Химическая технология

Chemical Technology

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-4-200-211 Оригинальная статья/Research article

УДК 66.081.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Методологический подход в исследованиях структурных, электрохимических и транспортных характеристик электробаромембранной очистки промышленных растворов

Дмитрий Н. Коновалов [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Сергей И. Лазарев [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Никита С. Наместников [1] namestnikov-nikita@mail.ru
Анна Г. Сысоева [1] asus1301201@gmail.com
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 имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Разработан комплексный методологический подход для исследования структурных, электрохимических и транспортных характеристик процессов электробаромембранной очистки промышленных растворов. Подход структурирован в виде многоуровневой иерархической схемы, охватывающей все этапы научного исследования: от аналитического обзора и выбора объектов до математического моделирования, инженерного расчета и оценки экономической эффективности. Методология обеспечивает системность исследований, повышая достоверность и воспроизводимость результатов. В качестве ключевых объектов экспериментальных исследований были определены модельные и реальные промышленные растворы из трех экологически значимых отраслей: производства минеральных удобрений (растворы солей аммония, калия), получения биотоплива (водно-эфирные смеси) и гальванических покрытий (многокомпонентные растворы, содержащие ионы тяжелых металлов, аммония, сульфатов и фосфатов). Исследования проводились с использованием ряда промышленных пористых полимерных мембран (нано-, ультра- и микрофильтрационных) от отечественных производителей. В работе представлены и проанализированы экспериментальные графические зависимости, иллюстрирующие влияние процесса на характеристики мембран и эффективность разделения. Методами рентгеноструктурного анализа, термогравиметрии и ДСК изучены структурные изменения микрофильтрационной мембраны после контакта с компонентами промывочных вод производства биотоплива. Для процессов электронанофильтрации модельных растворов минеральных удобрений получены вольт-амперные характеристики, зависимости сопротивления и электропроводности мембранных систем от напряжения и трансмембранного давления. В ходе очистки реального гальванического раствора исследованы транспортные характеристики: установлены зависимости коэффициента задержания ионов (Zn^{2+}, PO_4^{3-}) и удельного потока через мембраны от плотности электрического тока. Полученные данные служат основой для математического моделирования, оптимизации режимов работы и инженерного расчета электромембранных аппаратов. Разработанный методологический подход и полученные результаты вносят вклад в развитие научных основ ресурсосберегающих и экологичных технологий очистки промышленных стоков, обеспечивающих возврат ценных компонентов в производственный цикл..

Ключевые слова: Методология, экспериментальные исследования, характеристики, очистка, разделение, раствор, мембрана.

Methodological approach to the study of structural, electrochemical and transport characteristics of electrobaromembrane purification of industrial solutions

Dmitry N. Konovalov [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Sergey I. Lazarev [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Nikita S. Namestnikov [1] namestnikov-nikita@mail.ru
Anna G. Sysoeva [1] asus1301201@gmail.com
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

Для цитирования

Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Наместников Н.С., Сысоева А.Г., Полянский К.К. Методологический подход в исследованиях структурных, электрохимических и транспортных характеристик электробаромембранной очистки промышленных растворов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 200–211. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-200-211

For citation

Konovalov D.N., Lazarev S.I., Namestnikov N.S., Sysoeva A.G., Polyansky K.K. Methodological approach to the study of structural, electrochemical and transport characteristics of electrobaromembrane purification of industrial solutions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 200–211. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-200-211

© 2026, Коновалов Д.Н. и др. / Konovalov D.N. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. A comprehensive methodological approach has been developed for studying the structural, electrochemical, and transport characteristics of industrial solution purification processes using electrobaromembrane technology. The approach is structured as a multi-level hierarchical framework encompassing all stages of the research: from an analytical review and selection of objects to mathematical modeling, engineering calculations, and cost-effectiveness assessment. The methodology ensures a systematic approach to research, increasing the reliability and reproducibility of results. Model and real industrial solutions from three environmentally significant industries were identified as key objects of experimental research: mineral fertilizer production (ammonium and potassium salt solutions), biofuel production (water-ether mixtures), and electroplating (multicomponent solutions containing ions of heavy metals, ammonium, sulfates, and phosphates). The research was conducted using a range of industrial porous polymer membranes (nano-, ultra-, and microfiltration) from domestic manufacturers. The paper presents and analyzes experimental graphical dependencies illustrating the effect of the process on membrane characteristics and separation efficiency. X-ray diffraction, thermogravimetry, and differential scanning calorimetry (DSC) were used to study structural changes in a microfiltration membrane after exposure to components of biofuel production washwater. Current-voltage characteristics, as well as the dependences of membrane system resistance and conductivity on voltage and transmembrane pressure, were obtained for the electron-nanofiltration of model mineral fertilizer solutions. Transport characteristics were studied during the purification of a real galvanic solution: the dependences of the ion retention coefficient (Zn^{2+}, PO_4^{3-}) and the specific membrane flux on electric current density were determined. The obtained data serve as the basis for mathematical modeling, optimization of operating modes, and engineering calculations for electromembrane devices. The developed methodological approach and the obtained results contribute to the development of scientific foundations for resource-saving and environmentally friendly technologies for industrial wastewater treatment, ensuring the return of valuable components to the production cycle.

Keywords: Methodology, experimental studies, characteristics, purification, separation, solution, membrane.

Введение

Современные химические, гальванические и производства минеральных удобрений сопровождаются большим объемом технологических растворов и сточных вод, которые необходимо перерабатывать и утилизировать. В настоящее время в Российской Федерации только по производству гальванопокрытий существует около 1000 цехов. В Российском Федеральном классификаторе 444 вида токсичных отходов 1–2 классов опасности, в том числе 95 неорганических, 217 органических (растворители, полимеры, нефтепродукты), а также смешанных (органических и неорганических) отходов. С каждым годом требования контрольных органов РФ к очистке, разделению и утилизации технологических растворов и сточных вод для вышеперечисленных производств ужесточаются по предельно допустимым концентрациям, особенно по концентрациям тяжелых металлов.

