



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183:66.081.62

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10990

Сорбционные характеристики и электропроводность анионообменных мембран в растворах молочной кислоты

Олег Александрович Козадеров¹,

Ольга Анатольевна Козадерова^{1,2}✉, Виктория Юрьевна Чернова²

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, kozaderova-olga@mail.ru✉

²Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

Аннотация. Электромембранный синтез молочной кислоты и деминерализация ее водных растворов являются перспективным вариантом решения прикладных задач технологии переработки молочной сыворотки. Для эффективной организации электромембранного процесса необходима оценка сорбционной способности основных рабочих элементов аппаратов – ионообменных мембран. Анализ сорбционных характеристик и электропроводности мембран позволяет установить механизм взаимодействия веществ с ионообменниками, они необходимы для расчета кинетических параметров ионов в ионообменных мембранах, что важно при моделировании и интерпретации ионного транспорта в электромембранных системах. В настоящем исследовании изучены сорбционные характеристики сильноосновных анионообменных мембран с четвертичными аммониевыми группами МА-41 (Щекиноазот, Россия) и Ralex AM(H)-PP (Мега, Чехия) в индивидуальных водных растворах молочной кислоты (0.25 и 0.35 моль/дм³). Для мембраны МА-41, имеющей более крупные частицы ионообменного материала в своем составе, в сравнении с Ralex AM(H)-PP, доля необменной сорбции молочной кислоты достигает 25% от величины общей (обменной и необменной) сорбции, что в 2-3 раза больше, чем для мембраны Ralex AM(H)-PP. Исследуемые мембраны сопоставимы по величине общей сорбции молочной кислоты, которая имеет значение 2.06 ± 0.16 ммоль/г. Построены кинетические кривые сорбции. Показано, что время достижения максимальной рабочей емкости изучаемых сильноосновных мембран с четвертичными аммониевыми группами разных производителей по молочной кислоте составляет 34 и 22 минуты (для исходных концентраций молочной кислоты 0.25 и 0.35 моль/дм³ соответственно). Измерена электропроводность образцов анионообменных мембран в изучаемых растворах молочной кислоты. Рассчитаны коэффициенты диффузии Lac^- -ионов в ионообменных мембранах. Предложен вариант оценки размера частиц ионита, входящего в состав гетерогенной мембраны, на основе анализа фотографий образцов мембран, полученных методом оптической микроскопии. Перед микроскопированием мембрану необходимо обработать в растворе индикатора. Это позволит усилить различия в светопроницаемости ионит/полиэтилен и выделить частицы ионита на фоне инертного связующего.

Ключевые слова: молочная кислота, сильноосновная анионообменная мембрана, сорбция, необменное поглощение, электропроводность, степень дисперсности ионообменника.

Для цитирования: Козадеров О.А., Козадерова О.А., Чернова В.Ю. Сорбционные характеристики и электропроводность анионообменных мембран в растворах молочной кислоты // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 18-27. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10990>

Original article

Sorption characteristics and electrical conductivity of anion-exchange membranes in lactic acid solutions

Oleg A. Kozaderov¹, Olga A. Kozaderova^{1,2}✉, Viktoria Yu. Chernova²

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia, kozaderova-olga@mail.ru✉

²Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia



Abstract. The electromembrane synthesis of lactic acid and demineralization of its aqueous solutions are a promising option for solving applied problems of whey processing. The assessment of the sorption capacity of the main working elements of the apparatus - ion-exchange membranes is required for the effective organization of the electromembrane process. The analysis of the sorption characteristics and electrical conductivity of membranes allows to establish the mechanism of interaction of substances with ion exchangers; they are necessary for calculating the kinetic parameters of ions in ion-exchange membranes, important for modelling and interpreting ion transport in electromembrane systems. In this study, the sorption characteristics of strongly basic anion-exchange membranes with quaternary ammonium groups MA-41 (Shchekinoazot, Russia) and Ralex AM(N)-PP (Mega, Czech Republic) were investigated in individual aqueous solutions of lactic acid (0.25 and 0.35 mol/dm³). For the MA-41 membrane, which has larger particles of ion-exchange material in its composition, in comparison with Ralex AM(N)-PP, the share of non-exchange sorption of lactic acid reached 25% of the total (exchange and non-exchange) sorption, which was 2-3 times higher than for the Ralex AM(H)-PP membrane. The studied membranes were comparable in terms of the total sorption of lactic acid, which has a value of 2.06±0.16 mmol/g. Sorption kinetic curves were plotted. It was shown that the time required to reach the maximum working capacity of the studied strongly basic membranes with quaternary ammonium groups from different manufacturers in terms of lactic acid was 34 and 22 minutes (for initial lactic acid concentrations of 0.25 and 0.35 mol/dm³ respectively). The electrical conductivity of samples of anion-exchange membranes in the studied solutions of lactic acid was measured. Diffusion coefficients for Lac⁻ ions in ion-exchange membranes were calculated. The estimation method for the particle size of an ion exchanger in the composition of heterogeneous membrane based on the analysis of photographs of membrane samples obtained by optical microscopy has been proposed. The membrane must be treated in an indicator solution prior microscopy. This will enhance the differences in the light transmission of the ion exchanger/polyethylene and identify the ion exchanger particles against the background of an inert binder.

