

Т. А. Пудовкина, С. И. Лазарев, К. В. Шестаков

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОЙ ОЧИСТКИ РАСТВОРОВ**ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ, СОДЕРЖАЩИХ СУЛЬФАТ МАГНИЯ И ХЛОРИД ЖЕЛЕЗА (III)***Ключевые слова: ионообменные мембраны, электродиализ, разделение растворов, промышленные растворы.*

Электродиализ представляет собой один из самых популярных способов электрохимической очистки с использованием ионообменных мембран, и сфера его применения постоянно расширяется. Целью работы является исследование кинетических характеристик электродиализной очистки многокомпонентных растворов гальванических производств от ионов Mn^{2+} , $Fe^{общ}$, SO_4^{2-} и Cl^- . Для достижения поставленной цели был решен ряд прикладных задач, включая проведение мероприятий по подготовке и кондиционированию мембран, экспериментальные исследования по электродиализной очистке нескольких серий модельных растворов, содержащих $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ и $FeCl_3$ в различной концентрации до $0,4 \text{ кг/м}^3$ и аналогичных сточным водам отдельного сегмента гальванических производств, и анализ полученных результатов по изменению кинетических характеристик процесса очистки в зависимости от времени и исходной концентрации растворов. Процесс разделения проводили на лабораторной электродиализной установке с применением пакета чередующихся ионообменных мембран МК-40Л и МА-41П производства ООО «ИП «Щекиноазот», Россия. Установка состояла из электродиализной ячейки и трех независимых линий циркуляции, каждая из которых предназначена для обессоленного, концентрированного и приэлектродного растворов. Очистка растворов проводилась при наложении тока плотностью 20 А/м^2 . В результате исследования установлено, что изменение исходной концентрации веществ в рассматриваемых многокомпонентных растворах оказывает разное влияние на процесс электродиализной очистки в зависимости от удаления конкретного типа ионов. Например, при изначально низких концентрациях ионов наблюдаются высокие показатели очистки, достигающие 99,5%. Однако по мере увеличения концентрации для большинства исследуемых растворов серий «М», «Ж» и «ЖМ» происходит значительное снижение эффективности очистки при достижении определенного порогового значения исходной концентрации. Важно отметить, что данное пороговое значение может существенно варьироваться в зависимости от типа иона.

Т. А. Pudovkina, S. I. Lazarev, K. V. Shestakov

EFFICIENCY OF ELECTRODIALYSIS PURIFICATION OF ELECTROPLATING INDUSTRY**SOLUTIONS CONTAINING MAGNESIUM SULFATE AND IRON (III) CHLORIDE***Keywords: electro dialysis, ion exchange membranes, separation of solutions, industrial solutions.*

Electrodialysis is one of the most popular methods of electrochemical purification using membranes, and the scope of its application is constantly expanding. The aim of the work was to study the kinetic characteristics of multicomponent solution electro dialysis purification of electroplating plants from Mn^{2+} , Fe (common), SO_4^{2-} and Cl^- ions. To achieve this aim, a number of applied tasks were solved. There are measures carrying out for the preparation and conditioning of membranes, experimental studies on electro dialysis purification of several series of model solutions. These solutions were containing $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ and $FeCl_3$ in various concentrations up to 0.4 kg/m^3 and were similar to wastewater from a separate segment of electroplating industries. Also, analysis of the results obtained on changes in kinetic characteristics in the purification process depends on the time and initial concentration of the solutions was carried out. The separation process was carried out on a laboratory electro dialysis plant using a package of alternating ion exchange membranes МК-40L and МА-41P manufactured by IP Shekinoazot LLC, Russia. The plant consisted of an electro dialysis cell and three independent circulation lines, each of which is designed for desalinated, concentrated and near-electrode solutions. The solutions were purified with a current density of 20 A/m^2 . As a result of the work, it was found that a change in the initial concentration of substances in the multicomponent solutions under consideration has a different effect on the electro dialysis purification process, depending on the removal of a specific type of ions. For example, at initially low ion concentrations, high purification rates are observed, that reaching values of 99.5%. However, as the concentration increases, for most of the studied solutions of the "M", "ZH" and "ZHM" series, a significant decrease in purification efficiency occurs when a certain threshold value of the initial concentration is reached. It is important to note that this threshold value can vary significantly depending on the type and it.

Введение

В настоящее время в процессах очистки и концентрирования промышленных растворов все чаще предпочтение отдают ресурсо- и энергосберегающим технологиям [1-4]. Такими методами разделения растворов являются мембранные методы, в частности процесс электродиализа. Метод электродиализного разделения растворов относится к наиболее перспективным способам электромембранного концентрирования и очистки технологических

растворов и сточных вод. В процессе электродиализного разделения, ионы мигрируют через катионообменные и анионообменные мембраны, которые образуют камеры дилуата и концентрата вследствие направленного действия электрического потенциала. В работе [5] авторы выявили, что при таком электромембранном процессе как электродиализ, целевое разделение растворов, имеющем в своем составе катионы Fe^{3+} , Ni^{2+} и Cu^{2+} , коэффициенты задержания по ним значительно различаются. В случае электродиализного разделения многокомпонентного