Подлежащие очистке технологические растворы и сточные воды химических, гальванических и производств минеральных удобрений необходимо утилизировать по безотходной или малоотходной технологии, предпочтительно с возвратом компонентов раствора в процесс производства. Это приведет к ресурсо- и энергосбережению и позволит снизить экологическую нагрузку на водоемы Российской Федерации в целях сохранения флоры и фауны.

Для очистки, разделения и утилизации технологических растворов и сточных вод требуется применение современных методов, обладающих малой энерго- и металлоемкостью и экологичностью, то есть способностью метода разделения возвращать ценные компоненты раствора в процесс производства. К таким методам разделения относятся современные методы мембранной технологии, очистки и концентрирования технологических растворов и дифференцированного извлечения ионов из них, где затраты энергии сведены к минимальным, используемым только на разрыв межмолекулярных связей. Для эффективного применения методов мембранной технологии требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований по разработке методологии и методик исследования, изучению электрохимических и структурных характеристик полупроницаемых мембран, кинетики процесса, математическому моделированию, а также по созданию современного конструктивно-технологического оформления процессов с использованием мембранной техники.

На предприятиях химических, гальванических и производств минеральных удобрений Центрального Черноземья остро стоит задача по разработке и внедрению технологий с применением мембран по очистке и концентрированию промышленных растворов и сточных вод, которая в настоящее время является востребованной и актуальной, так как существует целенаправленная программа по модернизации устаревающего очистного оборудования. Поэтому фундаментом исследования настоящей работы является развитие научных и технологических основ электромембранных методов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

Большой вклад в развитие теоретических основ по электромембранной технологии внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как: Н.А. Платэ, Ю.И. Дытнерский, М. Мулдер, С.Т. Хванг, К. Каммермейер, В.А. Шапошник, В.И. Заболоцкий, В.И. Васильева, А.Г. Первов, К.К. Полянский, В.В. Котов, И.Т. Кретов, В.М. Селеткин, С.В. Шахов, С.А. Титов, А.В. Клинов, А.Ф. Дресвянников и др.

Цель работы – разработка методологии проведения научного исследования, представленной в виде многоуровневой взаимосвязанной структурно-иерархической схемы, основными этапами которой являются методики исследования

электрохимических, структурных, транспортных (кинетических) характеристик, математическое моделирование, методики оптимизации и инженерного расчета, разработка аппаратурно-технологического оформления и практическое применение в очистке промышленных растворов, экономическая оценка эффективности.

Материалы и методы

Достоверность и надежность научных работ невозможно обеспечить без разработки методологии исследований и расчета электромембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

Поставленные цель и задачи исследования, а также подбор, анализ и интерпретация данных основаны на подходах, принципах и методах корректно разработанной методологии, позволяющей снизить или исключить возможные неточности и отклонения данных. Методология для исследователя является обоснованным и структурированным рамочным инструментарием, позволяющим обеспечить высокую достоверность и надежность точности полученных результатов.

На рисунке 1 представлена разработанная систематизированная схема методологии исследования, определяющая структуру, содержание и взаимосвязь каждого этапа исследования. На каждом этапе методологии осуществляется определенный вклад в общий контекст исследования, который имеет свои цели и задачи. Четко структурированная методология позволяет обеспечить полноту и поэтапность исследования с подобранными методами и инструментами, а также получить достоверные результаты и сформулировать выводы в соответствии с целью и задачами исследования.

Исходя из вышеизложенного, разработанная систематизированная методология исследования – это важнейший инструмент для достижения поставленных цели и задач, обеспечивающий на высоком уровне качество, надежность и достоверность исследования.

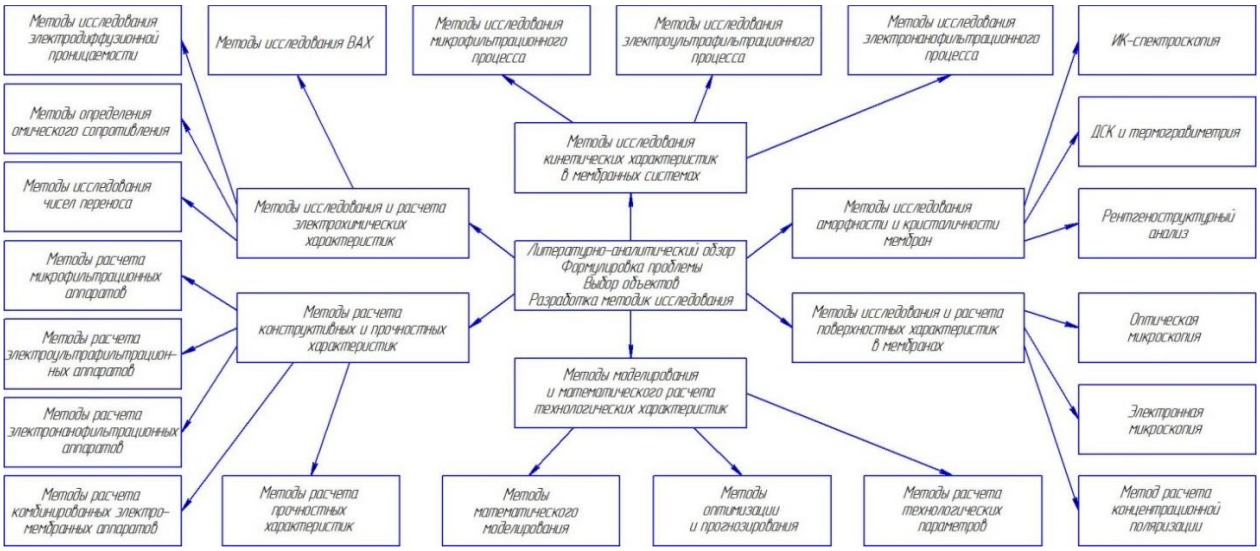


Рисунок 1. Методология исследования и расчета электромембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий

Figure 1. Methodology for research and calculation of electromembrane processes for purification and concentration of industrial solutions in the production of mineral fertilizers, biofuels and electroplating

I этап.

