

Анализ и обоснование тенденций развития электромембранных методов в очистке промышленных растворов

Константин В. Шестаков	¹	kostyanshestakov@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Сергей И. Лазарев	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0002-3429-1139
Ольга В. Долгова	¹	o.v.dolgova@mail.ru	 0009-0000-9588-4897
Константин К. Полянский	²	kaf-kit@vfreu.ru	

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

Аннотация. В работе рассмотрены тенденции развития технологического оформления электромембранных методов разделения, динамично развивающейся технологии, характеризующейся высокой эффективностью, простотой эксплуатации и обслуживания. На сегодняшний день исследования технологии электромембранного разделения проводятся как с целью оптимизации и улучшения характеристик стандартных элементов, так в связи с разработкой и внедрением новых материалов и процессов. Выявлено четыре основных вектора развития технологий электромембранного разделения. Новые подходы и методики электромембранного разделения промышленных растворов, в том числе широкое внедрение математического моделирования для описания процессов протекающих в аппаратах, на анионообменных или катионообменных мембранах, изменение плотности тока в аппарате. Усовершенствование или разработка новых электромембранных аппаратов и устройств, результатом является увеличение площади соприкосновения, которое предлагается достичь или путем изменения формы, количества мембран или их пористости и шероховатости. Разработка новых типов мембран и материалов для их изготовления, изменяющих структуру и физико-химические свойства мембран, включает внедрение в состав мембран разнообразных компонентов (углеродных квантовых точек, наночастиц оксидов металлов и др.), физико-химическая воздействия на мембрану, изменяющие ее на этапе формирования. Интеграция мембранного разделения и электрохимии, привела к разработке электропроводящих мембран, в состав которых включены углеродные наноматериалы, обладающие превосходной электропроводностью и стабильность. Цель исследований в данном направлении, уменьшение загрязнения мембран. Мембраны с электрохимическим действием могут своевременно разлагать мелкие органические загрязнители, механизмы воздействия на которые при обычным мембранным разделением отсутствуют.

Ключевые слова: мембраны, технологическое оформление, тенденции развития, перспективы, электромембранные методы.

Analysis and substantiation of trends in the development of electromembrane methods in the purification of industrial solutions

Konstantin V. Shestakov	¹	kostyanshestakov@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Sergey I. Lazarev	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0002-3429-1139
Olga V. Dolgova	¹	o.v.dolgova@mail.ru	 0009-0000-9588-4897
Konstantin K. Polyansky	²	kaf-kit@vfreu.ru	

1 Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106, Tambov, 392000, Russia

2 Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. The paper considers the trends in the development of technological design of electromembrane separation methods, a dynamically developing technology characterized by high efficiency, ease of operation and maintenance. To date, research on the technology of electromembrane separation is carried out both to optimize and improve the characteristics of standard elements, and to develop and implement new materials and processes. Four main vectors of development of electromembrane separation technologies have been identified. New approaches and techniques for the electromembrane separation of industrial solutions, including the widespread introduction of mathematical modeling to describe processes occurring in apparatuses, on anion-exchange or cation-exchange membranes, and changes in current density in the apparatus. The improvement or development of new electromembrane devices and devices, the result is an increase in the area of contact, which is proposed to be achieved either by changing the shape, number of membranes or their porosity and roughness. The development of new types of membranes and materials for their manufacture, which change the structure and physico-chemical properties of membranes, includes the introduction of various components into the composition of membranes (carbon quantum dots, metal oxide nanoparticles, etc.), physico-chemical effects on the membrane, changing it at the stage of formation. The integration of membrane separation and electrochemistry has led to the development of electrically conductive membranes, which include carbon nanomaterials with excellent electrical conductivity and stability. The purpose of research in this area is to reduce membrane contamination. Membranes with electrochemical action can decompose small organic pollutants in a timely manner, the mechanisms of action on which are absent with conventional membrane separation.

Keywords: membranes, technological design, development trends, prospects, electromembrane methods.

Для цитирования

Шестаков К.В., Лазарев С.И., Долгова О.В. Полянский К.К. Анализ и обоснование тенденций развития электромембранных методов в очистке промышленных растворов // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 40–47. doi:10.20914/2310-1202-2024-2-40-47

For citation

Shestakov K.V., Lazarev S.I., Dolgova O.V., Polyansky K.K. Analysis and substantiation of trends in the development of electromembrane methods in the purification of industrial solutions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 40–47. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-2-40-47

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

Введение

Технологии электромембранных методов разделения (ЭМР) являются важным инструментом для очистки промышленных растворов (гальванических производств, опреснения и очистки воды, разделения в пищевой и других отраслях производства) и имеют большой потенциал для улучшения производительности и качества конечного продукта. Метод основан на использовании разности потенциалов электрического поля, под действием которого заряженные ионы перемещаются через катионообменные или анионообменные мембраны в зависимости от заряда проникающих ионов, что позволяет с высокой селективностью проводить процесс очистки. Небольшая занимаемая площадь, высокая эффективность, низкое энергопотребление, экономия за счет масштаба, простота эксплуатации и обслуживания, минимальный контроль и модульная конструкция являются одними из преимуществ мембранных систем, делающих их конкурентоспособными по сравнению с признанными технологиями очистки различных видов промышленных сточных вод.

