



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 66.081.6:544.725

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10607

Влияние содержания ионообменной смолы на электротранспортные характеристики гетерогенных мембран

**Екатерина Евгеньевна Мещерякова¹, Марина Александровна Бровкина¹,
Ирина Владимировна Фалина^{1✉}, Вера Ивановна Васильева²,
Эльмара Маликовна Акберова²**

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, irina_falina@mail.ru✉

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Целью работы являлось исследование влияния содержания ионообменной смолы в гетерогенных мембранах на их электропроводность, а также оценка селективности мембран на основе анализа транспортно-структурных параметров расширенной трехпроводной модели проводимости.

В работе изучены проводящие характеристики серии экспериментальных гетерогенных катионо- и анионообменных мембран с различным содержанием ионообменной смолы. Мембраны изготовлены на основе функционализированной полистирольной ионообменной смолы, инертного связующего полиэтилена и армирующей сетки из полиэстера. В качестве фиксированных групп катионообменные мембраны содержали сульфокислотные, анионообменные мембраны – четвертичные аммониевые основания. Физико-химические свойства исследуемых образцов мембран определяли согласно стандартным методам испытаний ионообменных мембран. Удельную электропроводность мембран определяли по данным об их сопротивлении, измеренном ртутно-контактным методом. На основании концентрационных зависимостей удельной электропроводности мембран в растворах хлорида натрия рассчитаны транспортно-структурные и геометрические параметры расширенной трехпроводной модели проводимости.

Показано определяющее влияние соотношения ионообменника и инертного связующего на пути протекания тока в мембране, а также на ее селективность. Установлено, что электропроводность мембран увеличивается с ростом концентрации раствора и содержания ионообменной смолы в мембранах. Из анализа транспортно-структурных параметров выявлены закономерности влияния доли ионообменника на структурную организацию мембран. Для катионообменных мембран зависимость модельных параметров от содержания смолы имеет ступенчатый характер в области массовой доли ионообменника 55%. Анализ изменения структурных параметров показал, что свободный раствор находится как в порах и дефектах структуры, так и в частицах ионообменной смолы. Установлено, что селективность анионообменных мембран в исследованном диапазоне содержания смолы имеет практически одинаковые величины.

С увеличением доли ионообменника растет доля свободного раствора, который распределен внутри частиц ионообменной смолы. Однако, этот факт не оказывает существенного влияния на селективность образцов, и истинные числа переноса противоионов в ионообменных мембранах, рассчитанные из модельных параметров, также возрастают с увеличением доли ионообменника.

Ключевые слова: ионообменная мембрана, массовая доля ионообменной смолы, электропроводность, расширенная трехпроводная модель проводимости, селективность.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00397, <https://rscf.ru/project/21-19-00397/>

Для цитирования: Мещерякова Е.Е., Бровкина М.А., Фалина И.В., Васильева В.И., Акберова Э.М. Влияние содержания ионообменной смолы на электротранспортные характеристики гетерогенных мембран // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 4. С. 523-533.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10607>



Original article

The effect of the concentration of ion-exchange resin on the electrotransport properties of heterogeneous membranes

Ekaterina E. Meshcheryakova¹, Marina A. Brovkina¹, Irina V. Falina¹✉,
Vera I. Vasil'eva², Elmara M. Akberova²

¹Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, irina_falina@mail.ru✉

²Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Abstract. The purpose of our study was to investigate the effect of the concentration of ion-exchange resin in heterogeneous membranes on their electrical conductivity and to assess the selectivity of the membranes based on the analysis of transport and structural parameters of an extended three-wire conductivity model.

The article focuses on the conductivity of a range of experimental cation and anion exchange membranes with various concentrations of ion-exchange resin. The membranes were produced based on a functionalised polystyrene ion-exchange resin, an inert polyethylene binder, and a reinforcing polyester grid. The fixed groups in cation exchange membranes were sulphonic acid bases and in anion exchange membranes - quaternary ammonium bases. Physico-chemical properties of the studied samples of membranes were determined using standard testing methods for ion exchange membranes. The specific conductivity of the membranes was determined based on their resistivity measured using a mercury probe. The concentration dependences of the specific electrical conductivity of the membranes in sodium chloride solutions were used to calculate the transport, structural, and geometric parameters of the extended three-wire conductivity model.

