



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.6

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11705

Электропроводность гетерогенных ионообменных мембран в растворах моно-, ди- и трикарбоновых кислот и ее влияние на процесс электродиализа растворов, содержащих органические кислоты

**Елена Николаевна Носова¹, Денис Геннадьевич Колот²,
Станислав Сергеевич Мельников^{1✉}, Михаил Владимирович Шарафан¹**

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, melnikov.stanislav@gmail.com✉

²Saybolt (АО «Петролеум аналитс»), Москва, Россия

Аннотация. В настоящей работе исследована электропроводность катионообменных и анионообменных мембран, в растворах, содержащих как сильные (хлорид и ацетат натрия), так и слабые (уксусная, янтарная и лимонная кислоты) электролиты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что концентрационная зависимость электропроводности мембран в слабых электролитах существенно отличается от наблюдаемой для растворов сильных электролитов. В случае раствора уксусной кислоты электропроводность мембран выше, чем у равновесного раствора во всём диапазоне исследуемых концентраций. Показано, что существующие модели транспортно-структурной организации мембран позволяют описать структурные параметры ионообменных мембран, находящихся в контакте с сильными электролитами. В растворах хлорида натрия и ацетата натрия, полученные зависимости были обработаны в рамках микрогетерогенной и трёхпроводной моделей для установления влияния природы электролита на транспортно-структурные характеристики мембран. Зависимость электропроводности от концентрации раствора слабого электролита не позволяет применять ни микрогетерогенную, ни расширенную трёхпроводную модели для описания зависимости структура-свойства ионообменных материалов. Показано, что в растворе уксусной и частично янтарной кислоты основной вклад в сопротивление электромембранной системы вносит раствор. На основании полученных результатов по измерению электропроводности предложены изменения в конструкции лабораторного электродиализатора и проведены опыты по обессоливанию раствора уксусной кислоты. Показано, что использование более тонких межмембранных сепараторов в камере обессоливания приводит к увеличению интегрального выхода по току (с 0.32 до 0.44 при 0.6 А/дм² и той же степени опреснения) и снижению удельных энергозатрат (с 3.0 до 1.9 кВт·ч/моль при 0.6 А/дм²) при опреснении уксусной кислоты. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для улучшения параметров процесса получения слабых кислот методом биполярного электродиализа.

Ключевые слова: ионообменная мембрана, электрическая проводимость, электродиализ, органическая кислота.

Благодарности: исследование выполнено за счёт средств министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZEN-2023-0006

Для цитирования: Носова Е.Н., Колот Д.Г., Мельников С.С., Шарафан М.В. Электропроводность гетерогенных ионообменных мембран в растворах моно-, ди- и трикарбоновых кислот и ее влияние на процесс электродиализа растворов, содержащих органические кислоты // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 780-788. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11705>



Original article

Electrical conductivity of heterogeneous ion exchange membranes in solutions of mono-, di- and tricarboxylic acids and its effect on the process of electro dialysis of solutions containing organic acids

Elena N. Nosova¹, Denis G. Kolot², Stanislav S. Melnikov^{1✉}, Mikhail V. Sharafan¹