Успешное применение ЭМР в промышленности зависит от целого ряда параметров, из которых следует выделить следующие: установление оптимальных параметров процесса, таких как: ток, напряжение, температура и концентрация раствора. Немаловажным является правильный выбор конфигурации мембран и электродов, перечень которых непрерывно пополняется и перерабатывается, так как исследования и разработки в этом направлении довольно востребованы. Современные технологии ЭМР также включают автоматизацию процесса с помощью специализированных систем контроля и управления, что позволяет повысить производительность и качество продукта, а также уменьшить затраты на обслуживание и ремонт оборудования. Целью данной работы было выявление тенденций развития технологического оформления ЭМР.

Современные тенденции развития технологического оформления мембранных и, в частности, электрохимических мембранных методов разделения, направлены на повышение эффективности процесса разделения, уменьшении затрат энергии и введение новых, более современных материалов и технологий для достижения оптимальных результатов. Одной из важных тенденций развития технологического оформления электрохимического мембранного разделения является улучшение структуры мембран и электродов, что позволит повысить эффективность и понизить затраты на технологический процесс разделения. При этом работы по улучшению структуры и проницаемости мембран

ведутся в нескольких направлениях: готовые мембраны обрабатывают специально подобранным реагентом [1], на этапе изготовления мембраны в состав исходной смеси вводятся вещества, изменяющие ее структуру в процессе формирования [2], предподготовка мембран воздействием на них различными видами физико-химического методов [3], подбираются соотношения и виды растворителей. На химическую структуру мембран не влияют использование различных растворителей, полимеров и масштабы производства, менять структуру пор мембраны и шероховатость поверхности возможно с помощью регулирования скорости диффузии, при диффундировании растворителей/соразтворителей в носитель, а также времени испарения. При этом особое внимание уделяется экологической чистоте материалов, применяемых при производстве мембран.

Осуществляется разработка новых и современных материалов для изготовления мембран. Существует широкий спектр комбинаций составов мембран, который постоянно расширяется. Для изготовления мембран используют различные полимеры (полисульфон, полиэфирсульфон, поливинилиденфторид и другие) [4, 5], нанотехнологичные материалы (углеродные наноматериалы, углеродные квантовые точки, металлоорганические каркасы, наночастицы оксидов металлов [2, 6], мембраны с полимерными включениями.

Наноматериалы вводят в состав мембран для улучшения их физико-химических свойств, способствующих уменьшению загрязнения, улучшению смачивания пор. Металлические наночастицы вводят в состав мембран для придания мембранам гидрофобных характеристик, создания шероховатой поверхности. Наночастицы некоторых оксидов металлов обладают антибактериальными свойствами. Наноматериалы на основе углерода в структуре мембраны увеличивают их порозность (большое соотношение площади поверхности к объему), увеличивают механическую прочность и снижают уровень загрязненности [7]. Углеродные квантовые точки легко интегрируются в состав, придают ей гидрофильные свойства и способствуют защите мембраны от биообрастания. Немаловажным фактором при выборе углеродных квантовых точек для модификации мембран является простота и низкая стоимость их производства, экологическая чистота, в отличие от высокотоксичных полупроводниковых квантовых точек [8].

Мембраны с полимерными включениями состоят из базового полимера, экстрагента (чаще всего называемого носителем) и, при необходимости, пластификатора / модификатора. Базовый полимер обеспечивает механическую поддержку и структуру мембраны. Носитель

связывает извлекаемые элементы, экстрагирует и транспортирует их из загрязненной воды в принимающий раствор. Пластификатор представляет собой органическое соединение с неполярной алкильной основной цепью с одной или несколькими сильно сольватирующими полярными группами. Однако стоит отметить, что некоторые носители обладают пластифицирующими свойствами и могут образовывать гомогенные, стабильные и гибкие мембраны без добавления модификатора синтезируется путем растворения базового полимера, носителя и пластификатора в небольшом объеме органического растворителя, такого как хлороформ или тетрагидрофуран, с образованием гомогенного раствора.

Технологическая схема электромембранной очистки сточных вод, применяемая на производстве химического синтеза, представлена на рисунке 1. Схема включает две линии, которые могут работать независимо друг от друга. На первой линии осуществляется очистка кислых промывных вод. Сначала промывные воды копятся в емкости сбора 1, откуда их закачивают с помощью насоса 3 в аппарат нейтрализации растворов 4. После нейтрализации воды поступают в электродиализатор 5 для последующей очистки. Далее диллюат перекачивают в емкость сбора очищенной воды 6, а концентрат в емкость 7 сбора растворов, подлежащих утилизации или направляемых на выделение металлов.

