



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183; 66.081.62

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11563

Сорбционные, диффузионные характеристики и электропроводность анионообменных мембран в растворах молочной кислоты и хлорида натрия

Ольга Анатольевна Козадерова^{1,2}

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия, kozaderova-olga@mail.ru[✉]

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. На отдельных этапах производства молочной кислоты из молочной сыворотки могут быть применены мембранные технологии, в том числе процессы с использованием ионообменных мембран. В настоящем исследовании проведен сравнительный анализ сорбционных характеристик, диффузионной проницаемости и электропроводности сильноосновных анионообменных мембран с четвертичными аммониевыми группами – МА-41 (Щекиноазот, Россия) и Ralex AM(H)-PP (Мега, Чехия) - в индивидуальных водных растворах молочной кислоты и хлорида натрия в широком диапазоне концентраций. Для мембраны МА-41, имеющей более крупные частицы ионита внутри композита, в сравнении с Ralex AM(H)-PP, наблюдается более высокая необменная сорбция молочной кислоты и более высокие диффузионные потоки как молочной кислоты, так и хлорида натрия. Это может быть связано: с большей неравномерностью распределения фиксированного заряда по объему мембраны по причине меньшей степени дисперсности ионообменника и, как следствие, с меньшей площадью заряженной поверхности дисперсных частиц внутри мембраны (что приводит к менее действенному доннановскому исключению коионов из фазы мембраны); с ростом макропор на поверхности образца и уменьшением площади активной поверхности мембраны (поверхности, занятой частицами ионита). Измерена электропроводность образцов анионообменных мембран в растворах молочной кислоты и хлорида натрия. Для мембран в растворе минеральной соли с привлечением трехпроводной и микрогетерогенной модели проводимости проведен расчет вклада каналов проводимости (смешанный канал гель-раствор, гелевая фаза) в общую электропроводность системы. Наличие более широкого канала проводимости гель-раствор для Ralex AM(H)-PP в сочетании с сопоставимыми значениями доли гелевой и межгелевой фаз в образцах МА-41 и Ralex AM(H)-PP служит косвенным подтверждением влияния степени дисперсности ионита, входящего в состав гетерогенных образцов, на транспортные характеристики мембран.

Ключевые слова: молочная кислота, сильноосновная анионообменная мембрана, сорбция, необменное поглощение, диффузионная проницаемость, электропроводность.

Для цитирования: Козадерова О.А. Сорбционные, диффузионные характеристики и электропроводность анионообменных мембран в растворах молочной кислоты и хлорида натрия // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 4. С. 539-546. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11563>

Original article

Sorption, diffusion characteristics and electrical conductivity of anion-exchange membranes in lactic acid and sodium chloride solutions

Olga A. Kozaderova^{1,2},

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia, kozaderova-olga@mail.ru[✉]

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract. Membrane technologies, including processes involving ion-exchange membranes, can be used at certain stages during the production of lactic acid from whey. In this study, a comparative analysis of the sorption characteristics, diffusion permeability and electrical conductivity of strong basic anion exchange membranes with quaternary ammonium groups - MA-41 (Shchekinoazot, Russia) and Ralex AM(H)-PP (Mega, Czech Republic) in individual aqueous lactic acid and sodium chloride solutions was performed over a wide range of concentrations. For the MA-41 membrane, which has larger ion exchanger particles inside the composite, in comparison with Ralex AM(H)-PP, higher non-exchange sorption of lactic acid and higher diffusion fluxes of both lactic acid and sodium chloride were observed. This may be due to: a greater uneven distribution of a fixed charge throughout the membrane volume due to a lower degree of dispersion of the ion exchanger and, as a consequence, a smaller charged surface area of dispersed particles inside the membrane (which led to a less effective Donnan exclusion of co-ions from the membrane phase); with the growth of macropores on the surface of the sample. The electrical conductivity of samples of anion-exchange membranes in solutions of lactic acid and sodium chloride was measured. For membranes in a mineral salt solution, using a three-wire and microheterogeneous conductivity model, the contribution of conductivity channels (mixed gel-solution channel, gel phase) to the overall electrical conductivity of the system was calculated. The presence of a wider gel-solution conduction channel for Ralex AM(H)-PP in combination with comparable values of the proportion of gel and intergel phases in MA-41 and Ralex AM(H)-PP samples served as indirect confirmation of the influence of the degree of dispersion of the ion exchanger included in the composition of heterogeneous samples, on the transport characteristics of membranes.