раствора, содержащего одновременно данные катионы тяжелых металлов, наблюдается снижение значений коэффициентов задержания катионов Ni^{2+} и Cu^{2+} по сравнению с соответствующими односолевыми растворами. В статье [6] авторами отмечается, что через катионообменную мембрану МК-40 поток аминокислоты из модельного раствора выше, чем через анионообменную мембрану МА-41 в процессе электродиализного разделения. При таком разделении многокомпонентных растворов, то есть смешанной аминокислоты с минеральной солью наблюдается конкурентный перенос минеральных ионов через ионообменные мембраны, что приводит к снижению процесса электромембранного разделения. В работе [7] авторами изучен электродиализный метод деминерализации раствора, содержащий ароматический амин - анилин и серную кислоту, при варьировании показателями по напряжению на электродиализаторе с применением ионообменных мембран МА-41 МФ-4СК. В работе также приведено теоретическое обоснование предельной плотности тока для пары катионо- и анионообменной мембран и отмечено, что анионообменная и катионообменная мембраны имеют разные величины предельной плотности тока. Экспериментально показано, что процесс электродиализного разделения эффективнее проводить при значениях напряжения не выше 6 В.

Авторами работы [8] рассмотрен электромембранный метод, представляющий собой сочетание ионного обмена с электродиализом, который позволяет получать сверхчистую воду. В данном методе реализуются различные процессы переноса и перемещения, и, несмотря на его развитие в промышленных масштабах, фундаментальные аспекты до сих пор мало изучены. В ходе исследования в случае разбавленных растворов хлорида меди была изучена разделительная микроколлонка высотой 15 мм в зависимости от природы смолы (инертной или ионообменной) и плотности тока в импульсном электрическом режиме. Разработаны математические модели для определения значений четырех кинетических параметров. Результаты работы показывают, что скорости ионного обмена и миграции с использованием ионообменных смол намного выше, чем скорости массопереноса из раствора, окружающего слой загрузки, через мембраны. Показано, что взаимодействие между молекулами и мембранами в присутствии раствора играют важную роль в процессе переноса ионов. В статье [9] авторами исследовались модельные многокомпонентные растворы, аналоги промышленным растворам, имеющие в своем составе $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. Концентрация металлов в растворе составляла 40, 80, 120 или 160 мг/л. Электродиализное разделение растворов осуществлялось при плотности тока 20 А/м² в камерах обессоливания и концентрирования. При электродиализной очистке многокомпонентных растворов, содержащих одновременно катионы Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} , быстрее всего протекает удаление из раствора катионов Ni^{2+} , медленнее – катионов

Fe^{3+} . Степень очистки от катионов Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} за 3600 с в большинстве случаев составила более 98%, практически во всех случаях. Работа [10] посвящена изучению эффективности электродиализа в очистке широкого спектра отработанных водных растворов, полученных на различных производствах, таких как промышленные предприятия, городские системы канализации и животноводческие комплексы. Такие свойства, как селективность, высокая эффективность разделения и отсутствие химической обработки, делают методы электродиализа подходящими для опреснения и других видов обработки, приносящих значительную пользу окружающей среде. Технологии электродиализа могут использоваться в процессах концентрирования, разбавления, опреснения, регенерации и утилизации при очистке сточных вод и получении воды и/или других продуктов, например ионов тяжелых металлов, солей, кислот/щелочей, питательных веществ и органических веществ, а также электрической энергии. Интенсивная исследовательская деятельность была направлена на разработку усовершенствованных или новых систем, демонстрирующих предельно допустимые сбросы жидкости, которые должны быть экономически доступными и конкурентоспособными. В представленном исследовании [11] авторы подробно анализируют процесс электродиализа с применением биполярных мембран, а также его эксплуатационные характеристики с точки зрения экономической эффективности. В ходе экспериментов получены результаты на лабораторных установках, использующих мембраны биполярного типа. Работа подчеркивает практическую значимость утилизации солевых отходов, образуемых на атомных станциях, с целью получения вторичных продуктов, таких как кислоты и основания, которые могут быть повторно использованы в процессе производства на предприятиях. Экспериментальные данные подтвердили целесообразность применения модифицированных ионообменных мембран и конструктивных решений для двухкамерного электродиализатора, наполненного биполярными мембранами. Это позволяет эффективно извлекать кислоты и щелочи из солевых отходов атомных станций. Результаты исследования открывают новые перспективы для переработки отходов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, что делает такую технологию не только экономически выгодной, но и экологически оправданной. В работе [12] авторами представлен обзор методов обработки сточных хромсодержащих вод. Предложен вариант совершенствования реагентного способа очистки сточной воды от шестивалентного хрома. Исследован электромембранный процесс получения кислоты и основания из сульфата натрия. Авторами работы [13] оценено практическое использование электрохимических мембранных процессов для 100–1000-кратного уменьшения выброса из ванн электрохимического кадмирования ионов кадмия в сточные воды гальванического производства. Экспериментальные исследования на лабораторных и промышленных установках установили, что

эффективность электрохимического процесса напрямую зависит от типа применяемого электролита кадмирования. Степень извлечения кадмия имеет максимальное значение (99.9%) в случае цианидных электролитов, для сернокислых электролитов, не содержащих солей аммония, минимальное значение степени извлечения составляет 99%.