В это же время происходит параллельное накопление кислых сточных вод в емкости 2. Насосом 3, сточные воды перекачиваются в фильтр грубой очистки 8, где проводится гравитационное осаждение наиболее крупной фракции взвешенных частиц очищаемого раствора, которые после накапливаются в шламоборнике 9. Оставшаяся часть загрязняющих веществ, вместе со сточными водами, через насос 3 поступает в тонкослойный отстойник 10. В отстойнике происходит осаждение остатков взвешенных частиц, которые также направляются в шламоборник 9. Очищенные от взвешенных частиц сточные воды затем перекачиваются насосом 5 через установки для коррекции pH 11 и поступают в электробаромембранный аппарат 12. Количество необходимых электробаромембранных аппаратов зависит от общего объема сточных вод, требующих очистки.

В процессе очистки производится отделение загрязняющих веществ, в результате чего образуется концентрат. Этот концентрат, представленный в виде ретентата, выводится из аппарата с целью последующего выделения товарных продуктов или для дальнейшей утилизации. Очищенная вода, представленная в виде пермеата, направляется дальше по системе. Кроме того, к электрогиперфильтрационному аппарату 12 подключена

емкость с чистящими реагентами 13. С помощью насоса 5 реагенты подаются в аппарат для очистки мембран. Затем используемые чистящие реагенты собираются в емкости сбора чистящих реагентов 14 для дальнейшего использования или обработки.

Очищенная вода в виде пермеата подается насосом в электродиализатор 5 для дополнительной очистки. Из электродиализатора перекачивается вода с повышенной степенью очистки, или диллюат, снова с помощью насоса 5, и направляется в емкость сбора очищенной воды 6. Затем эта вода возвращается обратно в промышленный цикл для повторного использования. Загрязненная вода, представленная в виде ретентата, выводится из аппарата и направляется в емкость сбора концентрата после очистки сточных вод 7. Дальнейшая обработка этого концентрата может включать товарного продукта или утилизацию в соответствии с необходимыми требованиями и нормами.

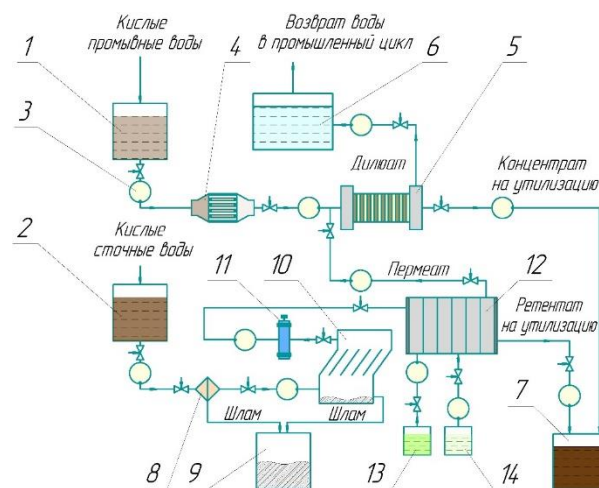


Рисунок 1. Технологическая схема очистной системы на производстве химического синтеза: 1 – емкость сбора кислых промывных вод; 2 – емкость сбора кислых сточных вод; 3 – насос; 4 – аппарат нейтрализации растворов; 5 – электродиализатор; 6 – емкость сбора очищенной воды; 7 – емкость сбора растворов, подлежащих утилизации; 8 – фильтр грубой очистки; 9 – шламоборник; 10 – тонкослойный отстойник; 11 – установка корректировки pH; 12 – электрогиперфильтрационный аппарат; 13 – емкость с чистящими реагентами; 14 – емкость сбора отработанных чистящих реагентов

Figure 1. Technological scheme of the purification system in the production of chemical synthesis: 1 – acidic washing water collection tank; 2 – acidic wastewater collection tank; 3 – pump; 4 – solution neutralization apparatus; 5 – electrodialyzer; 6 – purified water collection tank; 7 – collection tank for solutions to be disposed of; 8 – coarse filter; 9 – sludge collector; 10 – thin-layer sump; 11 – pH adjustment unit; 12 – electrohyperfiltration apparatus; 13 – container with cleaning reagents; 14 – collection tank for spent cleaning reagents

Еще одной важной тенденцией является разработка методов управления параметрами разделения, включающая в себя развитие новых методов контроля и регулирования электродного потенциала, температуры и других процессных параметров [9], которые позволяют оптимизировать эффективность процесса и снизить затраты на энергию.