The study determined that the ratio of the ion exchanger and the inert binder has a decisive influence on the current flow in the membrane and its selectivity. It was also determined that the electrical conductivity of the membranes increases with an increase of the concentration of the solution and the concentration of ion-exchange resin in the membranes. The analysis of the transport and structural parameters revealed dependences between the concentration of the ion exchanger and the structure of the membranes. The dependence of model parameters on the concentration of the resin in cation exchange membranes is stepwise in the region of the mass fraction of the ion exchanger of 55%. The analysis of the changes in the structural parameters demonstrated that there is free solution both in the pores and the defects of the structure, as well as in the particles of ion-exchange resin. The selectivity of anion exchange membranes in the studied range of concentrations of the resin remains practically the same.

An increase in the portion of the ion exchanger results in an increase in the portion of the free solution which is distributed in the particles of the ion-exchange resin. However, it does not have any significant effect on the selectivity of the samples. The actual transport number of counterions in ion exchange membranes calculated based on the model parameters also increases with an increase in the portion of the ion exchanger.

Keywords: ion exchange membrane, mass fraction of ion-exchange resin, electrical conductivity, extended three-wire conductivity model, selectivity.

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-19-00397, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00397/>

For citation: Meshcheryakova E.E., Brovkina M.A., Falina I.V., Vasil'eva V.I., Akberova E.M. The effect of the concentration of ion-exchange resin on the electrotransport properties of heterogeneous membranes. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(4): 523-533. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10607>

Введение

На сегодняшний день электромембранные технологии находят широкое применение как в очистке промышленных стоков для возврата ценных компонентов в производственный цикл, так и в получении пресной и сверхчистой воды. Исходя из этого, создание и модификация

мембранных материалов является актуальной проблемой. Например, ведутся исследования по профилированию поверхности [1] и уменьшению толщины [2] гетерогенных мембран с целью снижения энергозатрат на переработку растворов, а также уменьшения расхода полимера, и, как следствие, экологической нагрузки на окружающую среду. Однако



при этом может происходить ухудшение механических характеристик мембран, что сказывается на их эксплуатационных свойствах.

Путем варьирования объемного соотношения ионообменная смола/инертное связующее можно достичь компромисса между электрохимическими и механическими свойствами для получения гетерогенной мембраны с улучшенными свойствами. Кроме того, усиление электрической неоднородности поверхности мембраны вследствие изменения соотношения проводящей и инертной фаз может положительно сказываться на развитии электроконвекции [3], что является полезным при проведении электродиализа в интенсивных токовых режимах.

В работах [4, 5] показано влияние содержания ионообменной смолы на физико-химические и транспортные характеристики катионо- и анионообменных мембран на основе поливинилхлорида (ПВХ) в качестве связующего материала. Для анионообменных мембран одинаковой толщины 0.2 мм с увеличением доли смолы от 40 до 70% обменная емкость увеличивается в 1.9 раз, а влагосодержание – на 67%. В результате установлено значительное снижение сопротивления мембран и рост чисел переноса противоионов. Увеличение содержания смолы приводит к большему количеству проводящих участков и более высокой проводимости мембраны и, следовательно, снижает сопротивление мембраны. При низкой доле смолы, обуславливающей низкое значение полной обменной емкости и влагосодержания, ионообменные группы изолированы друг от друга в матрице мембраны. Следовательно, миграция ионов затруднена, поэтому сопротивление мембраны увеличивается. Данная тенденция установлена также и для катионообменных мембран на основе ПВХ [5, 6].

Авторы [7] показали, что увеличение содержания ионообменника от 33 до 80% в сульфокатионообменных мембранах на

основе полиэтилена в качестве инертного связующего приводит к росту удельной электропроводности в 60 и 77 раз в 0.1 М и 1.0 М растворах хлорида натрия, соответственно. Было выдвинуто предположение, что увеличение проводимости может быть связано с увеличением объема электролита в «междоузлиях» мембран. В работе [8] при разделении фенилаланина и хлорида натрия методом электродиализа установлено, что изменение содержания сульфокатионообменника в мембране от 45 до 70% позволяет увеличить скорость массопереноса минерального иона в полтора раза.