Keywords: lactic acid, strongly basic anion-exchange membrane, sorption, non-exchange absorption, electrical conductivity, degree of dispersion of the ion exchanger.

For citation: Kozaderov O.A., Kozaderova O.A., Chernova V.Yu. Sorption characteristics and electrical conductivity of anion-exchange membranes in lactic acid solutions. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(1): 18-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10990>

Введение

Молочная кислота (2-гидроксипропионовая кислота) применяется в пищевой, медицинской, фармацевтической, текстильной промышленности. В последнее время спрос на молочную кислоту значительно возрос, что связано с применением полимолочной кислоты для получения биоразлагаемых полимеров [1, 2]. Однако предварительная подготовка молочной кислоты как сырьевого компонента для получения полимолочной кислоты (выделение из ферментативного бульона при синтезе биохимическим способом, очистка) характеризуется определенными затруднениями, связанными с высокой гигроскопичностью продукта и применением дорогостоящих методов концентрирования и деминерализации ее растворов [3]. На отдельных стадиях получения молочной кислоты применяются мембранные процессы [3-8]: обработка нейтрализованной сыворотки в электродиализаторе-синтезаторе с биполярными

мембранами, в электродиализаторе-концентраторе с чередующимися катионо- и анионообменными мембранами [3, 4], ультрафильтрационное концентрирование сыворотки [5, 6], первапорационная дегидратация молочной кислоты [7]. Применительно к технологии молочной кислоты в качестве плюсов отмечают высокую селективность мембранной обработки, высокий уровень очистки и разделения компонентов смеси [8]. Недостатками мембранной технологии являются концентрационная поляризация и фазулинг мембран, что ведет к удорожанию процесса [6, 8]. Для грамотной организации мембранных процессов и поиска оптимальных условий их реализации необходимо знание сорбционных характеристик ионообменных мембран и их электропроводности в растворах молочной кислоты. Это позволит говорить о механизме сорбции органической кислоты ионообменником [9], определять кинетические параметры ионов органических кислот в ионообменных мембранах [10],

транспортные характеристики мембран [7, 10], проводить теоретический расчет структурно-кинетических параметров мембранного процесса [5].

Цель настоящей работы – изучение сорбционных характеристик и электропроводности сильноосновных анионообменных мембран МА-41 и Ralex AM(H)-PP в индивидуальных водных растворах молочной кислоты.

Экспериментальная часть

В статье рассмотрены сорбционные характеристики и удельная электропроводность серийно выпускаемых анионообменных мембран МА-41 и Ralex AM(H)-PP (Cl⁻-ионная форма) в индивидуальных водных растворах молочной кислоты с концентрацией 0.25 и 0.35 моль/дм³, имеющих рН 2.2 и 2.1 соответственно. В растворах с таким значением рН молочная кислота находится преимущественно в молекулярной форме [11].

Получение кинетических кривых сорбции проводили в статических условиях методом ограниченного объема [12]. Количество обменно-сорбированной молочной кислоты определяли по увеличению концентрации хлорид-ионов в растворе, концентрацию которых находили методом прямой потенциометрии [13]. Для определения необменной сорбции молочной кислоты проводили потенцио-

метрическое титрование равновесного раствора кислоты раствором щелочи [13], что позволило найти изменение в растворе содержания коионов Н⁺. Расчет содержания НЛас или Lас⁻ внутри мембраны проводили с учетом массы навески мембраны, объема раствора и изменения состава контактирующего раствора. Удельную электропроводность ионообменных мембран находили из сопротивления образцов, измеренного контактно-разностным методом [14].

