

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 541.183.12:547.466:621.359.7

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11107>

Органическое отравление анионообменной и биполярной мембран при разделении аминокислоты и сахарозы методом электродиализа

А. Ю. Харина , О. Е. Чарушина, Т. В. Елисеева

Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано поведение анионообменной мембраны МА-41 и биполярной мембраны МБ-2 во времени в ходе электродиализа раствора, содержащего тирозин и сахарозу. Установлены изменения вольт-амперных, транспортных, а также структурных характеристик ионообменных мембран. Исследование эволюции характеристик мембран при длительном контакте с растворами, содержащими ароматическую аминокислоту и дисахарид, направлено на углубление понимания и поиск решений проблемы органического отравления мембран, осложняющего электромембранное разделение компонентов раствора микробиологического синтеза аминокислот.

Обнаружено, что потоки тирозина и сахарозы через мембрану МА-41, измеренные после ее работы при электродиализе в течение 50 часов, достигают больших значений, чем в первые часы эксплуатации после установления стационарного состояния в системе. Однако отмечено, что последующее более длительное использование приводит к снижению потоков компонентов через мембрану МА-41, явно выраженному в интенсивном токовом режиме.

Такое снижение массопереноса, а также обнаруженное увеличение падения напряжения на мембранах МБ-2, МА-41 и уменьшение достигаемых значений эффективного числа переноса ионов OH^- для мембраны МА-41 связаны с явлением органического отравления, подтверждаемого выявленными структурными изменениями ионообменного материала, которые становятся значимыми после длительного контакта (более 60 часов) со смешанным раствором тирозина и сахарозы и связаны с накоплением аминокислоты и продукта ее окисления – 3,4-дигидроксибензилаланина в фазе мембраны, а также с уменьшением содержания сахарозы, сорбированной мембраной.

Ключевые слова: электродиализ, разделение, ионообменная мембрана, тирозин, сахароза, органическое отравление

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-29-01480.

ИК-спектры образцов мембран получены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

URL: <http://ckp.vsu.ru>.

Для цитирования: Харина А. Ю., Чарушина О. Е., Елисеева Т. В. Органическое отравление анионообменной и биполярной мембран при разделении аминокислоты и сахарозы методом электродиализа. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 268–276. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11107>

For citation: 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 electrodialysis. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 268–276. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11107>

 Харина Анастасия Юрьевна, e-mail: aukharina@gmail.com

© Харина А. Ю., Чарушина О. Е., Елисеева Т. В., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Аминокислоты широко востребованы в виде чистых соединений в пищевой, медицинской, фармацевтической промышленности и биотехнологии. Они находят применение в качестве пищевых добавок, таких как приправы и ароматизаторы, в качестве кормовых добавок для стимулирования роста и в качестве фармацевтических препаратов для лечения различных заболеваний. Спрос на аминокислоты продолжает расти. В настоящее время L-аминокислоты производятся путем ферментации микроорганизмами, при этом последующая обработка и извлечение из ферментационных бульонов часто сложны и неэффективны [1, 2].

Для извлечения аминокислот перспективны мембранные технологии. Возможности их внедрения во многом определяются широким рядом используемых материалов для изготовления мембран с требуемыми свойствами, а также различными способами управления параметрами протекания мембранных процессов. Электромембранные технологии используют ионообменные мембраны и градиент электрического потенциала в качестве движущей силы массопереноса заряженных частиц, они имеют такие важные преимущества, как возможность разделения компонентов с разными зарядами, безреагентность, экологичность, относительно невысокая стоимость [3–5]. Электродиализ с ионообменными мембранами позволяет осуществить разделение электролитов и неэлектролитов, обессоливание и концентрирование растворов электролитов. Данный метод часто используют в пищевой промышленности для деионизации различных полупродуктов и продуктов питания, а также для деминерализации сточных, морских и солоноватых вод, опреснения экстракта табачных листьев, извлечения молочной кислоты и аминокислот из сока травяного силоса и др. [6–12]. Электродиализ с биполярными мембранами применяют для получения кислот и оснований из солей, проведения других химических превращений, отделения электролитов от неэлектролитов, для раскисления некоторых продуктов питания, разделения смесей органических и неорганических кислот, в производстве высококачественной воды [13–15]. В отдельных работах рассматривается выделение аминокислот и изоляция их от примесей, оставшихся после синтеза, – минеральных солей, а также углеводов [16–19].