¹Kuban State University, Krasnodar, Russia, melnikov.stanislav@gmail.com✉

²Saybolt (JSC Petroleum Analysts), Moscow, Russia

Abstract. In this study, the electrical conductivity of cation-exchange and anion-exchange membranes was studied in solutions containing both strong (sodium chloride and acetate) and weak (acetic, succinic and citric acids) electrolytes. The results obtained indicate that the concentration dependence of the electrical conductivity of membranes in weak electrolytes differs significantly from that observed for solutions of strong electrolytes. In the case of an acetic acid solution, the electrical conductivity of the membranes is higher than that of the equilibrium solution over the entire range of concentrations that were studied. It has been shown that existing models of the transport and structural organization of membranes allows describing the structural parameters of ion-exchange membranes in contact with strong electrolytes. In sodium chloride and sodium acetate solutions, the obtained dependences were processed within the framework of microheterogeneous and three-wire models to establish the influence of the nature of the electrolyte on the transport and structural characteristics of the membranes. The dependence of electrical conductivity on the concentration of a weak electrolyte solution does not allow the use of either microheterogeneous or extended three-wire models for the description of the structure-property relationship of ion-exchange materials. It has been shown that in acetic acid and partially succinic acid solutions, the solution provides the main contribution to the resistance of the electromembrane system. Based on the results obtained from measuring electrical conductivity, changes in the design of a laboratory electro dialyzer were proposed and experiments were carried out on desalting a solution of acetic acid. It has been shown that the use of thinner intermembrane separators in the desalting chamber leads to an increase in the integral current efficiency (from 0.32 to 0.44 at 0.6 A/dm² and the same degree of desalination) and a reduction in specific energy consumption (from 3.0 to 1.9 kWh/mol at 0.6 A/dm²) during desalination of acetic acid. The results obtained can be further used to improve the parameters of the process of obtaining weak acids by bipolar electro dialysis.

Keywords: ion exchange membrane, electrical conductivity, electro dialysis, organic acid.

Acknowledgements: the research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FZEN-2023-0006

For citation: Nosova E.N., Kolot D.G., Melnikov S.S., Sharafan M.V. Electrical conductivity of heterogeneous ion exchange membranes in solutions of mono-, di- and tricarboxylic acids and its effect on the process of electro dialysis of solutions containing organic acids. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2023. 23(5): 780-788. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11705>

Введение

Электро dialиз – это электро мембранный метод разделения веществ с помощью электрического поля для удаления заряженных частиц из раствора. Ионные компоненты проходят через селективные ионообменные мембраны, которые переносят только анионы (анионообменные) или катионы (катионообменные). Это дешевый и экологически безопасный метод [1], который применяют в водоподготовке, очистке сточных вод, синтезе кис-

лот и оснований [2], переработке органических растворов (например, выделение молочной кислоты [3,4], стабилизация вина [5], кондиционирование соков [6] и предконцентрирование ферментационных бульонов [7]). Обзор методов выделения кислот приведен в работе [8].

Изменение свойств ионообменных мембран при контакте с растворами, содержащими слабые электролиты, было отмечено несколькими исследователями [9,10], включая работы Котова В.В. и Шапошника В.А. [11,12], которые были од-

ними из первых российских ученых, обративших на это внимание. В таких растворах проводимость гелевой фазы намного выше проводимости электронейтрального раствора [10]. Также необходимо учитывать возможность протекания химических реакций, например, протонирования/депротонирования анионов слабых кислот [13,14] из-за смещения показателя рН внутри мембраны. Такие реакции могут приводить к кажущемуся ускорению реакции диссоциации воды на границе мембрана/раствор [15].

Повысить эффективность электродиализного процесса можно используя мембраны с наиболее оптимальными свойствами для конкретного процесса. Создание новых мембранных материалов – это достаточно сложный и дорогостоящий процесс, поэтому привлекательным выглядит возможность подбора оптимальных параметров проведения процесса для наилучшего использования имеющихся материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование электропроводности ионообменных мембран в растворах, содержащих органические кислоты, и улучшение характеристик электродиализной переработки модельного раствора, содержащего уксусную кислоту.

Экспериментальная часть

Материалы. В качестве объектов исследования были выбраны гетерогенные ионообменные мембраны МК-40, МА-41 (Щекиноазот, Россия) и Ralex CM, Ralex AMN (Mega a.s., Чехия). Физико-химические характеристики мембран, представленные изготовителями приведены в таблице 1.