Исследуемые мембраны – гетерогенные, серийно выпускаемые ООО ИП «Щекиноазот» [15], Россия и АО «Мега», Чехия [16]. Они содержат четвертичные аммониевые группы в качестве функциональных. Исходная ионная форма изучаемых мембран – хлоридная. Некоторые свойства этих мембран приведены в табл. 1. Дисперсный состав ионообменника в мембранах изучали с помощью оптического микроскопа Levenhuk 625 с камерой M1400 Plus, объектив 10x0.25 в режиме проходящего света. Перед микроскопированием мембраны в хлоридной форме выдерживали в растворе универсального индикатора [17], это позволило получить контрастное изображение и выделить частицы ионита на фоне инертного связующего – полиэтилена: сорбция

Таблица 1. Характеристики мембран
 Table 1. Membrane characteristics

Показатель	Ralex AM(H)-PP	МА-41
Функциональные группы	-N ⁺ (CH ₃) ₃	
Связующее	Полиэтилен	
Армирующая ткань	полипропилен	полиамид
Полная обменная емкость по 0.1 М НСl, ммоль/г сух.мемб	2.2±0.1	2.0±0.3
Толщина в набухшем состоянии, 10 ⁻³ м	<0.75	0.55
Удельное электросопротивление в 0.6 М NaCl, Ом см	<120	<350
Число переноса, доли, не менее	0.95	0.94
Изменение размера по толщине при набухании, %	<50	30±5
Изменение размера по длине при набухании, %	<7	6±3

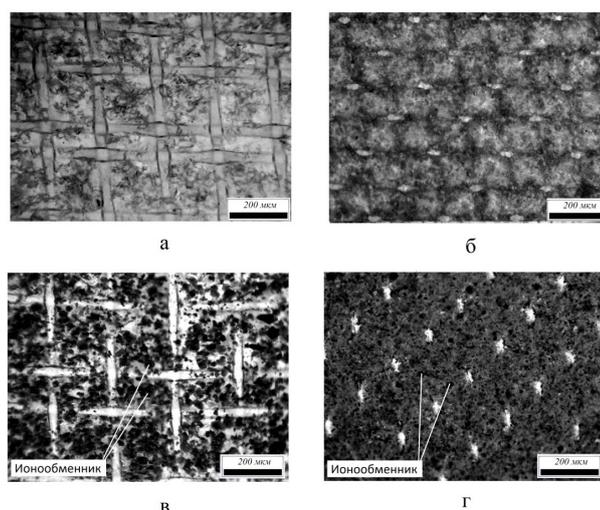


Рис. 1. Фотографии мембран (оптический микроскоп Levenhuk 625; камера M1400 Plus): а, б – мембраны, не обработанные в растворе индикатора; в, г – мембраны после контакта с раствором индикатора (а, в – МА-41, б, г – Ralex AM(H)-PP).

Fig. 1. Photographs of membranes (optical microscope Levenhuk 625; M1400 Plus camera): а, b – membranes not treated in the indicator solution; c, d – membranes after contact with the indicator solution (а, c – МА-41, b, d – Ralex AM(N)-RR).

окрашенных органических веществ происходит только частицами ионообменного компонента гетерогенной мембраны. Распределение участков ионообменника по радиусам рассчитывали как отношение числа участков, радиус которых находится в определенном интервале значений, к их общему числу. Оптическая микроскопия – относительно простой и недорогой метод – применяется для оценки электрической и геометрической неоднородности поверхности мембран [18, 19], в том числе с использованием окрашивающих ионит пигментов. Однако для количественной оценки распределения участков ионообменника по радиусам на поверхности набухших образцов ионообменных мембран обычно применяют методы, требующие использования более сложного оборудования, например, метод растровой электронной микроскопии [20, 21].

Кинетические кривые сорбции приводили в виде зависимостей $q - \tau$, где q – емкость сорбента по молочной кислоте в момент времени τ , моль/г; τ – время контакта сорбента с раствором сорбтива, мин. Скорость сорбции определяли по

тангенсу угла наклона зависимости $q - \tau$ на начальных этапах сорбции (при малых временах).