Однако изменение любой промышленной технологии требует предварительного изучения характеристик экспериментальных образцов мембран в лабораторных условиях, важнейшими из которых являются удельная электропроводность и селективность по отношению к переносу противоионов. Ранее в работе [9] показано, что увеличение доли инертного полимера в гетерогенной катионообменной мембране и введение полимерной сетки в перфторированные мембраны приводит к реорганизации путей протекания тока.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния содержания ионообменной смолы в гетерогенных мембранах на их электропроводность, а также оценка селективности мембран на основе анализа транспортно-структурных параметров расширенной трехпроводной модели проводимости.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использована серия экспериментальных гетерогенных катионо- и анионообменных мембран с различным содержанием ионообменной смолы. Перечень объектов исследования представлен в таблице 1. Все исследуемые гетерогенные мембраны были изготовлены горячим вальцеванием термопластичной смеси, состоящей из

Таблица 1. Основные физико-химические характеристики экспериментальных ионообменных мембран с разным содержанием ионообменной смолы

Table 1. Main physico-chemical properties of the experimental ion exchange membranes with various concentrations of ion-exchange resin

№	Массовая доля ионообменной смолы, %	Q , ммоль/Г _{наб.мемб}	W , %	ρ , г/см ³	d , мкм
Катионообменные мембраны					
1	45	1.81±0.06	29±2	1.10±0.08	518±6
2	50	1.89±0.07	33±3	1.12±0.09	548±6
3	55	1.93±0.07	36±1	1.14±0.08	581±5
4	60	2.07±0.05	39±3	1.15±0.08	602±6
5	65	2.16±0.05	42±1	1.16±0.06	654±7
6	70	2.24±0.05	45±1	1.18±0.09	714±7
Анионообменные мембраны					
7	45	0.78±0.02	27±2	1.03±0.07	560±10
8	50	0.81±0.04	30±2	1.08±0.06	530±20
9	60	0.92±0.02	34±3	1.08±0.09	590±20

мелкодисперсного порошка ионообменника и инертного связующего линейного полиэтилена низкой плотности. Ионообменники, используемые при производстве мембран, относятся к полимерам, полученным сополимеризацией полистирола с дивинилбензолом. По типу ионенных групп исследуемые мембраны являются сильнокислотными катионообменными с фиксированными группами сульфоновой кислоты и сильноосновными анионообменными с четвертичными аминогруппами. Мембраны армированы тканью Ulester (100% полиэстер). Диапазон содержания ионообменной смолы в мембранах составлял от 45 до 70% для катионообменных мембран и от 45 до 60% для анионообменных. Используемый диапазон содержания ионообменной смолы в мембранах обусловлен, с одной стороны, потерей ими транспортных свойств при увеличении доли инертного связующего, а с другой стороны – потерей механической прочности при возрастании доли ионита. Выбранный диапазон соотношений ионообменной смолы и инертного связующего в мембране перекрывает оптимальное сочетание электротранспортных свойств и состава гетерогенных мембран [10]. Перед

исследованием все образцы подвергались солевой подготовке.

Удельную электропроводность мембран определяли по данным об их сопротивлении, измеренном ртутно-контактным методом [11]. Сопротивление определялось как активная часть импеданса ячейки с мембраной при частоте переменного тока, при которой достигается равенство нулю реактивной части импеданса. Измерения проводились в изотермических условиях при 25°C. Погрешность измерений сопротивления не превышала 5%.

Физико-химические свойства исследуемых образцов мембран (табл. 1) определяли согласно стандартным методам испытаний ионообменных мембран [11]. Влагосодержание W мембран определяли методом воздушно-тепловой сушки, толщину d контролировали микрометром с точностью до 1 мкм, плотность ρ измеряли пикнометрическим методом. Полную обменную емкость мембран Q оценивали в статических условиях методом кислотно-основного титрования.

Расширенная трехпроводная модель проводимости. Для параметризации исследуемых мембранных материалов использована расширенная трехпроводная модель. Модель позволяет на основе

только концентрационной зависимости электропроводности ионообменного материала одновременно находить структурные и геометрические параметры, такие как объемные доли проводящих фаз геля и межгелевого раствора, а также доли тока, протекающего через различные фрагменты ионообменного материала. Данный подход базируется на использовании микрогетерогенной модели и теории обобщенной проводимости структурно неоднородных сред. Согласно микрогетерогенной модели, все элементы ионообменной мембраны группируются в две псевдофазы с разным типом проводимости: гелевую фазу и фазу межгелевого раствора. В объединенной гелевой фазе, в состав которой условно включены все компоненты ионообменного материала за исключением равновесного раствора, перенос тока осуществляется только противоионами. В межгелевых промежутках, заполненных раствором, свойства которого идентичны свойствам равновесного раствора, ток переносят как катионы, так и анионы [12]. В рамках теории обобщенной проводимости для описания процессов в такой двухфазной системе получено выражение для электропроводности мембраны:

$$\kappa_m = [f_1 \kappa_{iso}^\alpha + f_2 \kappa_{sol}^\alpha]^{1/\alpha}, \quad (1)$$