На первом этапе проводится литературно-аналитический обзор по тематике исследования, формулировка научной проблемы, выбор объектов и разработка методик исследования. Начальной и основной частью этапа является обобщенный критический анализ научных работ (публикации, научные статьи, годовые отчеты и т. п.), позволяющий ознакомиться, изучить, проанализировать и сформулировать проблему исследования в данной области научных интересов.

На основании литературно-аналитического обзора также производится выбор объектов исследования, являющийся важным аспектом первого этапа. В качестве объектов исследования могут быть подобраны модельные (содержащие в своем составе определенные компоненты) и промышленные (многокомпонентные) растворы, типы мембран, связанные с поставленной целью работы и подвергнующиеся детальному изучению.

Подбор и разработка методик исследования также являются неотъемлемой частью первого

этапа, включающей в себя методы исследования и расчета электрохимических хактеристик, структурных характеристик мембран, кинетических характеристик в мембранных системах, а также методы моделирования и расчета конструктивных, прочностных и технологических параметров электромембранных аппаратов.

Общая валидность и надежность исследования, корректный подбор исследуемых объектов, экспериментальных методов и разработка методик позволяют на первом этапе заложить прочный фундамент для дальнейших этапов методологии исследования с достижением высокой точности научных результатов и достоверности полученных данных.

II этап.

На втором этапе проводится выбор методов исследования и расчета электрохимических характеристик мембран, такие как вольт-амперные характеристики (ВАХ), электродифузионная проницаемость, определение омического сопротивления и чисел переноса мембран.

Вольтамперные характеристики позволяют определить зависимость плотности тока от напряжения при исследовании электрохимических характеристик мембран. Проанализировав их, можно определить диапазон напряжения, при котором будут достигнуты наилучшие показатели элекромембранного процесса разделения. На основании ВАХ рассчитываются омическое сопротивление и электропроводность мембранной системы, которые также являются основными электрохимическими характеристиками мембран.

Методы исследования электродифузионной проницаемости и расчет чисел переноса позволяют определить миграцию компонентов через мембрану, влияющую непосредственно на качество и эффективность электромембранного процесса. Второй этап позволяет оценить электрические свойства мембран, а также их потенциал для дальнейшего использования в электромембранных процессах, являясь неотъемлемой частью дальнейшей детальной проработки.

III этап.

Третий этап посвящен методам исследования структурных характеристик мембран, таких как аморфность и кристаличность, а также расчету поверхностных характеристик мембран. Для достижения поставленной цели исследования структурных характеристик мембран использованы методы ИК-спектроскопии (позволяет определить перестройку молекул активного слоя мембран), ДСК (позволяет определить фазовые переходы в мембране и их термодинамические характеристики) и термогравиметрии (позволяет измерить изменение массы мембраны в зависимости от температуры и определить термостабильность и термоокислительную стабильность материала), рентгеноструктурного анализа (позволяет определить структуру мембраны и выявить наличие дефектов в кристаллической решетке), оптической и электронной микроскопии (позволяют определить изменения в активном слое, а также подложке мембран при действии движущей силы электромембранного процесса), расчет концентрационной поляризации.

Всесторонний подход к исследованию структуры мембран позволяет определить важнейшие параметры и свойства материала активного слоя, которые напрямую влияют на дальнейшие исследования кинетических характеристик, а также моделирование и модернизацию технологий, повышающих производительность электромембранного процесса.

Третий этап является экваторным, но также немаловажным для последующих этапов экспериментальных исследований.

IV этап.

Четвертый этап посвящен методам исследования кинетических характеристик мембранных систем, таких как электронанофильтрация, электроультрафильтрация, микрофильтрация, фильтрация. На этом этапе проводятся подробные исследования по определению удельного выходного потока и коэффициента задержания в процессе электромембранного разделения.

Полученные на предыдущих этапах результаты используются для изучения кинетических характеристик мембран и также являются фундаментом для последующего этапа. Удельный выходной поток позволяет оценить производительность мембраны, а коэффициент задержания – качество процесса разделения и концентрирования растворов.

Результаты второго, третьего и четвертого этапов важны для последующих методов моделирования и математического расчета заключительного этапа методологии.

V этап.

Пятый этап основан на методах моделирования и математического расчета конструктивных, прочностных и технологических характеристик электромембранных аппаратов. Моделирование проводится на основе поэтапного решения математической модели электронанофильтрационного разделения путем аналитического решения уравнений конвективной диффузии, уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности потока с применением полярной системы координат при начальных и граничных условиях. Полученные результаты работы по моделированию процесса электронанофильтрации могут быть использованы специалистами

в области мембранных технологий при разработке и проектировании мембранных установок и технологических схем очистки сточных вод.

При практическом применении математическая модель предоставляет возможность перейти к инженерной методике расчета аппаратов, включающей в себя методы расчета конструктивных и прочностных характерситик аппаратов различных конструкций.

Также пятый этап включает метод оптимизации и прогнозирования удельного выходного потока с ограничениями по току, электроосмотической проницаемости, коэффициенту задержания, выходу по току при постоянном трансмембранном давлении. На основании аналитических и эмпирических исследований получены инженерные формулы, позволяющие в широком диапазоне изменений плотности электрического тока, электрической проницаемости, трансмембранного давления и коэффициентов задержания определить удельный выходной поток для электромембранных аппаратов и выбрать методы расчета их технологическх параметров.

Корректно полученные экспериментальные данные из предыдущих этапов позволяют адекватно смоделировать мембранный процесс и провести оптимизацию и прогнозирование удельного выходного потока, а также модернизировать конструкции мембранных аппаратов, используемых для очистки растворов.

На основании разработанных конструкций аппаратов и ранее проведенных исследований модернизируются технологические схемы очистки с применением высокоэффективных электромембранных и мембранных методов, в результате чего получена экономическая эффективность, являющаяся логическим завершением как пятого этапа методологии, так и всего научного исследования с предоставлением новых научных и технологических основ электромембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

В процессе производства минеральных удобрений образуются технологические растворы и сточные воды, которые содержат в своем составе ценные компоненты, например при производстве нитрата аммония побочным продуктом является конденсат сокового пара, содержащий ионы NH_4+ и $NO_3–$, представляющие большой интерес в целях обеспечения возврата в основной производственный цикл и экономии материальных ресурсов.

