


Исследования кинетических и сорбционных характеристик мембран ОФАМ-К и ОПМН-П в процессе электронанофильтрационного разделения водного раствора сульфата калия

Дмитрий Н. Коновалов	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Сергей И. Лазарев	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Луа Пепе	¹	alploua@gmail.com	 0000-0002-7333-4816
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 приведен анализ существующих методов мембранного разделения растворов на полупроницаемых и ионообменных мембранах, где отмечены их достоинства и недостатки. Объектами исследования являлись нанофильтрационные мембраны марки ОФАМ-К, ОПМН-П и водные растворы сульфата калия, используемого в производстве минеральных удобрений. Исследовано изменение коэффициента задержания на прианодной мембране ОФАМ-К по сульфат-ионам и на прикатодной мембране ОПМН-П по ионам калия при плотностях тока 12,82 и 15,38 А/м² с варьированием трансмембранного давления. Анализ коэффициента задержания прикатодной мембраной ОПМН-П по ионам калия с повышением давления показывает о его возрастании на 20–30%, что, вероятно, вызвано повышением скорости проницаемости воды, вызывающей разведение пермеата. В случае анализа коэффициента задержания по сульфат-ионам на прианодной мембране ОФАМ-К в области низких плотностей тока сначала задерживающая способность с повышением трансмембранного давления падает, а затем выходит на постоянное значение с небольшим повышением при давлении 1,5 МПа. При более высоких плотностях тока коэффициент задержания по сульфат-ионам на прианодной мембране ОФАМ-К с повышением трансмембранного давления, как и на прикатодной мембране ОПМН-П по ионам калия возрастает. Зависимости удельного выходного потока от времени приведены при трансмембранном давлении 0,75, 1 и 1,5 МПа и плотности тока 12,82 и 15,38 А/м². Отмечено, что на прианодной мембране ОФАМ-К удельный выходной поток возрастает, а на прикатодной мембране ОПМН-П снижается с течением времени, что обусловлено трансформацией физических свойств мембран и пограничных слоев, формируемых на их рабочей поверхности. На прианодной мембране ОФАМ-К с течением времени проницаемость по воде возрастает, а на прикатодной мембране ОПМН-П снижается. Представленные данные по десорбции ионов калия и сульфат-ионов на прианодной мембране ОФАМ-К и прикатодной мембране ОПМН-П свидетельствуют о том, что с течением времени десорбция ионов снижается, причем показатель десорбции ионов калия на прианодной мембране ОФАМ-К выше, хотя в процессе электронанофильтрации ионы переносятся в эквивалентных отношениях.

Ключевые слова: электронанофильтрация, мембрана, коэффициент задержания, pH раствора, ионы.

Studies of the kinetic and sorption characteristics of OFAM-K and OPMN-P membranes in the process of electron-nanofiltration separation of an aqueous solution of potassium sulfate

Dmitry N. Konovalov	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Sergey I. Lazarev	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Pepe Lua	¹	alploua@gmail.com	 0000-0002-7333-4816
Konstantin K. Polyansky	²	kaf-kit@vfreu.ru	

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

Abstract. The paper presents an analysis of existing methods of membrane separation of solutions on semipermeable and ion-exchange membranes, where their advantages and disadvantages are noted. The objects of study were OFAM-K and OPMN-P nanofiltration membranes and aqueous solutions of potassium sulfate used in the production of mineral fertilizers. The change in the retention coefficient on the near-anode OFAM-K membrane for sulfate ions and on the near-cathode membrane OPMN-P for potassium ions was studied at current densities of 12,82 and 15,38 A/m² with varying transmembrane pressure. An analysis of the retention coefficient of the OPMN-P cathode membrane for potassium ions with increasing pressure shows its increase by 20–30%, which is probably caused by an increase in the water permeability rate, which causes permeate dilution. In the case of analysis of the retention coefficient for sulfate ions on the anode OFAM-K membrane in the region of low current densities, the retention capacity first decreases with an increase in the transmembrane pressure, and then reaches a constant value with a slight increase at a pressure of 1,5 MPa. At higher current densities, the retention coefficient for sulfate ions on the anode OFAM-K membrane with an increase in transmembrane pressure, as well as on the OPMN-P cathode membrane, for potassium ions increases. The time dependences of the specific output flux are given at transmembrane pressures of 0,75, 1, and 1,5 MPa and current densities of 12,82 and 15,38 A/m². It is noted that the specific output flux increases on the near-anode OFAM-K membrane, while on the near-cathode membrane OPMN-P it decreases with time, which is due to the transformation of the physical properties of the membranes and boundary layers formed on their working surface. On the near-anode OFAM-K membrane, water permeability increases with time, and on the near-cathode membrane OPMN-P it decreases. The presented data on the desorption of potassium ions and sulfate ions on the near-anode membrane OFAM-K and near-cathode membrane OPMN-P indicate that the desorption of ions decreases with time, and the desorption index of potassium ions on the near-anode OFAM-K membrane is higher, although in the process Electronanofiltration ions are transferred in equivalent ratios.

Keywords: electron nanofiltration, membrane, retention coefficient, solution pH, ions.