На основе проведенного литературного обзора в отечественных и зарубежных источниках [10–13] и собственных исследований в современной тенденции развития технологического оформления электромембранных методов разделения можно выделить несколько основных групп:

1. Новые подходы и методики электромембранного разделения промышленных растворов. Существующие методы электромембранного разделения растворов имеют свои ограничения, и поэтому проводятся исследования с целью разработки новых методик. Главная цель заключается в создании эффективных и устойчивых процессов, которые могут быть применены в промышленности для разделения компонентов в технологических растворах. Исследования и разработки новых подходов и методик электромембранного разделения включают экспериментальные и теоретические подходы, что позволяет оценить производительность и эффективность новых методов, провести оптимизацию параметров процесса и предсказать поведение системы на основе моделирования [14–17].

Многочисленные исследования мембранного разделения направлены на определение характеристик процесса при повышенной плотности тока. Процесс разделения проводят при относительно небольших плотностях тока, поскольку существует прямая зависимость ионного потока от плотности тока, но известна тенденция к увеличению скорости извлечения за счет увеличения плотности тока, которая приводит как положительным, так и к отрицательным эффектам [18].

Математическое моделирование процессов, протекающих в электромембранных ячейках, широко используют для разработки новых методик разделения и моделирования процессов в аппарате [19]. Выделяют три наиболее используемые модели для оценки процессов на ионселективных мембранах: модель с поверхностным зарядом, пространственным зарядом и модель массива наноканалов. Численное моделирование базируется на основных уравнениях Навье-Стокса и Нернста-Планка в предположении электронейтральности, вычисляются поля давления, скорости, концентрации и электрического потенциала [20].

2. Модернизация или разработка новых электромембранных аппаратов и устройств.

Где можно выделить несколько ключевых направлений, которые сфокусированы на повышении эффективности и качества разделения, а также снижении энергопотребления и стоимости производства [21–24].

В настоящее время одно из представленных направлений в развитии мембранных технологий заключается в стремлении к увеличению площади соприкосновения между мембраной и технологическим раствором внутри аппарата или устройства. Данное направление является ответом на потребности в повышении эффективности разделения и повышении производительности мембранных систем. Это может быть достигнуто путем разработки новых структур мембран, изменения геометрии аппарата или устройства, а также совершенствования методов и технологий производства.

Снижение энергопотребления также является важным фактором в усовершенствовании электромембранных аппаратов и устройств. Работы по оптимизации параметров и режимов работы, а также разработке новых энергосберегающих технологий помогут снизить энергозатраты, сделав процессы разделения более эффективными.

Кроме того, современные технологии в производстве и новые инженерные решения позволяют снизить стоимость изготовления электромембранных аппаратов и устройств. Это может быть достигнуто через использование экономически выгодных материалов, оптимизацию производственных процессов и разработку более простых и эффективных конструкций.

Наконец, разработка новых конструкций аппаратов и технологических схем играет важную роль в усовершенствовании электромембранных устройств. Новые архитектуры и дизайны позволяют достичь лучшей производительности, оптимизировать процессы разделения и улучшить качество получаемых продуктов.

Все эти усовершенствования и новые разработки в области электромембранных аппаратов и устройств вместе способствуют развитию и модернизации процессов разделения и применения электромембранных технологий в различных отраслях, таких как водоочистка, фармацевтика, химическая промышленность и другие.

3. Разработка новых типов мембран и материалов для их изготовления. Это одна из ключевых групп тенденций в области электрохимического мембранного разделения. Данное направление включает разработку и внедрение новых материалов с максимальным коэффициентом задержания и водопроницаемостью для разделения конкретных компонентов [25–27]. Новые материалы обладают улучшенными характеристиками,

такими как высокая селективность разделения, повышенная эффективность и стабильность процесса, а также сниженное энергопотребление.

В процессе разработки новых материалов учеными и инженерами проводятся исследования по синтезу и модификации различных типов мембран, включая полимерные, керамические, металлические и композитные материалы. Использование новых материалов позволяет создать мембраны с оптимальными физико-химическими свойствами, которые справляются с особыми вызовами и требованиями каждого конкретного процесса разделения.

Например, использование наноматериалов позволяет достичь лучшего коэффициента разделения и снизить проницаемость для нежелательных компонентов. Кроме того, применение новых функциональных мембран, таких как ионометрические мембраны или селективные мембраны с определенными свойствами, предоставляет возможность разделения более сложных и разнообразных смесей.

Инновационные подходы, такие как использование 3D-печати и нанокompозитных материалов, позволяют создавать мембраны с уникальными структурами и свойствами. Такие материалы могут обеспечивать более эффективную передачу и разделение ионов и молекул, а также обладать повышенной механической прочностью и стабильностью при эксплуатации.

В целом, разработка и использование новых материалов в электрохимическом мембранном разделении способствует повышению технологической и экономической эффективности процессов разделения, а также открывает новые возможности для применения технологии в различных отраслях, включая водоподготовку, энергетику, химическую промышленность и другие.

