



## Исследование эффективности электромембранного разделения технологических растворов очистных сооружений ООО «РКС–Тамбов»

Олег А. Абоносимов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:abontam@inbox.ru">abontam@inbox.ru</a>	 0000-0002-51057782
Сергей И. Лазарев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru">sergey.lazarev.1962@mail.ru</a>	 0000-0003-07465161
Марина А. Хребтова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:hrebtowa@icloud.com">hrebtowa@icloud.com</a>	
Константин К. Полянский	<sup>2</sup>	<a href="mailto:kaf-kit@vfreu.ru">kaf-kit@vfreu.ru</a>	
Сергей И. Котенев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kotenev.igor@yandex.ru">kotenev.igor@yandex.ru</a>	
Дмитрий С. Лазарев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru">sergey.lazarev.1962@mail.ru</a>	



<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия

<sup>2</sup> Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия

**Аннотация.** Совершенствование процессов очистки отходов производства связано с решением экологических задач, предполагающих экономию потребляемых ресурсов окружающей среды и сокращение объема отходов, размещаемых в ней. И то и другое достигается за счёт внедрения малоотходных технологий с возможностью извлечения ценных компонентов и использования очищенных вод в оборотном цикле, среди которых электро-мембранные технологии занимают достойное место. В работе рассмотрена возможность применения электромембранного разделения при очистке технологических растворов очистных сооружений ООО «РКС–Тамбов». В целях изучения влияния параметров проведения процесса разделения на основные кинетические характеристики проведены экспериментальные исследования удельной производительности и коэффициента задержания мембран МГА-95 и ОПМН-П при разделении технологических растворов от фосфат-ионов  $PO_4^{3-}$ . Предложены к использованию критериальные зависимости расчета удельной производительности и коэффициента задержания при электромембранном разделении технологических растворов, содержащих фосфат-ионы. Проведен расчет экономической эффективности технологической схемы очистки сточных вод ООО «РКС–Тамбов» с использованием электромембранного аппарата и оценена ее рентабельность. Индекс доходности составит 1,703, то есть больше 1, что считается рентабельным бизнесом. Высокий показатель и рентабельности продукции. Срок окупаемости проекта составляет 2 года, что следует признать хорошим показателем, то есть через 2 года вложенные в проект денежные ресурсы вернутся в хозяйственный оборот. Рассчитанный срок окупаемости предположительно может быть уменьшен, так как цена концентрата нами не проиндексирована на величину инфляции.

**Ключевые слова:** технологические растворы, мембрана, коэффициент задержания, удельная производительность, электромембранный аппарат.

## Study of the efficiency of electromembrane separation of technological solutions of treatment facilities of RKS-Tambov

Oleg N. Abonosimov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:abontam@inbox.ru">abontam@inbox.ru</a>	 0000-0002-51057782
Sergey I. Lazarev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru">sergey.lazarev.1962@mail.ru</a>	 0000-0003-07465161
Marina A. Hrebtova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:hrebtowa@icloud.com">hrebtowa@icloud.com</a>	
Konstantin K. Polyansky	<sup>2</sup>	<a href="mailto:kaf-kit@vfreu.ru">kaf-kit@vfreu.ru</a>	
Sergey I. Kotenev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kotenev.igor@yandex.ru">kotenev.igor@yandex.ru</a>	
Dmitriy S. Lazarev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru">sergey.lazarev.1962@mail.ru</a>	

<sup>1</sup> Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia

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

**Abstract.** Improving industrial waste treatment processes is associated with solving environmental problems that involve saving consumed environmental resources and reducing the volume of waste disposed of in it. Both are achieved through the introduction of low-waste technologies with the ability to extract valuable components and use purified water in the recycling cycle, among which electro-membrane technologies occupy a worthy place. The paper considers the possibility of using electromembrane separation in the treatment of technological solutions of treatment facilities of RKS-Tambov. In order to study the influence of the parameters of the separation process on the main kinetic characteristics, experimental studies of the specific productivity and retention coefficient of MGA-95 and OPMN-P membranes were carried out during the separation of technological solutions from  $PO_4^{3-}$  phosphate ions. Criteria-based dependences for calculating the specific productivity and retention coefficient in the electromembrane separation of process solutions containing phosphate ions are proposed for use. The calculation of the economic efficiency of the technological scheme of wastewater treatment of RKS-Tambov using an electromembrane apparatus was carried out and its profitability was assessed. The profitability index will be 1.703, that is, more than 1, which is considered a profitable business. High rate and profitability of products. The payback period of the project is 2 years, which should be considered a good indicator, that is, after 2 years, the monetary resources invested in the project will return to economic circulation. The calculated payback period can presumably be reduced, since we have not indexed the price of the concentrate to inflation.