В качестве объектов экспериментальных исследований были приняты водные растворы хлорида аммония, сульфата калия, нитрата аммония, нитрата аммония и сульфата калия, сульфата цинка, характеристики и показатели которых представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики и показатели исследуемых водных растворов

Table 1.

Main characteristics and indicators of the studied aqueous solutions

Раствор Solution	Цвет Color	pH	*c*, кг/м^3 *c*, kg/m^3
водный раствор хлорида аммония (NH_4Cl) aqueous solution of ammonium chloride (NH_4Cl)	прозрачный transparent	8,0	0,5
			1,0
			2,0
водный раствор сульфата калия (K_2SO_4) aqueous solution of potassium sulfate (K_2SO_4)		8,0	0,2
			0,5
			0,8
водный раствор нитрата аммония (NH_4NO_3) aqueous solution of ammonium nitrate (NH_4NO_3)		7,0	0,2
			0,4
			0,8
водный раствор нитрата аммония и сульфата калия (NH_4NO_3/K_2SO_4) an aqueous solution of ammonium nitrate and potassium sulfate (NH_4NO_3/K_2SO_4)		7,0	0,2/0,04
			0,4/0,04
			0,8/0,04
водный раствор сульфата цинка ($ZnSO_4$) aqueous solution of zinc sulfate ($ZnSO_4$)		6,0	0,4

После выполнения электрохимических операций нанесения защитных покрытий (цинкование, хромирование и др.) и проведения последующих процессов обработки отработанных электролитов, образуемые технологические растворы и сточные воды содержат несколько важных для исследования и производства катионов и анионов (NH_4^+, $Fe_{общ}$, Zn^{2+}, $PO_4^{3–}$, $SO_4^{2–}$, Ni^{2+} и др.).

Еще одним объектом экспериментальных исследований стала смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды, образующаяся в процессе производства биотоплива, таблица 2.

В качестве объекта экспериментального исследования также выбран технологический раствор гальванического производства (АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, г. Тамбов), характеристики и показатели которого приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Основные характеристики и показатели исследуемой смеси метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды

Table 2.

Main characteristics and indicators of the studied mixture of vegetable oil methyl ester (E-phase) and water

Раствор Solution	Цвет Color	pH	Отношение, % Attitude, %
Смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды A mixture of vegetable oil methyl ester (E-phase) and water	Светло-молочно-коричневый Light milky brown	9,5	50:50
			52:48

Таблица 3.

Основные характеристики и показатели технологического раствора АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, г. Тамбов

Table 3.

Main characteristics and indicators of the technological solution of JSC "TAGAT" named after S.I. Livshits, Tambov

Раствор Solution	Цвет Color	pH	Ион Ion	Концентрация, мг/дм^3 Concentration, mg/dm^3
Промышленный раствор АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, г. Тамбов Industrial solution JSC "TAGAT" named after S.I. Livshits, Tambov	Прозрачно-молочный Transparent milky	8,5	NH_4+	1,358
			$Fe_{общ}$	0,068
			Zn^{2+}	0,340
			PO_4^{3-}	0,580
			SO_4^{2-}	50,900
			Тяжелые металлы (Ni^{2+}, Cu^{2+}, Cr^{6+}, Cr^{3+}) Heavy metals (Ni^{2+}, Cu^{2+}, Cr^{6+}, Cr^{3+})	0,022

Наибольший интерес в промышленном растворе АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица представляют исследования ионов NH_4^+, Zn^{2+}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-} и др., так как эти компоненты являются малоисследованными, особенно при переносе их через нанофильтрационные полупроницаемые мембраны. Другие ионы ($Fe_{общ}$, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Cr^{6+}, Cr^{3+} и др.), встречающиеся в технологических растворах и сточных водах гальванических производств, достаточно подробно исследованы в работах [1–4].

Другими объектами экспериментальных исследований являлись пористые полимерные промышленные нанофильтрационные (таблица 4), ультрафильтрационные (таблица 5) и микрофильтрационные (таблица 6) мембраны и предварительный фильтр (таблица 7) производителей ЗАО НТЦ «Владипор» [5] и ООО НПП «Технофильтр» [6], г. Владимир.

Таблица 4.

Характеристики нанофильтрационных мембран [5]

Table 4.

Characteristics of nanofiltration membranes [5]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Рабочее давление, МПа Working pressure, MPa	Минимальная производительность по воде, при T = 298 К, м^3/(м^2·с) Minimum water capacity at T = 298 K, m^3/(m^2 s)	Коэффициент задержания по 0,15 % NaCl, не менее Retention coefficient for 0,15 % NaCl, not less than	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
АМН-П | AMN-P	1,6	$1{,}66\cdot10^{-5}$	–	318	3…8
ОФАМ-К | OFAM-K	3,0	$2{,}22\cdot10^{-5}$	0,95	323	2…12
ОПМН-П | OPMN-P	1,6	$2{,}77\cdot10^{-5}$	0,55		

Нанофильтрационная мембрана типа АМН-П представляет собой пористую полимерную пленку на основе эфиров целлюлозы [5].

Обратноосмотическая композитная мембрана среднего давления типа ОФАМ-К состоит из активного слоя, являющегося продуктом поликонденсации ароматического диамина (м-фенилендиамина) и производных ароматических дикарбоновых кислот (изофталевой кислоты), и пористой подложки из полипропилена (ПП) или тканого лавсана; структура – капиллярно-пальчиковая» [5, 7].

Нанофильтрационная композитная полимерная пористая пленка типа ОПМН-П состоит из селективного слоя на полиамидной основе и пористой подложки из нетканого полипропилена; структура – вакуольная с губчатой прослойкой» [5, 7].

Таблица 5.

Характеристики ультрафильтрационных мембран [5]

Table 5.