Для цитирования

Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Луа П., Полянский К.К. Исследования кинетических и сорбционных характеристик мембран ОФАМ-К и ОПМН-П в процессе электронанофильтрационного разделения водного раствора сульфата калия // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 24–32. doi:10.20914/2310-1202-2023-1-24-32

For citation

Konovalov D.N., Lazarev S.I., Lua P., Polyansky K.K. Studies of the kinetic and sorption characteristics of OFAM-K and OPMN-P membranes in the process of electron-nanofiltration separation of an aqueous solution of potassium sulfate. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 24–32. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-1-24-32

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

Введение

В настоящее время, образующиеся технологические растворы на промышленных предприятиях химического, нефтехимического, машиностроительного и гальванического профиля, требуют очистки, регенерации и выделения целевых компонентов (катионов металлов, газов (кислород, водород и хлор)). Одним из актуальных методов разделения растворов, в настоящее время, является электрохимический мембранный метод, который используется с применением нанопермативных мембран, а в некоторых работах такой метод называется – электронанопермацией.

Остановимся подробно на некоторых традиционных мембранных методах разделения растворов и проведем краткий анализ современных публикаций.

Авторами работы [1] проведены экспериментальные исследования модифицированных гидроксидом хрома биполярных мембран МБ-2, показавшие при электродиализе более высокие концентрации кислоты и щелочи по сравнению с мембранами МБ-3 и Fumasep FBM. Получены вольт-амперные характеристики и изменение концентрации кислоты с ростом плотности тока исследуемых мембран, указывающие на высокую эффективность электродиализной очистки раствора Na_2SO_4 .

В статье [2] представлены данные по электрохимическим и кинетическим характеристикам при исследовании электромембранного процесса с перфторированными сульфокатионитовыми мембранами марки МФ-4СК с варьирующейся удельной влагоемкостью и различной концентрацией раствора NaCl . Отмечается, что эффективность использования в электромембранных процессах модифицированных ионообменных мембран доказана результатами измерений их транспортных характеристик.

В статье [3] получены новые композиционные материалы на основе катионообменной мембраны МК-40, модифицированной тонким слоем мембраны МФ-4СК с допированной 2 и 5% оксидом церия. Транспортные характеристики модифицированной мембраны при этом возрастают в ряду $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{H}^+$.

В работе [4] проведены исследования электрохимических характеристик ионообменных мембран, являющихся важнейшими кинетическими характеристиками, получаемыми в результате измерений электрического сопротивления. Зависимости электросопротивления и удельной электропроводности от числа и частоты переменного тока исследуемых катионообменной МК-40 и анионообменной МА-41 мембран соответственно указывают на возможность расчета энергосодержания при математическом моделировании

электродиализа раствора NaCl с чередующимися катионообменными и анионообменными мембранами.

В работе [5] приведены электродиализные исследования механизма массопереноса амфолитов с применением модифицированной 0,02 М раствором NaH_2PO_4 анионообменной мембраны АХ. Разработанная методика позволяет определять парциальные токи и числа переноса через анионообменную мембрану. Полученные суммарные и парциальные вольт-амперные характеристики исследуемой мембраны при электродиализе раствора NaCl обуславливаются трансформацией в мембране однозарядных анионов H_2PO_4^- сначала в двухзарядные HPO_4^{2-} , а затем в трехзарядные PO_4^{3-} .

В источнике [6] установлено влияние природы минеральных примесей на эффективность их извлечения из растворов гетероциклической аминокислоты – пролина (Pro), а также на потери продукта в процессе электромембранного обессоливания (электродиализа). Изучен массоперенос пролина через гетерогенные ионообменные мембраны при электродиализе его индивидуального водного раствора. Авторами отмечается, что для эффективного разделения гетероциклической аминокислоты и минеральной соли методом электродиализа необходим учет влияния природы ионов минеральной соли, их гидратации, подвижности в фазе ионообменной мембраны и растворе.

В работе [7] исследованы транспортные характеристики и особенности переноса компонентов разной природы при разделении водно-солевых растворов фенилаланина электродиализом в гальваностатическом режиме с расположенными горизонтально семью секциями электролизатора через экспериментальные мембраны. Указано, что на транспортные характеристики ионов аминокислоты и минеральной соли, а также качество разделения и величины деминерализации растворов оказывает значительный эффект содержание ионообменника в мембране.

В литературе [8] исследован процесс деминерализации растворов алкилароматической аминокислоты и хлорида натрия методами электродиализа и электродеонизации. Установлено, что большие значения степени обессоливания достигаются при использовании турбулентного режима течения жидкости, но потери целевого продукта при этом увеличиваются.

Работа [9] посвящена ресурсосбережению и решению экологических проблем при водоподготовке в условиях гальванического производства (линии никелирования). Авторами с использованием разработанной программы показано, что на уменьшение расхода технической воды гальванических производств влияют противоточные промывки вместе с такими

методами очистки, как механическая фильтрация, электродиализ с использованием анионообменной и катионообменной мембран Ralex AM(H)–PP, Ralex CM(H)–PP), а также ионообменные колонны с катионитами и анионитами Purolite C150, Purolite A100Plus. Приведены оптимальные режимы электродиализа в производственных условиях гальванического цеха.

В работе [10] приведено, что с ростом плотности тока в процессе электродиализного разделения раствора нитрата аммония потоки ионов соли проходят через максимум при предельном токе. С ростом плотности тока выше запредельного значения поток ионов аммония уменьшается. На уменьшение потока нитрат-ионов в «сверхпредельных токовых режимах» оказывает влияние меняющийся состав и каталитическая активность функциональных групп анионообменной мембраны в отношении к процессу диссоциации молекул воды.