Keywords: lactic acid, strong basic anion exchange membrane, sorption, non-exchange absorption, diffusion permeability, electrical conductivity.

For citation: Kozaderova O.A. Sorption, diffusion characteristics and electrical conductivity of anion-exchange membranes in lactic acid and sodium chloride solutions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(4): 539-546. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11563>

Введение

Молочная кислота (2-гидроксипропионовая кислота, НЛас) применяется в разных областях промышленности. На отдельных стадиях получения молочной кислоты из молочной сыворотки могут быть использованы мембранные технологии, в том числе процессы с ионообменными мембранами [1-4]. Эффективность применения мембранных технологий зависит от селективности ионообменных мембран, их электрического сопротивления. Для получения процесса с высокой производительностью и низким энергопотреблением необходимо фундаментальное изучение явлений сорбции и транспорта ионов в ионообменных мембранах.

Цель работы – сравнительный анализ сорбционных характеристик, диффузионной проницаемости и электропроводности сильноосновных анионообменных мембран MA-41 и Ralex AM(H)-PP в растворах молочной кислоты и хлорида натрия.

Характеристики мембран MA-41 и Ralex AM(H)-PP довольно хорошо изучены в растворах минеральных солей и

некоторых минеральных и органических кислот (в основном, аминокислот) [5-7]. Что касается молочной кислоты, то можно найти работы по изучению сорбции, где в качестве сорбентов применяются цеолиты, анионообменные смолы [8, 9]. Описание процессов деминерализации растворов, содержащих молочную кислоту, методами диализа и электродиализа приведено в исследованиях [1-4] с экспериментальными анионообменными мембранами АК-70 и промышленными – MA-41 [3]; с мембранами Neosepta CMB и Neosepta АНА, (Astom Co., Ltd., Tokyo, Japan) [4]. Сравнение свойств серийно выпускаемых в промышленном масштабе гетерогенных мембран MA-41 и Ralex AM(H) можно найти в работах [10-13]: в растворах карбоновых кислот [10] и растворах минеральных солей [11-13]. Закономерности, полученные для одних ионообменных мембран, не всегда будут сохраняться в системах с аналогичными растворами, но другими мембранами. Например, мембраны разного типа (или разных производителей) могут иметь различную селективность, электропроводность, сорбционную емкость в растворах одного и того же состава. В



связи с этим при планировании применения тех или иных мембран в конкретном мембранном процессе необходимо предварительное изучение их физико-химических и электрохимических характеристик.

Экспериментальная часть

Исследуемые мембраны – МА-41 и Ralex AM(H)-PP – выпускаются предприятиями ООО ИП «Щекиноазот» [14], Россия и АО «Мега», Чехия [15] соответственно. Гетерогенные мембраны марки МА-41 получают из композиции измельченного сильноосновного анионообменника АВ-17 и порошка полиэтилена. Сформированные из полученных смесей листы прессуют с армирующей тканью сначала в течение 50 мин при 150°C и давлении 5 атм., затем в течение минуты при давлении 290 атм. [16]. В отличие от мембран МА-41 мембраны Ralex получают методом горячего вальцевания. Свойства этих мембран приведены в табл. 1. Мембраны МА-41 имеют немного меньшее значение обменной емкости и отличаются меньшим набуханием. Перед применением ионообменные мембраны проходили стандартную процедуру кондиционирования [17].

Растворы молочной кислоты заданной концентрации готовили разбавлением концентрированного раствора молочной кислоты (80% масс.). Приготовленные растворы имели рН не более 2.65. В растворах с таким рН молочная кислота находится преимущественно в молекулярной форме [18]. Растворы хлорида натрия готовили по навеске.