Обсуждение результатов

Микрофотографии изучаемых гетерогенных ионообменных мембран МА-41 и Ralex AM(H)-PP в набухшем состоянии представлены на рис. 1. Рис. 1а и 1б показывает необработанные в растворе индикатора образцы. В этом случае хорошо видна только армирующая ткань, выделить же частицы ионообменника, распределенные в инертном пластификаторе – полиэтилене – не представляется возможным. На фотографиях 1в и 1г представлены фотографии мембран после контакта с универсальным индикатором. В этом случае в составе мембраны хорошо видны частицы ионообменного материала (черный цвет, хаотичное распределение по объему мембраны), полиэтилена (серый цвет), армирующей ткани (белый цвет, регулярная структура в виде сетки или ее частей). Сравнительный анализ распределения по размерам ионообменных участков мембран на изображениях

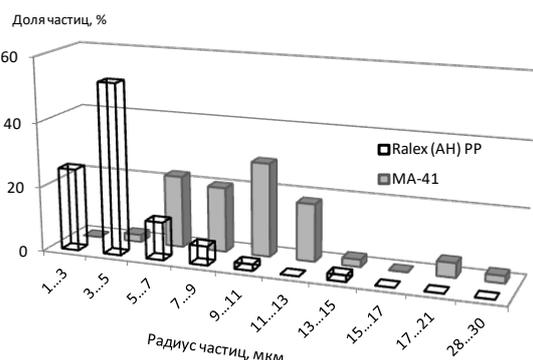


Рис. 2. Распределение частиц ионообменника по радиусам для изучаемых гетерогенных ионообменных мембран (набухшие образцы)

Fig. 2. Radial distribution of ion exchanger particles for studied heterogeneous ion-exchange membranes (swollen samples)

показывает, что максимум на кривой распределения для мембраны MA-41 находится в области 9-11 мкм; для Ralex AM(H)-PP - в области 3-5 мкм (рис. 2). Полученные результаты говорят о существенно более высокой неоднородности распределения ионообменника в мембране MA-41 по сравнению с мембраной Ralex AM(H)-PP. Степень измельчения ионита – основного компонента гетерогенной мембраны – влияет на распределение путей протекания тока в композитном образце. Так, с использованием комбинированной трехпроводной и микрогетерогенной модели электропроводности мембран [22], было найдено [23], что мембраны типа Ralex характеризуются более широким каналом смешанной проводимости гель-раствор.

Кинетические кривые сорбции молочной кислоты мембранами MA-41 и Ralex AM(H)-PP из индивидуальных водных растворов с концентрациями 0.25 и 0.35 моль/дм³ и их анализ представлены на

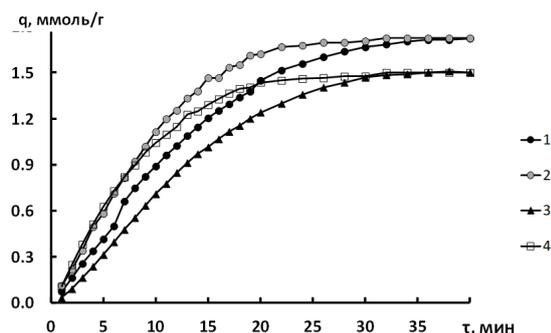


Рис. 3. Кинетические кривые обменной сорбции молочной кислоты из индивидуальных водных растворов анионообменными мембранами Ralex AM(H)-PP (кривые 1, 2) и MA-41 (кривые 3, 4) в Cl⁻ ионной форме из растворов с концентрацией 0.25 (кривые 1, 3)

и 0.35 (кривые 2, 4) моль/дм³

Fig. 3. Kinetic curves of the exchange sorption of lactic acid from individual aqueous solutions by anion-exchange Ralex AM(H)-PP (curves 1, 2) and MA-41 membranes (curves 3, 4) in Cl⁻ ionic form from solutions with a concentration of 0.25 (curves 1, 3) and 0.35 (curves 2, 4) mol/dm³

рис. 3. и в табл. 2. При сорбции Lac⁻ ионов мембранами время достижения максимальной рабочей обменной емкости составляет 34 и 22 минут для исходных концентраций сорбтива 0.25 и 0.35 моль/дм³ соответственно. Для мембраны MA-41, в сравнении с Ralex AM(H)-PP, доля необменной сорбции молочной кислоты достигает 25% от величины общей (обменной и необменной) сорбции, что в 2.3 раза больше, чем для мембраны Ralex AM(H)-PP. Это может быть связано с большей неравномерностью распределения фиксированного заряда по объему образца по причине меньшей степени дисперсности ионообменника, входящего в состав мембраны. Данный факт приводит к менее эффективному донновскому исключению коионов из фазы мембраны. Кроме этого, для мембран с меньшей степенью дисперсности ионообменника характерно наличие макропор большего радиуса и площади [24], что

