Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-333-343 Оригинальная статья/Research article
УДК 66.023.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Электрохимические характеристики процесса электронанофильтрационного разделения никельсодержащих растворов

Сергей И. Лазарев [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Дмитрий Н. Коновалов [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Павел. М. Малин [1] malin.pavlik@mail.ru 0009-0003-9535-277X
Константин К. Полянский [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-7333-4816

1 Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия
2 Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В технологических схемах очистки сточных вод производственных предприятий общий сток включает ряд компонентов, таких как кислотно-щелочные, цианистые, хром и никельсодержащие растворы, а также растворы, содержащие поверхностно-активные вещества от вспомогательных помещений. В связи с этим перспективным является применение электронанофильтрации (электробаромембранного процесса, а не электромембранного). Так в подобных процессах используются пористые полупроницаемые полимерные нанофильтрационные мембраны, а основными движущими силами выступают напряжение и трансмембранное давление. В качестве объекта экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик, сопротивления и электропроводности была выбрана нанофильтрационная мембрана типа ОПМН-П, представляющая собой пористую полимерную пленку на полиамидной основе, нанесенную на ультрафильтрационную основу. Выполненные экспериментальные исследования электрохимических характеристик процесса электробаромембранного разделения никельсодержащих растворов позволяют сформулировать следующие выводы: на кривых ВАХ отмечены два участка изменения плотности тока от напряжения. С повышением концентрации никеля фиксируется не линейное изменение плотности тока от трансмембранного давления; увеличение напряжения в электронанофильтрационной системе приводит к снижению омического сопротивления и росту электропроводности, что связано с ростом конвективного переноса ионов никеля через нанофильтрационную мембрану; установлено, что прикатодный пермеат подщелачиваетя, а прианодный пермеат подкисляется, таким образом, в прикатодной области происходит процесс восстановления, а в прианодной области – процесс окисления.

Ключевые слова: электробаромембранное разделение, раствор, вольт-амперные характеристики, сопротивление, электропроводность.

Electrochemical characteristics of the process of electron nanofiltration separation of nickel-containing solutions

Sergey I. Lazarev [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Dmitry N. Konovalov [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Pavel. M. Malin [1] malin.pavlik@mail.ru 0009-0003-9535-277X
Konstantin K. Polyansky [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-7333-4816

1 Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia
2 Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. In industrial wastewater treatment process flow charts, the total effluent includes a number of components, such as acid-base, cyanide, chromium, and nickel-containing solutions, as well as solutions containing surfactants from auxiliary areas. Therefore, the use of electronanofiltration (an electrobaromembrane process, rather than an electromembrane process) is promising. Such processes utilize porous semipermeable polymer nanofiltration membranes, with voltage and transmembrane pressure serving as the primary driving forces. The OPMN P nanofiltration membrane, a porous polymer film on a polyamide base applied to an ultrafiltration substrate, was chosen for experimental studies of its volt-ampere characteristics, resistance, and conductivity. The experimental studies of the electrochemical characteristics of the electrobaromembrane separation of nickel-containing solutions allow us to formulate the following conclusions: the I-V curves show two sections of current density changing with voltage. With increasing nickel concentration, a nonlinear change in current density is recorded as a function of transmembrane pressure; an increase in voltage in the electron-nanofiltration system leads to a decrease in ohmic resistance and an increase in electrical conductivity, which is associated with an increase in the convective transfer of nickel ions through the nanofiltration membrane; it was established that the cathode permeate becomes alkaline, while the anode permeate becomes acidic, thus, a reduction process occurs in the cathode region, and an oxidation process in the anode region..

Keywords: electrobaromembrane separation, solution, volt-ampere characteristics, resistance, electrical conductivity.

Для цитирования
Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Малин П.М., Полянский К.К. Электрохимические характеристики процесса электронанофильтрационного разделения никельсодержащих растворов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 333–343. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-333-343

For citation
Lazarev S.I., Konovalov D.N., Malin P.M., Polyansky K.K. Electrochemical characteristics of the process of electron nanofiltration separation of nickel-containing solutions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 333–343. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-333-343

© 2026, Лазарев С.И. и др. / Lazarev S.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Прорывное развитие химической, машиностроительной, аграрной и др. отраслей промышленности невозможно без использования современных ресурсосберегающих и экологичных процессов электромембранного разделения технологических растворов, однако широкое их применение ограничено рядом факторов, таких как предварительная лабораторная проработка жидкостей с компонентным составом реальных производств, исследование эксплуатационных свойств различных типов мембран, разработка аппаратурно-технологического оформления электромембранных аппаратов с заданными технологическими, конструктивными и прочностными параметрами. Существуют и особенности применения процессов электромембранного разделения, так возможно присутствующие в технологических растворах соли жесткости (кальция и магния) накладывают некоторые ограничения [1].

В течение последних двадцати пяти лет проведено значительное количество исследований, направленных на разработку и совершенствование различных типов мембран. В настоящее время особенно востребованы ионообменные мембраны, обладающие повышенной селективностью, пониженным электрическим сопротивлением, высокой химической, механической и термической устойчивостью, а также длительным сроком службы.

В технологических схемах очистки сточных вод производственных предприятий общий сток включает ряд компонентов, таких как кислотно-щелочные, цианистые, хром и никельсодержащие растворы, а также растворы, содержащие поверхностно-активные вещества от вспомогательных помещений. В связи с этим перспективным является применение электронанофильтрации (электробаромембранного процесса, а не электромембранного). Так в подобных процессах используются пористые полупроницаемые полимерные нанофильтрационные мембраны, а основными движущими силами выступают напряжение и трансмембранное давление.

В течение нескольких последних лет проводится значительный объем исследований, посвященных разработке, совершенствованию и дальнейшему изучению электрохимических свойств мембран. Ниже представлен обзор научных публикаций по соответствующей тематике.

В работе [2] авторы на основании проведенного литературного обзора по исследованию вольт-амперных характеристик электромембранных систем отмечают недостаточность данных по пористым полупроницаемым полимерным мембранам, в отличие от ионообменных. Полученные результаты экспериментальных исследований электрохимических характеристик мембранной системы с нанофильтрационными мембранами ОФАМ-К и ОПМН-П при электробаромембранном разделении модельного раствора, содержащего нитрат аммония и сульфат калия, позволили выделить характерные периоды на ВАХ (запредельный режим, деградация активного слоя мембраны).