**Keywords:** process solutions, membrane, retention factor, specific productivity, electromembrane apparatus.

### Для цитирования

Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Хребтова М.А., Полянский К.К., Котенев С.И., Лазарев Д.С. Исследование эффективности электромембранного разделения технологических растворов очистных сооружений ООО «РКС–Тамбов» // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 3. С. 187–198. doi:10.20914/2310-1202-2023-3-187-198

### For citation

Abonosimov O.N., Lazarev S.I., Hrebtova M.A., Polyansky K.K., Kotenev S.I., Lazarev D.S. Study of the efficiency of electromembrane separation of technological solutions of treatment facilities of RKS-Tambov. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 3. pp. 187–198. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-3-187-198

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

## Введение

Совершенствование процессов очистки отходов производства связано с решением экологических задач, предполагающих экономию потребляемых ресурсов окружающей среды и сокращение объема отходов, размещаемых в ней [1–3]. И то и другое достигается за счёт внедрения малоотходных технологий с возможностью извлечения ценных компонентов и использования очищенных вод в оборотном цикле, среди которых электромембранные технологии занимают достойное место [4–6].

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

В статье [7] представлены данные по электрохимическим и кинетическим характеристикам при исследовании электромембранного процесса с перфторированными сульфокатионитовыми мембранами марки МФ-4СК с варьирующейся удельной влагемкостью и различной концентрацией раствора NaCl. Отмечается, что эффективность использования в электромембранных процессах модифицированных ионообменных мембран доказана результатами измерений их транспортных характеристик.

В статье [8] 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 [9] проведены исследования электрохимических характеристик ионообменных мембран, являющимися 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 энергозатрат при математическом моделировании электродиализа раствора NaCl с чередующимися катионообменными и анионообменными мембранами.

В литературе [10] исследован процесс деминерализации растворов алкилароматической аминокислоты и хлорида натрия методами электродиализа и электродеионизации. Установлено, что большие значения степени обессоливания достигаются при использовании турбулентного режима течения жидкости, но потери целевого продукта при этом увеличиваются.

Работа [11] 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 [12] 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 предельного 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 [13] 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 [14] 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 электро-мембранного разделения растворов не выявил систематических данных по влиянию отдельных компонентов (ионов) на кинетические характеристики подобных систем.

**Цель работы** – исследование эффективности электро-мембранного разделения технологических растворов очистных сооружений ООО «РКС – Тамбов».

### Материалы и методы

В настоящее время в существующем положении схемы очистки сточных вод на очистных сооружениях «РКС – Тамбов» осадок с первичных отстойников и избыточный ил с вторичных отстойников не удаляется из системы в необходимом количестве. При этом происходит накопление загрязняющих веществ и большой прирост биомассы ила, что приводит к снижению эффективности работы первичных и вторичных отстойников, повышенной нагрузки на аэротенки, вторичному загрязнению сточных вод и ухудшению характеристик активного ила (загнивание, повышенный вынос, обескислороживание очищенной воды), что снижает качество очистки сточных вод.

Переработка сточных вод в предлагаемой схеме предусматривает использование электро-мембранного аппарата. Традиционная схема

очистки, не позволяет утилизировать отходы в том виде, который позволял бы их применять в дальнейшем в технологическом процессе, например, вовлекать в хозяйственный оборот очищенную воду и использовать для промышленных нужд концентрат, полученный из отходов в результате их мембранной обработки.

В таблице 1 представ усредненный состав технологических растворов очистных сооружений «РКС–Тамбов». В исследованиях использовали модельные растворы с концентрацией фосфатов в диапазоне 6,0–52,0 г/м<sup>3</sup>.

Исследования влияния трансмембранного давления и плотности тока на изменение электрохимических и кинетических характеристик выполнялись на экспериментальной установке, представленной в статьях [15–18]. Для оценки погрешности данных, полученных при электро-мембранном разделении 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 мембран марки МГА-95П и ОПМН-П приведены в таблице 2.

Таблица 1.

Состав технологических растворов

Table 1.

Composition of technological solutions

Показатель, мг/дм <sup>3</sup> Indicator, mg/	Первичный отстойник Primary sedimentation tank	Общий сброс Total discharge	ПДК для воды хозяйственно-питьевого назначения MAC for drinking and household water
Фосфаты   Phosphates	12,40	6,58	3,5
Хлориды   Chlorides	170,30	150,10	350
Сульфаты   Sulfates	65,70	85,15	500
Железо   Iron	3,15	0,54	0,3
Медь   Copper	0,015	0,005	0,1
Цинк   Zinc	0,034	0,002	0,5
Никель   Nickel	0,012	0,001	0,2
Нефтепродукты   Petroleum	2,85	0,070	0,3

Таблица 2.

Паспортные характеристики мембран марки МГА-95П и ОПМН-П [19]

Table 2.