4. Интеграция мембранного разделения и электрохимии. Исследования в данном направлении ведутся с целью решения одной из основных проблем мембранного разделения – загрязнения мембран. Загрязнение мембран происходит в результате накопления загрязнителей (веществ, не прошедших через мембрану) на поверхности и в порах. Негативные эффекты от загрязнения мембран разнообразны. Это и увеличение энергопотребления, вследствие снижения потока, и увеличение частоты замены мембран, и невозможность использования мембранных методов при разделении некоторых растворов.

Уменьшение загрязнения мембран предлагается достичь благодаря интеграции мембранного разделения и электрохимии, разработке нового типа мембран – электропроводящих мембран. Мембраны должны обладать электрохимическими свойствами, такими как хорошая

электропроводность и электрохимическая стабильность, чтобы обеспечить перенос электронов и длительную работу в воде [28]. Для этих целей идеально подходят углеродные наноматериалы, обладающие превосходной электропроводностью и стабильностью из-за их делокализованной π -электронной системы и sp^2 – гибридных со-товых сетей с сильными σ -связями в плоскости. Кроме того, они имеют атомно-гладкую поверхность, или внутренние каналы, или атомно-тонкую структуру и, следовательно, могут использоваться для создания высокоэффективных мембран с высокой селективностью и проницаемостью [29–31].

Катализатор закрепляется на мембранах, благодаря чему загрязняющие вещества могут подвергаться окислительному разложению с передачей их электронов окислителю. Электрокаталитические мембраны из углеродных нанотрубок обладают уникальными характеристиками, позволяющими во время мембранной фильтрации удалять загрязняющие вещества и уменьшать загрязнения за счет электрохимического окисления молекул загрязняющих веществ, природных органических веществ и биомолекул, попавших на поверхность или в каналы мембраны [32, 33].

Заключение

Электромембранные процессы – динамично развивающаяся технология со многими существующими и перспективными направлениями применения, включающая разделение промышленных растворов, очистку сточных вод, опреснение морской воды и другие. Использование электромембранных процессов при очистке промышленных сточных вод позволяет осуществлять полную очистку и повторно использовать в производстве регенерированную воду. Внедрение мембранной технологии позволит преодолеть или значительно минимизировать ограничения, накладываемые на существующие технологии.

Процессы и элементы, входящие в состав установок электромембранного разделения, находятся под постоянным вниманием исследователей, что позволяет сделать вывод о востребованности и перспективности технологии электромембранного разделения.