Также малоисследованными электромембранными системами в работе [3] по результатам проведенного обзора литературных источников отмечаются системы с применением пористых полупроницаемых полимерных мембран. На полученных кривых ВАХ в результате исследований мембранной системы с мембранами марок УАМ-100 и МГА-95, полученных при электробаромембранном разделении модельного раствора с ионами Mg^{2+} и Fe^{2+}, выделены характерные периоды (запредельный режим, интенсивный электроосмотический перенос) от действия напряжения и трансмембранного давления.

Авторы работы [4] провели экспериментальные исследования электрохимических свойств композитных материалов на основе перфторированной мембраны и полианилина Приведенный метод матричного синтеза во внешнем электрическом поле отмечается менее затратным и экологичнее в результате применения слабоконцентрированных растворов серной кислоты и анилина в сравнении с синтезом полианилина в статике. Высокая электропроводность и предельный ток исследованных композитных мембран позволяют сделать вывод о перспективности их применения в электромембранных процессах.

В работе [5] проведенные экспериментальные исследования мембраны МФ-4СК в составе мембранно-электродного блока водородного топливного элемента позволили оценить ее деградацию методами мембранной кондуктометрии и вольтамперометрии, контактной эталонной порометрии и оптической микроскопии. Отмечается влияние на деградацию мембраны, ее обменную емкость, влагосодержание, характеристики пористой структуры, удельную электропроводность и параметры вольтамперной кривой температуры и приложенной механической нагрузки, действующих в процессе прессования мембранно-электродного блока и различных условий его эксплуатации.

Проведенные авторами работы [6] экспериментальные исследования структурных и электрохимических параметров полиэтилентерефталатных трековых мембран при нанесении на одну сторону раствора сополимера из стирола и бутилметакрилата методом полива, позволили создать композитные мембраны с асимметрией проводимости и выпрямляющим эффектом в растворах электролитов, сходным с *p*-*n*-переходом в полупроводниках. Подобное явление объясняется снижением размеров и формы пор в осажденном слое сополимера и образованием межфазной границы раздела в порах между исходной мембраной и слоем сополимера с различной гидрофильностью.

В работе [7] на основе проведенных исследований структурных и электроповерхностных параметров полимерных ультрафильтрационных мембран в растворах NaCl, рассчитаны средние радиусы пор, которые могут быть применены при расчете электрокинетического потенциала с повышенными концентрациями. Разработан метод и представлены расчеты ряда структурных и электрохимических характеристик селективного слоя и подложки ацетатцеллюлозной мембраны.

Авторами в работе [8] отмечается, что проведенные экспериментальные исследования электрохимических, транспортных характеристик мембранной систем с нанофильтрационными мембранами ОПМН-П и ОФАМ-К процесса электронанофильтрации модельных и технологического растворов гальванических линий и производств минеральных удобрений, позволили определить влияние дросселирования в электрохимической ячейке и разогрева раствора на изменение локальной электропроводности раствора в межмембранном канале и, как следствие, роста плотности тока. Проведен анализ электрохимических характеристик исследуемых мембранных систем и выявлены характерные периоды. Определено влияние перепада давления, напряжения и, как следствие, pH раствора на транспортные характеристики процесса электронанофильтрации Предложены математические уравнения для теоретического расчета удельного выходного потока и коэффициента задержания с подобранными эмпирическими коэффициентами.

Авторы работы [9] также отмечают характерные периоды на вольт-амперных, омических характеристиках и электропроводности мембранных систем с ультрафильтрационными мембранами УФМ-50 при электромембранном разделении водного раствора K_2 SO_4. Определена взаимосвязь трансмембранного давления с омическим сопротивлением и электропроводностью системы, а также удельного выходного потока с величиной pH пермеатов и временем проведения эксперимента.

В работе [10] на основании проведенного литературного обзора электромембранных методов обоснован выбор объектов исследования электродиализного разделения растворов с содержанием ионов Zn^{2+}, Fe^{3+} и Na^{+}. На ВАХ мембранной системы выявлены два участка, определена зависимость силы тока и концентрации раствора на скорость миграции ионов. Сделан вывод об эффективности использования ионообменных мембран МА-41 и МК-40 в электродиализном аппарате для исследуемых растворов. Разработана методика расчета технологических параметров электродиализных установок, таких как предельная плотность тока, выход по току, площадь камер концентрирования и обессоливания, позволяющая провести секционирование аппарата.

На основании проведенного обзора процессов очистки хромсодержащих сточных вод авторами работы [11] теоретически обосновано использование электродеионизации. Разработаны установка и мембранная ячейка, получены данные по ВАХ, электропроводности мембранной системы в процессе электродеионизации сточных вод с компонентами хрома.

В работе [12] выявлены экологические проблемы машиностроительных и гальванических отраслей промышленности в связи с наличием слабоконцентрированных стоков. Проведены экспериментальные исследования ВАХ в процессе электродеионизации хромсодержащего модельного раствора с применением разных видов ионообменных смол и ионообменных мембран типа МА-41П и МК-40. Описаны конструкция электромембранного модуля и методика проведения эксперимента. Интерпретированы полученные кривые, выделены характерные участки для разных видов ионообменных наполнителей.

Авторы работы [13] исследовали электрохимические характеристики и транспорт ионов соли, борной кислоты и ее анионов для гетерогенных катионо- и анионообменных мембран Ralex с варьирование величины pH, используя метод вращающегося мембранного диска (ВМД). Выявлены закономерности переноса аниона тетрагидроксибората B(OH) – 4 через анионообменную мембрану.

Применение процесса электродиализа достаточно эффективно разделяет раствор

нитрата натрия и борной кислоты, но существуют особенности, связанные с напряжением на электродиализаторе.

Авторы работы [14] всесторонне исследовали электрохимические характеристики двухслойных ионообменных мембран МК-41/МФ-4СК и МА-41/МФ-4СК. Получена четырехслойная математическая модель для системы в тернарных растворах электролитов. Предложены расчетные формулы предельного тока, эффективных чисел переноса и коэффициентов специфической селективности, а также подобраны численные значения коэффициентов при различных плотностях тока. Экспериментально определены транспортные характеристики слоев исследуемых двухслойных мембран в различных растворах электролитов.

В работе [15] для диагностики эффекта капсулирования в профилированных гетерогенных мембранах, появление которого возможно при горячем прессовании, разработан подход для расчета поверхностного электрического сопротивления ионообменных мембран со сложной геометрией поверхности.