Ионообменные мембраны относятся к ряду современных типов материалов и имеют широкий спектр областей применения [20–23]. Для эффективного использования биполярных и монополярных мембран с целью извлечения аминокислот из растворов необходимо иметь представления об изменениях структурных, транспортных и вольт-амперных характеристик данных полимерных материалов, поскольку при контакте ионообменных мембран с органическими веществами возможно протекание побочных нежелательных процессов.

При длительном применении ионообменных материалов в растворах аминокислот и ряда других органических веществ электромембранные процессы могут быть осложнены явлением органического отравления, проявляющимся в изменении электрохимических, транспортных и структурных характеристик мембран [24–26], также возможно биологическое отравление [27].

В настоящее время недостаток данных о характеристиках ионообменных мембран, контактировавших с растворами ароматических аминокислот, свидетельствует об актуальности исследования их свойств при длительном использовании в электромембранной системе.

На основании этого целью настоящего исследования стала оценка изменений вольт-амперных, транспортных и структурных характеристик анионообменной и биполярной мембран при продолжительном электродиализе раствора ароматической аминокислоты (тирозина) и дисахарида (сахарозы).

2. Экспериментальная часть

Изучение изменений вольт-амперных и транспортных характеристик ионообменных мембран проведено при длительном электродиализе модельных растворов ароматической аминокислоты тирозина (Сигма-Алдрич, Берлингтон, США) ($C = 0.0025$ М) и сахарозы (Сигма-Алдрич, Берлингтон, США) ($C = 0.02$ М) в семисекционном лабораторном аппарате (рис. 1) в течение 60 часов. В работе использовался L-оптический изомер тирозина – аминокислота, которая в структуре содержит парагидрокси-фенилметильный боковой радикал. Некоторые физико-химические свойства тирозина приведены в табл. 1.

Камера 4 электродиализатора образована анионообменной и биполярной мембраной. При этом биполярная мембрана обращена анионооб-

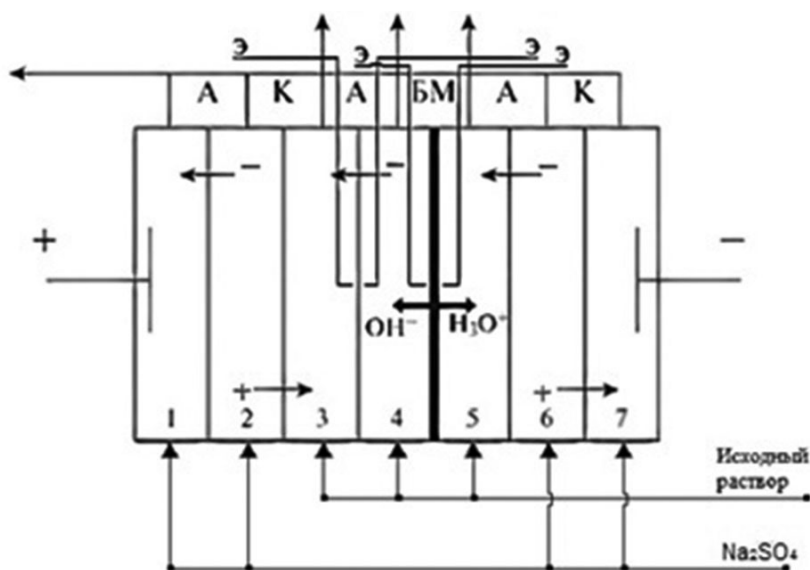
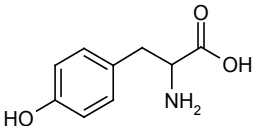


Рис. 1. Схема электродиализной ячейки, где А – анионообменная мембрана, К – катионообменная мембрана, БМ – биполярная ионообменная мембрана, Э – платиновые электроды

Таблица 1. Физико-химические свойства исследуемой аминокислоты [28–30]

Аминокислота	Структурная формула	pI	pK			Молекулярная масса	Растворимость, г/100мл H ₂ O, 25 °С	Объем бокового радикала, нм ³
			pK ₁	pK ₂	pK ₃			
Тирозин (Tyr)		5.63	2.20	9.11	10.07	181.19	0.045	0.1388

менным слоем к секции 4. Рабочая площадь мембран составляла 20 см². Высота аппарата равна 20 см, межмембранное расстояние – 10 мм, линейная скорость течения жидкости – 0.05 см·с⁻¹. Анод изготовлен из платины, катод - из нержавеющей стали.