Таблица 1. Характеристики мембран
Table 1. Membrane characteristics

Показатель	Ralex AM(H)-PP	МА-41
Фиксированные группы	-N ⁺ (CH ₃) ₃	
Инертное связующее	Полиэтилен	
Армирующая ткань	полипропилен	капрон
Обменная емкость, ммоль/г _{сух.}	2.2±0.1	2.0±0.3
Толщина в набухом состоянии, мкм	540	520
Число переноса, %	>95	>95
Влагосодержание, %	44	36

Получение изотерм сорбции молочной кислоты мембранами в хлоридной форме проводили в статических условиях методом переменных концентраций [19]. Величину сорбции молочной кислоты (q , моль/г) находили с учетом массы навески мембраны, объема контактирующего с мембраной раствора и изменения состава раствора. Обменное поглощение оценивали по увеличению содержания хлорид-ионов в растворе, необменное поглощение – по уменьшению содержания в растворе коионов водорода, концентрацию которых определяли методом кислотно-основного титрования. Диффузионные потоки молочной кислоты или хлорида натрия (J , моль/(см²·с)) находили из эксперимента по определению диффузионной проницаемости ионообменной мембраны, проведенному согласно методике [20]. Эксперимент проводили в проточной двухкамерной ячейке, в приемную камеру изначально в режиме рецикла подавали воду [18]. Удельную электропроводность ионообменных мембран (k , Ом⁻¹ см⁻¹) рассчитывали из сопротивления образцов (R , Ом), измеренного контактно-разностным методом [21], частота переменного тока 100 кГц. Формулы для расчета этих характеристик приведены ниже:

$$q = \frac{\Delta c \cdot V}{m}; \quad (1)$$

$$J = \frac{V_w \cdot dc}{S \cdot d\tau}; \quad (2)$$

$$k = \frac{d}{R \cdot S^2} \quad (3)$$

где Δc – изменение содержания в контактирующем с мембраной растворе противоионов или коионов, моль/дм³;

V – объем контактирующего с мембраной раствора молочной кислоты, дм^3 ; m – масса навески мембраны, г ; V_w – объем воды, дм^3 ; dc – изменение содержания электролита в приемной камере (моль/дм^3) за время dt , с ; S – площадь мембраны, см^2 ; d – толщина мембраны, см .

Обсуждение результатов

Изотермы сорбции молочной кислоты приведены на рис. 1. Изотермы обменного поглощения имеют вид кривой насыщения. Однако полная обменная емкость мембран не достигается, и мембрана находится в смешанной форме – хлорид/лактат. Это необходимо учитывать при расчете кинетических характеристик противоионов в мембранах. Более высокие значения обменной сорбции для Ralex AM(H)-PP могут быть связаны как с ее большими полной обменной емкостью и влагосодержанием, так и определяться долей активной поверхности мембран (поверхности, занятой частицами ионита). В работе [11] было показано, что эта характеристика для Ralex AMH-Pes составляет 35-40%, в то время как для MA-41 – 15-20%. В [12] найдена доля активной поверхности гетерогенных мембран Ralex – 25-30%, что в 2 раза выше, чем у гетерогенных мембран MA-41, исследованных в этой работе. Необменное поглощение молочной кислоты изучаемыми мембранами экспоненциально растет с увеличением концентрации сорбтива. Для MA-41, в сравнении с Ralex AM(H)-PP, величина необменной сорбции молочной кислоты имеет более высокое значение. Это может быть связано как с меньшей площадью активной поверхности мембран, так и с большей неравномерностью распределения фиксированного заряда по объему образца и формированию в объеме мембраны меньшей по площади заряженной поверхности дисперсных частиц. Эти эффекты являются следствием меньшей степени дисперсности ионообменника, входящего в состав

мембраны MA-41 [22]. В результате наблюдается менее эффективное доннановское исключение коионов из фазы мембраны. Кроме того, в работе [23] было показано, что гетерогенные мембраны с меньшей степенью дисперсности ионообменника характеризуются макропорами большего радиуса и площади, что также будет влиять на селективность образцов.