В работе [14] авторами изучается метод электродиализной очистки щелочных минерализованных жидких отходов тепловых электростанций. Практически метод электродиализной очистки позволяет из растворов ТЭЦ получить щелочь для повторного использования, уменьшить годовой объем сточных вод, а при помощи применения комплекса для термообессоливания полностью исключить их сброс. Работа [15] посвящена модернизации конструкций аппаратов, а также результатам внедрения электродиализа в технологические схемы различных отраслей промышленности. Определены основные области применения электродиализа в настоящее время. Отмечено, что в отличие от многих мембранных методов разделения, электродиализ можно применять не только для снижения соленосодержания воды, но и для концентрирования, получения кислот и щелочей. Особо выделен процесс, электродеионизации, являющийся разновидностью электродиализа и получивший широкое применение в настоящее время. Проведен анализ перспективных направлений использования и развития электродиализа. Для интенсификации процесса предложено использовать различные токовые режимы (например, пульсирующие токи). В качестве ионообменных материалов для изготовления мембран рассматриваются силиконы. Такие предложения позволили бы расширить применение электродиализного разделения. Авторами работы [16] проведены исследования по массопереносу и физико-химическим свойствам ионообменных мембран при электродиализном разделении промышленных растворов, содержащих органические компоненты различной природы. Отмечен опыт эксплуатации электродиализных установок по утилизации сточных вод химической промышленности, что позволяет показать перспективность использования электромембранных методов для создания безотходных производственных процессов. Выполненный обзор работ [1-16] по электродиализным методам очистки и концентрирования промышленных растворов, позволяет сформулировать цель работы по более глубокому исследованию кинетических характеристик переноса ионов через ионообменные мембраны из многокомпонентных систем. Поэтому целью работы было исследование кинетических характеристик электродиализной очистки многокомпонентных растворов гальванических производств от ионов Mn^{2+} , $Fe^{общ}$, SO_4^{2-} и Cl^- .

Экспериментальная часть

Для достижения поставленной цели был решен ряд прикладных задач. К ним следует отнести

проведение мероприятий по подготовке и кондиционированию мембран, экспериментальные исследования по электродиализной очистке нескольких серий модельных растворов с разной концентрацией, аналогичных сточным водам отдельного сегмента гальванических производств, и анализ полученных результатов по изменению кинетических характеристик процесса очистки в зависимости от времени и исходной концентрации растворов.

В качестве объектов исследования выступали ионообменные мембраны МК-40Л и МА-41П (ООО «ИП «Щекиноазот», Россия) и ряд модельных растворов, аналогичных промышленным стокам гальванических производств и содержащих $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ и $FeCl_3$ в различной концентрации. Все типы исследуемых растворов с соответствующей исходной концентрацией приведены в таблице 1. Предметом исследования был анализ влияния исходной концентрации растворенных веществ на эффективность электродиализной очистки растворов гальванических производств от сульфата магния и хлорида железа.

Таблица 1 – Исходные концентрации исследуемых растворов

Table 1 – Initial concentrations of the studied solutions

Раствор	$C_{исх.}, \text{кг/м}^3$			
	Mn^{2+}	SO_4^{2-}	$Fe^{общ}$	Cl^-
М1	0,0572	0,1000	–	–
М2	0,1144	0,2000	–	–
М3	0,1716	0,3000	–	–
М4	0,2288	0,4000	–	–
Ж1	–	–	0,0524	0,1000
Ж2	–	–	0,1048	0,2000
Ж3	–	–	0,1572	0,3000
Ж4	–	–	0,2096	0,4000
ЖМ1	0,0572	0,1000	0,0524	0,1000
ЖМ2	0,1144	0,2000	0,1048	0,2000
ЖМ3	0,1716	0,3000	0,1572	0,3000
ЖМ4	0,2288	0,4000	0,2096	0,4000

Подготовительные мероприятия для мембран включали предварительный осмотр мембранных рулонов на наличие поверхностных дефектов и вырезание заготовок необходимого размера для четырех катионообменных и четырех анионообменных мембран. Далее их погружали в емкость со слабым раствором $NaCl$ (0,6 моль/л) на 24 часа в темное место с целью оценки предварительного набухания и проведения активизации. На заключительном этапе подготовки набухшим мембранам придавалась окончательная форма, включая необходимые отверстия для обеспечения перетекания растворов внутри разделительной мембранной ячейки.

Исследование эффективности электродиализной очистки растворов проводили на экспериментальной лабораторной установке, схема которой показана на рис.1. К ее основным элементам относятся разделительная мембранная ячейка с пакетом

ионообменных мембран, линии для циркуляции обессоленного, концентрированного и приэлектродного растворов с вспомогательным оборудованием, включающим емкости для растворов, мембранные пневматические насосы AFL 7, манометры, расходомеры, впускные и выпускные клапаны и т.д. Рабочий токовый режим обеспечивался с помощью лабораторного блока питания MAISHENG MP1005D, который подключали к электродам, расположенным внутри плит корпуса. Для того, чтобы собрать мембранную ячейку целиком, анионо- и катионообменные мембраны поочередно вместе с полимерными прокладками укладывали определенным образом между плитами корпуса и затягивали болтовым соединением. Через имеющиеся в плитах корпуса и мембранах каналы растворы по лабиринтному пути перемещались внутри мембранной ячейки и происходил процесс разделения растворов. С учетом конструктивных особенностей разделительной ячейки у каждой мембраны активная площадь составила $0,0306 \text{ м}^2$.