В работе использовались гетерогенная анионообменная мембрана МА-41, катионообменная мембрана МК-40 и биполярная мембрана МБ-2 производства ООО ОХК «Щекиноазот». Данные гетерогенные мембраны имеют стирол-дивинилбензолную матрицу. Структура анионообменной мембраны МА-41 включает группы четвертичного аммониевого основания, а МК-40 – сульфогруппы. Биполярная мембрана МБ-2 изготовлена на основе мембран МА-41 и МК-40 [31].

В секции 3, 4, 5 электродиализатора поступал смешанный раствор тирозина (Tyr) и сахарозы (Suc). В секции 1, 2, 6, 7 аппарата подавался раствор сульфата натрия (C = 0.1M) (ЗАО «Вектон», Санкт Петербург, Россия). Анализ проводился для растворов, вытекающих из секций 3, 4.

Исследование изменений вольт-амперных характеристик (ВАХ) биполярной и анионообменной мембран в процессе электродиализа осуществлялось с применением вольтметра В7-26. Платиновые электроды подводились к исследуемой мембране на расстоянии 0.2 мм с каждой стороны.

Для количественного определения Tyr использовался метод УФ-спектроскопии [32], для определения Suc – фотометрический метод, основанный на окислении сахарозы в кислой среде дихроматом калия до CO₂, с применением способа градуировочного графика [33].

Поток вещества через ионообменные мембраны рассчитывали согласно формуле (1) [22]:

$$J = C \cdot V \cdot \tau^{-1} \cdot S^{-1}, \tag{1}$$

где J – поток через ионообменную мембрану, моль·см⁻²·с⁻¹; C – концентрация раствора, моль·дм⁻³; V – объем пробы, дм³; τ – время отбора пробы, с; S – рабочая площадь ионообменной мембраны, см².

Эффективное число переноса ионов гидроксила определяли по уравнению (2) [22]:

$$T = z \cdot F \cdot j \cdot i^{-1}, \quad (2)$$

где T – эффективное число переноса; F – постоянная Фарадея, Кл·моль⁻¹; z – заряд иона; i – плотность тока, А·см⁻²; j – поток ионов OH⁻, моль·см⁻²·с⁻¹.

Определение рН исследуемых растворов осуществлялось с помощью электронного рН-метра И-160МИ с предварительной калибровкой по буферным растворам (рН = 1.65, рН = 9.18). Значение рН растворов, подаваемых в камеру 4, находилось в пределах 5.5–5.9, что близко к изоэлектрической точке тирозина.

Методом ИК-спектроскопии исследованы структурные изменения ионообменных мембран, контактировавших с растворами, содержащим ароматическую аминокислоту. Предварительно образцы мембран высушивали при 50 °С, измельчали и прессовали с КВг в таблетки в соотношении 1 к 100. Спектры получены на ИК-Фурье спектрометре Vertex 70, Bruker Optik GmbH (Германия).

3. Результаты и обсуждение

Для оценки влияния взаимодействий ароматической аминокислоты, сахарозы и ионообменного материала под действием градиента электрического потенциала исследовано изменение транспортных характеристик мембраны МА-41 при длительном электродиализе с биполярной

мембраной раствора, содержащего тирозин и сахарозу (рис. 2а, б). На рис. 2 приведены зависимости потоков компонентов через мембрану МА-41 от плотности тока для «свежей» мембраны после установления стационарного состояния, а также для образцов мембран через 50 и 60 часов их работы без промывки.

На начальном участке полученных зависимостей наблюдается монотонное увеличение потоков тирозина с ростом плотности тока, после чего при плотности тока $i = 1.0$ – 2.3 мА·см⁻² обнаруживается наличие «плато», затем массоперенос аминокислоты снова растет в более интенсивном токовом режиме (рис. 2а). Отсутствие снижения потоков через МА-41 в области действия барьерного эффекта, наблюдаемого в системе с чередующимися монополярными мембранами, обусловлено интенсивной генерацией биполярной мембраной ионов водорода и гидроксила, приводящей к превращению биполярных ионов тирозина в анионы в камере 4 уже при малых токах. В интенсивном токовом режиме выявляется увеличение угла наклона рассматриваемых зависимостей $J - i$, что связано с ростом вклада электроконвекции и усилением действия эффекта облегченной электромиграции [34, 35]. Наблюдается небольшое увеличение потока дисахарида с ростом плотности тока (рис. 2б), так как сахароза является слабым электролитом, имеющим константу кислотной диссоциации порядка 10^{-13} [30].