Концентрационная зависимость удельной электропроводности изучаемых ионообменных мембран в индивидуальных водных растворах молочной кислоты и хлорида натрия приведена на рис. 2. Мембрана Ralex имеет более высокую удельную электропроводность как в растворах NaCl, так и в растворах молочной кислоты. Это может быть следствием ее более высокой обменной емкости и влагосодержания. При увеличении концентрации внешнего раствора NaCl наблюдается рост электропроводности мембран, что связано с влиянием необменно поглощенного сильного электролита на проводимость гетерогенного образца:

$$k_i = F \sum_i z_i u_i (\bar{c}_i + \bar{c}) = 2F \sum_i z_i u_i \sqrt{(X/2)^2 + c^2}, \quad (4)$$

где F – число Фарадея; z_i – зарядовое число иона; u_i – электрическая подвижность; \bar{c}_i – концентрация противоионов; \bar{c} – концентрация коионов в мембране; X – концентрация фиксированных ионов в мембране; c – концентрация внешнего раствора электролита. Для Ralex AM(H)-PP с увеличением концентрации минеральной соли в растворе электропроводность растет менее резко, чем для MA-41. Это связывают с более однородной структурой мембран типа Ralex [10]. Для растворов молочной кислоты проводимость мембран остается относительно постоянной (рис. 2). Во всем изучаемом диапазоне концентраций внешнего раствора молочной кислоты электропроводность мембран имеет более высокое значение, чем электропроводность раствора слабого электролита. Концентрация

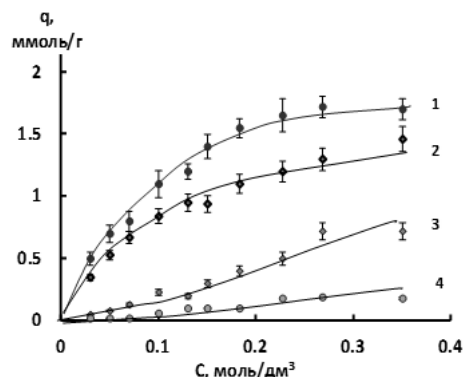


Рис. 1. Изотермы обменной (1, 2) сорбции и необменного поглощения (3, 4) молочной кислоты из индивидуальных водных растворов анионообменными мембранами Ralex AM(H)-PP (кривые 1, 4) и MA-41 (кривые 2, 3) в Cl⁻ ионной форме

Fig. 1. Isotherms of exchange (1, 2) sorption and non-exchange absorption (3, 4) of lactic acid from individual aqueous solutions by anion exchange Ralex AM(H)-PP (curves 1, 4) and MA-41 membranes (curves 2, 3) in Cl⁻ ionic form

нейтральных, необменно сорбированных HLac в мембране увеличиваются с ростом концентрации внешнего раствора молочной кислоты (рис. 1), но, в отличие от сильного электролита, молекулы слабого электролита не увеличивают электропроводность межгелевой фазы мембраны. Более того, в ряде работ [10, 24, 25] для органических кислот показана инверсия зависимости электропроводности анионообменных мембран от концентрации внешнего раствора электролита – увеличение проводимости ионообменников с уменьшением концентрации раствора. В растворах винной кислоты [24] такая зависимость связана с переходом мембраны в более проводящую двухзарядную форму тартрат-иона; в растворах аминокислот [25] – с влиянием гидролиза и появлением в мембране более подвижных водородных ионов при разбавлении раствора. Для молочной кислоты эффект роста электропроводности мембраны при разбавлении равновесного раствора не наблюдается.