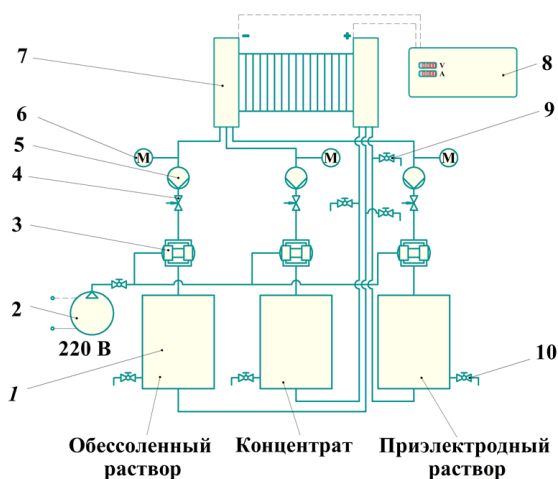


Рис. 1 – Общая схема установки: 1 – емкости для растворов; 2 – масляный компрессор; 3 – мембранные насосы; 4 – контрольные клапаны; 5 – расходомеры; 6 – манометры; 7 – разделительная ячейка; 8 – источник питания; 9 – выпускные клапаны для сбора образцов; 10 – выпускные клапаны для слива отработанных растворов

Fig. 1 – Common unit diagram: 1 – solution tanks; 2 – oil compressor; 3 – membrane pumps; 4 – control valves; 5 – flow meters; 6 – manometers; 7 – electro dialysis cell; 8 – power source; 9 – outlet valves for samples collection; 10 – outlet valves for draining spent solutions

Рабочие параметры экспериментов были выбраны следующими: плотность тока – 20 А/м^2 , исходный объем растворов и средний расход разделяемого раствора в каждой линии установки – $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно, ширина межмембранного канала – $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, продолжительность одного эксперимента – 60 минут.

Отбор образцов раствора осуществляли на выходе из мембранной ячейки каждые 15 минут. Анализ концентрации растворенных веществ проводили с помощью иономера ИТАН с соответствующими ионоселективными электродами.

Результаты и их обсуждение

Результатом исследований являются зависимости изменения концентрации целевых ионов в камере обессоливания от времени проведения процесса разделения. На рис. 2 представлены результаты изменения приведенной концентрации катионов Mn^{2+} исходной в процессе электродиализного разделения растворов серии «М» и «ЖМ» в камерах обессоленного раствора.

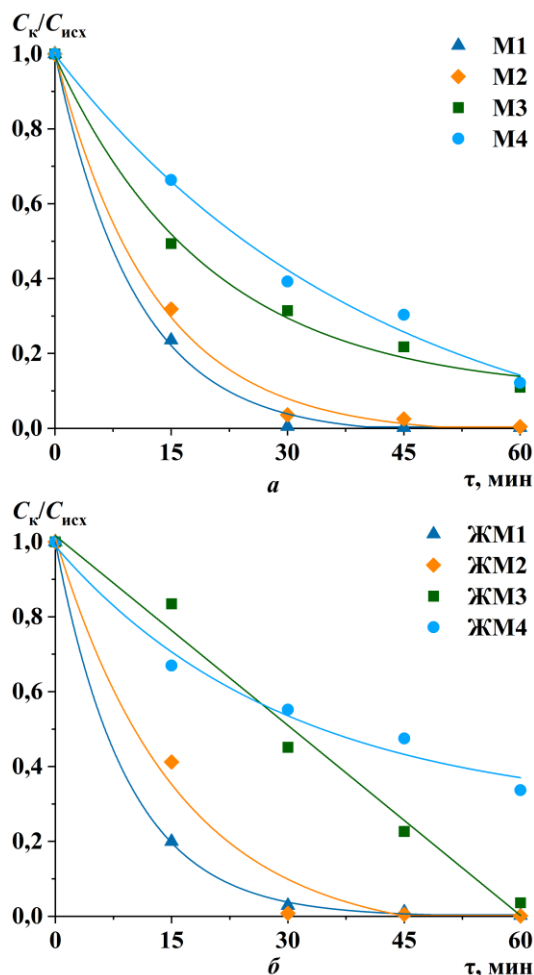


Рис. 2 – Изменение приведенной концентрации катионов Mn^{2+} в камере для обессоленного раствора в процессе электродиализного разделения растворов «М» (а) и «ЖМ» (б)

Fig. 2 – Changes in the reduced concentration of Mn^{2+} cations in the desalinated solution chamber during electro dialysis separation of "M" (a) and "ZHM" (b) solutions

В результате всех необходимых экспериментов установлена высокая эффективность мембраны МК-40Л в процессе очистки растворов от катионов Mn^{2+} . Уровень удаления катионов варьировался от 93% до 99,5%, что свидетельствует о высокой производительности данной мембраны. Полученные результаты подчеркивают не только высокую степень очистки, но и значительную селективность мембраны в отношении катионов марганца в исследуемых системах. Это открывает широкие перспективы её применения в различных сферах, связанных с очисткой