где f_1, f_2 – объемные доли геля и раствора, $f_1 + f_2 = 1$; α – структурный параметр, отражающий взаимное расположение проводящих фаз в мембране: $\alpha = 1$ соответствует параллельному расположению фаз

относительно транспортной оси, а $\alpha = -1$ – последовательному; $\kappa_m, \kappa_{iso}, \kappa_{sol}$ – электропроводность мембраны, ее гелевых участков и межгелевых промежутков, соответственно.

Согласно расширенной трехпроводной модели [13], ток через ионообменный материал протекает по трем параллельным каналам (рис. 1): последовательно через ионит и раствор (1), только через ионит (2) и только через раствор (3). Уравнения расширенной трехпроводной модели, связывающие структурные параметры двухфазной модели проводимости (f_1, α) и геометрические параметры (a, b, c, d, e), а также уравнение, описывающее электропроводность мембраны:

$$b = f_1^{1/\alpha}, \quad (2)$$

$$c = f_2^{1/\alpha}, \quad (3)$$

$$a = 1 - f_2^{1/\alpha} - f_1^{1/\alpha}, \quad (4)$$

$$d = 1 - (f - b)/a, \quad (5)$$

$$e = (f - b)/a, \quad (6)$$

$$\kappa_m = \frac{a\kappa_d}{e+d\kappa_d} + b\kappa_d + c, \quad (7)$$

где κ_m и κ_d – электропроводности мембраны и ее гелевой фазы, нормированные на электропроводность раствора: $\kappa_m = \kappa_m/\kappa_{sol}$, $\kappa_d = \kappa_{iso}/\kappa_{sol}$; a, b, c – геометрические параметры, характеризующие доли тока, проходящего через смешанный канал с последовательным чередованием фаз ионита и раствора, только через ионит и только через раствор ($a+b+c=1$); d, e – доли раствора и ионита в смешанном канале ($d+e=1$).

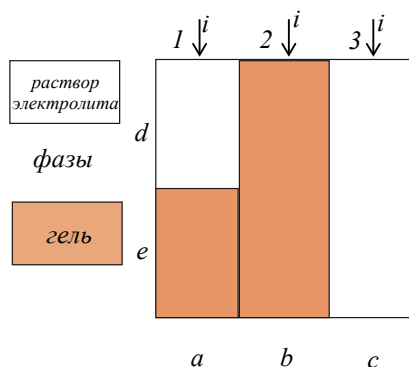


Рис. 1. Схема путей протекания тока в трехпроводной модели ионообменной мембраны
 Fig. 1. Current flows in the three-wire model of an ion exchange membrane

В предположении, что ток в каналах a и b переносится лишь противоионами, а в канале c – как противоио-, так и коионами, можно получить уравнение для расчета истинного числа переноса противоиона в мембране (\bar{t}_+), если известна доля тока, протекающего по каналу раствора (параметр c):

$$\bar{t}_+ = 1 - t_- \frac{c}{K_m}, \quad (8)$$

где t_- – число переноса коиона в растворе.

Обсуждение результатов

Физико-химические свойства мембран. Сравнение свойств экспериментальных мембран с разной массовой долей ионообменной смолы выявило влияние содержания ионообменника на их физико-химические свойства. Установлено, что с увеличением содержания сульфокатионообменной смолы от 45 до 70 масс.% полная обменная емкость набухших образцов катионообменных мембран изменилась на 24%. При этом выявлен рост влагосодержания и толщины мембран на 55 и 38%, соответственно. Сравнительный анализ физико-химических характеристик экспериментальных анионообменных мембран свидетельствует, что с увеличением массовой доли ионообменника от 45 до 60

масс.% обменная емкость растет на 18%, влагосодержание – на 26%.

Концентрационные зависимости удельной электропроводности мембран. Концентрационные зависимости удельной электропроводности исследуемой серии образцов мембран в растворе хлорида натрия представлены на рисунке 2. Проводимость как катионо-, так и анионообменных мембран увеличивается с ростом содержания ионообменной смолы в них. Однако, увеличение содержания катионообменной смолы в диапазоне от 65 до 70% не приводит к значимому увеличению удельной электропроводности, так как концентрационные зависимости удельной электропроводности для этих образцов совпадают в пределах погрешности эксперимента.