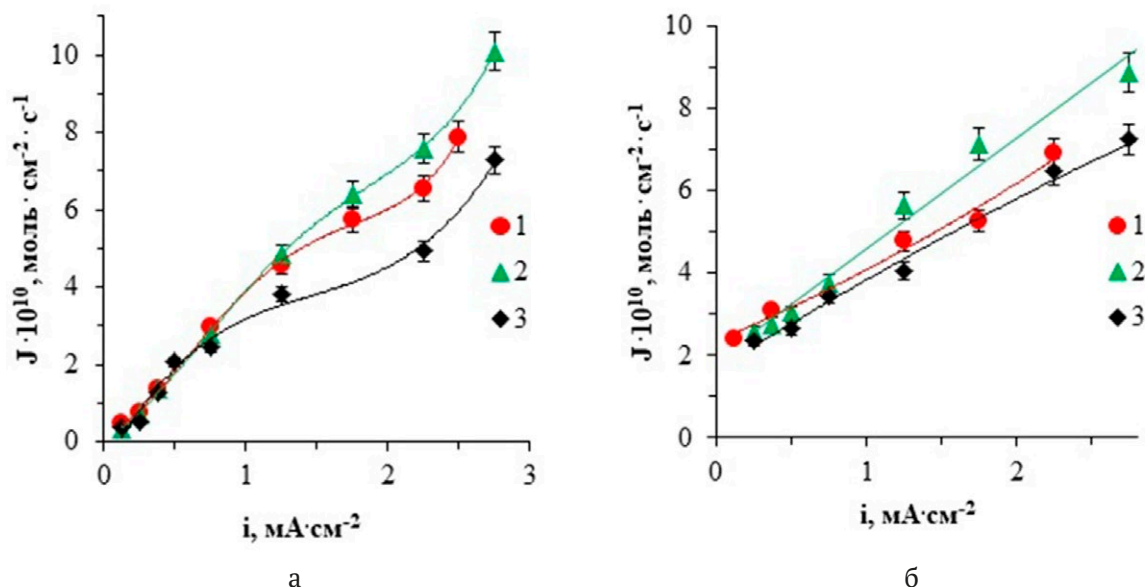


Рис. 2. Зависимость потоков Tyr (а) и Suc (б) через мембрану МА-41 от плотности тока при электродиализе раствора Tyr + Suc: 1 – мембрана после установления стационарного состояния («свежая» мембрана), 2 – мембрана через 50 часов работы, 3 – мембрана через 60 часов работы

Из данных зависимостей видно, что потоки тирозина и сахарозы через анионообменную мембрану, отработавшую в течение 50 часов, достигают больших значений по сравнению со «свежим» образцом (рис. 2а, б). Мембрана «разрабатывается» под влиянием массопереноса достаточно крупных гидратированных органических веществ, изменяется ее пористость, появляются поры большего радиуса по сравнению с неработавшей мембраной [36].

Однако затем при последующем использовании мембран в интенсивном токовом режиме потоки данных компонентов через МА-41 снижаются. Зависимости потока аминокислоты через мембрану МА-41 от времени процесса электродиализа при разных значениях плотности тока представлены на рис. 3. Очевидно, что в интенсивном токовом режиме начало снижения потока тирозина через мембрану, длительно эксплуатируемую в растворе, содержащем аминокислоту и дисахарид, происходит после 50 часов работы.

Это может быть обусловлено постепенным органическим отравлением ионообменных мембран, контактировавших с раствором тирозина и сахарозы при электродиализе.

В настоящей работе также зарегистрированы изменения вольт-амперных характеристик ионообменных мембран при длительном электродиализе раствора Тур + Суc. Зафиксировано увеличение падения напряжения после работы более 50 часов как для мембраны МА-41, так и для

МБ-2. ВАХ мембраны МБ-2 для разного времени эксплуатации приведены на рис. 4а. Изменения могут быть обусловлены экранированием функциональных групп исследуемых мембран молекулами аминокислоты и сахарозы, блокирующими поры мембраны, затрудняющими протекающие реакции диссоциации воды ввиду снижения каталитической активности функциональных групп мембран по отношению к реакции диссоциации воды. Данный факт для анионообменной мембраны МА-41 при ее длительном