Авторы работы [16] в своих исследованиях трековых мембран (ТМ) с асимметричными порами для определения ацетилхолин хлорида (АЦХ) использовали метод циклической переменнотоковой вольтамперометрии. Получены данные по электрохимическим и метрологическим характеристикам ТМ с наполненными наночастицами дробленого катионита и анионита порами.

Авторы работы [17] использовали метод импедансной спектроскопии для определения структурных и электрохимических характеристик композита и его фаз гетерогенных ионообменных мембран МК-40 (H^+, K^+, Na^+, NH_4^+ – формы) и МА-41 (Cl^- и NO_3^- – формы). Проведено сравнение двух способов измерения импеданса мембран: контактный и контактно-разностный, определен наиболее предпочтительный. Получены спектры электрохимического импеданса ионообменных мембран в разных ионных формах, показавшие обратную пропорциональность величины радиуса полуокружности годографа импеданса к коэффициенту диффузии противоиона и прямую пропорциональность к доле межгелевой фазы мембраны.

На основании проведенного обзора литературных источников [2–17], посвященных исследованиям электрохимических характеристик мембранных систем, сформулирована цель настоящей работы, заключающаяся в получении и интепретации вольт-амперных характеристик, сопротивления и электропроводности в процессе электронанофильтрационного разделения никельсодержащих растворов с использованием нанофильтрационной мембраны ОПМН-П.

Материалы и методы

В качестве объекта экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик, сопротивления и электропроводности была выбрана нанофильтрационная мембрана типа ОПМН-П, представляющая собой пористую полимерную пленку на полиамидной основе, нанесенную на ультрафильтрационную основу (производитель ЗАО НТЦ «Владипор», г. Владимир), эксплуатационные характеристики которой представлены в таблице 1.

Другим объектом экспериментальных исследований выступал водный раствор химически чистого сернокислого никеля ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$ ГОСТ 4465–2016), имитирующий состав технологического раствора, образующегося в процессе никелирования.

На рисунке 1 представлена модернизированная электронанофильтрационная (электробаромембранная) установка для исследования электрохимических характеристик мембранных систем.

Таблица 1.

Эксплуатационные характеристики мембраны ОПМН-П [18]

Table 1.

Operational characteristics of the OPMN-P membrane

Размер пор | Pore size	2–5 нм
Селективность по отношению одновалентными ионам (Cl-) раствора NaCl с массовой концентрацией 1,5 г/дм³ при давлении 1,5 ± 0,2 МПа, % Selectivity with respect to monovalent ions (Cl^-) of NaCl solution with a mass concentration of 1.5 g/dm³ at a pressure of 1.5 ± 0.2 MPa, %	≥50
Производительность по фильтрату при температуре 25 ± 1 °С и давлении 1,5 ± 0,2 МПа, дм³ / (м² ч) Permeate flux at a temperature of 25 ± 1 °C and pressure of 1.5 ± 0.2 MPa, dm³/(m²·h).	≥80
pH	2–12
Рабочая температура °С | Operating temperature, °С	10–35
Концентрация свободного хлора | Free chlorine concentration – при непрерывной работе | during continuous operation – при дезинфекции (не более 30 мин.) |during disinfection (not more than 30 min.)	 ≤1 мг/дм³ ≤5 мг/дм³