и разделением растворов, а также в обработке сточных вод с аналогичным компонентным составом. Однако при анализе эффективности удаления катионов в растворах М3, М4 и ЖМ4 наблюдалась тенденция к снижению данной эффективности, которая колебалась в пределах от 67% до 88% от исходного количества ионов. Это расхождение в результатах можно объяснить несколькими факторами, влияющими на процессы мембранной фильтрации. Одним из ключевых факторов является увеличение концентрации катионов Mn^{2+} в анализируемых растворах, что приводит к усилению процесса концентрационной поляризации (КП) на поверхности мембраны. Это явление возникает в результате накопления ионов на стороне мембраны, которая находится в контакте с раствором. Накопление ионов нарушает равновесие и изменяет локальную концентрацию, что затрудняет их дальнейшую диффузию. Кроме того, данный процесс может усложняться нелинейными эффектами, которые способствуют увеличению сопротивления переносу ионов через мембрану. Эти нелинейные эффекты могут вызывать дополнительные изменения в электрических полях и напряжении, создавая дополнительные барьеры движению ионов. Поэтому управление концентрацией катионов в растворах становится важным аспектом, позволяющим оптимизировать процессы, протекающие в системах, использующих мембраны.

Если сравнивать разделение растворов «М» и «ЖМ» относительно изменения концентрации катионов Mn^{2+} , то при первых двух исходных концентрациях растворов серии «М» отличий практически не зафиксировано. Кривые имеют ярко выраженный экспоненциальный характер. Это выражается в том, что большая часть катионов марганца (около 75-80%) удалялась из камеры обессоленного раствора в первые 15 минут экспериментов, а затем происходила более медленная доочистка растворов. Для растворов с более высокой исходной концентрацией менее резкая, что коррелируется с упомянутой ранее худшей эффективностью удаления целевых ионов. Кроме того, наблюдается более заметное влияние многокомпонентности растворов на эффективность разделения в виде значительных расхождений в итоговых показателях. Выделяется на фоне остальных зависимость приведенной концентрации от времени для раствора ЖМ3 – кривая имеет более линейный характер.

Графики с зависимостями изменения приведенной концентрации катионов $Fe_{общ}$ в камере для обессоленного раствора от времени при разделении растворов серии «Ж» и «ЖМ» представлены на рис. 3.

По результатам экспериментов установлена общая для всех исследуемых растворов закономерность, заключающаяся в снижении эффективности очистки при повышении начальной концентрации растворённых веществ. Кроме того, фиксируется увеличение времени, необходимого для достижения заданной степени очистки, что непосредственно связано с ухудшением динамики массопереноса из-за усложнения диффузии растворённых частиц. Данное

усложнение вызвано явлением концентрационной поляризации (КП), увеличением межмолекулярного взаимодействия частиц в растворе, образованием конкурирующих адсорбционных взаимодействий и избирательностью ионообменных мембран к конкретному веществу.

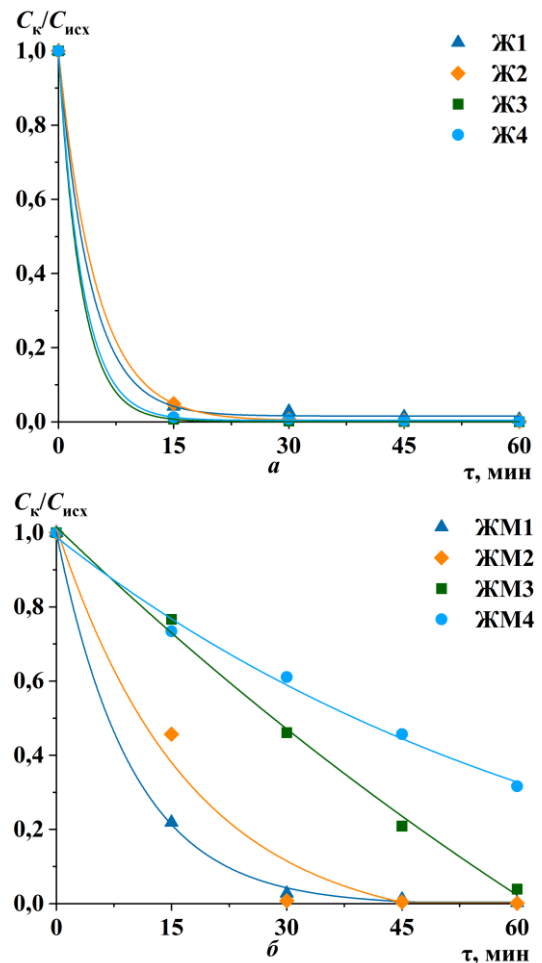


Рис. 3 –Изменение приведенной концентрации катионов $Fe_{общ}$ в камере для обессоленного раствора в процессе электродиализного разделения растворов «Ж» (а) и «ЖМ» (б)

Fig. 3 – Changes in the reduced concentration of Fe_{com} cations in the desalinated solution chamber during electrodiализ separation of "ZH" (a) and "ZHM" (b) solutions

Многокомпонентный состав растворов оказывает большее влияние на эффективность очистки от ионов железа, чем на эффективность очистки от ионов марганца. При разделении всех растворов серии «Ж», содержащих только $FeCl_3$ в различной концентрации, катионы $Fe_{общ}$ быстро удалялись из камеры обессоливания, и к первому отбору образцов через 15 минут после начала эксперимента было удалено 95-99% от исходного количества катионов $Fe_{общ}$, что нельзя сказать про разделение многокомпонентных растворов серии «ЖМ». При этом для растворов ЖМ1 и ЖМ2 характерен более долгий процесс очистки в течение эксперимента при аналогичной эффективности очистки соответствующих растворов серии «Ж», в то время

как для растворов с более высокой исходной концентрацией эффективность ухудшается. С негативной стороны отметим разделение раствора ЖМ4, в ходе которого эффективность удаления катионов $Fe_{общ}$ составила всего 66%.