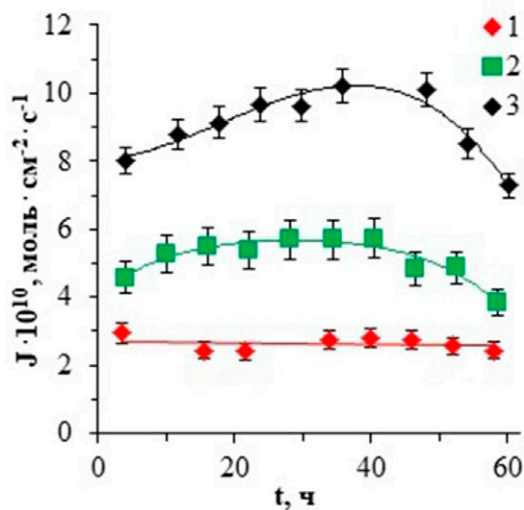


Рис. 3. Зависимость потоков Тур через мембрану МА-41 от времени при электродиализе раствора Тур + Суc: 1 – при 0.75 мА·см⁻², 2 – 1.25 мА·см⁻², 3 – 2.75 мА·см⁻²

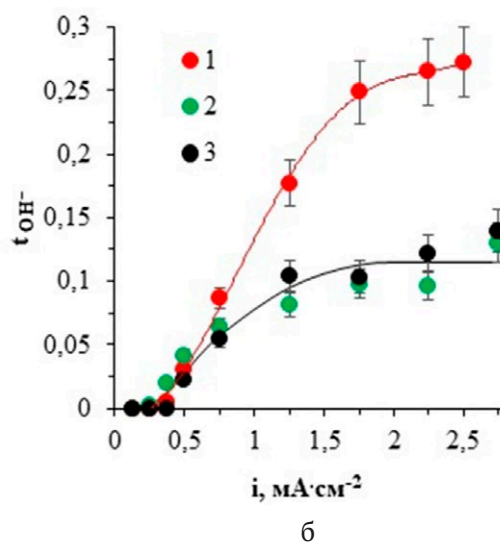
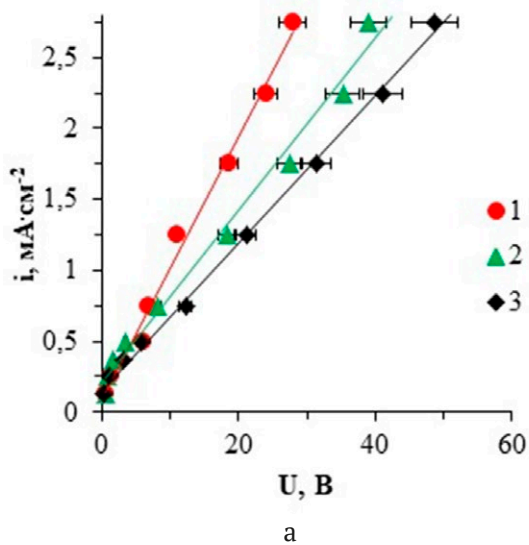


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики мембраны МБ-2 (а) и зависимость эффективного числа переноса ионов ОН⁻ для мембраны МА-41 от плотности тока (б) при длительном электродиализе раствора Тур + Суc: 1 – «свежая» мембрана, 2 – мембрана через 50 часов работы; 3 – мембрана через 60 часов работы

использовании в ходе электродиализа подтверждается снижением эффективного числа переноса ионов гидроксила (рис. 4б).

На ВАХ мембраны МБ-2 (рис. 4а) не наблюдается наличия трех классических участков, характерных для монополярной мембраны МА-41 [22]. Это связано с тем, что при протекании даже малого тока через биполярную мембрану на внутренней границе, разделяющей катионообменную и анионообменную части, диссоциируют молекулы воды.

Кроме того, зафиксировано изменение общего напряжения на ячейке при длительном электродиализе без промывки (регенерации) ионообменных мембран. С увеличением времени контакта мембран с раствором, содержащим ароматическую аминокислоту и углевод, общее напряжение в системе возрастает при одном и том же значении силы тока.

На рис. 5 приведены зарегистрированные зависимости рН раствора камеры 4 от времени эксплуатации мембран. Из полученных результатов видно, что после 50 часов эксплуатации мембран без регенерации выявляется достижение меньших значений рН раствора камеры 4. Это обусловлено снижением генерации ионов гидроксила мембраной МБ-2 во времени и указывает на отравление анионообменного слоя биполярной мембраны.

В настоящей работе обнаружено, что изменение транспортных и вольт-амперных характеристик мембран сопровождается изменением

их структуры. Исследованы образцы анионообменной мембраны МА-41, структура которой идентична анионообменному слою биполярной мембраны МБ-2, в основной форме, форме, сорбирующей компоненты из раствора Туг + Suc, а также «отравленной» мембраны после длительного контакта с данным раствором в течение 10 суток.