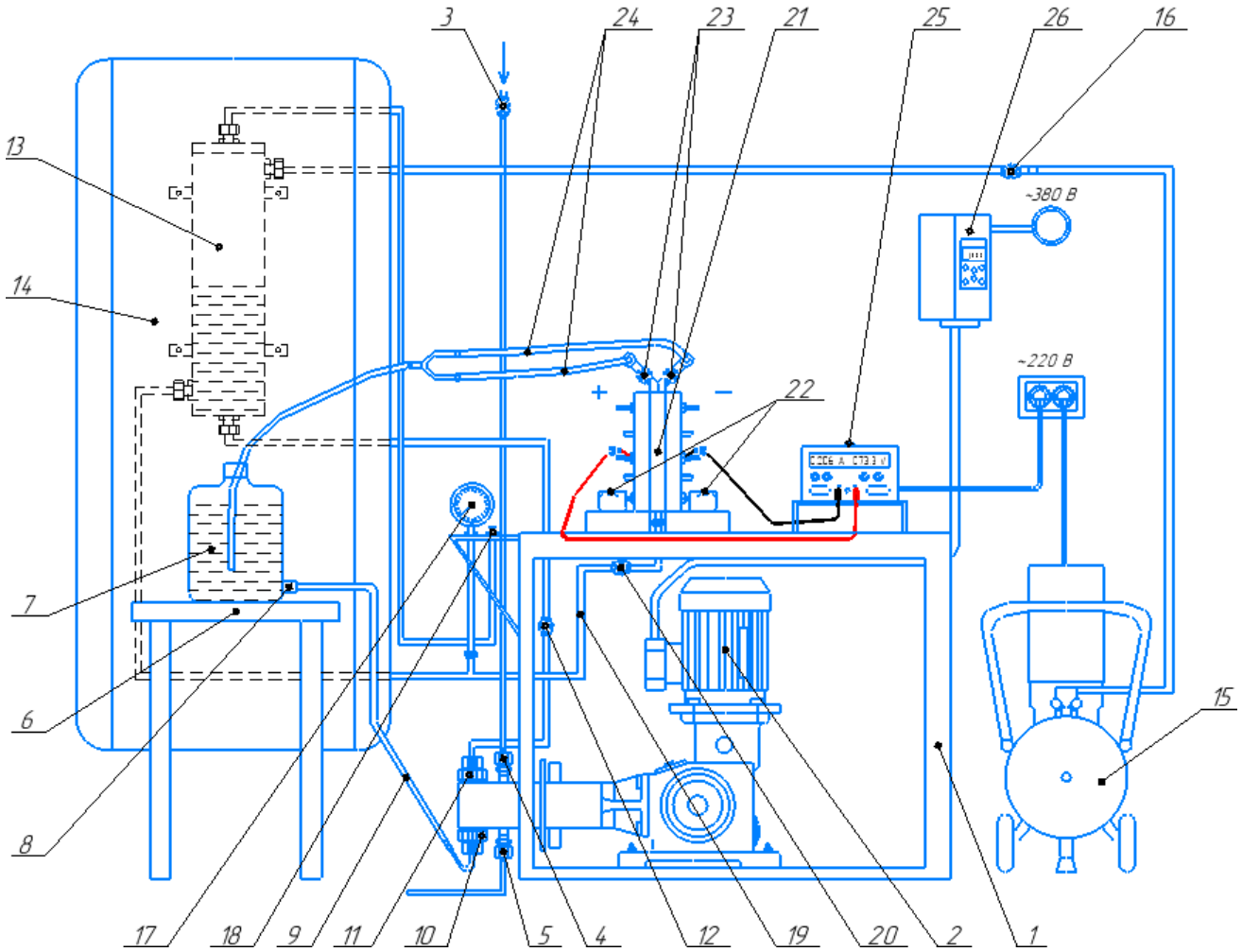


Рисунок 1. Схема модернизированной лабораторной электробаромембранной установки: 1 – стол металлический; 2 – агрегат электронасосный дозировочный плунжерный (НД 2,5 250/100 К14В-УХЛ3); 3 – вентиль подачи охлаждающей воды; 4 – штуцер подвода охлаждающей воды; 5 – штуцер вывода охлаждающей воды; 6 – стол для емкости; 7 – емкость с исходным раствором; 8 – штуцер для подачи раствора; 9 – всасывающий трубопровод; 10 – штуцер ввода исходного раствора; 11 – штуцер вывода исходного раствора; 12 – перекрывающий вентиль; 13 – ресивер; 14 – экран защитный; 15 – компрессор (Einhell TE-AC 270/24/10); 16 – вентиль подачи воздуха в ресивер; 17 – манометр; 18 – вентиль регулировки давления в ресивере; 19 – магистраль высокого давления; 20 – запорный вентиль; 21 – электробаромембранная ячейка; 22 – емкость для отбора прианодного и прикатодного пермеата; 23 – дозирующий вентиль; 24 – магистраль низкого давления; 25 – лабораторный блок питания; 26 – универсальный преобразователь частоты (IDS-Drive серия «М»)

Figure 1. Diagram of the upgraded laboratory electrobaromembrane installation: 1 – metal table; 2 – electric pump metering plunger unit (ND 2,5 250/100 K14V-UHLZ); 3 – cooling water supply valve; 4 – cooling water supply nozzle; 5 – cooling water outlet nozzle; 6 – tank table; 7 – tank with initial solution; 8 – solution supply nozzle; 9 – suction pipeline; 10 – initial solution inlet nozzle; 11 – initial solution outlet nozzle; 12 – shut-off valve; 13 – receiver; 14 – protective shield; 15 – compressor (Einhell TE-AC 270/24/10); 16 – air supply valve to the receiver; 17 – pressure gauge; 18 – pressure control valve in the receiver; 19 – high pressure line; 20 – shut-off valve; 21 is an electrobaromembrane cell; 22 is a reservoir for the selection of anode and cathode permeate; 23 – metering valve; 24 – low pressure line; 25 – laboratory power supply unit; 26 – universal frequency converter (IDS-Drive "M" series)

Электробаромембранная установка включает в себя стол металлический 1, агрегат электронасосный дозировочный плунжерный 2 (НД 2,5 250/100 К14В-УХЛ3) (далее по тексту «плунжерный насос»), который закреплен (зафиксирован) болтами на нижнем профиле стола металлического 1. Открытием вентиля подачи охлаждающей воды 3 заполняется система охлаждения плунжерного насоса 2 через штуцер подвода охлаждающей воды 4 и выходит через штуцер вывода охлаждающей воды 5 в канализацию.

Слева расположен стол для емкости 6, предназначенный для размещения емкости

с исходным раствором 7. При включении плунжерного насоса 2 осуществляется подача раствора через штуцер для подачи раствора 8 к всасывающему трубопроводу 9, который направляет поток к штуцеру ввода исходного раствора 10. Далее через штуцер вывода исходного раствора 11 раствор поступает при открытом перекрывающим вентиле 12 в ресивер 13, перед ресивером 13 закреплен экран защитный 14.

Сжатый воздух от компрессора 15 (Einhell TE-AC 270/24/10) поступает в ресивер 13 через вентиль подачи воздуха в ресивер 16. Давление воздуха контролируется манометром 17, при превышении допустимого давления излишки воздуха сбрасываются через вентиль регулировки давления в ресивере 18. По магистрали высокого давления 19 через запорный вентиль 20 осуществляется подача раствора к электробаромембранной ячейке 21. По обе стороны ячейки 21 расположены емкости для отбора прианодного и прикатодного пермеата 22. Перекрытием дозирующих вентилей 23 осуществляется поддержание необходимого давления в системе и подача раствора к магистрали низкого давления 24, после чего раствор возвращается в емкость с исходным раствором 7.

Лабораторный блок питания 25 выполняет функцию подачи напряжения на электроды электробаромембранной ячейки 21 и контроля силы тока. Лабораторный блок питания 25 оборудован цифровыми индикаторами (вольтметром и амперметром) и регуляторами грубой и точной установки напряжения и силы тока. Универсальный преобразователь частоты 26 (IDS-Drive серия «М») позволяет изменять частоту вращения электродвигателя плунжерного насоса 2, задавая необходимую подачу.

Методика проведения эксперимента по исследованию вольт-амперных характеристик проводилась следующим образом.

После выхода электронанофильтрационной установки на рабочий режим работы при заданной подаче плунжерного насоса 2 с помощью универсального преобразователя частоты 26 и необходимой величины рабочего давления (минимального для серии экспериментов) перекрытием дозирующих вентилей 23 осуществлялась подача электрического напряжения на электроды электробаромембранной ячейки 21 от лабораторного блока питания 25. С интервалом в 5 В ступенчато изменялось напряжение регуляторами грубой и точной установки и проводилась фиксация силы тока, отображаемых на вольтметре и амперметре соответственно лабораторного блока питания 25, в диапазоне напряжения 0–70 В. После чего напряжение восстанавливалось на значение «0» и эксперимент продолжался при следующем для серии экспериментов рабочем давлении аналогичным образом.

В результате полученных экспериментальных данных по силе тока рассчитывалась плотность тока по формуле:

$$i = I / F_{\text{м}}; \quad (1)$$

где I – фиксируемая сила тока при эксперименте, А; $F_{\text{м}}$ = 0,0078 м^2 – рабочая площадь мембраны в электробаромембранной ячейке.

По полученным данным плотности тока и напряжения строились вольт-амперные характеристики для диапазона рабочего давления 1–2 МПа и интервала концентрации чистого никеля в исходном растворе 10–40 мг/дм^3.