Результаты расчета параметров расширенной трехпроводной модели. На основе представленных на рисунке 2 концентрационных зависимостей удельной электропроводности мембран в растворах хлорида натрия были рассчитаны параметры расширенной трехпроводной модели проводимости с использованием программы [14]. Полученные значения параметров представлены на рисунке 3.

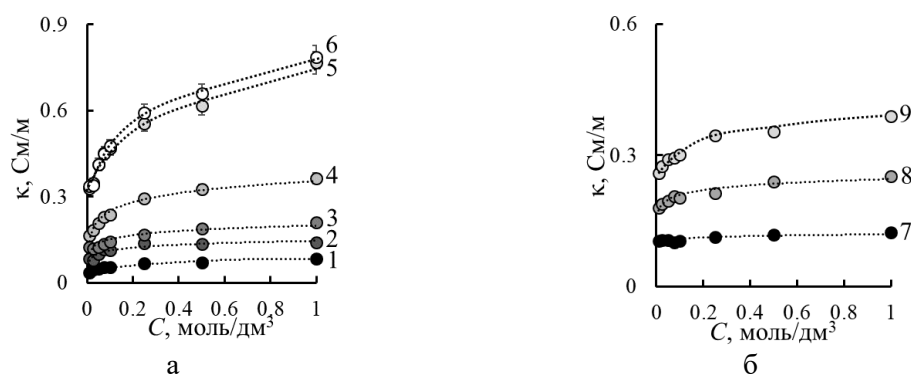


Рис. 2. Концентрационные зависимости удельной электропроводности катионообменных мембран (а) с содержанием смолы 1 – 45%, 2 – 50%, 3 – 55%, 4 – 60%, 5 – 65%, 6 – 70% и анионообменных мембран (б) с содержанием смолы 7 – 45%, 8 – 50%, 9 – 60% в растворах хлорида натрия

Fig. 2. Concentration dependences of the conductivity of cation exchange membranes (a) with resin fraction of 1 – 45%, 2 – 50%, 3 – 55%, 4 – 60%, 5 – 65%, 6 – 70% and anion exchange membranes (b) with resin fraction of 7 – 45%, 8 – 50%, 9 – 60% in sodium chloride solutions

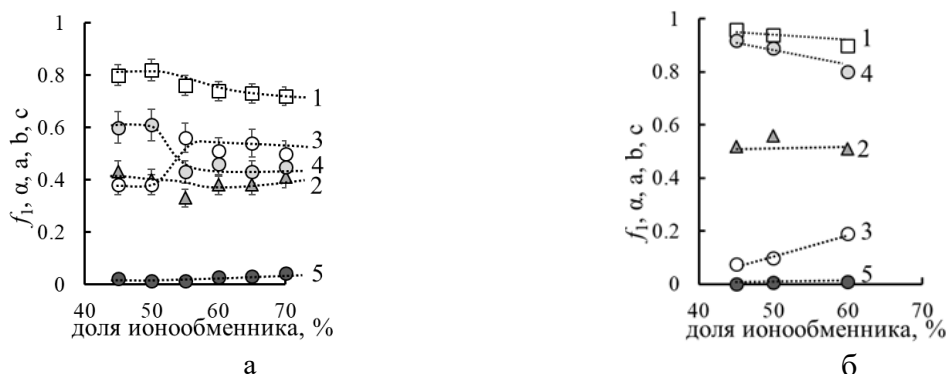


Рис. 3. Зависимости значений модельных параметров 1 – f_1 , 2 – α , 3 – a , 4 – b , 5 – c от массовой доли ионообменной смолы в катионообменных (а) и анионообменных (б) мембранах

Fig. 3. Dependences of the model parameters 1 – f_1 , 2 – α , 3 – a , 4 – b , 5 – c on the mass fraction of ion-exchange resin in cation (a) and anion (b) exchange membranes