Авторами работы [11] представлены результаты исследований ионообменных и мембранных методов как комплексных методов очистки природных подземных вод с повышенным содержанием катионов металлов (железо, кальций, магний). Изучена селективность и проницаемость нанофильтрационных мембран при очистке модельных растворов и реальных вод, показано влияние соединений железа в исходной воде. Установлено заметное снижение проницаемости мембраны при очистке железосодержащих подземных вод. Представлены рекомендации по использованию ионного обмена и нанофильтрации в качестве комплексных методов очистки природных подземных вод.

Авторами работы [12] исследовано влияние расхода ретентата на формирование потоков воды и хлоридов натрия, магния и кальция при их переносе через нанофильтрационную мембрану Vontron VNF. Установлен рост задерживающей

способности мембраны с повышением расхода ретентата, при этом трансмембранный перенос компонентов раствора в мембране Vontron VNF не останавливается даже при рабочем давлении ниже осмотического, что является перспективным результатом при повышении качества энергосберегающего разделения и выделения солей разновалентных металлов.

Проведенный литературный анализ по всестороннему исследованию процессов электрохимического мембранного разделения растворов не выявил систематических данных по влиянию отдельных компонентов (ионов) на кинетические и электрохимические характеристики подобных систем.

Поэтому целью настоящей работы стало изучение влияния трансмембранного давления и плотности тока на кинетические и сорбционные характеристики мембран OFAM-K и OPMN-P в процессе электронанофильтрационного разделения водного раствора сульфата калия, применяемого в производстве минеральных удобрений.

Материалы и методы

Исследования влияния трансмембранного давления и плотности тока на изменение электрохимических и кинетических характеристик выполнялись на экспериментальной установке, представленной в статьях [13–16]. Для оценки погрешности данных, полученных при нанофильтрации исследуемого раствора, экспериментальные исследования повторяли 10 раз при варьировании трансмембранного давления и плотности тока. В результате статистической обработки полученных данных относительное стандартное отклонение не превышало 0,1.

Паспортные характеристики исследуемых нанофильтрационных мембран марки OFAM-K и OPMN-P приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Паспортные характеристики нанофильтрационных мембран марки OFAM-K и OPMN-P [17].

Table 1.

Passport characteristics of OFAM-K and OPMN-P nanofiltration membranes [17].

Марка мембраны Brand membranes	Рабочие характеристики мембран Membrane performance				
	Рабочее давление, МПа Working pressure, MPa	Минимальная производительность по воде, при T = 298 K, м ³ /м ² ×с Minimum performance by water, at T = 298 K, m ³ /m ² ×s	Коэффициент задержания по 0,15% NaCl, не менее Coefficient detentions 0,15% NaCl, at least	Рабочий диапазон pH Operating pH range	Максимальная температура, K Maximum temperature, K
ОФАМ-К OFAM-K	3,0	$2,22 \times 10^{-5}$	0,95	2–12	323
ОПМН-П OPMN-P	1,6	$2,77 \times 10^{-5}$	0,55		

Мембраны марки OFAM-K имеет активный слой из м-фенилендиамина и изофталево́й кислоты. В качестве пористой подложки используется полипропилен или тканый лавсан. Мембрана марки OPMN-P имеет селективный слой из полиамида. В качестве пористой подложки используется нетканый полипропилен.

Выбор плотностей тока (12,82 А/м² и 15,38 А/м²) обусловлен тем, что пористые полимерные мембраны являются слабо ионизированными и достаточно высокоэффективны при разделении растворов с малыми плотностями тока. Верхняя граница выбрана на основании теоретических и предварительных экспери-

ментальных исследований. При большем значении плотности тока происходит деградация активного слоя полимерной мембраны, что снижает производительность и качество разделения. При плотности тока меньше нижнего значения влияние электрического напряжения на процесс электро-нанофильтрации незначительно, в связи с чем основной движущей силой процесса разделения является трансмембранное давление.

Основной кинетической характеристикой электрохимического нанофильтрационного процесса является удельный выходной поток, который определялся по ниже приведенной зависимости [18–20]:

$$J = \frac{V}{F_m \cdot \tau}, \quad (1)$$

где V – объем полученного пермеата на нанофильтрационной мембране, м^3 ; F_m – рабочая площадь нанофильтрационной мембраны, м^2 ; τ – время выполнения экспериментальных исследований, с.

Значение коэффициента задержания, полученного в процессе электронанофильтрационного разделения, определяется по формуле:

$$R = 1 - \frac{c_{\text{пер}}}{c}, \quad (2)$$

где c , $c_{\text{пер}}$ – концентрация ионов в разделяемом растворе и пермеате.

Концентрацию ионов определяли следующим образом. Исследуемую пробу осветляли на фильтре с рейтингом пор 1 мкм, для избегания попадания механических частиц в прибор, разбавляли в 10 раз деионизованной водой марки Е 1.1 по ASTM D-5127–13. Раствор наливали в кювету, вместительностью 50 мл, которую помещали в ионообменный хроматограф. Исследуемый раствор шприцевым насосом подавался

в анализаторную ячейку. На выходе получали концентрацию одного из компонентов исследуемой пробы. Для определения второго компонента, определяли pH исследуемого раствора, по которому в последствии рассчитывали концентрацию, сопоставляя табличные значения зависимости концентрации раствора от pH.