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 Сазонов О.О., Панов Н.М., Дулмаев С.Э. Клинов А.В. и др. Первапорационные характеристики элементарноорганических полиуретанов // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 2. С. 73–78.
- 2 Selatile K., Ray S.S., Kumar N., Ojijo V. et al. Fabrication of Advanced 2D Nanomaterials Membranes for Desalination and Wastewater Treatment // Two-Dimensional Materials for Environmental Applications. 2023. P. 245–268. doi: 10.1007/978-3-031-28756-5_8
- 3 Назаров В.Г., Нагорнова И.В., Столяров В.А., Доронин Ф.А. и др. Влияние фторирования сверхвысокомолекулярного полиэтилена и композитов на его основе на поверхностную структуру и свойства // Химическая физика. 2018. №. 12. С. 63–73. doi:10.1134/S0207401X18110080
- 4 Li H., Huang L., Li X., Huang W. et al. Calcium-alginate/HKUST-1 interlayer-assisted interfacial polymerization reaction enhances performance of solvent-resistant nanofiltration membranes // Separation and Purification Technology. 2023. № 309. P. 123031. doi:10.1016/j.seppur.2022.123031
- 5 Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. № 2 (41). С. 192–207. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207
- 6 Sinha Ray S., Singh Bakshi H., Dangayach R., Singh R. et al. Recent developments in nanomaterials-modified membranes for improved membrane distillation performance // Membranes. 2020. V. 10. №. 7. P. 140. doi:10.3390/membranes10070140
- 7 Das R., Ali M.E., Abd Hamid S.B., Ramakrishna S. et al. Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination // Desalination. 2014. №. 336. P. 97–109. doi:10.1016/j.desal.2013.12.026
- 8 Zhao D.L., Chung T.-S. Applications of carbon quantum dots (CQDs) in membrane technologies: A review // Water Res. 2018. №. 147. P. 43–49. doi:10.1016/j.watres.2018.09.040
- 9 Филимонова А.А., Чичиринов А.А., Печенкин А.В., Чичирова Н.Д. Оптимизация гидродинамического режима в камерах проточного электроомембранного аппарата // Мембраны и мембранные технологии. 2023. Т. 13. № 1. С. 15–22.
- 10 Сайт Роспатента. URL: <http://www.fips.ru/>
- 11 Google Patents. URL: <https://patents.google.com>
- 12 Заболоцкий В.И., Березина Н.П., Никоненко В.В., Шудренко А.А. Развитие мембранных технологий на основе электродиализа в России // Наука Кубани. 2010. № 3. С. 4–10.
- 13 Лепеш Г.В., Панасюк А.С., Лепеш Г.В., Чурилин А.С. Современные методы очистки сточных вод промышленных предприятий // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 3(37). С. 14–23.
- 14 Козадерова О.А. Нифталиев С.И., Ким К.Б. Применение биполярных мембран МБ-2, модифицированных гидроксидом хрома (III), для конверсии сульфата натрия // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. № 3. С. 30–36.
- 15 Евдокимов И.А., Толмачев Л.И., Бондарчук А.Д. Классический и биполярный электродиализ в инновационных технологиях переработки творожной сыворотки // Молочная промышленность. 2018. № 9. С. 69–73.
- 16 Тураев Д.Ю., Колесников В.А., Попов А.Н. Теоретические и практические основы регенерации и утилизации мембранным и безмембранным электролизом серноокислых растворов травления меди, применяемых в производстве печатных плат // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 1. С. 87–98.
- 17 Ткаченко Д.О., Зажигаева К.В. Применение установок электродеионизации в практике водоподготовки на тепловых электрических станциях // Новая наука: От идеи к результату. 2016. № 4–1. С. 87–89.
- 18 Strnad J., Kincl M., Beneš J., Svoboda M. et al. Overlimiting mechanisms of heterogeneous cation-and anion-exchange membranes: A side-by-side comparison // Desalination. 2024. №. 571. P. 117093. doi:10.1016/j.desal.2023.117093
- 19 Бурчу М.П., Липин А.Г., Шибашов А.В. Моделирование процесса разделения растворов электролитов в электроомембранном аппарате // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2013. № 3. С. 83–85.
- 20 Uzdenova A., Urtenov M. Potentiodynamic and galvanodynamic regimes of mass transfer in flow-through electrodiolysis membrane systems: Numerical simulation of electroconvection and current-voltage curve // Membranes. 2020. V. 10. №. 3. P. 49. doi: 10.3390/membranes10030049
- 21 Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecular-level interactions to electrochemical cell design // Physical Chemistry Chemical Physics. 2017. № 19(35). P. 23570–23584. doi: 10.1039/c7cp02822a
- 22 Лазарев К.С., Ковалев С.В., Лазарев С.И., Кочетов В.И. Проектирование и расчет электробаромембранных аппаратов плоскокамерного типа для очистки промышленных стоков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 5. С. 5–9.
- 23 Хохлов П.А., Шестаков К.В., Лазарев Д.С. О некоторых особенностях разработки электродиализатора с охлаждающими трубками // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы XI Международной научно-инновационной молодежной конференции. Тамбов, 2019. С. 212–214.
- 24 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Селиванов Ю.Т. Математическое описание и методика расчета технологических параметров электродиализного аппарата для очистки сточных вод химических производств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 1. С. 32–34.
- 25 Кононенко Н.А., Демина О.А., Лозаа Н.В., Долгополов С.В. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование предельного диффузионного тока в системах с модифицированными перфторированными сульфокатионитовыми мембранами // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 5. С. 283–300.
- 26 Вайнертова К., Кршивчик Й., Недела Д., Странска Э. и др. Полимерные связующие для ионообменных мембран с повышенной механической стойкостью // Производство и использование эластомеров. 2016. № 2. С. 33–42.
- 27 Лебедева О.А., Седелкин В.М., Потехина Л.Н. Технология получения и характеристики хитозановых нанофильтрационных мембран // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 1. С. 58–65. doi: 10.6060/ivkkt.20226501.6340
- 28 Sun M., Wang X.X., Winter L.R., Zhao Y.M. et al. Electrified Membranes for Water Treatment Applications // ACS ES&T Engg. 2021. №. 1. P. 725–752. doi:10.1021/acsestengg.1c00015

- 29 Zhang Z.X., Huang G.H., Li Y.P., Chen X.J. et al. Electrically conductive inorganic membranes: A review on principles, characteristics and applications // *Chem. Eng. J.* 2022. № 427. P. 131987. doi:10.1016/j.cej.2021.131987
- 30 Patil J.J., Jana A., Getachew B.A., Bergsman D.S. et al. Conductive carbonaceous membranes: recent progress and future opportunities // *J. Mater. Chem. A*. 2021. №. 9. P. 3270–3289. doi:10.1039/D0TA08928A
- 31 Ahmed F., Lalia B.S., Kochkodan V., Hilal N. et al. Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: A review // *Desalination*. 2016. №. 391. P. 1–15. doi:10.1016/j.desal.2016.01.030
- 32 Fan X., Zhao H., Liu Y., Quan X. et al. Enhanced permeability, selectivity, and antifouling ability of cnts/Al₂O₃ membrane under electrochemical assistance // *Environ. Sci. Technol.* 2015. №. 49. P. 2293–2300. doi: 10.1021/es5039479
- 33 Fan X., Zhao H., Quan X., Liu Y. et al. Nanocarbon-based membrane filtration integrated with electric field driving for effective membrane fouling mitigation // *Water Res.* 2016. №. 88. P. 285–292. doi: 10.1016/j.watres.2015.10.043