Методы исследования. Для изучения электропроводности мембран использовали ртутно-контактный метод [16]. Для получения значения сопротивления использовали импедансметр Parstat 4000. Спектр электрохимического импеданса мембраны изучали при нулевой постоянной токовой составляющей и амплитуде

переменного тока 100 мкА в диапазоне от 500 кГц до 10 Гц. Активное сопротивление мембраны получали методом экстраполяции линейного участка спектра в высокочастотной области на ось действительных значений. Изучение электропроводности ионообменных мембран проводили в растворах хлорида и ацетата натрия, а также уксусной, янтарной и лимонной кислотах.

Исследование процесса электродиализного обессоливания уксусной кислоты проводилось на лабораторном электродиализаторе. Мембранный пакет электродиализатора содержал пять элементарных ячеек, образованных чередующимися анионо- и катионообменными мембранами Ralex (таблица 1). Рабочая площадь каждой мембраны составляла 5×12.5 см². Испытания проводились в циркуляционном режиме с заданной силой тока в диапазоне 0.1-0.6 А. Раствор уксусной кислоты с концентрацией 0.6% (0.1 моль/дм³) использовался в объемах по 1 и 0.5 дм³ для камер обессоливания и концентрирования. В приэлектродной камере циркулировал раствор серной кислоты с концентрацией 0.5 моль/дм³. Межмембранное расстояние в камере концентрирования было одинаковым (0.9 мм), а в камере обессоливания изменялось в пределах 0.5, 0.9 или 1.9 мм. Линейные скорости потока раствора составляли 3.6 см/с для канала шириной 0.5 мм, 3.6 и 2.9 см/с для канала шириной 0.9 мм и 1.6 см/с для канала шириной 1.9 мм. Скорость потока жидкости через электродные камеры была постоянной (20 дм³/ч).

Контролируемыми величинами являлись: напряжение на электродиализном модуле, а также концентрация уксусной кислоты. Концентрацию кислоты определяли методом потенциометрического титрования на автотитраторе (TitroLine 7750-Titrisoft, Германия: диапазон/дискретность/точность измерений рН:

Таблица 1. Физико-химические параметры исследуемых мембран
 Table 1. Physicochemical parameters of the studied membranes

Мембрана	Ralex CM	Ralex AMH	МК-40	МА-41
Ионогенная группа	-SO ₃ ⁻	-N ⁺ (CH ₃) ₃	-SO ₃ ⁻	-N ⁺ (CH ₃) ₃
Ионит	—	—	KY-2-8	AB-17-8
Инертное связующее	Полиэтилен			
Армирующая ткань	Полиэстер		Капрон	
Ионообменная ёмкость*, ммоль/г-наб	1.12±0.05	0.86±0.05	1.08±0.05	0.91±0.05
Число переноса, %	>0.95	>0.95	>0.8	>0.94
Влагосодержание* W, %	44±5	45±4	33±7	36±5
Толщина в набухшем состоянии*, мкм	520±5	550±5	540±5	430±5

*измерено в данной работе для конкретного образца мембраны

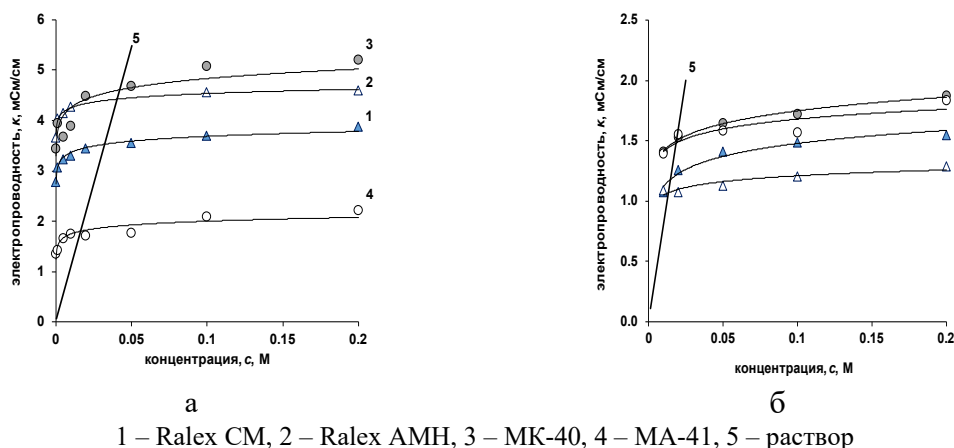


Рис.1. Концентрационная зависимость электропроводности ионообменных мембран в растворе хлорида натрия (а) и ацетата натрия (б)