Characteristics of ultrafiltration membranes [5]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Рабочее давление P, МПа Working pressure P, MPa	Удельный поток растворителя J, $м^3/(м^2 \cdot с)$ Specific flow of solvent J, $m^3/(m^2 \cdot s)$	Коэффициент задержания по альбумину 67000Д Albumin retention coefficient 67000D	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
УАМ-50 | UAM-50	0,15	$3{,}33 \cdot 10^{-6}$	0,97	323	3…8
УАМ-100 | UAM-100		$1{,}67 \cdot 10^{-6}$			
УПМ-К | UPM-K	0,1	$1{,}16 \cdot 10^{-5}$	0,98	373	2…12
УПМ-100 | UPM-100		$2{,}33 \cdot 10^{-4}$	0,97		

Мембрана типа УАМ представляет собой пористую полимерную полупрозрачную или белого цвета пленку на основе ацетатов целлюлозы на подложках: нетканый полипропилен, лавсан [5].

Мембрана типа УПМ представляет собой пористую полимерную пленку на основе ароматического полисульфонамида «Сульфон-4Т» на подложках: нетканый лавсан и полипропилен [5].

Таблица 6.

Характеристики микрофильтрационных мембран [5, 6]

Table 6.

Characteristics of microfiltration membranes [5, 6]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Средний диаметр пор, мкм Average pore diameter, μm	Рабочее давление, МПа Working pressure, MPa	Производительность J, $дм^3/(м^2 \cdot ч)$ Productivity J, $dm^3/(m^2\ h)$	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
МФФК-3 MFFK-3	0,45	0,56	7500 (по этанолу, при P = 0,05 МПа) 7500 (for ethanol, at P = 0,05 MPa)	353	1…13
МФФК-3Г MFFK-3G		0,50	7000 (по этанолу, при P = 0,05 МПа) 7000 (for ethanol, at P = 0,05 MPa)		
МФФК-2Г MFFK-2G	0,25	0,26	3200 (по этанолу, при P = 0,05 МПа) 3200 (for ethanol, at P = 0,05 MPa)		
ММК – 0,45 MMK – 0,45	0,45	0,50	21000 (по очищенной воде, при P = 0,1 МПа) 21000 (for purified water, at P = 0,1 MPa)	343	3…14

Микрофильтрационная фторопластовая композиционная гидрофильная и гидрофобная мембрана типа МФФК представляет собой пористый пленочный материал на основе фторопласта Ф42Л на подложке из нетканых материалов (полипропилен, лавсан) [5].

Микропористая капроновая гидрофильная мембрана марки ММК представляет собой пористую пленку белого цвета на основе полиамида [6].

Таблица 7.

Характеристики предварительного фильтра ПП-190 [6]

Table 7.

Characteristics of the pre-filter PP-190 [6]

Эффективность удержания частиц, мкм Particle retention efficiency, μm		Максимальный перепад давления, МПа Maximum pressure drop, MPa	Начальная производительность по дистиллированной воде, при P = 0,05 МПа, $см^3/(см^2 \cdot мин)$ Initial capacity for distilled water, at P = 0.05 MPa, $cm^3/(cm^2 \cdot min)$	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
не менее 98 % at least 98 %	не менее 95 % at least 95 %				
3	2	0,5 при 293 К; 0,2 при 353 К 0,5 at 293 K; 0,2 at 353 K	Не менее 400 Not less than 400	363	2…13

Фильтрационная мембрана ПП представляет собой пористую пленку из полипропиленового нетканого материала без подложки [6].

Методика подготовки мембран.

Методика предварительной подготовки полупроницаемых мембран для проведения экспериментальных исследований заключалась в следующем:

– визуально определялось место на полотне исследуемой мембраны без наличия дефектов (смятий, сжатий, трещин и др.), проводилась обрезка необходимой геометрической формы и размера;

– мембрана замачивалась в растворе дистиллированной воды в течение суток;

– мембрана, в зависимости от необходимости расположения на конкретном электроде (анод или катод), предварительно обрабатывалась разбавленным раствором кислоты (серная кислота, pH = 5…6) или щелочи (гидроксид натрия, pH = 9) и проводилась промывка дистиллированной водой;

– образец мембраны располагался в ячейке баромембранной установки для обжатия (при максимальном избыточном давлении) при перекачивании дистиллированной воды;

– подготовленные мембраны располагались на пористом электроде-катоде и пористом электроде-аноде;

– осуществлялась сборка электробаромембранной ячейки с прикатодными и прианодными мембранами.

Результаты и обсуждение

Разработанная методология и подобранные объекты исследования позволили провести ряд экспериментальных исследований и получить графические результаты по структурным характеристикам различными методами, такими как рентгеноструктурный анализ (рисунок 2), термогравиметрия (рисунок 3), дифференциально-сканирующая калориметрия (рисунок 4), электрохимическим: волт-амперным (рисунок 5), сопротивлению (рисунок 6), электропроводности (рисунок 7) мембранных систем, а также транспортным: коэффициенту задержания (рисунок 8) и удельному выходному потоку (рисунок 9).

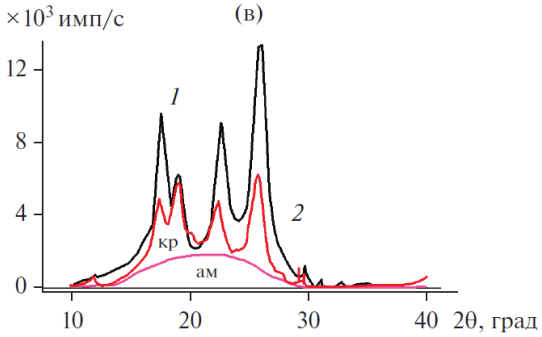


Рисунок 2. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом рентгеноструктурного анализа: 1 – исходная; 2 – рабочая

Figure 2. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by X-ray structural analysis: 1 – initial; 2 – working

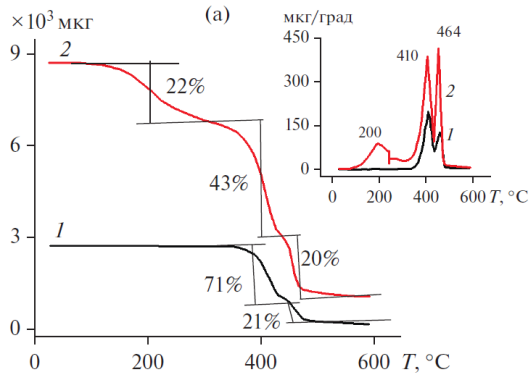


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом термогравиметрии: 1 – исходная; 2 – рабочая