Массу десорбированного вещества из прикадодных и прианодных мембран определяли по следующему выражению:

$$M = c_d \cdot V, \quad (3)$$

где c_d – концентрация десорбированного вещества в растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объем раствора, м^3 .

Десорбцию ионов из фазы мембраны производили следующим образом. Заранее подготавливали 4 емкости объемом по 0,5 л. для каждой исследуемой мембраны с бидистиллированной водой. Отработанную мембрану после электронанофильтрационного разделения раствора сульфата калия погружали в емкость и выдерживали в течение 24 часов. По истечении этого времени исследуемую мембрану извлекали и помещали во вторую емкость на тоже время и так далее до четвертой, после чего в растворе каждой емкости определяли концентрацию десорбированного вещества из прикатодной ОПМН-П и прианодной ОФАМ-К мембран по методике, описанной выше.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены зависимости коэффициента задержания от трансмембранного давления с постоянной плотностью тока при электронанофильтрационном разделении модельного раствора сульфата калия на прианодной мембране ОФАМ-К по сульфат-ионам и прикатодной мембране ОПМН-П по ионам калия.

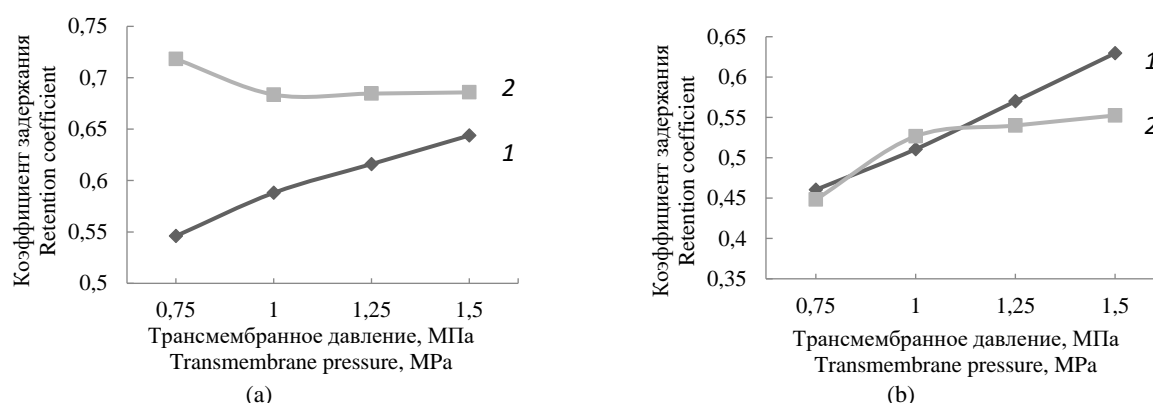


Рисунок 1. Зависимости коэффициента задержания от трансмембранного давления с постоянной плотностью тока $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (а) и $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (б) при электронанофильтрационном разделении модельного раствора сульфата калия на прианодной мембране ОФАМ-К по сульфат-ионам (2) и прикатодной мембране ОПМН-П по ионам калия (1)

Figure 1. Dependences of the retention coefficient on the transmembrane pressure with a constant current density $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (a) and $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (b) in the electron nanofiltration separation of a model solution of potassium sulfate on the anode OFAM-K membrane by sulfate ions (2) and cathode membrane OPMN-P for potassium ions (1)

Анализ коэффициента задержания прикатодной мембраной ОПМН-П по ионам калия с увеличением трансмембранного давления показывает о его возрастании на 20–30%, что, вероятно, вызвано повышением скорости проницаемости воды с ростом движущей силы процесса, приводящей к разведению пермеата, то есть к снижению в нем концентрации иона калия. В случае анализа коэффициента задержания по сульфат-ионам на прианодной мембране ОФАМ-К в области низких плотностей тока сначала задерживающая способность с повышением трансмембранного давления падает, а затем выходит на постоянное значение с небольшим повышением при трансмембранном давлении 1,5 МПа. При более высоком значении плотности

тока ($15,38 \text{ A/m}^2$) коэффициент задержания по сульфат-ионам на прианодной мембране ОФАМ-К с повышением трансмембранного давления, как и на прикатодной мембране ОПМН-П по ионам калия возрастает, что подтверждает эффективность применения процесса электронанофильтрации в области повышенных значений трансмембранного давления.

На рисунках 2 и 3 показаны данные по удельному выходному потоку в виде зависимостей от времени проведения эксперимента при варьировании трансмембранного давления с постоянной плотностью тока при электронанофильтрационном разделении модельного раствора сульфата калия на прианодной мембране ОФАМ-К и прикатодной мембране ОПМН-П.