Fig. 1. Concentration dependence of the electrical conductivity of ion-exchange membranes in a solution of sodium chloride (a) and sodium acetate (b)

-4...18 / 0.001/ ±0.002.). Аликвоту объемом 5 см³ титровали 0.1 моль/дм³ раствором гидроксида натрия с использованием микробюретки (объем 10 см³, шаг 0.05 см³). По полученной зависимости рН от объема титранта рассчитывалась дифференциальная кривая титрования. Перегиб на кривой титрования (скачок на дифференциальной кривой) соответствует объему, израсходованному на титрование слабой кислоты. Каждое титрование повторялось три раза. Расхождение объемов титранта между параллельными экспериментами не превышало 0.05 см³.

Обсуждение результатов

Электропроводность. Результаты измерения электропроводности изучаемых мембран в растворах хлорида натрия и ацетата приведены на рисунке 1. Концентрационная зависимость электропроводности ионообменных мембран позволяет установить некоторые из транспортно-структурных характеристик мембран. Расширенная трёхпроводная модель [17] описывает зависимость электропроводности ионообменной мембраны от концентрации раствора и включает фазы геля, электронейтрального раствора и

Таблица 2. Параметры расширенной трёхпроводной и микрогетерогенной моделей найденные из концентрационной зависимости электропроводности ионообменных мембран в растворе хлорида натрия и ацетата натрия

Table 2. Parameters of the extended three-wire and microheterogeneous models found from the concentration dependence of the electrical conductivity of ion-exchange membranes in a solution of sodium chloride and sodium acetate

Модель	Параметр	NaCl				CH ₃ COONa			
		Ralex CM	Ralex AMH	МК-40	МА-41	Ralex CM	Ralex AMH	МК-40	МА-41
Трёхпроводная	<i>a</i>	0.15	0.10	0.30	0.29	0.64	0.21	0.21	0.25
	<i>b</i>	0.85	0.90	0.68	0.69	0.35	0.78	0.78	0.75
	<i>c</i>	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
	<i>d</i>	0.34	0.25	0.48	0.15	0.34	0.46	0.48	0.39
	<i>e</i>	0.66	0.75	0.52	0.85	0.66	0.54	0.52	0.61
	<i>f</i> ₂	0.05	0.03	0.16	0.14	0.22	0.10	0.11	0.10
Микрогетерогенная [10]	<i>α</i>	0.3	0.2	0.5	0.1	0.2	0.4	0.5	0.4
	<i>f</i> ₂	0.03	0.04	0.16	0.14	0.12	0.06	0.10	0.08
	<i>α</i>	0.3	0.4	0.5	0.6	-	-	-	-

смешанной проводимости. Последняя учитывает перенос ионов через гранулы ионообменника и раствор между ними.