На основе закона Ома рассчитывалась величина сопротивления:

$$R = U / I, \quad (2)$$

где U – задаваемое напряжение, В.

Следующим этапом стало определение электропроводности мембранной системы по формуле:

$$\gamma = 1 / R. \quad (3)$$

После чего строились зависимости сопротивления и электропроводности мембранных систем, оснащенных нанофильтрационной мембраной ОПМН-П, при разделении никельсодержащего раствора от напряжения с варьированием трансмембранного давления и концентрации.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные зависимости электрохимических характеристик мембранной системы, оснащенной прианодной и прикатодной нанофильтрационной мембраной марки ОПМН-П, при разделении никельсодержащего раствора с концентрацией чистого никеля в диапазоне 10–40 мг/дм^3 от напряжения при варьировании трансмембранного давления в интервале 1–2 МПа представлены на рисунках 2–4.

Проанализировав данные ВАХ для никельсодержащих растворов, полученные при электронанофильтрационном разделении, можно выделить два явно выраженных участка изменения кривой. Первый участок – линейный омический, который характеризует сопротивление мембраны.

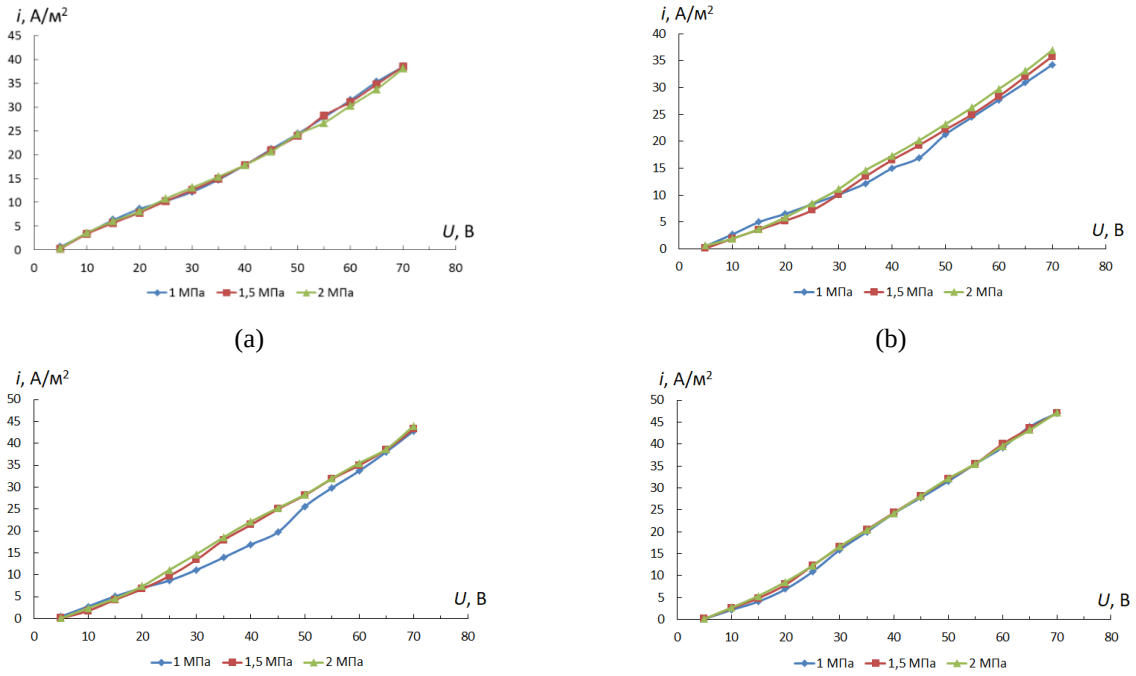


Рисунок 2. Вольт-амперные характеристики мембранной системы, оснащенной прианодной и прикатодной нанофильтрационной мембраной марки ОПМН-П, при разделении никельсодержащего раствора с концентрацией чистого никеля 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (d) мг/дм^3 от трансмембранного давления

Figure 2. Volt-ampere characteristics of a membrane system equipped with an anode and cathode nanofiltration membrane of the OPMN-P brand, when separating a nickel-containing solution with a concentration of pure nickel of 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (g) mg/dm^3 of transmembrane pressure

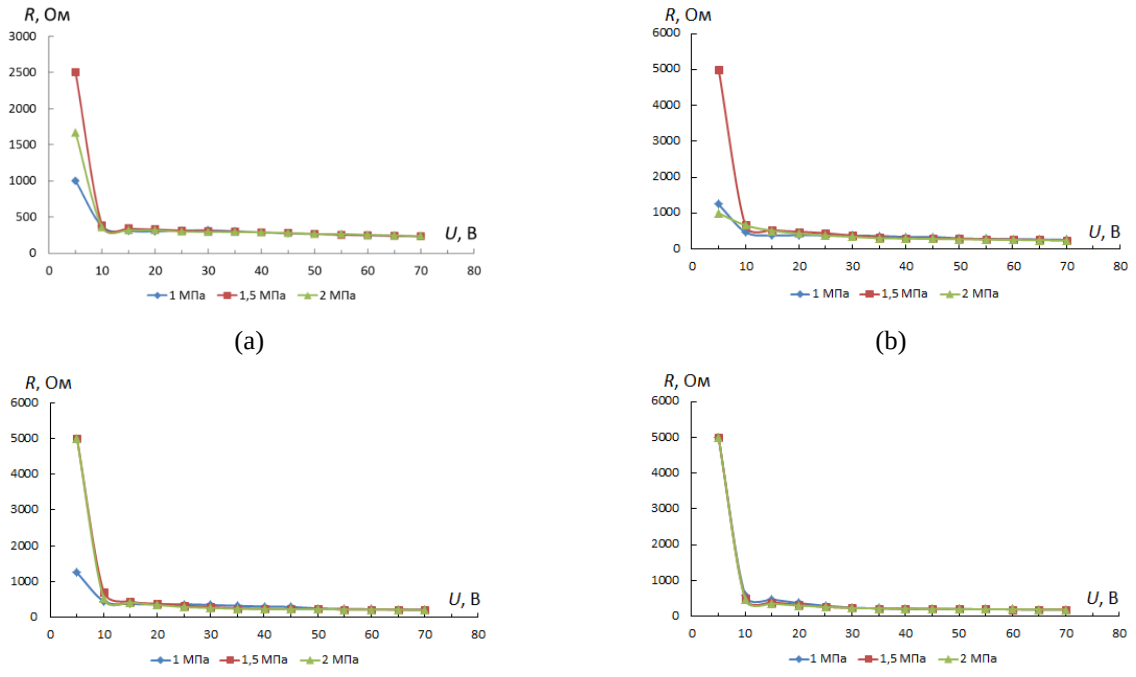


Рисунок 3. Зависимости сопротивления мембранной системы, оснащенной прианодной и прикатодной нанофильтрационной мембраной марки ОПМН-П, при разделении никельсодержащего раствора с концентрацией чистого никеля 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (d) мг/дм^3 от напряжения при варьировании трансмембранного давления

