\frac{d_2}{ql} C_0^{\beta_2}, \quad (18)$$

$$j'' = -\frac{d_1}{(1-q)l} C_0^{\beta_1}. \quad (19)$$

Таким образом, развитый модельный подход позволяет не только рассчитать величину плотности диффузионного потока через бислойную мембрану и найти концентрацию виртуального раствора на внутренней границе  $C_0$ , но и определить толщины отдельных слоев.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки предложенного подхода в качестве объекта исследования была использована перфто-

рированная мембрана МФ-4СК (ОАО “Пластполимер”, Санкт-Петербург), модифицированная полианилином (ПАНИ). Синтез ПАНИ проводили на одной поверхности мембраны (образец МФ-4СК/ПАНИ-1) методом последовательной диффузии концентрированных растворов мономера (солянокислого анилина) и окислителя (персульфата аммония) через мембрану в воду [16]. Время синтеза составляло 25 мин. Для того, чтобы получить образец, диффузионные характеристики которого такие же, как у модифицированного слоя, был получен объемно-модифицированный образец МФ-4СК/ПАНИ-О в результате синтеза ПАНИ в тех же условиях на обеих сторонах мембраны МФ-4СК.

Для получения бислойных мембран с разной толщиной модифицированного слоя, использовали более разбавленные рабочие растворы мономера и окислителя, а время модифицирования варьировали от 1 до 3 ч [5]. В результате была получена серия образцов МФ-4СК/ПАНИ-II-x, где x – продолжительность модифицирования в часах. После модифицирования мембраны отмывали водой и приводили в равновесие с раствором электролита заданной концентрации.

Диффузионную проницаемость образцов изучали в растворах хлоридов натрия и соляной кислоты при диффузии электролита заданной концентрации через мембрану в воду. За нарастанием концентрации диффундирующего электролита следили кондуктометрическим методом. Диффузионную проницаемость анизотропных мембран измеряли при их различной ориентации по отношению к потоку электролита.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе экспериментально полученных концентрационных зависимостей плотности диффузионного потока электролита через мембрану в воду по уравнению

$$P = \frac{j l}{C} \quad (20)$$

были рассчитаны интегральные коэффициенты диффузионной проницаемости исходной мембраны МФ-4СК и композитов МФ-4СК/ПАНИ-I и МФ-4СК/ПАНИ-О, которые представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, модифицирование перфторированной мембраны с помощью ПАНИ ведет к существенному уменьшению ее диффузионной проницаемости. При этом образец, модифицированный с двух сторон, имеет наименьшую диффузионную проницаемость, т.е. модификатор ухудшает диффузионные характеристики мембраны МФ-4СК, что согласуется с результатами, полученными ранее [5, 6]. Эффект асимметрии диффузионных свойств композитов МФ-4СК/ПАНИ-I не превышает 10% в исследованном диапазоне концентраций растворов электролита.

Полученные концентрационные зависимости диффузионного потока для исходной и объемно (с двух сторон) модифицированной мембран были обработаны согласно уравнению (1) в координатах  $\lg j - \lg C$  ( $j$ , моль  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ;  $C$ , моль  $\text{м}^{-3}$ ). Это позволило определить значения  $\beta_i$  и  $d_i$  для каждого из слоев, представленные в табл. 1.

Полученные значения параметров  $\beta_i$  и  $d_i$  были использованы для расчета диффузионного потока NaCl через мембрану МФ-4СК/ПАНИ-I в воду по модели, разработанной авторами [12], без учета толщин слоев в этом образце. Результаты расчета представлены на рис. 4. Видно что, рассчитанная кривая (сплошная линия) существенно отличается от экспериментальных данных (точки). Аналогичные результаты были получены авторами [12] при описании диффузионного поведения анизотропных ионообменных мембран, поверхность которых насыщена крупными органическими ионами. Таким образом, данный подход недостаточно точно описывает диффузионную проницаемость не только мембран, насыщенных крупными органическими ионами, но и модифицированных ПАНИ.