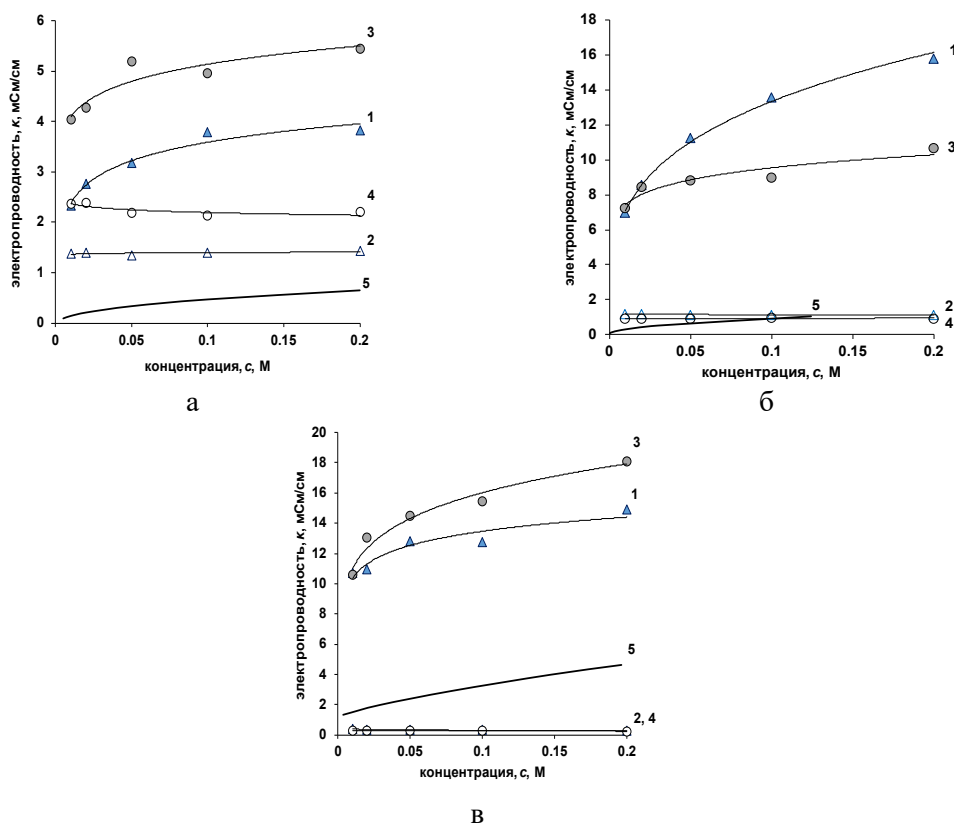
Транспортно-структурные параметры, найденные из концентрационной зависимости электропроводности мембран, в рамках расширенной трёхпроводной модели приведены в таблице (табл. 2). Также в таблице представлены данные полученные ранее [10] в рамках микрогетерогенной модели.

Параметр *f*₂, найденный с помощью расширенной трёхпроводной модели, соответствует результатам, полученным с использованием микрогетерогенной модели [10,18] для мембран Ralex. Меньшая доля электронейтрального раствора объясняется более гомогенной структурой мембран Ralex. Для мембран МК-40 и МА-41 тоже характерен незначительный вклад переноса через электронейтральный раствор, но доля переноса через смешанный канал выше из-за возможного отсутствия контакта между частицами ионита в мембране.

В растворе ацетата натрия электропроводности исследуемых мембран становятся сравнимы (рис. 16). Доля электронейтрального раствора для мембран Ralex увеличивается (СМ – 340%;

АМН – 233 %), а для МК-40 и МА-41 незначительно уменьшается (31% и 29%) при уравнивании с раствором ацетата натрия (табл. 2).

В растворах органических кислот электропроводность катионообменных мембран в несколько раз превышает электропроводность анионообменных мембран и/или равновесного раствора (рис. 2). Высокая электропроводность катионообменных мембран, уравниваемых с растворами неорганических кислот, хорошо известна и объясняется высокой подвижностью ионов водорода в мембранной фазе по сравнению с другими ионами. Следует также учитывать особенности взаимодействия ионообменных мембран с растворами слабых электролитов. Из-за электростатических взаимодействий между ионами электролита и фиксированными группами мембраны степень диссоциации органической кислоты в фазе геля существенно увеличивается и, вероятно, достигает 100%. В результате внутри гелевой фазы равновесие смещено в сторону ионов – продуктов диссоциации органической кислоты. При этом из-за действия доннановского исключения появляющиеся анионы выводятся из