Таблица 2. Характеристики сорбции молочной кислоты из водных растворов мембранами Ralex AM(H)-PP и MA-41

Table 2. Characteristics of lactic acid sorption from aqueous solutions by Ralex AM(N)-PP and MA-41 membranes

Мембрана/ исходная концен- трация сорбтива, М	скорость сорбции, ммоль/(г·мин)	время выхода кинетиче- ской кривой на плато, мин	величина необ- менной сорбции, ммоль/г
Ralex/0.35	0.1132	22	0.18
MA-41/0.35	0.1187	22	0.72
Ralex/0.25	0.0882	34	0.19
MA-41/0.25	0.0692	34	0.72

Таблица 3. Электропроводность мембран Ralex AM(H)-PP и MA-41 в растворах молочной кислоты и коэффициенты диффузии Lac^- в мембране

Table 3. Electrical conductivity of Ralex AM(N)-PP and MA-41 membranes in lactic acid solutions and diffusion coefficients of Lac^- in the membrane

Мембрана/исходная концен- трация раствора молочной кислоты, М	Удельная электропровод- ность ионообменной мембраны, $\text{Om}^{-1} \text{cm}^{-1}$	Коэффициент диффузии Lac^- в мембране, cm^2/c
Ralex/0.35	$(2.55 \pm 0.18) \cdot 10^{-3}$	$2.88 \cdot 10^{-7}$
MA-41/0.35	$(2.23 \pm 0.16) \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-7}$
Ralex/0.25	$(2.53 \pm 0.14) \cdot 10^{-3}$	$2.85 \cdot 10^{-7}$
MA-41/0.25	$(2.10 \pm 0.14) \cdot 10^{-3}$	$2.44 \cdot 10^{-7}$

также может влиять на селективность образцов, в том числе, и увеличивать вклад необменного поглощения слабого электролита.

При концентрациях равновесного раствора молочной кислоты 0.25 и 0.35 моль/дм³ полная обменная емкость мембран не достигается, это значит, что в мембране присутствует два вида противоионов – хлорид Cl^- и лактат Lac^- . Расчет коэффициента диффузии Lac^- в мембране проводили с применением уравнения:

$$k = \frac{F^2}{R \cdot T} \sum_{i=1}^n z_i^2 \cdot \bar{D}_i \cdot \bar{c}_i, \quad (1)$$

где k , \bar{D}_i , \bar{c}_i и z_i – электропроводность мембраны в смешанной Cl^-/Lac^- форме (найдена экспериментально), коэффициент диффузии, концентрация и заряд иона (Cl^- или Lac^-) в мембране соответственно. При этом полагали, что необменно сорбированная молочная кислота не вносит вклад в общую электропроводность мембраны, а проводимость образца определяется только хлоридом и лактатом. Коэффициент диффузии Cl^- в мембране принимали равным $3.8 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{c}$, что найдено

по уравнению Нернста-Эйнштейна из электропроводности мембраны в хлоридной форме. Результаты приведены в табл. 3. В мембранах значения коэффициентов диффузии ионов значительно меньше, чем в растворе [25], что связано с высокой вязкостью полимерного материала и перемещением противоионов в поле заряда фиксированных ионов, плотность которого выше, чем в растворе. Для исследуемых мембран коэффициенты диффузии Lac^- меньше, чем Cl^- . Это можно объяснить разницей их Стоксовых радиусов [25, 26]: $[r_{st}(\text{Cl}^-) = 0.120 \text{ nm}] < [r_{st}(\text{Lac}^-) = 0.236 \text{ nm}]$.