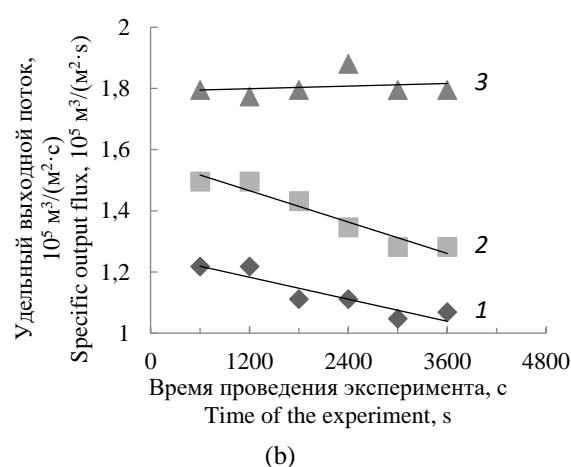
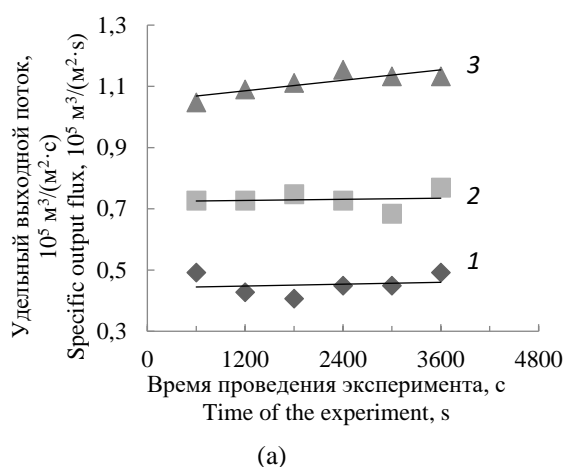


Рисунок 2. Зависимости удельного выходного потока от времени проведения эксперимента с постоянной плотностью тока $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ при электронанофильтрационном разделении модельного раствора сульфата калия на прианодной мембране ОФАМ-К (а) и прикатодной мембране ОПМН-П (б) при варьировании трансмембранного давления: 1 – 0,75 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 1,5 МПа

Figure 2. Dependences of the specific output flux on the time of the experiment with a constant current density $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ during the electron nanofiltration separation of a model solution of potassium sulfate on the OFAM-K anode membrane (a) and the OPMN-P cathode membrane (b) with varying transmembrane pressure: 1 – 0,75 MPa; 2 – 1 MPa; 3 – 1,5 MPa

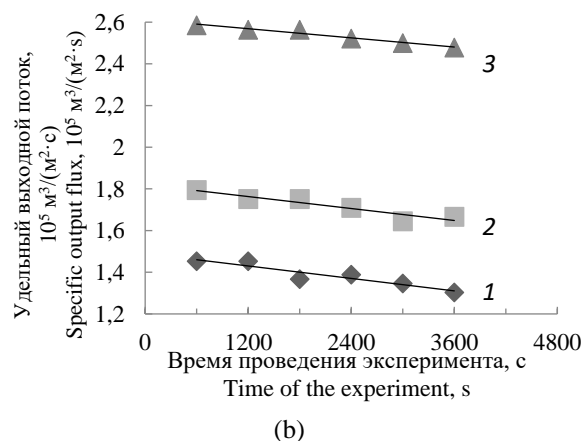
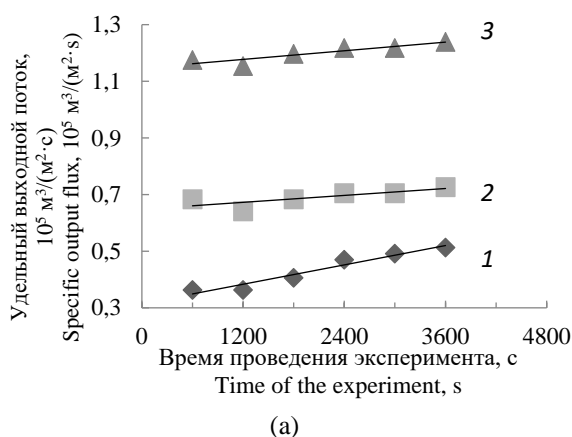


Рисунок 3. Зависимости удельного выходного потока от времени проведения эксперимента с постоянной плотностью тока $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ при электронанофильтрационном разделении модельного раствора сульфата калия на прианодной мембране ОФАМ-К (а) и прикатодной мембране ОПМН-П (б) при варьировании трансмембранного давления: 1 – 0,75 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 1,5 МПа

Figure 3. Dependences of the specific output flux on the time of the experiment with a constant current density $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ during the electron nanofiltration separation of a model solution of potassium sulfate on the OFAM-K anode membrane (a) and the OPMN-P cathode membrane (b) with varying transmembrane pressure: 1 – 0,75 MPa; 2 – 1 MPa; 3 – 1,5 MPa

Зависимости удельного выходного потока от времени приведены при трансмембранном давлении 0,75, 1 и 1,5 МПа и плотности тока 12,82 и 15,38 А/м². Отмечено, что на прианодной мембране ОФАМ-К удельный выходной поток возрастает, а на прикатодной мембране ОПМН-П снижается с течением времени, что обусловлено трансформацией физических свойств мембран и пограничных слоев, формируемых на их рабочей поверхности. На прианодной мембране ОФАМ-К с течением времени проницаемость по воде возрастает, а на прикатодной мембране ОПМН-П снижается. На удельный выходной поток (рисунок 2 и 3) для прианодных и прикатодных мембран электронанофильтрационного процесса также, вероятно, влияет электропроводность мембранной системы.

На рисунке 4 представлены результаты десорбции прианодной мембраны ОФАМ-К по сульфат-ионам и прикатодной мембраны ОПМН-П по ионам калия.