Figure 3. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by thermogravimetry: 1 – initial; 2 – working

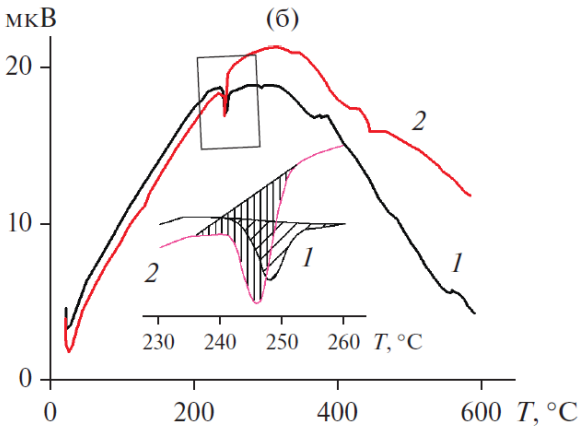


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом дифференциально-сканирующей калориметрии: 1 – исходная; 2 – рабочая

Figure 4. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by differential scanning calorimetry: 1 – initial; 2 – working

Экспериментальные зависимости структурных характеристик различными методами получены для образцов мембраны МФФК-3 до и после действия трансмембранного давления и диффузии эфирных масел при микрофильтрационной очистке промывочной воды, образующейся в процессе синтеза биотоплива [8, 9].

Электрохимические характеристики мембранной системы исследованы при электронанофильтрационном разделении модельного раствора производства минерального удобрения [10].

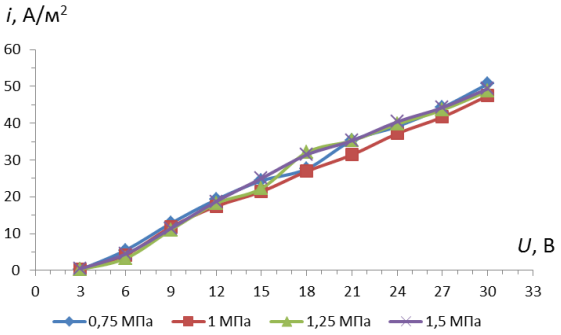


Рисунок 5. Зависимости ВАХ мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония (c = 0,5 кг/м^3) от трансмембранного давления

Figure 5. Dependences of the current-voltage characteristics of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes during the separation of an aqueous solution of ammonium chloride (c = 0,5 kg/m^3) on the transmembrane pressure

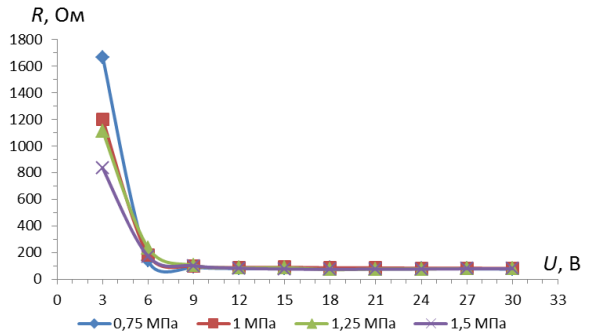


Рисунок 6. Зависимости сопротивления мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония (c = 0,5 кг/м^3) от напряжения и трансмембранного давления

Figure 6. Dependences of the resistance of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes, when separating an aqueous solution of ammonium chloride (c = 0,5 kg/m^3) on voltage and transmembrane pressure

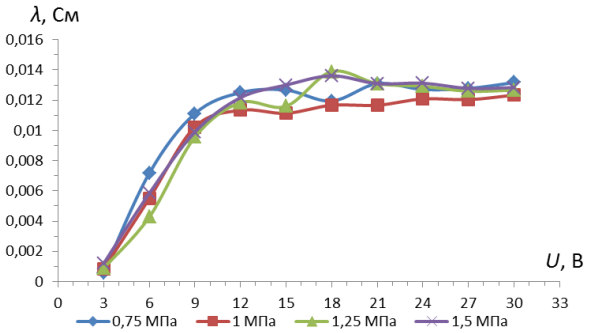


Рисунок 7. Зависимости электропроводности мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония (c = 0,5 кг/м^3), от напряжения и трансмембранного давления

Figure 7. Dependences of the electrical conductivity of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes, when separating an aqueous solution of ammonium chloride (c = 0,5 kg/m^3), on voltage and transmembrane pressure

Транспортные характеристики мембранной системы представлены для процесса электробаромембранного разделения промышленного раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица [11].

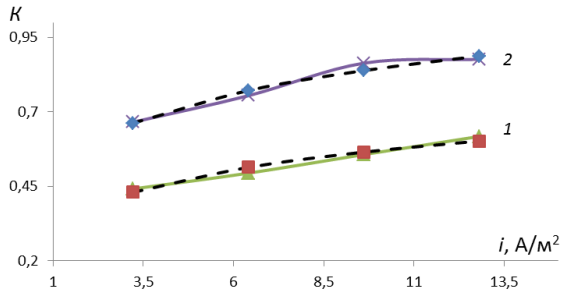


Рисунок 8. Зависимости коэффициента задержания для прикатодной мембраны ОПМН-П от плотности тока при постоянном трансмембранном давлении P = 1,6 МПа и разделении технологического раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица по ионам: *1* – PO_4^{3-}; *2* – Zn^{2+} (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет)

Figure 8. Dependences of the retention coefficient for the OPMN-P cathode membrane on the current density at a constant transmembrane pressure P = 1,6 MPa and separation of the process solution of the galvanic production of JSC TAGAT named after S.I. Livshits by ions: *1* – PO_4^{3-}; *2* – Zn^{2+} (solid line – experiment; dashed line – calculation)