Passport characteristics of MGA-95P and OPMN-P nanofiltration membranes [19]

Марка мембраны Membrane brand	Рабочие характеристики мембран				
	Рабочее давление, МПа Operating pressure, MPa	Минимальная производительность по воде, при T = 298 K, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·с Minimum water capacity, at T = 298 K, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·s	Коэффициент задержания по 0,15% NaCl, не менее Retention coefficient of 0.15% NaCl, not less	Рабочий диапазон pH Operating pH range	Максимальная температура, K Maximum temperature, K
МГА-95П	4,0	2,22·10 <sup>-5</sup>	0,95	2–12	323
ОПМН-П	1,6	2,77·10 <sup>-5</sup>	0,55		

Мембраны марки МГА-95П имеет активный слой из ацетата целлюлозы. В качестве пористой подложки используется полипропилен или тканый лавсан. Мембрана марки ОПМН-П имеет селективный слой из полиамида. В качестве пористой подложки используется нетканый полипропилен.

Выбор плотностей тока (5,2–22,5 А/м<sup>2</sup>) 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 экспериментальных исследо-

ваний. 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 электромембранного разделения незначительно, в связи с чем основной движущей силой процесса разделения является трансмембранное давление.

Основной кинетической характеристикой электромембранного процесса является удельный выходной поток, который определяется по ниже приведенной зависимости [16–18]:

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

где  $V$  – объем полученного пермеата на мембране, м<sup>3</sup>;  $F_m$  – рабочая площадь мембраны, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время выполнения экспериментальных исследований, с.

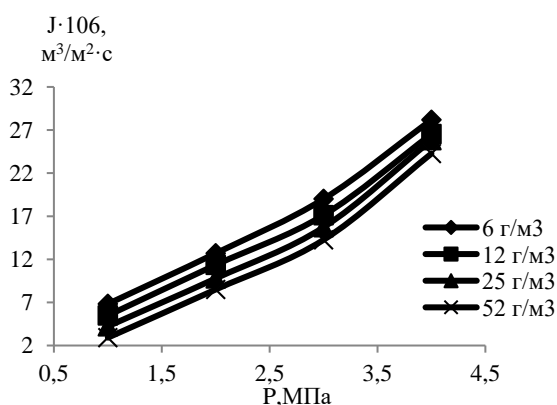
Значение коэффициента задержания, полученного в процессе электромембранного разделения, определяется по формуле:

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

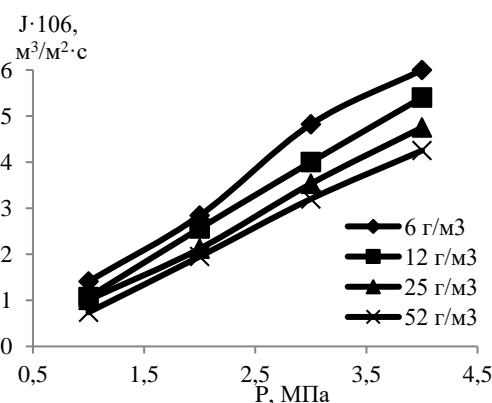
где  $c$ ,  $c_{\text{пер}}$  – концентрация ионов в разделяемом растворе и пермеате.

### Результаты и обсуждение

На рисунках 1–3 представлены зависимости удельного потока мембран МГА-95П и ОПМН-П для водного раствора фосфат – ионов от трансмембранного давления и плотности тока.



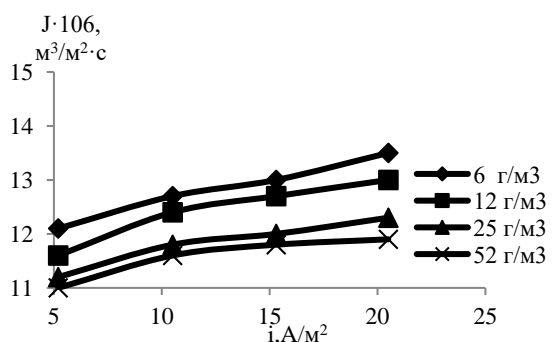
(a)



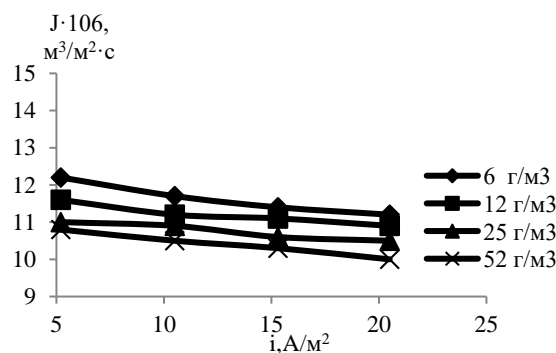
(b)