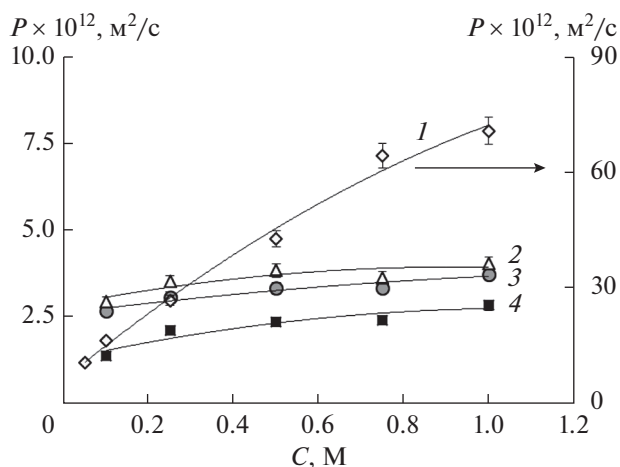


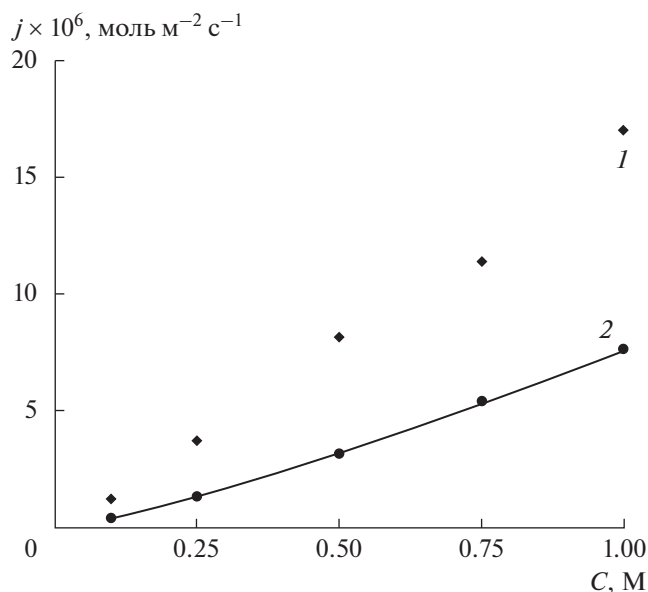
Рис. 3. Концентрационные зависимости диффузионной проницаемости мембран в растворах NaCl: 1 — МФ-4СК, 2, 3 — мембрана МФ-4СК/ПАНИ-I, обращенная к потоку электролита немодифицированной и модифицированной поверхностью, 4 — композит МФ-4СК/ПАНИ-О.

Для исследованных мембран выполнен расчет по предложенной модели по уравнениям (15), (17)–(19) которая учитывает не только концентрацию виртуального раствора на внутренней границе между слоями, но и соотношение толщин слоев. На рис. 5 представлены концентрационные зависимости плотности диффузионного потока, рассчитанные с учетом разной толщины слоев. На данном рисунке образцам исходной МФ-4СК и МФ-4СК/ПАНИ-О соответствуют значения  $q$ , равные 0 и 1. Видно, что диффузионный поток существенно зависит от доли модифицированного слоя в общей толщине мембраны. Экспериментальные значения плотности диффузионного потока для образца МФ-4СК/ПАНИ-I находятся между расчетными кривыми, соответствующими долям модифицированного слоя, равным 0.25 и 0.5, и доля модифицированного слоя составила 0.45 от толщины мембраны. При изменении ориентации образца по отношению к потоку электролита толщина модифицированного слоя колеблется в пределах 10%, что сопоставимо с экспериментальной погрешностью.

В работе [17] исследованы оптические изображения срезов композитных мембран, полученных в условиях, идентичных условиям модифи-

Таблица 1. Модельные параметры каждого слоя бислойной мембраны

Мембрана	NaCl		HCl	
	$\beta$	$d \times 10^{13}$ , моль $\text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$	$\beta$	$d \times 10^{12}$ , моль $\text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$
МФ-4СК	1.65	7.88	1.40	12.9
МФ-4СК/ПАНИ-О	1.28	2.44	1.27	4.07