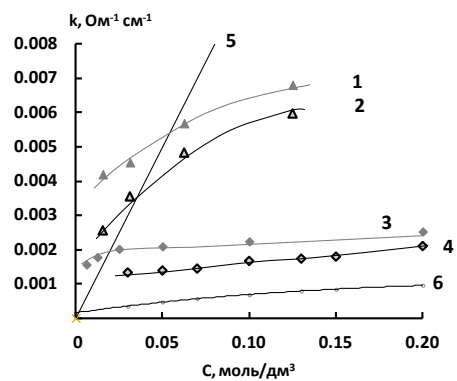


Рис. 2. Удельная электропроводность в зависимости от концентрации внешнего раствора для мембран: Ralex AM(H)-PP в растворе NaCl (1) и HLac (3), MA-41 в растворе NaCl (2) и HLac (4). Электропроводность раствора NaCl (5). Электропроводность раствора молочной кислоты (6).

Fig. 2. Specific electrical conductivity depending on the concentration of the external solution for membranes: Ralex AM(H)-PP in NaCl solution (1) and HLac (3), MA-41 in NaCl solution (2) and HLac (4). Electrical conductivity of NaCl solution (5). Electrical conductivity of lactic acid solution (6)

На рис. 3 показаны пути протекания тока в композитном образце по данным анализа концентрационной зависимости электропроводности мембран в растворе NaCl с применением комбинированной трехпроводной и микрогетерогенной модели проводимости ионообменных мембран [17, 26]. Мембраны типа Ralex характеризуются более широким каналом смешанной проводимости гель-раствор. Доли переноса тока по гелевой и межгелевой фазам в образцах MA-41 и Ralex AM(H)-PP сопоставимы. Такие значения полученных модельных параметров путей переноса тока также могут быть связаны с различной степенью дисперсности ионита, входящего в состав гетерогенных образцов.

Рассмотренные выше различные характеристики обменной и необменной сорбции, структурная организация гетерогенных мембран разных производителей проявляются и при исследовании диффузионной проницаемости образцов в растворах молочной кислоты и хлорида

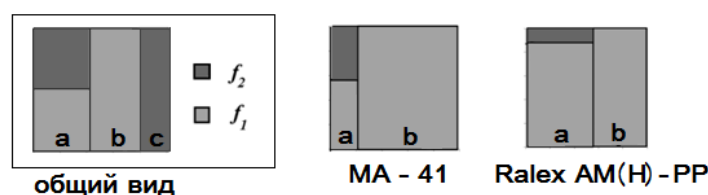


Рис. 3. Параметры комбинированной трехпроводной и микрогетерогенной модели для изучаемых мембран в растворе хлорида натрия, каналы проводимости: а – гель/раствор; б – гель; с – раствор; f₁- доля гелевой фазы; f₂ – доля межгелевой фазы

Fig. 3. Parameters of the combined three-wire and microheterogeneous model for the studied membranes in a sodium chloride solution, conduction channels: a – gel/solution; b – gel; c – solution; f₁- fraction of the gel phase; f₂ – fraction of intergel phase

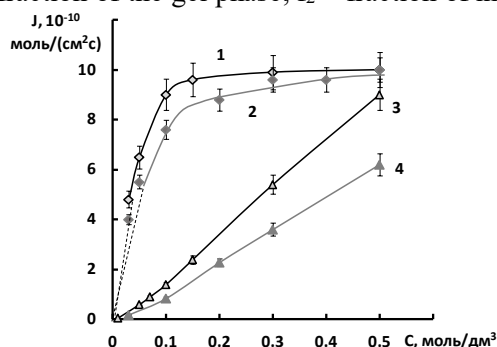


Рис. 4. Диффузионные потоки молочной кислоты (1, 2) и хлорида натрия (3, 4) для МА-41 (1, 3) и Ralex АН-РР (2, 4).

Fig. 4. Diffusion flows of lactic acid (1, 2) and sodium chloride (3, 4) for MA-41 (1, 3) and Ralex АН-РР (2, 4).