Представленные данные по десорбции ионов калия и сульфат-ионов на прианодной мембране ОФАМ-К и прикатодной мембране ОПМН-П свидетельствуют о том, что с течением времени десорбция ионов снижается, причем показатель десорбции ионов калия на прианодной мембране ОФАМ-К выше, хотя в процессе электронанофильтрации ионы переносятся в эквивалентных отношениях.

На рисунке 5 представлены зависимости величины pH от трансмембранного давления на прианодной мембране ОФАМ-К и прикатодной мембране ОПМН-П.

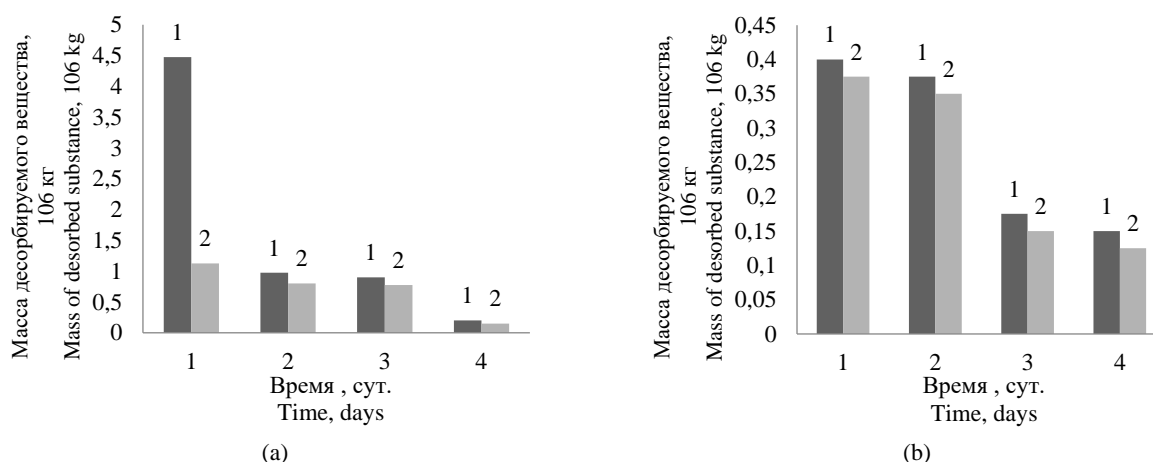


Рисунок 4. Результаты десорбции прианодной мембраны ОФАМ-К по сульфат-ионам (2) и прикатодной мембраны ОПМН-П по ионам калия (1) после электронанофильтрационного разделения при плотности тока $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (a) и $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (b)

Figure 4. Results of desorption of the anode membrane OFAM-K by sulfate ions (2) and the cathode membrane OPMN-P by potassium ions (1) after electron-nanofiltration separation at current density $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (a) and $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (b)

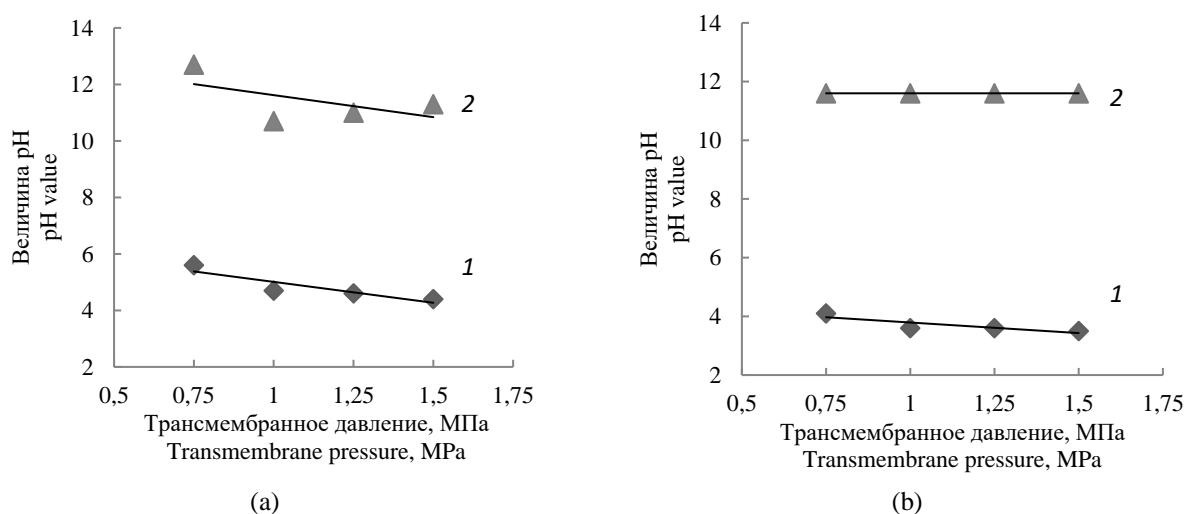


Рисунок 5. Зависимости величины pH от трансмембранного давления на прианодной мембране ОФАМ-К (1) и прикатодной мембране ОПМН-П (2) при плотности тока $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (a) и $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (b)

Figure 5. Dependences of the pH value on the transmembrane pressure on the anode membrane OFAM-K (1) and the cathode membrane OPMN-P (2) at current density $i = 12,82 \text{ A/m}^2$ (a) and $i = 15,38 \text{ A/m}^2$ (b)