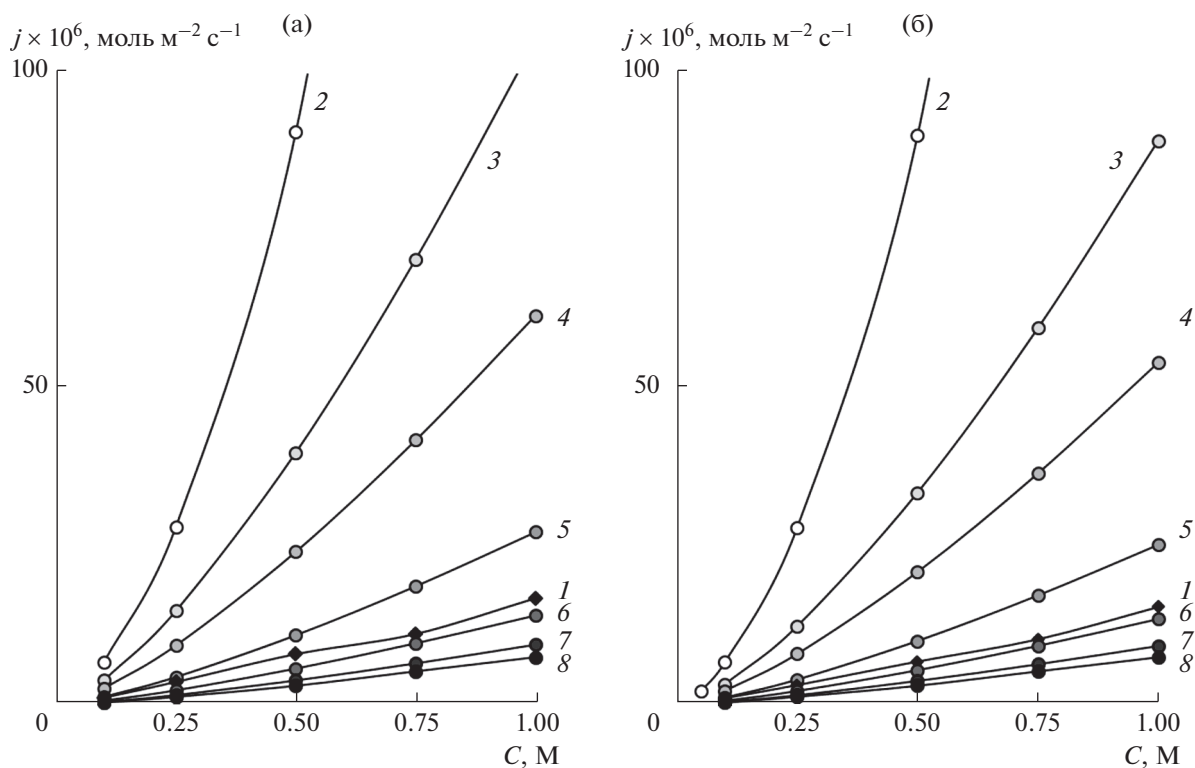


**Рис. 4.** Экспериментальные (точки) концентрационные зависимости плотности диффузионного потока NaCl через мембраны МФ-4СК/ПАНИ-I (1) и МФ-4СК/ПАНИ-O (2) и результат расчета по уравнениям (9)–(12) для образца МФ-4СК/ПАНИ-I (сплошная линия).

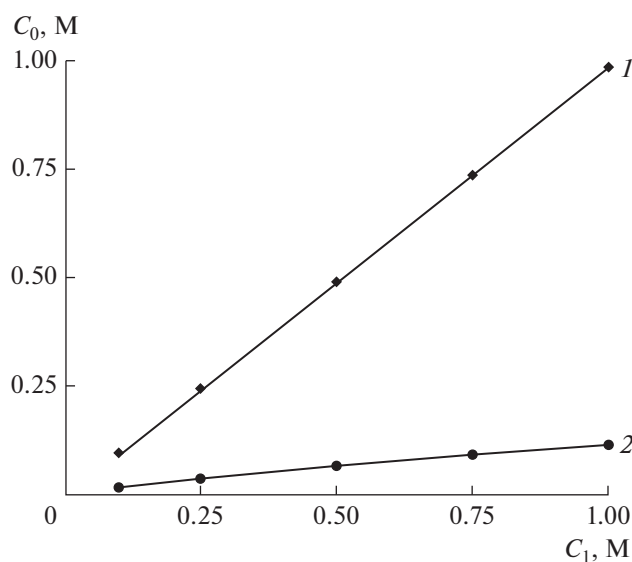
цирования образца МФ-4СК/ПАНИ-I, и показано, что толщина модифицированного слоя составляет 30–65% и определяется влагосодержанием мембраны. Таким образом, показано, что расчет по предлагаемой модели позволяет адекватно оценить толщину модифицированного слоя.

На рис. 6 представлены данные о концентрации виртуального раствора на внутренней границе между слоями при различной ориентации мембраны МФ-4СК/ПАНИ-I к потоку электролита при  $q = 0.45$ . Видно, что в полном согласии со сделанным предположением модифицированный слой оказывает сильное подавляющее действие на диффузионный перенос через бислойную мембрану и концентрация виртуального раствора всегда ниже в случае ориентации мембраны модифицированным слоем к потоку электролита по сравнению с обратной ориентацией независимо от концентрации диффундирующего электролита.