На ИК-спектрах мембраны МА-41 наличие тирозина в фазе мембраны после сорбции из раствора Туг + Suc подтверждают полосы поглощения при 1157 см^{-1} (фенолят-ион Туг), 1573 и 1257 см^{-1} – (карбоксилат-ион). Увеличение интенсивности данных максимумов после 10 суток контакта мембраны с раствором, содержащим аминокислоту и сахарозу, указывает на накопление тирозина в фазе мембраны. Кроме того, на ИК-спектре мембраны, длительно контактировавшей с раствором Туг + Suc в течение 10 суток, обнаруживается новый пик – 1595 см^{-1} , который может свидетельствовать о появлении в фазе мембраны 3,4-дигидроксифенилаланина – продукта окисления тирозина.

После сорбции Suc мембраной из смешанного раствора аминокислоты и углевода, на спектрах появляются полосы при 1635 см^{-1} (C–O), а также при $1307, 1257, 1089\text{ см}^{-1}$ (C–O–C – группа), кроме того, увеличивается интенсивность полосы при 3425 см^{-1} (ОН-группа). Данные изменения указывают на наличие дисахарида в фазе мембраны. После 10 суток контакта с исследуемым раствором на ИК-спектре наблюдается снижение интенсивности полос при 1635 см^{-1} (C–O), а также $1307, 1257, 1089\text{ см}^{-1}$ (C–O–C-группа), что косвенно указывает на уменьшение содержания данного дисахарида в фазе ионообменной мембраны.

4. Заключение

Исследовано поведение анионообменной мембраны МА-41 и биполярной мембраны МБ-2 во времени в ходе электродиализа раствора, содержащего тирозин и сахарозу.

Для исследуемых мембран в ходе длительного электродиализа зафиксировано увеличение падения напряжения на мембранах. Данные изменения могут быть обусловлены экранированием функциональных групп мембраны МБ-2 аминокислотой и сахарозой, а также блокированием пор мембраны, затрудняющими протекающие реакции диссоциации воды.

Установлено, что поток тирозина и сахарозы при электродиализе достигает больших зна-

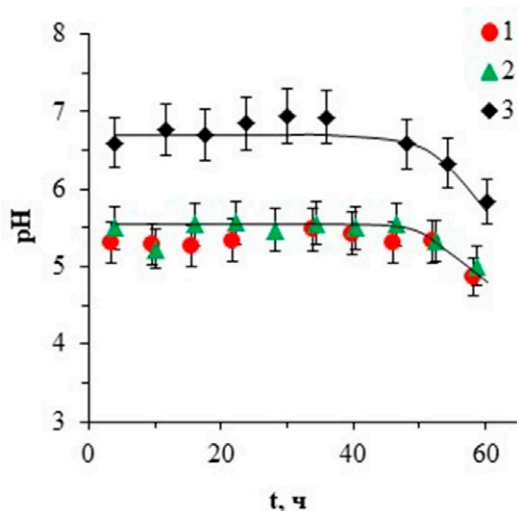


Рис. 5. Зависимость рН от времени на выходе из камеры 4 при длительном электродиализе раствора Туг + Suc: 1 – при $0.75\text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$, 2 – $1.25\text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$, 3 – $2.75\text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$

чений через мембрану МА-41, отработавшую в течение 50 часов, чем через «свежую» мембрану. Транспортные характеристики мембраны возрастают из-за изменения пористости и влагосодержания мембраны при контакте с высокогидратированными органическими веществами. Однако последующее использование мембран приводит к сокращению потоков аминокислоты и сахарозы через МА-41 в интенсивном токовом режиме. Снижение массопереноса компонентов через мембрану МА-41, увеличение сопротивления мембраны МБ-2, а также обнаруженное уменьшение достигаемых значений эффективного числа переноса ионов ОН для исследуемых мембран во время эксплуатации связаны с явлением органического отравления, сопровождающегося обнаруженными структурными изменениями, возникающими после длительного контакта (более 50 часов) со смешанным раствором тирозина и сахарозы и выражающимися в удерживании аминокислоты и продукта ее окисления – 3,4-дигидроксифенилаланина в фазе мембраны, а также в уменьшении содержания сахарозы в фазе мембраны.