Как видно из кривых изменения рН, с повышением трансмембранного давления рН на прианодной мембране уменьшается, то есть пермеат при трансмембранном давлении 1,5 МПа становится более кислым, чем при давлении 0,75 МПа. На прикатодной мембране ОПМН-П щелочной пермеат с повышением трансмембранного давления уменьшается ближе к нейтральной среде. С повышением плотности тока наклон кривых рН пермеата изменяется, так при плотности тока 15,38 А/м² кривая рН более пологая.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований по электронанофильтрационному разделению водного раствора, содержащего сульфат калия можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент задержания с повышением трансмембранного давления на прианодной мембране ОФАМ-К и прикатодной мембране ОПМН-П возрастает, это, вероятно, вызвано увеличением скорости проникновения воды в большей степени чем иона, что приводит к разведению пермеата, а значит к снижению в нем концентрации иона.

2. Удельный выходной поток с повышением времени проведения экспериментальных исследований на прианодной мембране ОФАМ-К возрастает, на прикатодной мембране ОПМН-П снижается, вероятно, подкисление раствора благоприятнее сказывается на работу нанофильтрационных мембран, где интенсивнее происходит разрушение пограничных слоев, чем в щелочной среде. С повышением трансмембранного давления удельный выходной поток возрастает, что объясняется ростом скорости проникновения растворителя в тракт пермеата.

3. Данные по десорбции показывают, что с течением времени десорбция вещества снижается, это объясняется снижением содержания вещества в сорбированной мембране. Кривые рН раствора показывают, что с повышением трансмембранного давления рН на прианодной мембране ОФАМ-К уменьшается, то есть пермеат при трансмембранном давлении 1,5 МПа становится более кислым, чем при давлении 0,75 МПа. На прикатодной мембране ОПМН-П щелочной пермеат с повышением трансмембранного давления стремится ближе к нейтральной среде.

Литература

- 1 Козадрова 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.
- 2 Кононенко Н.А., Демина О.А., Лоза 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.
- 3 Юрова П.А., Стенина И.А., Ярославцев А.Б. Влияние на транспортные свойства катионообменных мембран МК-40 модификации перфторсульфополимером и оксидом церия // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 6. С. 568–573.
- 4 Шапошник В.А., Анисимова Н.О., Коровкина А.С. Электропроводность многослойных монополярных ионообменных мембран // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 3. С. 346–351.
- 5 Цыгурина К.А., Рыбалкина О.А., Мельникова Е.Д., Письменская Н.Д. Суммарные и парциальные вольтамперные характеристики анионообменных мембран в растворах NaCl и NaH₂PO₄ // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 4. С. 585–595.
- 6 Козадрова О.А., Нифталиев С.И., Ким К.Б. Перенос ионов при электродиализе нитрата аммония // Электрохимия. 2018. Т. 54. № 4. С. 416–422.
- 7 Харина А.Ю., Елисеев С.Я. Деминерализация раствора фенилаланина электромембранными методами // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 1. С. 126–132.
- 8 Елисеева Т.В., Харина А.Ю., Черникова Е.Н., Чарушина О.Е. Деминерализация растворов гетероциклической аминокислоты электромембранным методом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 492–497.
- 9 Мавлетов М.Н., Яруллин А.З., Березин Н.Б., Межевич Ж.В. Локальная очистка сточных вод гальванических производств комбинированным способом с использованием электродиализной установки и ионообменных колонн // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 6. С. 63–66.
- 10 Васильева В.И., Сауд А.М., Акберова Э.М. Разделение водно-солевых растворов фенилаланина электродиализом при использовании мембран с разной массовой долей сульфокатионообменной смолы // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 498–509.
- 11 Чигаев И.Г., Комарова Л.Ф. Исследование нанофильтрации и ионного обмена как комплексных методов очистки природных подземных вод // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 4. С. 99–102.
- 12 Винницкий В.А., Чугунов А.С., Ершов М.В. Влияние расхода ретентата на мембранное разделение бинарных растворов хлоридов натрия, магния и кальция // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 10. С. 46–55.
- 13 Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Ковалева О.А. Анализ кинетических характеристик баромембранного и электробаромембранного разделения раствора нитрата аммония // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63. № 9. С. 28–36.
- 14 Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Рыжкин В.Ю., Ковалев С.В. и др. Проектирование и расчет электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа для разделения промышленных растворов с равной площадью прикатодных и прианодных мембран // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. № 5. С. 10–13.

15 Абоносимов О.А. Исследование гидродинамической проницаемости обратноосмотических мембран в растворах солей тяжелых металлов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2016. Т. 1. № 59. С. 187–191.

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

17 Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. URL: www.vladipor.ru/catalog/show

18 Dytnersky Y.I., Volcheck K.A., Polyanskaya N.B. Separation of multicomponent solutions using reagent ultrafiltration // Desalination. 1991. V. 81. № 1–3. pp. 273–279.

19 Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. М.: ДеЛи принт, 2007. 208 с.

20 Луа П., Лазарев С.И., Ковалева О.А., Ковалев С.В. Электрохимические и кинетические характеристики процесса электромембранного разделения раствора сульфата калия // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. № 8. С. 107–114.

References

1 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).