Установлено, что с увеличением доли ионообменной смолы в мембране закономерно возрастает проводимость геля, которая равна электропроводности мембраны в точке изоэлектропроводности. Увеличение проводимости гелевой фазы обусловлено ростом доли ионообменника и величины полной обменной емкости, соответственно. При равном содержании ионообменника объемная доля свободного раствора (параметр $f_2=1-f_1$) в катионообменных мембранах существенно выше, чем в анионообменных. Кроме того, увеличение доли ионообменника в мембране приводит к уменьшению доли геля (параметр f_1) как в катионо-, так и анионообменных мембранах. Этот факт указывает на то, что свободный раствор находится не только в структурных дефектах на стыке ионообменной смолы и инертного связующего, но и в частицах смолы. Это сопровождается уменьшением доли тока, перенесенного по каналу геля (параметр b), и возрастанием как вклада переноса по смешанному каналу с последовательным чередованием геля и раствора (параметр a), так и по каналу переноса только по раствору (параметр c). Величина параметра α , характеризующего взаимное расположение проводящих фаз в мембране, практически не зависит от природы ионогенных групп и доли ионообменной смолы в мембране.

Среднее значение величины α составляет 0.4 для катионообменных и 0.5 для анионообменных мембран.

Необходимо отметить, что для серии катионообменных мембран зависимость модельных параметров от массовой доли ионообменной смолы имеет ступенчатый характер с резким изменением при достижении порогового значения 55 масс. %, а для анионообменных мембран наблюдается их монотонное изменение (рис. 3). Похожий эффект наблюдался авторами [9] при анализе влияния инертного компонента на значения модельных параметров для серии катионообменных мембран МК-40.

Для расчета истинных чисел переноса противоионов в мембране по формуле (8) использовали значения параметра c , отвечающего доле тока, переносимой по каналу раствора. Полученные концентрационные зависимости чисел переноса ионов представлены на рисунке 4. Установлено, что в исследованном диапазоне концентраций селективность катионообменных мембран существенно ниже по сравнению с анионообменными. Селективность катионообменных мембран зависит от содержания ионообменника в мембране и увеличивается с его ростом. Однако при концентрации раствора хлорида натрия 0.25 М для образцов катионообменных мембран с содержанием смолы 45-60

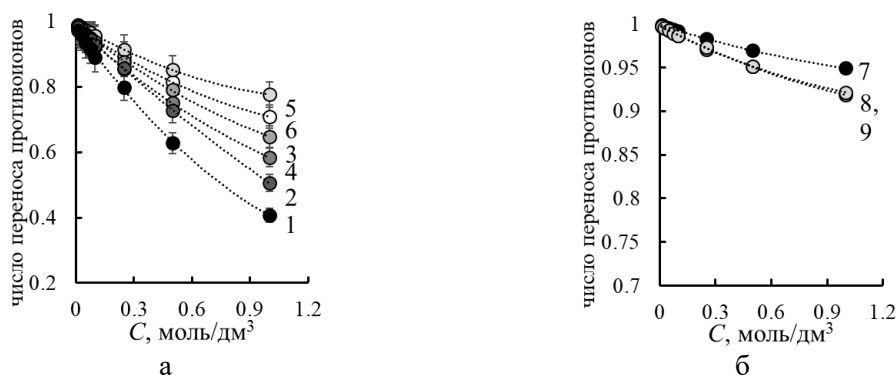


Рис. 4. Концентрационные зависимости чисел переноса противоионов в катионообменных мембранах (а) с содержанием смолы 1 – 45%, 2 – 50%, 3 – 55%, 4 – 60%, 5 – 65%, 6 – 70% и анионообменных мембранах (б) с содержанием смолы 7 – 45%, 8 – 50%, 9 – 60%

Fig. 4. Concentration dependences of the transport number of counterions in cation exchange membranes (a) with resin fraction of 1 – 45%, 2 – 50%, 3 – 55%, 4 – 60%, 5 – 65%, 6 – 70% and anion exchange membranes (b) with of resin fraction 7 – 45%, 8 – 50%, 9 – 60%

масс.% наблюдается существенное снижение селективности. Это связано с высокими значениями объемных долей внутреннего равновесного раствора, установленными для этой серии образцов. На основании полученных результатов можно заключить, что оптимальная величина объёмной доли внутреннего равновесного раствора не должна превышать 0.2. В то же время селективность анионообменных мембран практически не зависит от массовой доли ионообменной смолы и для всех исследованных образцов имеет близкие значения.