Заключение

Рассмотрена кинетика сорбции молочной кислоты из индивидуальных водных растворов с концентрациями 0.25 и 0.35 моль/дм³ высокоосновными серийно выпускаемыми ионообменными мембранами MA-41 и Ralex AM(H)-PP, имеющими одинаковые функциональные группы, но отличающимися дисперсностью ионообменника, входящего в состав



образцов. Выявлены следующие особенности изучаемого процесса. Необменное поглощение молочной кислоты мембраной МА-41 в 2-3 раза выше, чем мембраной Ralex AM(H)-PP. Это может быть связано как с ростом макропор на поверхности образца, так и с большей неравномерностью распределения фиксированного заряда по объему мембраны по причине меньшей степени дисперсности ионообменника, входящего в ее состав. Последнее приводит к менее действенному доннановскому исключению ко-ионов из фазы мембраны. Наибольшее значение ионообменной сорбции характерно для мембран типа Ralex AM(H)-PP, а величины общей сорбции сопоставимы для растворов одинаковых концентраций, как для МА-41, так и Ralex AM-PP. Проведен расчет коэффициентов диффузии лактат-анионов в ионообменных мембранах по данным электропроводности с учетом найденных сорбционных характеристик мембран. При этом полагали, что электропроводность образцов обеспечивается двумя видами противоионов – хлоридом и лактатом, а обязательно сорбированная молочная кислота

не вносит вклад в общую электропроводность мембраны.

Предложен вариант оценки размера частиц ионита, входящего в состав гетерогенной мембраны. Распределение частиц ионообменника по радиусам оценивается по результатам анализа фотографий, полученных методом оптической микроскопии. Перед микроскопированием мембрану необходимо обработать в растворе индикатора: ионит и полиэтилен имеют близкую светопрозрачность, однако сорбция окрашенных органических веществ позволяет усилить различия в светопрозрачности ионит/полиэтилен и выделить частицы ионита на фоне инертного связующего.

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. Малафеев К.В., Москалюк О.А., Юдин В.Е., Седуш Н.Г. и др. Получение и свойства волокон из сополимера молочной и гликолевой кислот // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2017. Т. 59, № 1. С. 47-52.

2. Фомин В.А., Завражнов С.А. Состояние и направления развития работ по получению биоразлагаемых полимеров из молочной кислоты // *Пластические массы*. 2011. № 5. С. 50-58.

3. Золотарева М.С., Володин Д.Н., Бессонов А.С., Топалов В.К. Электродиализ – наиболее эффективный процесс деминерализации молочной сыворотки // *Молочная промышленность*. 2015. № 3. С. 37-39.

4. Шинкарёв С.М., Аксёнов А.В. Биотехнологический способ получения молочной кислоты. Патент РФ № 2661792, 2018.

5. Хромова Т.А., Родионов Д.А., Лазарев С.И., Полянский К.К. Структурно-кинетические характеристики ультрафильтрационного концентрирования подсырной сыворотки // *Сыроделие и маслоделие*. 2022. № 1. С. 46-49.

6. Родионов Д.А., Лазарев С.И., Полянский К.К., Абоносимов О.А. и др. Изменение структуры потока молочной сыворотки в трубчатом канале ультрафильтрационного элемента // *Сыроделие и маслоделие*. 2021. № 1. С. 42-44.

7. Komesu A, Wolf Maciel M. R., Filho R. M. Separation and purifications technologies for lactic acid – A Brief Review // *Bio-Resources*. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 4364-4383.