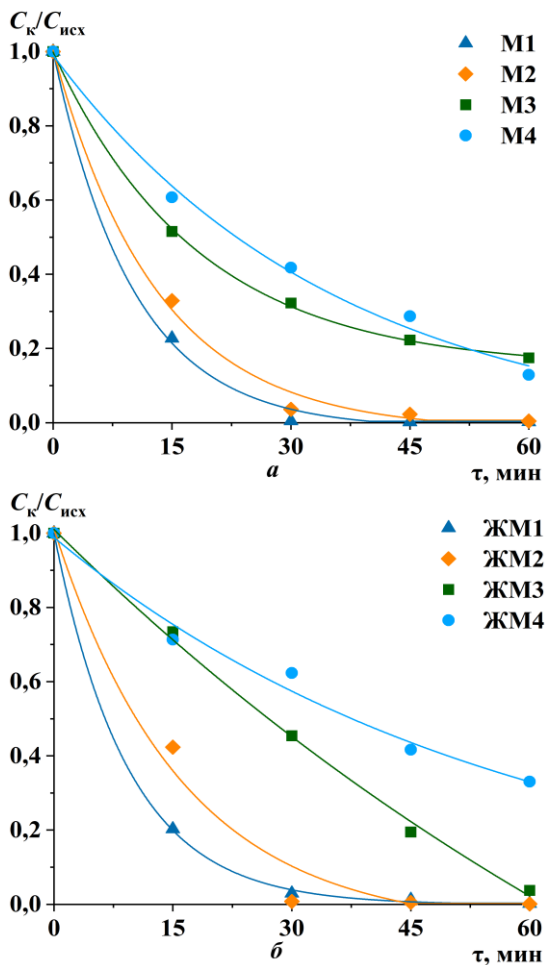


Рис. 4 –Изменение приведенной концентрации анионов SO_4^{2-} в камере для обессоленного раствора в процессе электродиализного разделения растворов «М» (а) и «ЖМ» (б)

Fig. 4 – Changes in the reduced concentration of SO_4^{2-} anions in the desalinated solution chamber during electro dialysis separation of "M" (a) and "ZHM" (b) solutions

Кривые (рис. 4), демонстрирующие динамику изменения приведенной концентрации сульфат-анионов в камере для обессоливания в процессе электродиализного разделения растворов «М» и «ЖМ», имеют форму, аналогичную полученным для катионов марганца. Это свидетельствует о схожести механизмов диффузии и сорбции в процессе электродиализа для анионов и катионов в рамках рассматриваемых растворов. Важно подчеркнуть, что эффективность удаления сульфат-анионов из растворов «М» и «ЖМ» с использованием мембраны марки МА-41П на протяжении всего процесса электродиализа оказалась ниже, чем эффективность удаления катионов Mn^{2+} . В ходе исследования было отмечено, что на отдельных этапах разделения растворов серии «М» наблюдалась значительная разница в

эффективности, достигающая 10%, что свидетельствует о зависимости эффективности очистки от условий эксперимента.

Более высокая начальная концентрация раствора, содержащего сульфат-анионы, приводит к менее эффективному удалению этих анионов методом электродиализа в течение 60 минут. Этот эффект аналогичен тому, что наблюдался и для других ионов. Увеличение общего количества ионов в растворе приводит к более высокой конкуренции между ними, затрудняет процесс удаления целевых ионов и снижает селективность мембраны. Общий уровень очистки от анионов SO_4^{2-} варьировался в пределах 80,0-99,5% для растворов серии «М» и 61,0-99,0% для «ЖМ».

На рис. 5 представлены графики, которые отображают динамику изменения приведенной концентрации анионов хлора в камере с обессоленным раствором. Эти графики были получены в ходе электродиализного процесса разделения растворов серий «Ж» и «ЖМ».

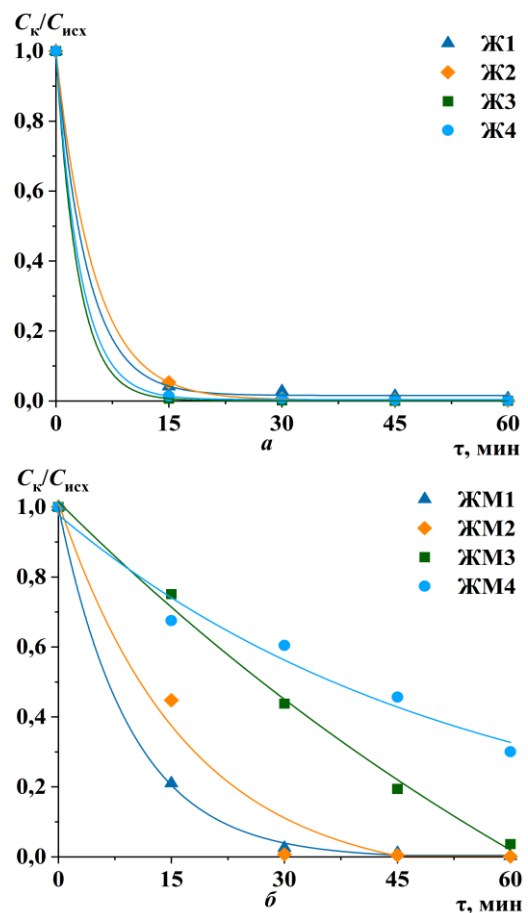


Рис. 5 – Изменение приведенной концентрации анионов Cl^- в камере для обессоленного раствора в процессе электродиализного разделения растворов «Ж» (а) и «ЖМ» (б)