Заключение

В работе изучены электротранспортные свойства экспериментальной серии гетерогенных катионо- и анионообменных мембран с различным содержанием ионообменной смолы. Показано, что электропроводность мембран закономерно увеличивается с ростом концентрации раствора и содержания ионообменной смолы. На основании концентрационных зависимостей удельной электропроводности мембран рассчитаны параметры расширенной трехпроводной модели, характеризующие объемные доли геля и межгелевого раствора и пути переноса тока в мембране, а также электропроводность гелевой фазы. Из анализа

транспортно-структурных параметров выявлены закономерности влияния доли ионообменника на структурную организацию мембран. Для катионообменных мембран зависимость модельных параметров от содержания смолы имеет ступенчатый характер в области массовой доли ионообменника 55%. Характер изменения величин структурных параметров показал, что свободный раствор находится как в порах и дефектах структуры, так и в частицах ионообменной смолы. С увеличением доли ионообменника растет доля свободного раствора, который распределен внутри частиц ионообменной смолы. Однако, этот факт не оказывает существенного влияния на селективность образцов, и истинные числа переноса противоионов в катионообменных мембранах, рассчитанные из модельных параметров, также возрастают с увеличением доли ионообменника. Установлено, что селективность анионообменных мембран в исследованном диапазоне содержания смолы имеет практически одинаковые величины.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые



могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Vasil'eva V., Goleva E., Pismenskaya N., Kozmai A., Nikonenko V. Effect of surface profiling of a cation-exchange membrane on the phenylalanine and NaCl separation performances in diffusion dialysis // *Sep. Purif. Technol.* 2019. Vol. 210. pp. 48-59.

2. Kozaderova O.A., Kim K.B., Gadzhdiyeva Ch.S., Niftaliev S.I. Electrochemical characteristics of thin heterogeneous ion exchange membranes // *J. Membr. Sci.* 2020. Vol. 604. Art. No. 118081.

3. Небавская К.А., Бутыльский Д.Ю., Мороз И.А., Небавский А.В., Письменская Н.Д., Никоненко В.В. Увеличение массопереноса через гомогенную анионообменную мембрану в предельных и сверхпредельных токовых режимах путем экранирования части ее поверхности непроводящими полосами // *Мембраны и мембранные технологии.* 2018. Т. 8. № 4. С. 261-271.

4. Vyas P. V., Shah B.G., Trivedi G.S., Ray P., Adhikary S.K., Rangarajan R. Characterization of heterogeneous anion-exchange membrane // *J. Membr. Sci.* 2001. Vol. 187. pp. 39-46.

5. Vyas P.V., Ray P., Adhikary S.K., Shah B.G., Rangarajan R. Studies of the effect of variation of blend ratio on permselectivity and heterogeneity of ion-exchange membranes // *J. Colloid Interface Sci.* 2003. Vol. 257. pp. 127-134.

6. Khodabakhshi A.R., Madaeni S.S., Hosseini S.M. Comparative studies on morphological, electrochemical, and mechanical properties of s-polyvinyl chloride based heterogeneous cation-exchange membranes with different resin ratio loading // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010. Vol. 49. pp. 8477-8487.

7. Hale D.K., McCauley D.J. Structure and properties of heterogeneous cation-exchange membranes // *Transactions of the Faraday Society.* 1961. Vol. 57. pp. 135-149.

8. Васильева В.И., Сауд А.М., Акберова Э.М. Разделение водно-солевых растворов фенилаланина электродиализом при использовании мембран с разной массовой долей сульфокатионообменной смолы // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2021. Т. 21. № 4. С. 498-509.

9. Falina I.V., Demina O.A., Kononenko N.A., Annikova L.A. Influence of inert components on the formation of conducting channels in ion-exchange membranes // *J. Solid State Electrochem.* 2017. Vol. 21. pp. 767-775.

10. Oren Y., Freger V., Linder C. Highly conductive ordered heterogeneous ion-exchange membranes // *J. Membr. Sci.* 2004. Vol. 239. pp. 17-26.

11. Berezina N.P., Kononenko N.A., Dyomina O.A., Gnusin N.P. Characterization of ion-exchange membrane materials: properties vs structure // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2008. Vol. 139. pp. 3-28.

12. Гнусин Н.П., Заболоцкий В.И., Никоненко В.В., Мешечков А.И. // *Журн. физ. химии.* 1980. Т. 65. № 6. С. 1518-1522.

13. Демина О.А., Кононенко Н.А., Фалина И.В. Новый подход к характеристике ионообменных мембран с помощью набора модельных параметров // *Мембраны и мембранные технологии.* 2014. Т. 4. № 2. С. 83-94.

14. Демина О.А., Фалина И.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2014662877. 2014.