8. Ростовцева В.А., Пулялина А.Ю., Дубовенко Р.Р., Сапрыкина Н.Н. и др. Влияние ионной жидкости на транспортные свойства гибридных мембран в процессе дегидратации молочной кислоты // *Мембраны и мембранные технологии*. 2021. Т. 11, № 5. С. 304-312.
9. Овчаренко Е.О., Васильева В.И., Шапошник В.А., Козадерова О.А. и др. Сорбция аминокислот катионообменной мембраной // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2001. Т. 1, № 1. С. 84-90.
10. Козадерова О.А., Шапошник В.А. Кинетические характеристики ионообменной мембраны в растворах аминокислот // *Электрохимия*. 2004. Т. 40, № 7. С. 798-804.
11. Козадерова О.А., Калинина С.А., Моргачева Е.А., Нифталиев С.И. Сорбционные характеристики и диффузионная проницаемость анионообменной мембраны МА-41 в растворах молочной кислоты // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2021. Т. 21, № 3. С. 317-325.
12. Селеменев В.Ф., Славинская Г.В., Хохлов В.Ю. Практикум по ионному обмену. Воронеж. Воронеж. гос. ун-т. 2004. 160 с.
13. Васильев В.П. Аналитическая химия. В 2 ч. Ч. 2. Физико-химические методы анализа. М. Высшая школа. 1989. 384 с.
14. Шапошник В.А., Васильева В.И., Григорчук О.В. Явления переноса в ионообменных мембранах. М. МФТИ. 2001. 200 с.
15. ООО ИП Щекиноазот. Режим доступа: <http://www.azotom.ru/monopolyarnye-membrany> (дата обращения: 8.03.2022)
16. АО МЕГА. Режим доступа: <https://www.mega.cz/membranes/> (дата обращения: 8.03.2022)
17. ГОСТ 4919.1-2016 Реактивы и особо чистые вещества. Методы приготовления растворов индикаторов. М.: Стандартинформ. 2018. 30 с.
18. Nebavskaya K.A., Sarapulova V.V., Sabbatovskiy K.G., Sobolev V.D. et al. Impact of ion exchange membrane surface charge and hydrophobicity on electroconvection at underlimiting and overlimiting currents // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 523. P. 36-44.
19. Sarapulova V.V., Nevakshenova E.E., Nebavskaya X.A. et al. Characterization of bulk and surface properties of anion-exchange membranes in initial stages of fouling by red wine // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 559. P. 170-182.
20. Vasil'eva V.I., Akberova E.M., Zhiltsova A.V., Chernykh E.I., Sirota E.A., Agapov B.L. Sem diagnostics of the surface of mk-40 and ma-40 heterogeneous ion-exchange membranes in the swollen state after thermal treatment // *Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2013. Vol. 7, no 5. P. 833-840.
21. Акберова Э.М., Яцев А.М., Кожухова Е.Ю., Васильева В.И. Микроскопический анализ поверхности гетерогенных мембран с разной степенью дисперсности ионообменника после температурного воздействия // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017. Т. 19. № 2. С. 158-165.
22. Заболоцкий В.И., Никоненко В.В. Перенос ионов в мембранах. М. Наука, 1996. 392 с.
23. Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б., Матчина К.С. Изучение процесса переноса тока в системе гетерогенная ионообменная мембрана-раствор нитрата аммония // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2016. Т. 18, № 2. С. 232-240.
24. Васильева В.И., Письменская Н.Д., Акберова Э.М., Небавская К.А. Влияние термохимического воздействия на морфологию и степень гидрофобности поверхности гетерогенных ионообменных мембран // *Журнал физической химии*. 2014. Т. 88, № 7-8. С. 1114-1120.
25. Волков А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. Минск. Современная школа. 2005. 608 с.

26. Дамаскин, Б. Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирилина. М. Химия. 2001. 624 с.

References

1. Malafeev K.V., Moskalyuk O.A., Yudin V.E. et al. Synthesis and properties of fibers prepared from lactic acid-glycolic acid copolymer. *Polymer Science, Series A*. 2017; 59 (1): 53-57. <https://doi.org/10.1134/S0965545X17010096>

2. Fomin V.A., Zavrazhnov S.A. Sostoyanie i napravleniya razvitiya rabot po polucheniyu biorazlagaemykh polimerov iz molochnoi kisloty. *Plasticheskie massy*. 2011; 5: 50-58. (In Russ.)

3. Zolotareva M.S., Volodin D.N., Besonov A.S., Topalov V.K. Elektrodializ – naibolee effektivnyi protsess demineralizatsii molochnoi syvorotki. *Molochnaya promyshlennost'*. 2015; 3: 37-39. (In Russ.)

4. Shinkarev S.M., Aksenov A.V. Biotechnological method of obtaining lactic acid Patent RF, no. 2661792, 2018.

5. Khromova T.A., Rodionov D.A., Lazarev S.I., Polyansky K.K. Structural and kinetic characteristics of cheese whey. *Cheesemaking and buttermaking*. 2022; 1: 46-49. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2022-1-46-48>. (In Russ.)

6. Rodionov D.A., Lazarev S.I., Polyansky K.K., Abonosimov O.A., Polushkin D.L. Changing the structure of the whey flow in the tubular channel of the ultrafiltration element. *Cheesemaking and buttermaking*. 2021; 1: 42-44. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2021-42-44>. (In Russ.)

7. Komesu A., Wolf Maciel M.R., Filho R.M. Separation and purifications technologies for lactic acid – A Brief Review. *BioResources*. 2017; 12 (2): 4364-4383. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.Komesu>.