1 – Ralex CM, 2 – Ralex AMH, 3 – МК-40, 4 – МА-41, 5 – раствор электролита

Рис. 2. Концентрационная зависимость электропроводности ионообменных мембран в растворе уксусной кислоты (а), янтарной кислоты (б), лимонной кислоты (в)
 Fig. 2. Concentration dependence of the electrical conductivity of ion-exchange membranes in a solution of acetic acid (a), succinic acid (b), citric acid (c)

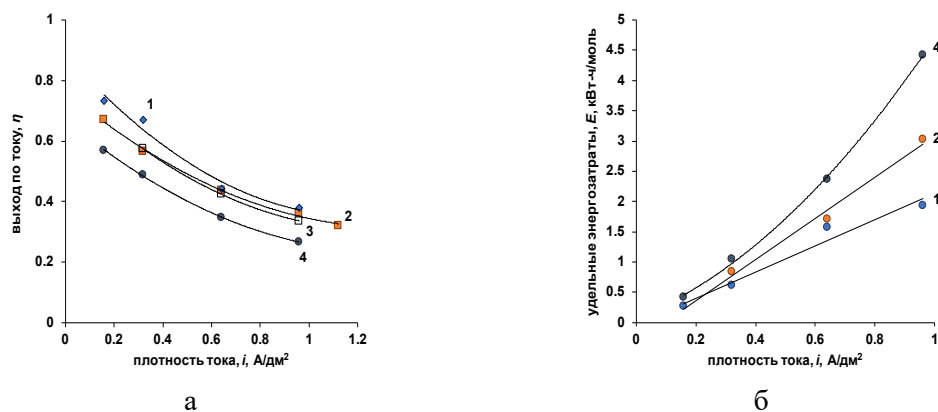
фазы геля, за счёт чего в электро-нейтральном растворе равновесие наоборот смещается в сторону молекулярной формы кислоты.

Электропроводность раствора зависит от основности кислоты: уксусная кислота обладает меньшей проводимостью, чем ионообменные мембраны, янтарная кислота – в разбавленных растворах проводит хуже, чем ионообменные мембраны, лимонная кислота проявляет более высокую проводимость, чем анионообменные мембраны. В растворах органических кислот проводимость анионообменных мембран снижается с увеличением основности, из-за увеличения количества ионных пар анион-ионогенная группа.

Изучение электропроводности мембран и растворов органических кислот показывает, что влияние на сопротивление системы оказывают не мембраны, а

растворы кислот. Это верно и для разбавленных растворов янтарной кислоты. При электродиализе основной вклад в сопротивление дает раствор в камере обессоливания. Для эффективности процесса нужно уменьшить межмембранное расстояние в этой камере.

Электродиализ. Результаты проведения электродиализа показывают, что при наименьшей плотности тока (0.16 A/dm^2) для различных межмембранных расстояний изменение концентрации уксусной кислоты в тракте обессоливания носит линейный характер. Увеличение плотности тока приводит к сокращению времени электродиализа, одновременно с этим наблюдается снижение скорости обессоливания по достижению концентрации раствора уксусной кислоты около 0.01 M .



Толщина камеры обессоливания, мм: 1 – 0.5 (3.3 см/с), 2 – 0.9 (3.3 см/с), 3 – 0.9 (2.9 см/с), 4 – 1.9 (1.6 см/с)

Рис. 3. Зависимость выходов по току по камере обессоливания электродиализатора (а) и удельных энергозатрат (б) от плотности тока

Fig. 3. Dependence of the current outputs for the desalination chamber of the electro dialyzer (a) and specific energy consumption (b) on the current density

Полученные данные позволяют рассчитать выходы по току и удельные энергозатраты [19] (рис. 3). Уменьшение межмембранного расстояния с 0.9 до 0.5 мм позволяет увеличить выход по току на 10-20 % при плотностях тока 0.16 и 0.32 А/дм², при дальнейшем увеличении плотности тока существенной разницы между опытами при межмембранном расстоянии 0.5 и 0.9 мм не наблюдается. Также не наблюдается существенного влияния линейной скорости потока раствора при межмембранном расстоянии 0.9 мм. Использование больших межмембранных расстояний приводит к снижению удельных характеристик процесса.