References

1. Vasil'eva V., Goleva E., Pismenskaya N., Kozmai A., Nikonenko V. Effect of surface profiling of a cation-exchange membrane on the phenylalanine and NaCl separation performances in diffusion dialysis. *Sep. Purif. Technol.* 2019; 210; 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.065>

2. Kozaderova O.A., Kim K.B., Gadzhdiyeva Ch.S., Niftaliev S.I. Electrochemical characteristics of thin heterogeneous ion



- exchange membrane. *J. Membr. Sci.* 2020; 604: Art. No. 118081. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118081>
3. Nebavskaya K.A., Butylskii D.Yu., Moroz I.A., Nebavsky A.V., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Enhancement of mass transfer through a homogeneous anion-exchange membrane in limiting and over-limiting current regimes by screening part of its surface with nonconductive strips. *Petroleum Chemistry.* 2018; 58: 780-789. <https://doi.org/10.1134/S0965544118090086>
4. Vyas P.V., Shah B.G., Trivedi G.S., Ray P., Adhikary S.K., Rangarajan R., Characterization of heterogeneous anion-exchange membrane. *J. Membr. Sci.* 2001; 187: 39-46. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00613-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00613-X)
5. Vyas P.V., Ray P., Adhikary S.K., Shah B.G., Rangarajan R., Studies of the effect of variation of blend ratio on permselectivity and heterogeneity of ion-exchange membranes. *J. Colloid Interface Sci.* 2003; 257; 127-134. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00025-5)
6. Khodabakhshi A.R., Madaeni S.S., Hosseini S.M. Comparative studies on morphological, electrochemical, and mechanical properties of s-polyvinyl chloride based heterogeneous cation-exchange membranes with different resin ratio loading. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010; 49: 8477-8487. <https://doi.org/10.1021/ie9014205>
7. Hale D.K., McCauley D.J. Structure and properties of heterogeneous cation-exchange membranes. *Transactions of the Faraday Society.* 1961; 57: 135-149. <https://doi.org/10.1039/TF9615700135>
8. Vasil'eva V.I., Saud A.M., Akberova E.M. Separation of phenylalanine aqueous salt solutions by electro dialysis using membranes with different mass fractions of sulfonated cation-exchange resin. *Sorbtsionnye I khromatograficheskie protsessy.* 2021; 21; 498-509. <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2021.21/3634> (In Russ.)
9. Falina I.V., Demina O.A., Kononenko N.A., Annikova L.A. Influence of inert components on the formation of conducting channels in ion-exchange membranes. *J. Solid State Electrochem.* 2017; 21: 767-775. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3415-0>
10. Oren Y., Freger V., Linder C. Highly conductive ordered heterogeneous ion-exchange membranes. *J. Membr. Sci.* 2004; 239: 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.12.031>
11. Berezina N.P., Kononenko N.A., Dyomina O.A., Gnusin N.P. Characterization of ion-exchange membrane materials: properties vs structure. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2008; 139: 3-28. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.01.002>
12. Gnusin N.P., Zabolockij V.I., Nikonenko V.V., Meshechkov A.I., Razvitie principa obobshhennoj provodimosti k opisaniyu javlenij perenosa v dispersnyh sistemah. *Zhurn. fiz. Himii.* 1980; 65(6): 1518-1522. (In Russ.)
13. Demina O.A., Kononenko N.A., Falina I.V. New approach to the characterization of ion-exchange membranes using a set of model parameters. *Petroleum Chemistry.* 2014; 54: 515-525. <https://doi.org/10.1134/S0965544114070032>
14. Demina O.A., Falina I.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM. No 2014662877, 2014.

Информация об авторах / Information about the authors

Е.Е. Мещерякова – магистр кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

М.А. Бровкина – к.х.н., доцент кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

E.E. Meshcheryakova – a master at the Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

M.A. Brovkina – Ph.D. (chemistry), an associate prof. at the Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3562-1213>



И.В. Фалина – д.х.н., доцент, профессор кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

В.И. Васильева – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Э.М. Акберова – к.х.н., ведущий инженер кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

I.V. Falina – Dr. Sci. (chemistry), docent, a professor at the Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8246-150X>, e-mail: irina_falina@mail.ru

V.I. Vasil'eva – Dr. Sci. (chemistry), a professor at the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2739-302X>, e-mail: viv155@mail.ru

E.M. Akberova – Ph.D. (chemistry), a leading engineer at the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3461-7335>, e-mail: elmara_09@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022; принята к публикации 27.10.2022.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 27.10.2022.