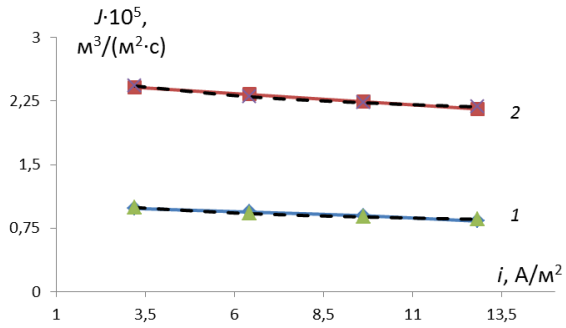


Рисунок 9. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (1) и прикатодной ОПМН-П (2) мембран при разделении технологического раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица от плотности тока с постоянным трансмембранным давлением P = 1,6 МПа (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет)

Figure 9. Dependences of the specific output flow for the anode OFAM-K (*1*) and cathode OPMN-P (*2*) membranes during the separation of the process solution of the galvanic production of JSC TAGAT named after S.I. Livshits on the current density with a constant transmembrane pressure P = 1,6 MPa (solid line – experiment; dashed line – calculation)

Заключение

1. Разработана методология проведения научного исследования, представленная в виде многоуровневой взаимосвязанной структурно-иерархической схемы, основными этапами которой являются методики исследования электрохимических, структурных, кинетических характеристик, математическое моделирование, методики оптимизации и инженерного расчета, разработка аппаратурно-технологического оформления и практическое применение в очистке промышленных растворов, экономическая оценка эффективности.

2. На основе проведенного аналитического обзора по традиционным и электрохимическим мембранным методам очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий и в соответствии с целью и задачами работы проведен выбор объектов экспериментального исследования. Такими объектами выступают модельные, технологический и промышленные растворы в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий, а также нанофильтрационные, ультрафильтрационные, микрофильтрационные мембраны и предварительный фильтр производителей ЗАО НТЦ «Владипор» и ООО НПП «Технофильтр», г. Владимир.

3. Получены результаты экспериментальных исследований и представлены некоторые графические зависимости структурных, электрохимических и транспортных характеристик мембранных систем при электробаромембранной и баромембранной очистке и концентрировании промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

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 Абоносимов О.А. Научные и практические основы электробаромембранной технологии в процессах химической водоподготовки и регенерации промышленных растворов: дис. … д-ра техн. наук: 05.17.03. Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2016. 364 с.

2 Акулиничев А.Н. Кинетические зависимости и технологическая эффективность процесса электробаромембранного удаления ионов тяжелых металлов (Fe, Cd, Pb) из сточных вод очистных предприятий: дис. … канд. техн. наук: 05.17.03. Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2017. 160 с.

3 Лазарев Д.С., Хорохорина И.В. Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств от ионов Zn^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+} // Вестник Технологического университета. 2025. Т. 31. № 1. С. 118–128.

4 Абоносимов Д.О., Протасов Д.Н., Абоносимов О.А. и др. Математическая модель электрогиперфильтрационного процесса очистки технологических растворов медно-гальванических производств // Вестник российских университетов. Математика. 2017. Т. 22. № 6-1. С. 1383–1388.

5 Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. URL: http://www.vladipor.ru/catalog/show/ (дата обращения: 07.02.2021).

6 Технофильтр: сайт ООО НПП Технофильтр. URL: https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtry-dlya-laboratoriy/ (дата обращения: 07.02.2021).

7 Лазарев С.И., Головин Ю.М., Ковалев С.В. и др. Влияние трансмембранного давления и диффузии эфирных субстанций на трансформацию структуры в полимерных пленках вида УПМ 100 и ПП 190 // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 4. С. 421–427.

8 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances // High Temperature. 2022. V. 60. № 4. P. 485–491.

9 Коновалов Д.Н., Луа П., Лазарев С.И. и др. Исследование процесса электронанофильтрации при разделении раствора хлорида аммония на мембранах АМН-П и ОПМН-П // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 2. С. 14–19.

10 Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н. и др. Электрохимические и транспортные характеристики мембранных систем при электронанофильтрационном разделении растворов, содержащих нитрат аммония и сульфат калия // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 6. С. 355–376.

11 Хорохорина И.В. Сорбционная емкость слабоионизированных мембран ОПМН-К и ОПМН-П при нанофильтрационном разделении технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 3. С. 67–70.

12 Kharchenko I.A., Volkova I.R., Fadeeva N.P. et al. Application of Electrobaromembrane Process for Separation of Aqueous Solutions of Ionic Dyes // Membranes and Membrane Technologies. 2025. V. 7. № 2. P. 144–153.

13 Butylskii D., Troitskiy V., Chuprynina D. et al. Selective separation of singly charged chloride and dihydrogen phosphate anions by electrobaromembrane method with nanoporous membranes // Membranes. 2023. V. 13. № 5. P. 455.

14 Pismenskaya N., Bdiri M., Sarapulova V. et al. A review on ion-exchange membranes fouling during electrodialysis process in food industry, part 2: Influence on transport properties and electrochemical characteristics, cleaning and its consequences // Membranes. 2021. V. 11. № 11. P. 811.

15 Sarapulova V.V., Pasechnaya E.L., Titorova V.D. et al. Electrochemical properties of ultrafiltration and nanofiltration membranes in solutions of sodium and calcium chloride // Membranes and Membrane Technologies. 2020. V. 2. № 5. P. 332–350.

16 Giacobbo A., Bernardes A.M. Membrane separation process in wastewater and water purification // Membranes. 2022. V. 12. № 3. P. 259. doi: 10.3390/membranes12030259

17 Castro-Muñoz R., Díaz-Montes E., Cassano A., Gontarek E. Membrane separation processes for the extraction and purification of steviol glycosides: an overview // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. V. 61. № 13. P. 2152–2174. doi: 10.1080/10408398.2020.1772717

18 Stenina I., Golubenko D., Nikonenko V., Yaroslavtsev A. Selectivity of transport processes in ion-exchange membranes: Relationship with the structure and methods for its improvement // International Journal of Molecular Sciences. 2020. V. 21. № 15. P. 5517. doi: 10.3390/ijms21155517

19 Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Goh P.S. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances // Environmental Science: Advances. 2025. V. 4. № 4. P. 530–570. doi: 10.1039/D4VA00378K

20 Lin Q., Zeng G., Yan G., Luo J. et al. Self-cleaning photocatalytic MXene composite membrane for synergistically enhanced water treatment: Oil/water separation and dyes removal // Chemical Engineering Journal. 2022. V. 427. P. 131668. doi: 10.1016/j.cej.2021.131668

References

1 Abonosimov O.A. Scientific and practical foundations of electrobaromembrane technology in the processes of chemical water treatment and regeneration of industrial solutions. Doctoral Dissertation (Dr. Sci. Tech.). Tambov: FSBEI HE "TSTU", 2016. 364 p. (in Russian).