Для проверки предложенного подхода была выполнена оценка толщины слоев для серии перфторированных мембран МФ-4СК/ПАНИ-II-x, модифицированных ПАНИ в течение 1, 2 и 3 ч. Данные по диффузионной проницаемости указанной серии мембран в растворах HCl приведе-



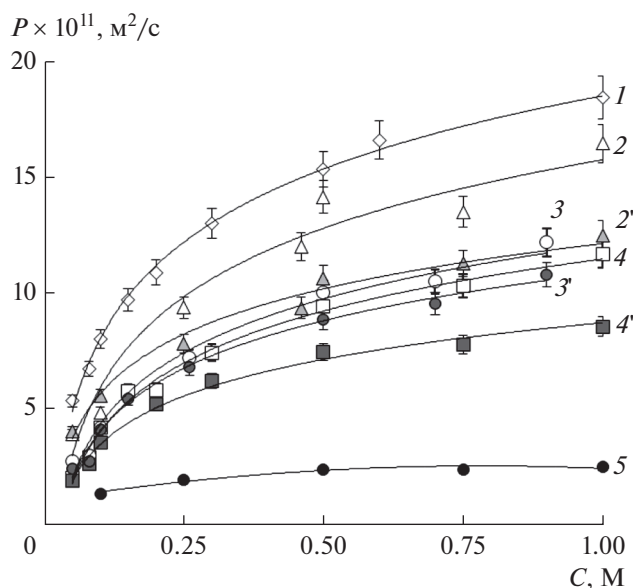
**Рис. 5.** Концентрационные зависимости диффузионного потока NaCl при ориентации мембраны МФ-4СК/ПАНИ-I модифицированной (а) и немодифицированной (б) поверхностью к потоку, полученные в эксперименте (1) и рассчитанные при разной доле модифицированного слоя от толщины мембраны: 0 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.25 (5), 0.5 (6), 0.75 (7), 1 (8).



**Рис. 6.** Зависимость концентрации виртуального раствора ( $C_0$ ) от концентрации диффундирующего электролита ( $C_1$ ) для исследуемой мембраны МФ-4СК/ПАНИ-1 ( $q = 0.45$ ) при ее ориентации немодифицированным (1) и модифицированным (2) слоем к потоку NaCl.

ны на рис. 7. Для расчета использовали параметры  $\beta_i$  и  $d_i$  для мембран МФ-4СК и МФ-4СК/ПАНИ-О, рассчитанные на основании концентрационных зависимостей диффузионного потока в растворах HCl, также представленных на рис. 7. Рассчитанные значения параметров приведены в табл. 1. Увеличение времени полимеризации должно приводить к возрастанию толщины модифицированного слоя и, как следствие, к снижению диффузионной проницаемости. Данная закономерность выполняется для образцов, модифицированных в течение 1 и 2 ч.

При увеличении времени модифицирования до 3 ч диффузионная проницаемость возрастает, как и электроосмотическая проницаемость [5], что обусловлено расклинивающим действием ПАНИ на кластерную структуру перфторирован-



**Рис. 7.** Концентрационные зависимости диффузионной проницаемости исходной (1) и модифицированных мембран МФ-4СК/ПАНИ-II-1 (3, 3'), МФ-4СК/ПАНИ-II-2 (4, 4'), МФ-4СК/ПАНИ-II-3 (2, 2') и МФ-4СК/ПАНИ-О (5) в растворах HCl при ориентации немодифицированным (2–4) и модифицированным (2'–4') слоем к потоку электролита.

ной мембраны и связано с изменением морфологии модифицированного слоя.

Результаты оценки толщины слоев при различной ориентации мембраны, выполненные разработанным нами способом с учетом толщин слоев анизотропной мембраны, представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что для всех композитных образцов доля толщины модифицированного слоя при различной ориентации мембраны к потоку электролита совпадает в пределах 20%-ной погрешности. Это указывает на возможность использования модельных параметров композитной мембраны МФ-4СК/ПАНИ-1 при анализе свойств бислойных мембран МФ-4СК/ПАНИ-II, полученных в других условиях модифицирова-

**Таблица 2.** Результаты оценки доли модифицированного слоя в бислойных мембранах

Бислойная мембрана	Модифицированный слой обращен к потоку электролита	Немодифицированный слой обращен к потоку электролита	Данные оптической микроскопии [5, 18]	Модель бислойной тонкопористой мембраны [5]
	доля модифицированного слоя в мембране $q$			
МФ-4СК/ПАНИ-II-1	0.07	0.08	0.10	0.38
МФ-4СК/ПАНИ-II-2	0.10	0.11	0.16	0.79
МФ-4СК/ПАНИ-II-3	0.07	0.05	0.35	0.95