2 Kononenko N.A., Demina O.A., Loza 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. (in Russian).

3 Yurova P.A., Stenina I.A., Yaroslavl'tsev A.B. Effect on the transport properties of MK 40 cation exchange membranes modified with perfluorosulfopolymer and cerium oxide. Electrochemistry. 2020. vol. 56. no. 6. pp. 568-573. (in Russian).

4 Shaposhnik V.A., Anisimova N.O., Korovkina A.S. Electrical conductivity of multilayer monopolar ion-exchange membranes. Sorption and chromatographic processes. 2018. vol. 18. no. 3. pp. 346-351. (in Russian).

5 Tsygurina K.A., Rybalkina O.A., Melnikova E.D., Pishevskaya N.D. Total and partial voltage characteristics of anion-exchange membranes in solutions of NaCl and NaH₂ PO₄. Condensed media and interphase boundaries. 2017. vol. 19. no. 4. pp. 585-595. (in Russian).

6 Kozaderova O.A., Niftaliev S.I., Kim K.B. Ion transfer during ammonium nitrate electrodialysis. Electrochemistry. 2018. vol. 54. no. 4. pp. 416-422. (in Russian).

7 Kharina A.Yu., Eliseev S.Ya. Demineralization of phenylalanine solution by electromembrane methods. Condensed media and interphase boundaries. 2017. vol. 19. no. 1. pp. 126-132. (in Russian).

8 Eliseeva T.V., Kharina A.Yu., Chernikova E.N., Charushina O.E. Demineralization of heterocyclic amino acid solutions by the electromembrane method. Sorption and chromatographic processes. 2021. vol. 21. no. 4. pp. 492-497. (in Russian).

9 Mavletov M.N., Yarullin A.Z., Berezin N.B., Mezhevich Zh.V. Local wastewater treatment of electroplating plants by a combined method using an electrodialysis unit and ion exchange columns. Bulletin of the Technological University. 2019. vol. 22. no. 6. pp. 63-66. (in Russian).

10 Vasilyeva V.I., Saud A.M., Akberova E.M. Separation of water-salt solutions of phenylalanine by electrodialysis using membranes with different mass fraction of sulfocation exchange resin. Sorption and chromatographic processes. 2021. vol. 21. no. 4. pp. 498-509. (in Russian).

11 Chigaev I.G., Komarova L.F. Investigation of nanofiltration and ion exchange as complex methods of natural groundwater purification. Bulletin of the Technological University. 2019. vol. 22. no. 4. pp. 99-102. (in Russian).

12 Vinnitskiy V.A., Chugunov A.S., Ershov M.V. Effect of retentate consumption on membrane separation of binary solutions of sodium, magnesium and calcium chlorides. News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2021. vol. 64. no. 10. pp. 46-55. (in Russian).

13 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kovaleva O.A. Analysis of kinetic characteristics of baromembrane and electrobaromembrane separation of ammonium nitrate solution. Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. 2020. vol. 63. no. 9. pp. 28-36. (in Russian).

14 Konovalov D.N., Lazarev S.I., Ryzhkin V.Yu., Kovalev S.V. et al. Design and calculation of an electrobaromembrane apparatus of a flat-chamber type for separation of industrial solutions with an equal area of near-cathode and near-anode membranes. Chemical and oil and gas engineering. 2021. no. 5. pp. 10-13. (in Russian).

15 Abonosimov O.A. Investigation of hydrodynamic permeability of reverse osmotic membranes in solutions of heavy metal salts. Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University. 2016. vol. 1. no. 59. pp. 187-191. (in Russian).

16 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Lua P. Electrochemical and transport characteristics of membrane systems during electron-filtration separation of solutions containing ammonium nitrate and potassium sulfate. Electrochemistry. 2021. vol. 57. no. 6. pp. 355-376. (in Russian).

17 Vladipor: website of CJSC STC Vladipor. Available at: www.vladipor.ru/catalog/show (in Russian).

18 Dytnersky Y.I., Volcheck K.A., Polyanskaya N.B. Separation of multicomponent solutions using reagent ultrafiltration. Desalination. 1991. vol. 81. no. 1-3. pp. 273-279.

19 Swittsov A.A. Introduction to membrane technology. Moscow, Delhi Print, 2007. 208 p. (in Russian).

20 Lua P., Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Kovalev S.V. Electrochemical and kinetic characteristics of the process of electromembrane separation of potassium sulfate solution. Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. 2021. vol. 64. no. 8. pp. 107-114. (in Russian).

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., зав. 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>

Луа Пепе аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, alploua@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

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

 <https://orcid.org/>

Вклад авторов

Дмитрий Н. Коновалов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты, написал рукопись

Сергей И. Лазарев консультация в ходе исследования, обзор литературных источников по исследуемой проблеме, написал рукопись

Луа Пепе провёл эксперимент


Константин К. Полянский корректировал рукопись до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Dmitry N. Kononov 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>

Pepe Lua graduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, alploua@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

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

 <https://orcid.org/>

Contribution

Dmitry N. Kononov review of literary sources on the problem under study, conducted an experiment, performed calculations, wrote a manuscript

Sergey I. Lazarev consultation during the study, review of literary sources on the problem under study, wrote the manuscript

Pepe Lua conducted an experiment

Konstantin K. Polyansky corrected manuscript before submission to the editor and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/01/2023	После редакции 03/02/2023	Принята в печать 22/02/2023
Received 13/01/2023	Accepted in revised 03/02/2023	Accepted 22/02/2023