Fig. 5 – Changes in the reduced concentration of Cl^- anions in the desalinated solution chamber during electro dialysis separation of "ZH" (a) and "ZHM" (b) solutions

Очистка от данных анионов протекает достаточно эффективно. Для большинства растворов эффективность очистки превышает 96%. Исключением

является разделением многокомпонентного раствора ЖМ4, который обладал наибольшей исходной концентрацией. В этом случае наблюдалось значительное влияние большого количества растворенных веществ на эффективность массопереноса анионов хлора. Подобные эффекты выявлены также и для других ионов, что указывает на общую тенденцию. Такое поведение селективности мембран может быть объяснено осадкообразованием на поверхности мембран и повышением концентрационной поляризации (КП), которое происходит при увеличении исходных концентраций растворенных веществ.

Заключение

В рамках выполнения данной работы были проведены исследования влияния исходной концентрации растворенных веществ и многокомпонентности растворов, содержащих ионы Mn^{2+} , $Fe^{общ}$, SO_4^{2-} и Cl^- , на эффективность электродиализной очистки с применением ионообменных мембран МК-40Л и МА-41П.

Увеличение концентрации веществ в сложных растворах оказывает значительное влияние на эффективность электродиализа, используемого для удаления различных ионов. Это влияние неравномерно распределяется между различными ионами, что проявляется в изменении эффективности их удаления. В рамках данной работы выявлено у ионов марганца, хлора и сульфат-анионов. Например, при изначально низких концентрациях ионов наблюдаются высокие показатели эффективности очистки. Однако по мере увеличения концентрации для большинства исследуемых растворов серий «М» и «ЖМ» происходит значительное снижение эффективности очистки, когда достигается определенное пороговое значение исходной концентрации. Важно отметить, что это пороговое значение может существенно варьироваться в зависимости от типа иона, что связано с различиями в их электрохимических свойствах и поведении в растворе. Некоторые ионы могут оказаться более подверженными агрегации и взаимодействию с другими компонентами раствора, что затрудняет их удаление. Кроме того, с увеличением концентрации ионов в растворе могут возникать различные явления, такие как осадкообразование, концентрационная поляризация (КП), которые негативно сказываются на общей производительности процесса. Это может проявляться и в виде увеличения сопротивления и изменения кинетических характеристик ионообменных мембран.

Поэтому для оптимизации процесса электродиализной очистки важно тщательно исследовать влияние различных факторов, включая начальные концентрации ионов, на эффективность удаления ионов. Это позволит более точно прогнозировать поведение системы и, в конечном итоге, улучшить результаты очистки за счет правильного подбора условий эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Литература

1. И. А. Евдокимов, Л. И. Толмачев, А. Д. Бондарчук, В. А. Кравцов, Б. А. Даржания, *Молочная промышленность*, 9, 69 – 73 (2018). DOI: 10.31515/1019-8946-2018-9-69-72.
2. С. А. Конева, Ю. В. Матвеев, В. М. Цалоев, *JARiTS*, 28, 94-97 (2022). DOI: 10.26160/2474-5901-2022-28-94-97.
3. A. A. Shepshelov, A. V. Kulikov, N. N. Petushev, A. A. Litvinchuk, A. S. Danilyuk, D. A. Zaychenko, *Food Industry: Science and Technology*, 15, 1(55), 61-66 (2022). DOI: 10.47612/2073-4794-2022-15-1(55)-61-66.
4. В. А. Шапошник, В. И. Васильева, О. В. Григорчук. *Явления переноса в ионообменных мембранах*, МФТИ (ГУ), Москва, 2001. 200 с.
5. К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, К. К. Полянский, Н. Н. Игнатов, *Журнал прикладной химии*, 94, 5, 547-552 (2021). DOI: 10.31857/S0044461821050017.
6. Т. В. Елисеева, А. Ю. Харина, Е. Н. Черникова, О. Е. Чарушина, *Сорбционные и хроматографические процессы*, 21(4), 492-497 (2021). DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3633.
7. Н. В. Лоза, С. А. Лоза, Н. А. Романюк, Н. А. Кононенко, *Электрохимия*, 55, 9, 1091-1098 (2019). DOI: 10.1134/S0424857019090093.
8. I. Monzie, L. Muhr, F. Lapicque, G. Grévilot, *Chem. Eng. Sci.*, 60, 1389-1399 (2005).
9. К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, А. В. Крылов, Д. С. Лазарев, О. В. Ломакина, *Вестник технологического университета*, 26, 3, 21-25 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_3_21.
10. L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, *Membranes*, 10, 7, 146 (2020). DOI: 10.3390/membranes10070146.
11. Е. Н. Егоров, А. А. Свитцов, С. Н. Дудник, В. И. Демкин, *Мембраны и мембранные технологии*, 2, 3, 198 (2012).
12. С. И. Нифталиев, О. А. Козадрова, К. Б. Ким, *Экология и промышленность России*, 25, 10, 4-9 (2021). DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-4-9.
13. С. С. Кругликов, Н. Е. Некрасова, В. В. Кузнецов, Е. А. Филатова, *Мембраны и мембранные технологии*, 9, 2, 146-152 (2019). DOI: 10.1134/S2218117219020056.
14. Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, А. И. Ляпин, А. И. Минibaев, А. И. Силов, Л. И. Тромачев, *Надежность и безопасность энергетики*, 4(31), 41-45 (2015).
15. В. И. Быков, С. И. Ильина, В. И. Логинов, Л. В. Равичев, А. А. Свитцов, *Вестник Технологического университета*, 24, 7, 5-10 (2021). DOI: 10.25712/ACTU.2072-8921.2021.03.024.
16. Т. А. Краснова, *Сорбционные и хроматографические процессы*, 12, 3, 419-427 (2012).