Заявленный вклад авторов

Харина А. Ю. – подготовка обзора, обсуждение результатов, написание и редактирование текста. Чарушина О. Е. – проведение исследования, написание текста. Елисеева Т. В. – научное руководство, концепция исследования, обсуждение результатов.

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. Самонина А. С. Получение аминокислот биотехнологическим методом. Стадии производства. Применение в медицинской практике. *Актуальные вопросы фармацевтических и естественных наук: Сборник статей Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, 17–21 мая 2021, Иркутск*. Иркутск: Иркутский государственный медицинский университет; 2021. с. 313–316. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46592328>
2. Suwal Sh. Doyen A., Bazinet L. Characterization of protein, peptide and amino acid fouling on ion-exchange and filtration membranes: review of current

and recently developed methods. *Journal of Membrane Science*. 2015;496: 267–283. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.08.056>

3. Быков В. И., Ильина С. И., Логинов В. Я. Равичев Л. В., Свитцов А. А. Электродиализ: история и перспективы развития. *Вестник технологического университета*. 2021;24(7): 5–10.

4. Xu T., Huang C. Electrodialysis-based separation technologies: a critical review. *AIChE Journal*. 2008;54: 3147–3159. <https://doi.org/10.1002/aic.11643>

5. Lazarova Z., Beschkov V., Velizarov S. Electromembrane separations in biotechnology. *Physical Sciences Reviews*. 2020;5: 1–11. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0063>

6. Wang M., Kuang S., Wang X., ... Zhang Y. Transport of amino acids in soy sauce desalination process by electrodialysis. *Membranes*. 2021;11(6): 408. <https://doi.org/10.3390/membranes11060408>

7. Zeppenfeld S., van Pinxteren M., Engel A. A Protocol for quantifying mono- and polysaccharides in seawater and related saline matrices by electrodialysis (ED) – combined with HPAEC-PAD. *Ocean Science*. 2020;16: 817–830. <https://doi.org/10.5194/os-2020-2>

8. Ge S., Zhang Z., Yan H., ... Wang Y. Electrodialytic desalination of tobacco sheet extract: membrane fouling mechanism and mitigation strategies. *Membranes*. 2020;11: 14. <https://doi.org/10.3390/membranes10090245>

9. Thang V. H., Koschuh W., Kulbe K. D. Desalination of high salt content mixture by two-stage electrodialysis as the first step of separating valuable substances from grass silage. *Desalination*. 2004;162(1-3): 343–353. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)00068-2)

10. Bazinet L., Geoffroy T. R. Electrodialytic processes: market overview, membrane phenomena, recent developments and sustainable strategies. *Membranes*. 2020;10: 221. <https://doi.org/10.3390/membranes10090221>

11. Campione A., Gurreri L., Ciofalo M., Micale G., Tamburini A., Cipollina A. Electrodialysis for water desalination: a critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Desalination*. 2018;434: 121–160. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.044>

12. Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A., Micale G. Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery: a systematic review on progress and perspectives. *Membranes*. 2020;10: 146. <https://doi.org/10.3390/membranes10070146>

13. Пурселли Ж. Электродиализ с биполярными мембранами: основы метода, оптимизация, применение. *Электрохимия*. 2002;38(8): 1026–1033. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44584769>