натрия. На рис. 4 показаны диффузионные потоки молочной кислоты и хлорида натрия для изучаемых мембран. Потоки молочной кислоты и для Ralex AM(H)-PP, и для МА-41 имеют более высокие значения, чем для NaCl: исключение из фазы «заряженной» мембраны коионов (в нашем случае катионов Na⁺) приводит к более низким потокам сильного электролита. Скорость массопереноса как молочной кислоты, так и хлорида натрия через МА-41 в 1.2-1.5 раза выше, чем через Ralex AM(H)-PP.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ сорбционных характеристик, удельной электропроводности и диффузионной проницаемости гетерогенных ионообменных мембран Ralex AM(H)-PP и МА-41 в индивидуальных водных растворах хлорида натрия и молочной кислоты. Обменная емкость по молочной

кислоте и электропроводность мембраны Ralex AM(H)-PP характеризуются более высокими значениями по сравнению с МА-41. Необменное поглощение органической кислоты для Ralex AM(H)-PP, напротив, выражено в меньшей степени. Пониженными являются и диффузионные потоки, причем как молочной кислоты, так и хлорида натрия. Как следствие, Ralex AM(H)-PP проявляет себя как более селективная мембрана. Особенности переноса ионов в изучаемых ионообменных мембранах и через эти мембраны для растворов органической кислоты и минеральной соли могут быть связаны с разной степенью дисперсности ионита, входящего в состав гетерогенных композитных материалов, что на наш взгляд является наиболее значимым различием для Ralex AM(H)-PP и МА-41. Полученные результаты полезны при разработке и моделировании электродиализных и диализных процессов переработки



растворов, содержащих молочную кислоту и минеральную соль.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-

Список литературы/References

1. Zolotareva M.S., Volodin D.N., Bessonov A.S., Topalov V.K. Elektrodializ - naibolee effektivnyi protsess demineralizatsii molochnoi syvorotki. *Molochnaya promyshlennost'*. 2015; 3: 37-39. (In Russ.)
2. Kim Y.H., Moon S.H., Lactic acid recovery from fermentation broth using one-stage electrodialysis. *J. Chem. Technol. Biotechnol.: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*. 2001; 76: 169-178. <https://doi.org/10.1002/jctb.368>
3. Kulincov P.I., Bobrinskaya G.A., Sel'emenev V.F., Garshina T.I., Agupova M.V. Povysenie effektivnosti elektrodializnoi demineralizatsii molochnoi syvorotki. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2011; 11(5): 713-716. (In Russ.)
4. Talebi S., Garthe M., Roghmans F., Chen G., Kentish S. Lactic acid and salt separation using membrane technology. *Membranes*. 2021; 11(2): 107. <https://doi.org/10.3390/membranes11020107>
5. Saud A.M., Vasil'eva V.I., Goleva E.A., Akberova E.M., Kozlov A.T. Selection of anion-exchange membrane for separation of phenylalanine and sodium chloride by neutralization dialysis. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2020; 20(6): 749-759. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/3143> (In Russ.)
6. Shutkina E.A., Nevakshenova E.E., Pismenskaya N.D., Mareev S.A., Nikonenko V.V. Diffusion permeability of the anion-exchange membranes in sodium dihydrogen phosphate solution. *Condensed Matter and Interphases*. 2015; 17(4): 566-578. (In Russ.)
7. Kharina A.Yu., Charushina O.E., Eliseeva T.V. Organic fouling of anion-exchange and bipolar membranes during the separation of amino acid and sucrose by electro-dialysis. *Condensed Matter and Interphases*. 2023; 25(2): 268-276. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11107>
8. Aljundi H., Belovich J., Talu O. Adsorption of lactic acid from fermentation broth and aqueous solutions on Zeolite. *Chemical Engineering Science*. 2005; 60(18): 5004-5009. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.04.034>
9. Evangelista R.L., Mangold A.J., Nikolov Z.L. Recovery of lactic acid by sorption. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 1994; 45: 131-144. <https://doi.org/10.1007/BF02941793>
10. Melnikov S.S., Kolot D.G. Electrical conductivity of ionexchange membranes in solutions containing carboxylic acids. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; 124: 549-562. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-032>
11. Melnikov S.S. Development of a method for fixing perftorsulfopolimer mf-4sk on a heterogeneous membrane-substrate. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2017; 125: 223-234. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-125-015>
12. Vasil'eva V.I., Zhiltsova A.V., Akberova E.M., Fataeva A.I. Influence of surface inhomogeneity on current-voltage characteristics of heterogeneous ion exchange membranes. *Condensed Matter and Interphases*. 2014; 16(3): 257-261. (In Russ.)
13. Zabolotskii V.I., Bugakov V.V., Sharafan M.V., Chermit R.Kh. Transfer of electrolyte ions and water dissociation in anion-exchange membranes under intense current conditions. *Russ. J. Electrochem.* 2012; 48(6): 650-659. <https://doi.org/10.1134/S1023193512060158>
14. ООО IP Shchekinoazot. Available at: <http://www.azotom.ru/monopolyarnye-membrany> (Accessed: 12.06.2023)