References

1. I. A. Evdokimov, L. I. Tolmachev, A. D. Bondarchuk, V. A. Kravtsov, B. A. Darzhaniya, *Dairyindustry*, 9, 69 – 73 (2018). DOI: 10.31515/1019-8946-2018-9-69-72.
2. S. A. Koneva, Yu. V. Matveev, V. M. Tsaloev, *JARiTS*, 28, 94-97 (2022). DOI: 10.26160/2474-5901-2022-28-94-97.

- 3 A.A. Shepshelev, A.V. Kulikov, N.N. Petushev, A.A. Litvinchuk, A.S. Danilyuk, D.A. Zaychenko, *Food Industry: Science and Technology*, **15**, 1(55), 61-66 (2022). DOI: 10.47612/2073-4794-2022-15-1(55)-61-66.
4. V.A. Shaposhnik, V.I. Vasilyeva, O.V. Grigorichuk. *Transfer phenomena in ion-exchange membranes*, МИПТ (ГУ), Moscow, 2001. 200 p.
5. K.V. Shestakov, S.I. Lazarev, K.K. Polyansky, N.N. Ignatov, *Journal of Applied Chemistry*, **94**, 5, 547-552 (2021). DOI: 10.1134/S1070427221050013.
6. T. V. Eliseeva, A. Y. Kharina, E. N. Chernikova, O. E. Charushina, *Sorption and chromatographic processes*, 21(4), 492-497 (2021). DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3633>.
7. N.V. Loza, S.A.Loza, N.A.Romanyuk, N.A. Kononenko, *Electrochemistry*, **55**, 9, 1091-1098 (2019). DOI: 10.1134/S102319351909009X.
8. I. Monzie, L. Muhr, F. Lapique, G. Grévillet, *Chem. Eng. Sci.*, 60, 1389-1399 (2005).
9. K.V.Shestakov, S.I.Lazarev, A.V.Krylov, D.S.Lazarev, O.V.Lomakina, *Herald of Technological University*, **26**, 3, 21-25 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_3_21.
10. L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, *Membranes*, **10**, 7, 146 (2020). DOI: 10.3390/membranes10070146.
11. E. N. Egorov, A. A. Swittsov, S. N. Dudnik, V. I. Demkin, *Membranes and membrane technologies*, **2**, 3, 198 (2012).
12. S. I. Niftaliev, O. A. Kozaderova, K. B. Kim, *Ecology and Industry of Russia*, **25**, 10, 4-9 (2021). DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-4-9
13. S. S. Kruglikov, N. E. Nekrasova, V. V. Kuznetsov, E. A. Filatova, *Membranes and membrane technologies*, **9**, 2, 146-152 (2019). DOI: 10.1134/S2517751619020057
14. N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, A.I. Lyapin, A.I. Minibaev, A.I. Silov, L.I. Tromachev, Reliability and safety of energy, 4(31), 41-45 (2015).
15. V.I. Bykov, S.I. Ilyina, V.I. Loginov, L.V. Ravichev, A.A. Swittsov, *Herald of Technological University*, **24**, 7, 5-10 (2021). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.024
16. T. A. Krasnova, *Sorption and chromatographic processes*, **12**, 3, 419-427 (2012).

© **Т. А. Пудовкина** – аспирант кафедры Механика и инженерная графика (МИГ), Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия, tatyanka.xromova96@mail.ru; **С. И. Лазарев** – д.т.н., проф., зав. кафедрой МИГ, ТГТУ, sergey.lazarev.1962@mail.ru; **К. В. Шестаков** – д.т.н., доцент кафедры МИГ, ТГТУ, kostyanshestakov@mail.ru.

© **Т. А. Pudovkina** – PhD-student, Department of Mechanics and Engineering Graphics (MEG), Tambov State Technical University (TSTU), Tambov, Russia, tatyanka.xromova96@mail.ru; **S. I. Lazarev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the MEG department, TSTU, sergey.lazarev.1962@mail.ru; **K. V. Shestakov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate professor of the MEG department, TSTU, kostyanshestakov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 08.05.25.