14. Mani K. N. Electrodialysis water splitting technology. *Journal of Membrane Science*. 1991;58(2): 117–138. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(00\)82450-3](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(00)82450-3)
15. Medina-Collana J. T., Rosales-Huamani J. A., Franco-Gonzales E. J., Montaño-Pisfil J. A. Factors influencing the formation of salicylic acid by bipolar membranes electrodialysis. *Membranes*. 2022;12(2): 149. <https://doi.org/10.3390/membranes12020149>
16. Pelletier S., Serre E., Mikhaylin S., Bazinet L. Optimization of cranberry juice deacidification by electrodialysis with bipolar membrane: impact of pulsed electric field conditions. *Separation and Purification Technology*. 2017;186: 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.054>
17. Харина А. Ю., Чарушина О. Е., Елисеева Т. В. Особенности массопереноса компонентов при электродиализе раствора ароматическая аминокислота – минеральная соль – сахараза. *Мембраны и мембранные технологии*. 2021;4: 145–150. <https://doi.org/10.1134/S2517751622020068>
18. Eliseeva T. V., Krisilova E. V., Shaposhnik V. A., Bukhovets A. E. Recovery and concentration of basic amino acids by electrodialysis with bipolar membranes. *Desalination and Water Treatment*. 2010;14(1-3): 196–200. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1028>
19. Елисеева Т. В., Текучев А. Ю., Шапошник В. А., Лущик И. Г. Электродиализ растворов аминокислот с применением биполярных ионообменных мембран. *Электрохимия*. 2001;37(4): 492–495. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44584463>
20. Шельдешов Н. В., Заболоцкий В. И. *Биполярные ионообменные мембраны. Получение. Свойства. Применение. Мембраны и мембранные технологии*. М.: Научный мир; 2013. 70–115.
21. Strathmann H. *Ion-exchange membrane separation process*. Amsterdam: Elsevier; 2004. 348 p. [https://doi.org/10.1016/s0927-5193\(04\)80031-7](https://doi.org/10.1016/s0927-5193(04)80031-7)
22. Заболоцкий В. И., Никоненко В. В. *Перенос ионов в мембранах*. М.: Наука; 1996. 392 с.
23. Tanaka Y. *Ion exchange membranes*. Amsterdam: Elsevier Science; 2015. 522 p.
24. Apel P. Y., Velizarov S., Volkov A. V., ... Yaroslavtsev A. B. Fouling and membrane degradation in electromembrane and baromembrane processes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2022;4: 69–92. <https://doi.org/10.1134/S2517751622020032>
25. Харина А. Ю., Елисеева Т. В. Характеристики катионообменной мембраны МК-40 при электродиализе растворов минеральной соли и аминокислоты. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2017;17(1): 148–155. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2017.17/364>
26. Елисеева Т. В., Харина А. Ю. Особенности вольт-амперных и транспортных характеристик анионообменных мембран при электродиализе растворов, содержащих алкилароматическую аминокислоту и минеральную соль. *Электрохимия*. 2015;51(1): 74–80. <https://doi.org/10.7868/S0424857015010041>
27. Mikhaylin S., Bazinet L. Fouling on ion-exchange membranes: classification, characterization and strategies of prevention and control. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016;229: 34–56. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.006>
28. Майстер А. *Биохимия аминокислот* / под ред. А. Е. Браунштейна М.: ИИЛ; 1961. 531 с.
29. Якубке Х.-Д. Ешкайт Х. *Аминокислоты, пептиды, белки* / под ред. Ю. В. Митина. М.: Мир; 1985. 82 с.
30. *Химическая энциклопедия: в пяти томах* / под ред. Н. С. Зефилова. М.: Большая российская энциклопедия; 1995. Т. 4. С. 295.
31. Березина Н. П., Кононенко Н. А., Дворкина Г. А., Шельдешов Н. В. *Физико-химические свойства ионообменных материалов*. Краснодар: КубГУ; 1999. 82 с.
32. Котова Д. Л., Крысанова Т. А., Елисеева Т. В. *Спектрофотометрическое определение аминокислот в водных растворах: учеб. пособие по специальности химия, фармация, биология*. Воронеж: ВГУ; 2004. с. 25–38.
33. Лурье И. С. *Руководство по техническому контролю в кондитерской промышленности*. М.: Пищевая промышленность; 1978. с. 56–59.
34. Nikonenko V. V., Pismenskaya N. D., Belova E. I.; Sistas P., Huguet P., Pourcelly G., Larchet C. Intensive current transfer in membrane systems: modelling, mechanisms and application in electrodialysis. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;160: 101–123. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.08.001>
35. Елисеева Т. В., Шапошник В. А. Эффекты циркуляции и облегчённой электромиграции аминокислот при электродиализе с ионообменными мембранами. *Электрохимия*. 2000;36(1): 73–76. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44578525>
36. Dobrevsky J., Zvezdov A. Investigation of pore structure of ion exchange membranes. *Desalination*. 1979;28(3): 283–289. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(00\)82235-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(00)82235-3)

Информация об авторах

Харина Анастасия Юрьевна, к. х. н., н. с., ведущий инженер кафедры аналитической химии химического факультета, *Воронежский государственный университет* (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3050-8684>
aukharina@gmail.com

Чарушина Ольга Евгеньевна, м. н. с. кафедры аналитической химии, *Воронежский государственный университет* (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0008-9568-9088>
charushinaoe@gmail.com

Елисеева Татьяна Викторовна, к. х. н., доцент, заведующий кафедрой аналитической химии, *Воронежский государственный университет* (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2391-8415>
tatyanaeliseeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022; одобрена после рецензирования 24.11.2022; принята к публикации 02.12.2022; опубликована онлайн 25.06.2023.