8. Rostovtseva V.A., Pulyalina A. Yu., Dubovenko R.R., Saprykina N.N., Vinogradova L.V., Polotskaya G.A. Influence of ionic liquid on transport properties of hybrid

membranes in the lactic acid dehydration process. *Membranes and Membrane Technologies*. 2021; 3 (5): 274-281. <https://doi.org/10.1134/S2517751621050103>

9. Ovcharenko E.O., Vasil'eva V.I., Shaposhnik V.A., Kozaderova O.A. Sorbtziya aminokislot kationoobmennoi membranoi. *Sorbtionnye I khromatograficheskie protsessy*. 2001; 1(1): 84-90. (In Russ.)

10. Kozaderova O.A., Shaposhnik V.A. Kinetic parameters of ion-exchange membrane in amino acid solutions. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2004; 40 (7): 698-703. <https://doi.org/10.1023/B:RUEL.0000035251.04661.f7>

11. 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. *Sorbtionnye I khromatograficheskie protsessy*. 2021; 21 (3): 317-325. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3465> (In Russ.)

12. Selemenev V.F., Slavinskaya G.V., Khokhlov V.Yu. Praktikum po ionnomu obmenu. Voronezh, 2004, 160 p. (In Russ.)

13. Vasil'ev V.P. Analiticheskaya khimiya. V 2 ch. Ch. 2. Fiziko-khimicheskie metody analiza. Moskva. Vysshaya shkola, 1989, 384 p. (In Russ.)

14. Shaposhnik, V.A., Vasil'eva V.I., Grigorchuk O.V. Yavleniya perenosa v ionoobmennykh membranakh. M. MPhTI, 2001. 200 p. (In Russ.)

15. ООО IP Shchekinoazot. <http://www.azotom.ru/monopolyarnye-membrany>.

16. АО MEGA. <https://www.mega.cz/membranes/>.

17. GOST 4919.1-2016 Reaktivy i osobochistye veshchestva. Metody prigotovleniya rastvorov indikatorov. M.: Standartinform, 2018, 30 p.

18. Nebavskaya, K.A., Sarapulova V.V., Sabbatovskiy K.G., Sobolev V.D. [et al.]. Impact of ion exchange membrane surface charge and hydrophobicity on electroconvection at underlimiting and overlimiting



- currents. *Journal of Membrane Science*. 2017; 523: 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.09.038>
19. Sarapulova V.V., Nevakshenova E.E., Nebavskaya X.A. et al. Characterization of bulk and surface properties of anion-exchange membranes in initial stages of fouling by red wine. *Journal of Membrane Science*. 2018; 559: 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.04.047>
20. Vasil'eva V.I., Akberova E.M., Zhiltsova A.V., Chernykh E.I., Sirota E.A., Agapov B.L. Sem diagnostics of the surface of mk-40 and ma-40 heterogeneous ion-exchange membranes in the swollen state after thermal treatment. *Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2013; 7 (5): 833-840. <https://doi.org/10.1134/S1027451013050194>
21. Akberova E.M., Yatsev A.M., Kozhukhova E.Yu., Vasil'eva V.I. Microscopic analysis of the surface of heterogeneous membranes with a different degree of ion exchanger dispersity after temperature influence. *Condensed matter and interphases*. 2017; 19 (2). 158-165. (In Russ.)
22. Zabolotsky V.I., Nikonenko V.V. Ion transport in membranes. M. Nauka, 1996. 392 p. (In Russ.)
23. Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Matchina K.S. Izuchenie protsessa perenosa toka v sisteme geterogennaya ionoobmennaya membrana-rastvor nitrata ammoniya. *Condensed matter and interphases*. 2016; 18 (2). 232-240. (In Russ.)
24. 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>
25. Volkov A. I. Bol'shoi khimicheskii spravochnik / A. I. Volkov, I. M. Zharskii. Minsk Sovremennaya shkola, 2005. 608 p.
26. Damaskin, B. B. Elektrokimiya / B. B. Damaskin, O. A. Petrii, G. A. Tsirlina. – M. Khimiya, 2001. 624 p.

Информация об авторах / Information about the authors

О.А. Козадеров – д.х.н, заведующий кафедрой физической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

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

В.Ю. Чернова – студент Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, Россия

O.A. Kozaderov – DSc in Chemistry, Head of the Physical Chemistry Department, Department of Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: ok@chem.vsu.ru

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

V.Yu. Chernova – Student of Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia, e-mail: vikyart33@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 21.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 11.12.2022; approved after reviewing 21.12.2022; accepted for publication 28.12.2022.