15. AO MEGA. Available at: <https://www.mega.cz/membranes/> (Accessed: 12.06.2023)
16. Garshina T.I., Kozaderova O.A., Shaposhnik V.A. Fiziko-khimicheskie kharakteristiki tonkikh ionoobmennyykh membran. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2007; 7(1): 148-151.
17. Kononenko N.A., Demina O.A., Loza N.V. Membrannaya elektrokimiya. Krasnodar. Izd-vo Kuban. gos. un-ta, 2017, 290 p. (In Russ.)
18. Kozaderova O.A., Kalinina S.A., Morgacheva E.A., Niftaliev S.I. Sorption characteristics and diffusion permeability of the MA-41 anion-exchange membrane in lactic acid solutions. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2021; 21(3): 317-325. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3465> (In Russ.)
19. Selemenev V.F., Slavinskaya G.V., Khokhlov V.Yu. Praktikum po ionnomu obmenu. Voronezh, 2004, 160 p.
20. Nikonenko V.V., Vedernikova E.E., Pismenskaya N.D. Patent RF № 100275, 2010.
21. Shaposhnik, V.A., Vasil'eva V.I., Grigor'chuk O.V. Yavleniya perenosa v ionoobmennyykh membranakh. Moscow, MPhTI, 2001, 200 p. (In Russ.)
22. Kozaderov O.A., Kozaderova O.A., Chernova V.Yu. Sorption characteristics and electrical conductivity of anion-exchange membranes in lactic acid solutions. *Sorbtsionnyye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2023; 23(1): 18-27. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10990>. (In Russ.)
23. Vasil'eva V.I., Pismenskaya N.D., Akberova E.M., Nebavskaya K.A. Effect of thermochemical treatment on the surface morphology and hydrophobicity of heterogeneous ion-exchange membranes. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2014; 88 (8): 1293-1299. <https://doi.org/10.1134/S0036024414080317>
24. Sarapulova V., Nevakshenova E., Pismenskaya N., Dammak L., Nikonenko V. Unusual concentration dependence of ion-exchange membrane conductivity in ampholyte-containing solutions: Effect of ampholyte nature. *J. Memb. Sci.* 2015; 479: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.01.015>
25. Kozaderova O.A., Shaposhnik V.A. Kinetic parameters of ion-exchange membrane in amino acid solutions. *Russ. J. Electrochem.* 2004; 40(7): 698-703. <https://doi.org/10.1023/B:RUEL.0000035251.04661.f7>
26. Zabolotsky V.I., Nikonenko V.V. Ion transport in membranes. M., Nauka, 1996, 392 p.

Информация об авторах / Information about the authors

О.А. Козадерова – д.х.н, профессор кафедры неорганической химии и химической технологии Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж; доцент кафедры физической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

O.A. Kozaderova – DSc in Chemistry, Professor of the Department of Inorganic Chemistry and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh; Associate Professor of the Physical Chemistry Department, Department of Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, E-mail: kozaderova-olga@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.06.2023; одобрена после рецензирования 13.09.2023; принята к публикации 20.09.2023.

The article was submitted 24.06.2023; approved after reviewing 13.09.2023; accepted for publication 20.09.2023.