References

- 1 Sazonov O.O., Panov N.M., Dulmaev S.E. Klinov A.V. et al. Pervaporation characteristics of organoelement polyurethanes. *Bulletin of the Technological University*. 2023. vol. 26. no. 2. pp. 73–78. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_2_73 (in Russian).
- 2 Selatile K., Ray S.S., Kumar N., Ojijo V. et al. Fabrication of Advanced 2D Nanomaterials Membranes for Desalination and Wastewater Treatment. *Two-Dimensional Materials for Environmental Applications*. 2023. pp. 245–268. doi: 10.1007/978-3-031-28756-5_8
- 3 Nazarov V.G., Nagornova I.V., Stolyarov V.A., Doronin F.A. et al. The effect of fluorination of ultrahigh molecular weight polyethylene and composites based on it on the surface structure and properties. *Chemical Physics*. 2018. no. 12. pp. 63–73. doi:10.1134/S0207401X18110080 (in Russian).
- 4 Li H., Huang L., Li X., Huang W. et al. Calcium-alginate/HKUST-1 interlayer-assisted interfacial polymerization reaction enhances performance of solvent-resistant nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*. 2023. no. 309. pp. 123031. doi:10.1016/j.seppur.2022.123031
- 5 Lebedeva O.V., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *News of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2022. vol. 12. no. 2 (41). pp. 192–207. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207 (in Russian).
- 6 Sinha Ray S., Singh Bakshi H., Dangayach R., Singh R. et al. Recent developments in nanomaterials-modified membranes for improved membrane distillation performance. *Membranes*. 2020. vol. 10. no. 7. pp. 140. doi:10.3390/membranes10070140
- 7 Das R., Ali M.E., Abd Hamid S.B., Ramakrishna S. et al. Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desalination*. 2014. no. 336. pp. 97–109. doi:10.1016/j.desal.2013.12.026
- 8 Zhao M., Chung T.-S. Applications of carbon quantum dots (CQDs) in membrane technologies: A review. *Water Res.* 2018. no. 147. pp. 43–49. doi:10.1016/j.watres.2018.09.040
- 9 Filimonova A.A., Chichirov A.A., Pechenkin A.V., Chichirova N.D. Optimization of the hydrodynamic regime in chambers of a flowing electromembrane apparatus. *Membranes and membrane technologies*. 2023. vol. 13. no. 1. pp. 15–22. (in Russian).
- 10 Rospatent's website. Available at: <http://www.fips.ru/> (in Russian).
- 11 Google Patents. Available at: <https://patents.google.com> (in Russian).
- 12 Zabolotsky V.I., Berezina N.P., Nikonenko V.V., Shudrenko A.A. Development of membrane technologies based on electrodialysis in Russia. *Nauka Kubani*. 2010. no. 3. pp. 4–10. (in Russian).
- 13 Lepesh G.V., Panasyuk A.S., Lepesh G.V., Churilin A.S. Modern methods of wastewater treatment of industrial enterprises. *Technical and technological problems of service*. 2016. no. 3(37). pp. 14–23. (in Russian).
- 14 Kozaderova O.A., Niftaliev S.I., Kim K.B. Application of bipolar MB-2 membranes modified with chromium (III) hydroxide for sodium sulfate conversion. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2019. vol. 62. no. 3. pp. 30–36. (in Russian).
- 15 Evdokimov I.A., Tolmachev L.I., Bondarchuk A.D. Classical and bipolar electrodialysis in innovative technologies for processing curd whey. *Dairy industry*. 2018. no. 9. pp. 69–73. (in Russian).
- 16 Turaev D.Yu., Kolesnikov V.A., Popov A.N. Theoretical and practical bases of regeneration and utilization by membrane and membrane-free electrolysis of sulfuric acid solutions of copper etching used in the production of printed circuit boards. *Theoretical foundations of chemical technology*. 2021. vol. 55. no. 1. pp. 87–98. (in Russian).
- 17 Tkachenko D.O., Zazhigaeva K.V. Application of electrodeionization installations in the practice of water treatment at thermal power plants. *New Science: From idea to result*. 2016. no. 4–1. pp. 87–89. (in Russian).
- 18 Strnad J., Kincl M., Beneš J., Svoboda M. et al. Overlimiting mechanisms of heterogeneous cation-and anion-exchange membranes: A side-by-side comparison. *Desalination*. 2024. no. 571. pp. 117093. doi:10.1016/j.desal.2023.117093
- 19 Burchu M.P., Lipin A.G., Shibashov A.V. Modeling of the process of separation of electrolyte solutions in an electromembrane apparatus. *Mathematical methods in engineering and technologies – MMTT*. 2013. no. 3. pp. 83–85. (in Russian).
- 20 Uzdenova A., Urtenov M. Potentiodynamic and galvanodynamic regimes of mass transfer in flow-through electrodialysis membrane systems: Numerical simulation of electroconvection and current-voltage curve. *Membranes*. 2020. vol. 10. no. 3. pp. 49. doi: 10.3390/membranes10030049
- 21 Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecular-level interactions to electrochemical cell design. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2017. no 19(35). pp. 23570–23584. doi: 10.1039/c7cp02822a
- 22 Lazarev K.S., Kovalev S.V., Lazarev S.I., Kochetov V.I. Design and calculation of electrobaromembrane flat-chamber type devices for industrial wastewater treatment. *Chemical and oil and gas engineering*. 2013. no. 5. pp. 5–9. (in Russian).
- 23 Khokhlov P.A., Shestakov K.V., Lazarev D.S. On some features of the development of an electrodialyzer with cooling tubes. *Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovative management. Materials of the XI International Scientific and Innovative Youth Conference. Tambov*, 2019. pp. 212–214. (in Russian).
- 24 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Selivanov Yu. T. Mathematical description and methodology for calculating technological parameters of an electrodialysis apparatus for wastewater treatment of chemical industries. *Chemical and oil and gas engineering*. 2020. no. 1. pp. 32–34. (in Russian).