Figure 3. Dependences of the resistance of a membrane system equipped with an anode and cathode nanofiltration membrane of the OPMN-P brand during separation of a nickel-containing solution with a concentration of pure nickel of 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (d) mg/dm^3 on voltage with varying transmembrane pressure

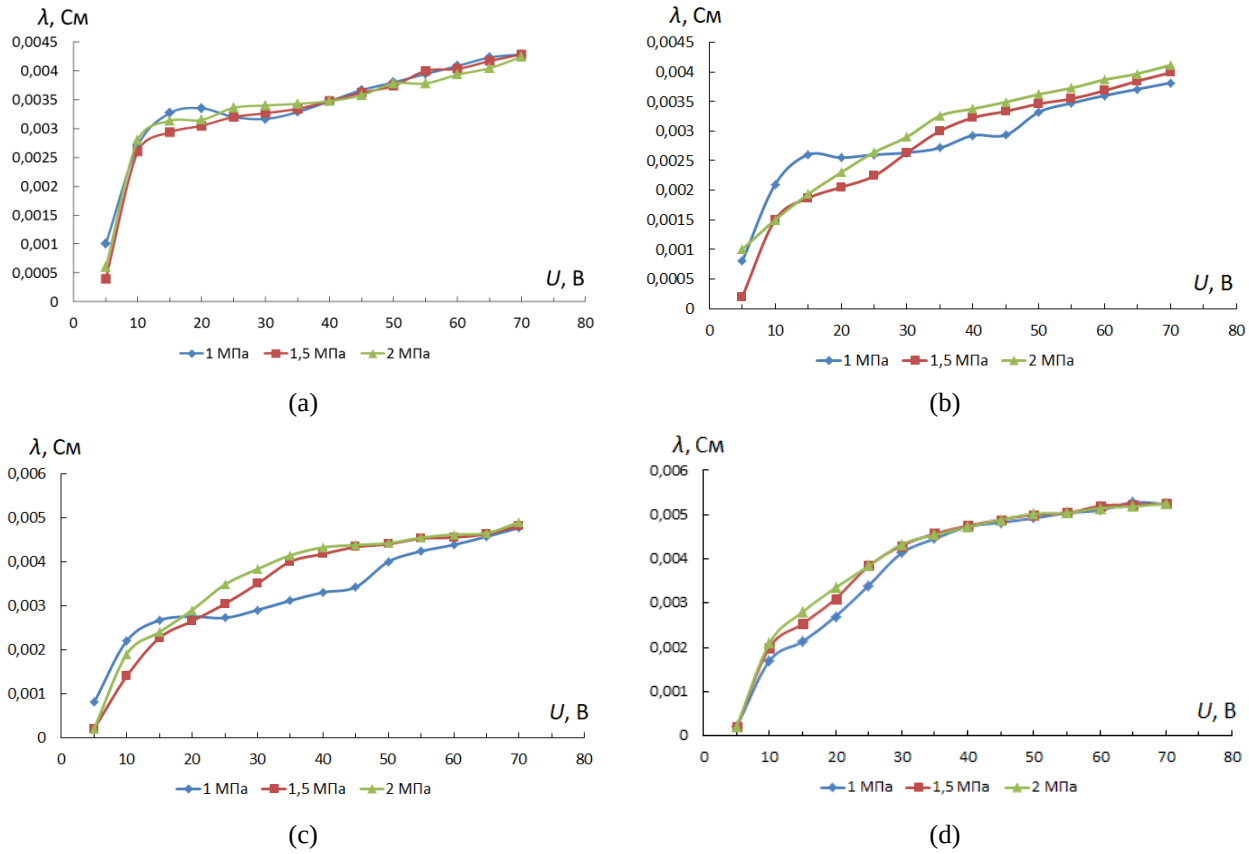


Рисунок 4. Зависимости электропроводности мембранной системы, оснащенной прианодной и прикатодной нанофильтрационной мембраной марки ОПМН-П, при разделении никельсодержащего раствора с концентрацией чистого никеля 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (d) мг/дм^3 от напряжения при варьировании трансмембранного давления

Figure 4. Dependences of the electrical conductivity of a membrane system equipped with an anode and cathode nanofiltration membrane of the OPMN-P brand upon separation of a nickel-containing solution with a concentration of pure nickel of 10 (a); 20 (b); 30 (c); 40 (d) mg/dm^3 on voltage with varying transmembrane pressure

Для никельсодержащих растворов с концентрацией 10–40 мг/дм^3 он находиться в диапазоне от 0 до 20 В. Следующая зона на вольтамперных кривых соответствует области сверхпредельных токов в диапазоне от 20 до 70 В. В этом диапазоне начинается активное образование ионов H^+ и OH^-, что связано с развитием концентрационной поляризации у поверхности мембран. Анализ полученных ВАХ показывает, что для растворов с повышенной концентрацией (40 мг/дм^3) [11] трансмембранное давление не однозначно влияет на ВАХ. С повышением концентрации никеля явно видно не линейное изменение плотности тока от трансмембранного давления.

Проведя анализ омических характеристик и электропроводности мембранных систем электронанофильтрационного процесса разделения никельсодержащих растворов при различных концентрациях и величины трансмембранного давления, представленных на рисунке 3 и 4, отмечается, что увеличение приложенного напряжения приводит к снижению омического сопротивления и росту электропроводности, что связано с увеличением конвективного переноса ионов никеля через нанофильтрационную мембрану. С повышением трансмембранного давления явно возрастает электропроводность системы, связанная с повышением конвективного переноса компонентов раствора.

Зависимости величины pH исходного раствора, прианодного и прикатодного пермеата от концентрации чистого никеля в диапазоне 10–40 мг/дм^3 представлены на рисунке 5.