Наибольший эффект от использования тонких межмембранных сепараторов наблюдается при расчёте удельных энергозатрат на удаление уксусной кислоты из раствора. Уменьшение межмембранного расстояния с 0.9 до 0.5 мм при одинаковой линейной скорости потока раствора позволяет снизить удельные энергозатраты с 3 до 1.9 кВт-ч/моль (снижение на 36%). Лимитирующим фактором, препятствующим дальнейшему уменьшению толщины камеры обессоливания, является рост энергозатрат на прокачку раствора по узкому каналу, который может нивелировать наблюдаемое уменьшение энергозатрат на перенос вещества.

Заключение

В ходе работы были приведены результаты изучения концентрационных зависимостей электропроводности и диффузионной проницаемости ионообменных мембран, находящихся в контакте с раствором уксусной кислоты. Выявлен ряд особенностей, отличающих транспортно-структурные параметры мембран, находящихся в контакте с раствором содержащих органические анионы от их характеристик в растворах сильных электролитов: при контакте с растворами карбоновых кислот электропроводность ионообменных мембран выше электропроводности раствора; в растворах карбоновых кислот анионообменные мембраны проявляют характеристики присутствующие гомогенным мембранам; невозможно применить известные модельные подходы (микрорегетерогенную модель и расширенную трёхпроводную модель) для описания транспортно-структурных характеристик ионообменных мембран, находящихся в контакте с растворами карбоновых кислот.

На основании полученных результатов внесены изменения в конструкцию электродиализатора, предназначенного для обессоливания растворов. Получены



результаты работы аппарата электродиализа при различной толщине каналов камеры опреснения. Увеличение межмембранного расстояния и снижение линейной скорости протока раствора уменьшает теоретическую предельную плотность тока. С практической точки зрения известно, что большие выходы по току будут наблюдаться для систем с мень-

шим отношением величины поляризующей плотности тока к предельной плотности тока.

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/References

1. Cournoyer A., Bazinet L. Electrodialysis Processes an Answer to Industrial Sustainability: Toward the Concept of Eco-Circular Economy? –A Review. *Membranes (Basel)*. 2023; 13: 205. <https://doi.org/10.3390/membranes13020205>
2. Strathmann H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*. 2010; 264: 268-288. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.069>
3. Gyo Lee E., Moon S.H., Keun Chang Y., Yoo I.K., Nam Chang H. Lactic acid recovery using two-stage electrodialysis and its modelling. *J. Memb. Sci.* 1998; 145: 53-66. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00065-9)
4. Pleissner D., Schneider R., Venus J., Koch T. Separation of lactic acid and recovery of salt-ions from fermentation broth. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2017; 92: 504-511. <https://doi.org/10.1002/jctb.5023>
5. Ibeas V., Correia A.C., Jordão A.M. Wine tartrate stabilization by different levels of cation exchange resin treatments: impact on chemical composition, phenolic profile and organoleptic properties of red wines. *Food Res. Int.* 2015; 69: 364-372. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2015.01.003>
6. Rozoy E., Boudesocque L., Bazinet L. Deacidification of Cranberry Juice by Electrodialysis with Bipolar Membranes. *J. Agric. Food Chem.* 2015; 63: 642-651. <https://doi.org/10.1021/jf502824f>
7. Moresi M., Sappino F. Electrodialytic recovery of some fermentation products from model solutions: Techno-economic feasibility study. *J. Memb. Sci.* 2000; 164: 129-140. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00186-6)
8. Handojo L., Wardani A.K., Regina D., Bella C., Kresnowati M.T.A.P.A.P., Wenten I.G. Electro-membrane processes for organic acid recovery. *RSC Adv.* 2019; 9: 7854-7869. <https://doi.org/10.1039/C8RA09227C>
9. 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>
10. Melnikov S., Kolot D., Nosova E., Zabolotskiy V. Peculiarities of transport-structural parameters of ion-exchange membranes in solutions containing anions of carboxylic acids. *J. Memb. Sci.* 2018; 557: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.04.017>
11. Isaev N.I., Kotov V.V., SHaposhnik V.A. Podvizhnost' organicheskikh anionov v anionoobmennyyh sistemah. *Elektrokhimiya*. 1971; 7: 908-911. (In Russ.)
12. Kotov V.V., Isaev N.I., SHaposhnik V.A. Perenos slabyyh elektrolitov cherez ionoobmennyye membrany. *ZHurnal Fizicheskoy Himii*. 1972; 46: 539-540. (In Russ.)
13. Pismenskaya N.D., Melnikova E.D., Rybalkina O.A., Nikonenko V.V. The Impact of Long-Time Operation of an Anion-Exchange Membrane AMX-Sb in the Electrodialysis Desalination of Sodium Chloride Solution on the Membrane