ния. Для композитов МФ-4СК/ПАНИ-II-1 и МФ-4СК/ПАНИ-II-2 толщины слоев хорошо согласуются с результатами оценки толщины модифицированного слоя на основании изучения оптических изображений срезов композитных мембран и в рамках модели бислойной тонкопоровистой мембраны [5], приведенными в табл. 2. По результатам расчета по уравнениям (15), (17)–(19) для образца МФ-4СК/ПАНИ-II-3 наблюдается уменьшение толщины слоя, в то время как по данным оптической микроскопии она увеличивается. Такое расхождение между экспериментом и расчетом обусловлено изменением свойств слоев, связанным, в том числе, с прорастанием цепей ПАНИ через мембрану, что ограничивает использование характеристик мембран МФ-4СК и МФ-4СК/ПАНИ-О для описания свойств образца МФ-4СК/ПАНИ-II-3.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит модельный подход к описанию диффузионной проницаемости бислойных ионообменных мембран, учитывающий не только свойства отдельных слоев и концентрацию виртуального раствора на границе между слоями, но и их толщину. Верификация предложенного подхода проведена на примере перфторированной мембраны МФ-4СК, модифицированной полианилином. Показано удовлетворительное совпадение толщины модифицированного слоя, рассчитанной по предложенной модели и найденной из результатов изучения срезов мембран оптическим методом. Установлена корреляция между толщиной модифицированного слоя и временем синтеза ПАНИ в мембране. Показана адекватность применения данной модели для описания диффузионной проницаемости перфторированных мембран, модифицированных ПАНИ в различных условиях.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-20069).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Loza S.A., Zabolotsky V.I., Loza N.V., Fomenko M.A.* // *Petroleum Chem.* 2016. V. 56. P. 1027.
2. *Melnikov S.S., Sheldeshov N.V., Zabolotskii V.I.* // *Desalination. Water Treat.* 2018. V. 123. P. 1.
3. *Zabolotskii V., Sheldeshov N., Melnikov S.* // *J. Appl. Electrochem.* 2013. V. 43. P. 1117.
4. *Zhao Y., Tang K., Liu H., Van der Bruggen B., Sotto Díaz A., Shen J., Gao C.* // *J. Membr. Sci.* 2016. V. 520. P. 262.
5. *Березина Н.П., Кононенко Н.А., Филиппов А.Н., Шкирская С.А., Фалина И.В., Сычева А.А.-Р.* // *Электрохимия.* 2010. Т. 46. С. 515.
6. *Kononenko N.A., Loza N.V., Shkirskaya S.A., Falina I.V., Khanukaeva D.Yu.* // *J. Solid State Electrochem.* 2015. V. 19. P. 2623.
7. *Протасов К.В., Шкирская С.А., Березина Н.П., Заболоцкий В.И.* // *Электрохимия.* 2010. Т. 46. С. 1209.
8. *Moshtari K. S., Oppers N.A.W., de Groot M.T., Keurentjes J.T.F., Schouten J.C., van der Schaaf J.* // *J. Appl. Electrochem.* 2017. V. 47. P. 213.
9. *Lebedev K., Ramirez P., Mafe S., Pellicer J.* // *Langmuir.* 2000. V. 16. P. 9941.
10. *Nikonenko V.V., Zabolotskii V.V., Lebedev K.A.* // *Russ. J. Electrochem.* 1996. V. 32. P. 234.
11. *Filippov A.N., Starov V.M., Kononenko N.A., Berezhina N.P.* // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2008. V. 139. P. 29.
12. *Кононенко Н.А., Гнусин Н.П., Березина Н.П., Паршиков С.Б.* // *Электрохимия.* 2002. Т. 38. С. 930.
13. *Гнусин Н.П., Березина Н.П., Шудренко А.А., Ивина О.П.* // *Журн. физ. химии.* 1994. Т. 68. С. 565.
14. *Демина О.А., Кононенко Н.А., Фалина И.В., Демин А.В.* // *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. С. 259.
15. *Филиппов А.Н., Кононенко Н.А., Демина О.А.* // *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. С. 509.
16. *Шкирская С.А., Сычева А.А.-Р., Березина Н.П., Тимофеев С.В., Криштопа М.В.* Пат. 2411070 РФ. 2009.
17. *Березина Н.П., Шкирская С.А., Колечко М.В., Попова О.В., Сенчихин И.Н., Ролдугин В.И.* // *Электрохимия.* 2011. Т. 47. С. 1066.
18. *Шкирская С.А.* Электрокинетические свойства и морфология нанокompозитных материалов на основе сульфокатионитовых мембран и полианилина // Автореферат дис. ... канд. хим. наук. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2008.