- 25 Kononenko N.A., Demina O.A., Lozaa N.V., Dolgoplov S.V. et al. Theoretical and experimental investigation of the limiting diffusion current in systems with modified perfluorinated sulfocationite membranes. *Electrochemistry*. 2021. vol. 57. no. 5. pp. 283–300. doi: 10.31857/S0424857021050066 (in Russian).
- 26 Vainertova K., Krshivchik J., Nedela D., Stranska E., etc. Polymer binders for ion exchange membranes with increased mechanical resistance. Production and use of elastomers. 2016. no. 2. pp. 33–42. (in Russian).
- 27 Lebedeva O.A., Sedelkin V.M., Potekhina L.N. Technology of obtaining and characteristics of chitosan nanofiltration membranes. *Izvestia of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2022. vol. 65. no. 1. pp. 58–65. doi: 10.6060/ivkkt.20226501.6340 (in Russian).
- 28 Sun M., Wang X.X., Winter L.R., Zhao Y.M. et al. Electrified Membranes for Water Treatment Applications. *ACS ES&T Engg*. 2021. no. 1. pp. 725–752. doi:10.1021/acsestengg.1c00015
- 29 Zhang Z.X., Huang G.H., Li Y.P., Chen X.J. et al. Electrically conductive inorganic membranes: A review on principles, characteristics and applications. *Chem. Eng. J*. 2022. no. 427. pp. 131987. doi:10.1016/j.cej.2021.131987
- 30 Patil J.J., Jana A., Getachew B.A., Bergsman D.S. et al. Conductive carbonaceous membranes: recent progress and future opportunities. *J. Mater. Chem. A*. 2021. no. 9. pp. 3270–3289. doi:10.1039/D0TA08928A
- 31 Ahmed F., Lalia B.S., Kochkodan V., Hilal N. et al. Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: A review. *Desalination*, 2016, no. 391. pp. 1–15. doi:10.1016/j.desal.2016.01.030
- 32 Fan X., Zhao H., Liu Y., Quan X. et al. Enhanced permeability, selectivity, and antifouling ability of cnts/Al₂O₃ membrane under electrochemical assistance. *Environ. Sci. Technol*. 2015. no. 49. pp. 2293–2300. doi: 10.1021/es5039479
- 33 Fan X., Zhao H., Quan X., Liu Y. et al. Nanocarbon-based membrane filtration integrated with electric field driving for effective membrane fouling mitigation. *Water Res*. 2016. no. 88. pp. 285–292. doi: 10.1016/j.watres.2015.10.043

Сведения об авторах

Константин В. Шестаков к.т.н., доцент, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственных технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kostyanshestakov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Сергей И. Лазарев д.х.н., профессор, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственных технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3429-1139>

Ольга В. Долгова к.т.н., инженер, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственных технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, o.v.dolgova@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9588-4897>

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, kaf-kit@vfreu.ru

Information about authors

Konstantin V. Shestakov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106, Tambov, 392000, Russia, kostyanshestakov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Sergey I. Lazarev Dr. Sci. (Engin.), professor, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106, Tambov, 392000, Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3429-1139>

Olga V. Dolgova Cand. Sci. (Engin.), engineer, nature management and environmental protection department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106, Tambov, 392000, Russia, o.v.dolgova@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9588-4897>

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, kaf-kit@vfreu.ru

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/03/2024	После редакции 28/03/2024	Принята в печать 17/04/2024
Received 11/03/2024	Accepted in revised 28/03/2024	Accepted 17/04/2024