2 Akulinichev A.N. Kinetic dependences and technological efficiency of the process of electrobaromembrane removal of heavy metal ions (Fe, Cd, Pb) from wastewater treatment plants. Candidate Dissertation (Cand. Sci. Tech.). Tambov: FSBEI HE "TSTU", 2017. 160 p. (in Russian).

3 Lazarev D.S., Khorokhorina I.V. Kinetic characteristics of electronanofiltration treatment of technological solutions from galvanic industries from Zn^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+} ions. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2025. vol. 31. no. 1. pp. 118–128. (in Russian).

4 Abonosimov D.O., Protasov D.N., Abonosimov O.A. et al. Mathematical model of electrohyperfiltration process for purification of technological solutions of copper-galvanic industries. Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2017. vol. 22. no. 6-1. pp. 1383–1388. (in Russian).

5 Vladipor. Available at: http://www.vladipor.ru/catalog/show/ (accessed: 07.02.2021) (in Russian).

6 Technofilter. Available at: https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtry-dlya-laboratoriy/ (accessed: 07.02.2021) (in Russian).

7 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Influence of transmembrane pressure and diffusion of ethereal substances on the transformation of structure in polymer films of UPM 100 and PP 190 types. Surface and Interface Science and Materials Protection. 2022. vol. 58. no. 4. pp. 421–427. (in Russian).

8 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances. High Temperature. 2022. vol. 60. no. 4. pp. 485–491. doi: 10.1134/S0018151X22040116.

9 Konovalov D.N., Lua P., Lazarev S.I. et al. Study of the electronanofiltration process during the separation of ammonium chloride solution on AMN-P and OPMN-P membranes. Bulletin of the Technological University. 2022. vol. 25. no. 2. pp. 14–19. (in Russian).

10 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N. et al. 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. (in Russian).

11 Khorokhorina I.V. Sorption capacity of weakly ionized OPMN-K and OPMN-P membranes during nanofiltration separation of technological solutions containing heavy metal ions. Bulletin of the Technological University. 2020. vol. 23. no. 3. pp. 67–70. (in Russian).

12 Kharchenko I.A., Volkova I.R., Fadeeva N.P. et al. Application of Electrobaromembrane Process for Separation of Aqueous Solutions of Ionic Dyes. Membranes and Membrane Technologies. 2025. vol. 7. no. 2. pp. 144–153. doi: 10.1134/S2517751624020062.

13 Butylskii D., Troitskiy V., Chuprynina D. et al. Selective separation of singly charged chloride and dihydrogen phosphate anions by electrobaromembrane method with nanoporous membranes. Membranes. 2023. vol. 13. no. 5. article 455. doi: 10.3390/membranes13050455.

14 Pismenskaya N., Bdiri M., Sarapulova V. et al. A review on ion-exchange membranes fouling during electrodialysis process in food industry, part 2: Influence on transport properties and electrochemical characteristics, cleaning and its consequences. Membranes. 2021. vol. 11. no. 11. article 811. doi: 10.3390/membranes11110811.

15 Sarapulova V.V., Pasechnaya E.L., Titorova V.D. et al. Electrochemical properties of ultrafiltration and nanofiltration membranes in solutions of sodium and calcium chloride. Membranes and Membrane Technologies. 2020. vol. 2. no. 5. pp. 332–350. doi: 10.1134/S2517751620050078.

16 Giacobbo A., Bernardes A.M. Membrane separation process in wastewater and water purification. Membranes. 2022. vol. 12. no. 3. article 259. doi: 10.3390/membranes12030259.

17 Castro-Muñoz R., Díaz-Montes E., Cassano A., Gontarek E. Membrane separation processes for the extraction and purification of steviol glycosides: an overview. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. vol. 61. no. 13. pp. 2152–2174. doi: 10.1080/10408398.2020.1772717.

18 Stenina I., Golubenko D., Nikonenko V., Yaroslavtsev A. Selectivity of transport processes in ion-exchange membranes: Relationship with the structure and methods for its improvement. International Journal of Molecular Sciences. 2020. vol. 21. no. 15. article 5517. doi: 10.3390/ijms21155517.

19 Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Goh P.S. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances. Environmental Science: Advances. 2025. vol. 4. no. 4. pp. 530–570. doi: 10.1039/D4VA00378K.

20 Lin Q., Zeng G., Yan G., Luo J. et al. Self-cleaning photocatalytic MXene composite membrane for synergistically enhanced water treatment: Oil/water separation and dyes removal. Chemical Engineering Journal. 2022. vol. 427. Article 131668. doi: 10.1016/j.cej.2021.131668.

Сведения об авторах

Дмитрий Н. Коновалов к.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

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

Никита С. Наместников аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, namestnikov-nikita@mail.ru

Анна Г. Сысоева аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, asus1301201@gmail.com

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

Dmitry N. Konovalov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technique and technology of road transport department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, kdn1979dom@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9366-8661

Sergey I. Lazarev Dr. Sci. (Engin.), head of department, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0746-5161

Nikita S. Namestnikov graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, namestnikov-nikita@mail.ru

Anna G. Sysoeva graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, asus1301201@gmail.com

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, commerce and commodity science department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia; consultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, 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 03/11/2025	**После редакции** 20/11/2025	**Принята в печать** 15/12/2025

Received 03/11/2025	**Accepted in revised** 20/11/2025	**Accepted** 15/12/2025