Из данных, приведенных на рис. 5 видно, что разделяемый раствор немного изменяет pH раствора, что говорит о диссоциации компонентов никельсодержащего раствора. Прикатодный пермеат подщелачивается, а прианодный пермеат подкисляется, что соответствует физике электрохимического процесса, в прикатодной области происходят процессы восстановления, а в прианодной – окисления.

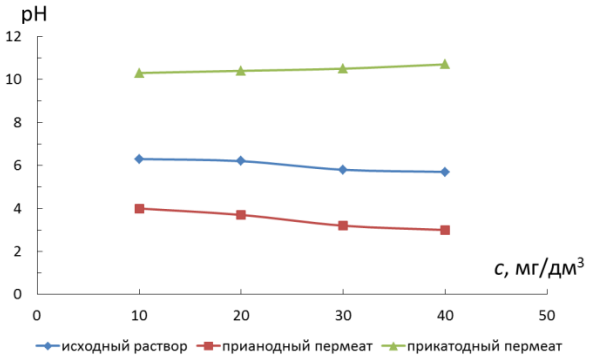


Рисунок 5. Зависимости величины pH до и после процесса электробаромембранного разделения никельсодержащего раствора от концентрации чистого никеля

Figure 5. Dependence of the pH value before and after the process of electrobaromembrane separation of a nickel-containing solution on the concentration of pure nickel

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования электрохимических характеристик процесса электробаромембранного разделения никельсодержащих растворов позволяют сформулировать следующие выводы: 1. На кривых ВАХ отмечены два участка изменения плотности тока от напряжения. С повышением концентрации никеля фиксируется не линейное изменение плотности тока от трансмембранного давления. 2. Увеличение напряжения в электронанофильтрационной системе приводит к снижению омического сопротивления и росту электропроводности, что связано с ростом конвективного переноса ионов никеля через нанофильтрационную мембрану. 3. Установлено, что прикатодный пермеат подщелачиваетя, а прианодный пермеат подкисляется, таким образом, в прикатодной области происходит процесс восстановления, а в прианодной области – процесс окисления.

Благодарности

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 Шапошник В.А., Васильева В.И., Григорчук О.В. Явления переноса в ионообменных мембранах. М.: МФТИ, 2001. 200 с.

2 Коновалов Д.Н., Ковалев С.В., Лазарев С.И., Луа П. и др. Вольт-амперные и омические характеристики электромембранной очистки гальванических стоков от ионов NH4+, Zn2+, NO3-, SO42-, PO43- // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 612–621. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.612-621

3 Лазарев С.И., Левин А.А., Ковалев С.В., Михайлин М.И. и др. Вольтамперные и проницаемые характеристики электробаромембранной очистки гальванических стоков от ионов Mg2+, Fe2+ // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26. № 4. С. 629–636. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.629-636

4 Кононенко Н.А., Долгополов С.В., Гнусин Н.П., Березина Н.П. и др. Электрохимические свойства композитных мембран МФ-4СК/полианилин, полученных методом матричного синтеза во внешнем электрическом поле // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2012. № 2. С. 42–47.

5 Кудашова Д.С., Кононенко Н.А., Бровкина М.А., Фалина И.В. Изучение деградации перфторированной мембраны в процессе работы в водородном топливном элементе // Мембраны и мембранные технологии. 2022. Т. 12. № 1. С. 29–37. doi: 10.1134/S2218117222010059

6 Кравец Л.И., Лизунов Н.Е., Мешалкин А.Ю., Робу С.В. и др. Структура и электрохимические свойства полимерных композитных мембран с селективным слоем // Электрохимия. 2011. Т. 47. № 4. С. 489–498.

7 Ермакова Л.Э., Савина И.А., Сидорова М.П. Структурные и электроповерхностные характеристики анизотропных ультрафильтрационных мембран // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2012. № 1. С. 55–68.

8 Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Луа П. Электрохимические и транспортные характеристики мембранных систем при электронанофильтрационном разделении растворов, содержащих нитрат аммония и сульфат калия // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 6. С. 355–376. doi: 10.31857/S0424857021050091

9 Луа П., Лазарев С.И., Ковалева О.А., Ковалев С.В. Электрохимические и кинетические характеристики процесса электромембранного разделения раствора сульфата калия // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 8. С. 107–114. doi: 10.6060/ivkkt.20216408.6397

10 Крылов А.В., Шестаков К.В., Лазарев С.И., Хорохорина И.В. Электрокинетические характеристики электродиализной очистки цинкосодержащих растворов от ионов цинка, железа и натрия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. № 1(56). С. 143–153. doi: 10.21285/achb.1024

11 Филимонова О.С., Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Брянкин К.В. Исследования вольт-амперных характеристик в процессе электродеионизационной очистки промышленных растворов от хромсодержащих веществ // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2024. № 2(92). С. 53–63. doi: 10.17277/voprosy.2024.02.pp.053-063

12 Михайлин М.И., Лазарев С.И., Хорохорина И.В., Полянский К.К. Исследование вольт-амперных характеристик процесса электродеионизации с использованием различного ионообменного наполнителя // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 7. С. 60–63. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_7_60

13 Заболоцкий В.И., Романюк Н.А., Лоза С.А. Электрохимические свойства и специфическая селективность гетерогенных ионообменных мембран в борат-нитратных растворах электролитов // Мембраны и мембранные технологии. 2023. Т. 13. № 1. С. 3–14. doi: 10.31857/S221811722301008X

14 Ачох А.Р., Заболоцкий В.И., Лебедев К.А., Шарафан М.В. и др. Электрохимические свойства и селективность двухслойных ионообменных мембран в тернарных растворах сильных электролитов // Мембраны и мембранные технологии. 2021. Т. 11. № 1. С. 58–78. doi: 10.1134/S2218117221010028

15 Шельдешов Н.В., Заболоцкий В.И., Лоза С.А. Электропроводность ионообменных мембран С профилированной поверхностью // Мембраны и мембранные технологии. 2014. Т. 4. № 4. С. 261. doi: 10.1134/S2218117214040087

16 Шкинев В.М., Мартынов Л.Ю., Трофимов Д.А., Долгоносов А.М. Наполненные ионитами трековые мембраны с асимметричными порами для электрохимического определения ацетилхолин хлорида // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76. № 3. С. 279–288. doi: 10.31857/S0044450221030105

17 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б. Электропроводящие свойства мембран МК-40 и МА-41, исследованные методом высокочастотной спектроскопии импеданса // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 1(67). С. 167–172. doi: 10.20914/2310-1202-2016-1-167-172

18 Из полиамида. URL: https://vladipor.ru/wp-content/uploads/2023/06/iz_poliamida.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

References

1 Shaposhnik V.A., Vasilyeva V.I., Grigorchuk O.V. Transfer phenomena in ion-exchange membranes. Moscow: MIPT, 2001. 200 p. (in Russian).