Current-Voltage Characteristic and the Water Splitting Rate. *Membr. Membr. Technol.* 2019; 1: 88-98. <https://doi.org/10.1134/s2517751619020070>

14. Melnikov S.S., Nosova E.N., Melnikova E.D., Zabolotsky V.I. Reactive separation of inorganic and organic ions in electrodialysis with bilayer membranes. *Sep. Purif. Technol.* 2021; 268: 118561. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118561>

15. Simons R., Khanarian G. Water dissociation in bipolar membranes: Experiments and theory. *J. Membr. Biol.* 1978; 38: 11-30. <https://doi.org/10.1007/BF01875160>

16. Karpenko L.V., Demina O.A., Dvorkina G.A., Parshikov S.B., Larchet C., Auclair B., Berezina N.P. Comparative Study of Methods Used for the Determination of Electroconductivity of Ion-Exchange Membranes. *Russ. J. Electrochem.* 2001; 37: 287-293.

17. Demina O.A., Kononenko N.A., Falina I.V. New approach to the

characterization of ion-exchange membranes using a set of model parameters. *Pet. Chem.* 2014; 54: 515-525. <https://doi.org/10.1134/S0965544114070032>

18. Davydov D., Nosova E., Loza S., Achoh A., Korzhov A., Sharafan M., Melnikov S. Use of the Microheterogeneous Model to Assess the Applicability of Ion-Exchange Membranes in the Process of Generating Electricity from a Concentration Gradient. *Membranes (Basel)*. 2021; 11: 406.

<https://doi.org/10.3390/membranes11060406>

19. Kovalev N.V., Karpenko T.V., Sheldeshov N.V., Zabolotskii V.I. Ion Transport through a Modified Heterogeneous Bipolar Membrane and Electromembrane Recovery of Sulfuric Acid and Sodium Hydroxide from a Sodium Sulfate Solution. *Membr. Membr. Technol.* 2020; 2: 391-398. <https://doi.org/10.1134/S2517751620060050>

Информация об авторах / Information about the authors

Е.Н. Носова – аспирант кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Д.Г. Колот – эксперт АО «Петролеум аналитс», Москва, Россия

С.С. Мельников – к.х.н., доцент кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

М.В. Шарафан – к.х.н., проректор по научной работе и инновациям, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

E.N. Nosova – the postgraduate student, Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russia, e-mail: nosova.el@inbox.ru

D.G. Kolot – expert, JSC “Petroleum analysts”, Moscow, Russia, e-mail: denis.colot@yandex.ru

S.S. Melnikov – Ph.D., Associate Professor, Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russia, e-mail: melnikov.stanislav@gmail.com

M.V. Sharafan – Ph.D., Vice-Rector for Research and Innovation, Kuban State University, Krasnodar, Russia, e-mail: nts@kubsu.ru

Статья поступила в редакцию 28.06.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; принята к публикации 04.10.2023.

The article was submitted 28.06.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 04.10.2023.