2 Konovalov D.N., Kovalev S.V., Lazarev S.I., Lua P. et al. Current-voltage and ohmic characteristics of electromembrane purification of galvanic wastewater from NH4+, Zn2+, NO3-, SO42-, PO43- ions. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2019. vol. 25. no. 4. pp. 612–621. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.612-621 (in Russian).

3 Lazarev S.I., Levin A.A., Kovalev S.V., Mikhaylin M.I. et al. Current-voltage and permeability characteristics of electrobaromembrane purification of galvanic wastewater from Mg2+, Fe2+ ions. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2020. vol. 26. no. 4. pp. 629–636. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.629-636 (in Russian).

4 Kononenko N.A., Dolgopolov S.V., Gnusin N.P., Berezina N.P. et al. Electrochemical properties of composite MF-4SK/polyaniline membranes obtained by matrix synthesis in an external electric field. Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2012. no. 2. pp. 42–47. (in Russian).

5 Kudashova D.S., Kononenko N.A., Brovkina M.A., Falina I.V. Study of the degradation of a perfluorinated membrane during operation in a hydrogen fuel cell. Membranes and Membrane Technologies. 2022. vol. 12. no. 1. pp. 29–37. doi: 10.1134/S2218117222010059 (in Russian).

6 Kravets L.I., Lizunov N.E., Meshalkin A.Yu., Robu S.V. et al. Structure and electrochemical properties of polymer composite membranes with a selective layer. Electrochemistry. 2011. vol. 47. no. 4. pp. 489–498. (in Russian).

7 Ermakova L.E., Savina I.A., Sidorova M.P. Structural and electro-surface characteristics of anisotropic ultrafiltration membranes. Bulletin of Saint Petersburg University. Physics and Chemistry. 2012. no. 1. pp. 55–68. (in Russian).

8 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Lua P. Electrochemical and transport characteristics of membrane systems during electronanofiltration separation of solutions containing ammonium nitrate and potassium sulfate. Electrochemistry. 2021. vol. 57. no. 6. pp. 355–376. doi: 10.31857/S0424857021050091 (in Russian).

9 Lua P., Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Kovalev S.V. Electrochemical and kinetic characteristics of the process of electromembrane separation of potassium sulfate solution. News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2021. vol. 64. no. 8. pp. 107–114. doi: 10.6060/ivkkt.20216408.6397 (in Russian).

10 Krylov A.V., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Khorokhorina I.V. Electrokinetic characteristics of electrodialysis purification of zinc-containing solutions from zinc, iron and sodium ions. News of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2026. vol. 16. no. 1(56). pp. 143–153. doi: 10.21285/achb.1024 (in Russian).

11 Filimonova O.S., Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bryankin K.V. Studies of current-voltage characteristics in the process of electrodeionization purification of industrial solutions from chromium-containing substances. Problems of Modern Science and Practice. Vernadsky University. 2024. no. 2(92). pp. 53–63. doi: 10.17277/voprosy.2024.02.pp.053-063 (in Russian).

12 Mikhaylin M.I., Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Polyansky K.K. Study of current-voltage characteristics of the electrodeionization process using various ion-exchange fillers. Bulletin of Technological University. 2022. vol. 25. no. 7. pp. 60–63. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_7_60 (in Russian).

13 Zabolotsky V.I., Romanyuk N.A., Loza S.A. Electrochemical properties and specific selectivity of heterogeneous ion-exchange membranes in borate-nitrate electrolyte solutions. Membranes and Membrane Technologies. 2023. vol. 13. no. 1. pp. 3–14. doi: 10.31857/S221811722301008X (in Russian).

14 Achokh A.R., Zabolotsky V.I., Lebedev K.A., Sharafan M.V. et al. Electrochemical properties and selectivity of bilayer ion-exchange membranes in ternary solutions of strong electrolytes. Membranes and Membrane Technologies. 2021. vol. 11. no. 1. pp. 58–78. doi: 10.1134/S2218117221010028 (in Russian).

15 Sheldeshov N.V., Zabolotsky V.I., Loza S.A. Electrical conductivity of ion-exchange membranes with a profiled surface. Membranes and Membrane Technologies. 2014. vol. 4. no. 4. p. 261. doi: 10.1134/S2218117214040087 (in Russian).

16 Shkinev V.M., Martynov L.Yu., Trofimov D.A., Dolgonosov A.M. Ionite-filled track membranes with asymmetric pores for electrochemical determination of acetylcholine chloride. Journal of Analytical Chemistry. 2021. vol. 76. no. 3. pp. 279–288. doi: 10.31857/S0044450221030105 (in Russian).

17 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Electrically conductive properties of MK-40 and MA-41 membranes studied by high-frequency impedance spectroscopy. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2016. no. 1(67). pp. 167–172. doi: 10.20914/2310-1202-2016-1-167-172 (in Russian).

18 From polyamide. Available at: https://vladipor.ru/wp-content/uploads/2023/06/iz_poliamida.pdf (accessed: 20.04.2026) (in Russian).

Сведения об авторах

Сергей И. Лазарев д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0746-5161

Дмитрий Н. Коновалов д.т.н., доцент, кафедра техники и технологии автомобильного транспорта, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kdn1979dom@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9366-8661

Павел. М. Малин аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, malin.pavlik@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-9535-277X

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, профессор-консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036 kaf-kit@vfreu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7333-4816

Information about authors

Sergey I. Lazarev Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0746-5161

Dmitry N. Konovalov Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Engineering and Technology of Motor Transport", Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, kdn1979dom@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9366-8661

Pavel. M. Malin graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, malin.pavlik@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-9535-277X

Konstantin K. Polyansky Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Commerce and commodity science, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia, consulting professor, technology of animal products depart-ment, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-kit@vfreu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7333-4816

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 08/06/2026	**После редакции** 13/07/2026	**Принята в печать** 17/08/2026
Received 08/06/2026	**Accepted in revised** 13/07/2026	**Accepted** 17/08/2026