Рисунок 1. Зависимости удельного потока мембраны ОПМН-П (а) и МГА-95П (б) от трансмембранного давления с постоянной плотностью тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 1. Dependences of the specific flux of the membrane OPMN-P (a) and MGA-95P (b) on the transmembrane pressure with a constant current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations



(a)



(b)

Рисунок 2. Зависимости удельного потока мембраны ОПМН-П при катодной (а) и анодной (б) от плотности тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  с постоянным трансмембранном давлением  $P = 2,0 \text{ МПа}$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 2. Dependences of the specific flux of the OPMN-P membrane near the cathode (a) and near the anode (b) on the current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  with a constant transmembrane pressure  $P = 2.0 \text{ MPa}$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations

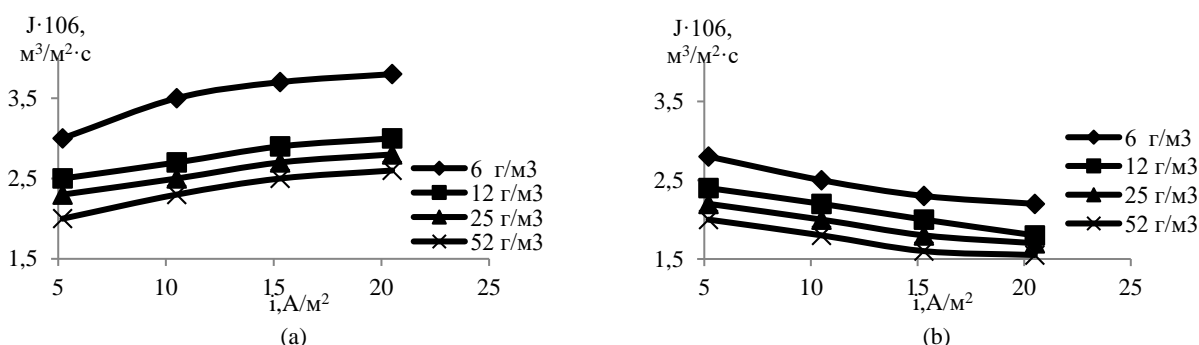


Рисунок 3. Зависимости удельного потока мембраны МГА-95П при катодной (а) и при анодной (б) от плотности тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  с постоянным трансмембранным давлением  $P = 2,0 \text{ МПа}$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 3. Dependences of the specific flux of the MGA-95P membrane near the cathode (a) and near the anode (b) on the current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  with a constant transmembrane pressure  $P = 2.0 \text{ MPa}$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations

Значения эмпирических коэффициентов увеличением давления возрастает величина проницаемости мембран, так как увеличивается эффективная движущая сила процесса [16]. Мембрана ОПМН-П имеет большую величину удельного потока по сравнению с МГА-95П, что объясняется различной пористой структурой активного слоя мембран [20]. В тех случаях, когда мембрана не изменяет своей структуры под действием давления, проницаемость воды линейно возрастает с увеличением эффективной движущей силы. Однако, при повышенных давлениях реальные полимерные мембраны не сохраняют свою первоначальную структуру и уплотняются. В связи с этим, начиная с некоторой величины рабочего давления, проницаемость снижается и при определенных давлениях достигает максимума. При дальнейшем увеличении давления проницаемость снижается [20].

Анализ зависимости удельного потока от концентрации показал, что удельный поток через исследуемые мембраны незначительно уменьшается с ростом концентрации для всех веществ. По значениям концентраций исследуемых растворов их можно отнести к разбавленным. Для таких растворов характерно незначительное влияние роста концентрации на проницаемость мембран.

Рассмотрение зависимости удельного потока растворителя от плотности тока показало неоднозначное поведение кривых для прикатодных и прианодных мембран. Данный факт можно объяснить различными величинами групп ионов различных зарядов, влияющих на перенос воды через исследуемые мембраны.

Для теоретического расчета удельного потока растворителя нами было предложено уравнение следующего вида [21]:

$$J = k \left( \Delta P - (k_1 + i^m k_2) C \right) \exp(k_3 C^n) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (3)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $n$ ,  $A$  – числовые коэффициенты,  $\Delta P$  – перепад трансмембранного давления, МПа;

$C$  – концентрация,  $\text{кг/м}^3$ ;  $T$  – температура, К;  $k$  – коэффициент водопроницаемости мембраны,  $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{МПа}$ ;  $i$  – плотность тока ( $\text{A/m}^2$ ).

В таблице 3 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.

Таблица 3.  
Значения эмпирических коэффициентов

Table 3.  
Values of empirical coefficients

Мембрана Membrane	$k_1$	$m$	$k_2$	$k_3$	$n$	$A$
МГА-95 (прианодная)   MGA 95 (anode)	-1,43	-0,39	-113,36	2,93	-0,09	9,29
МГА-95 (прикатодная)   MGA 95 (near-cathode)	-16,35	0,87	-0,52	3,98	-0,1	7,67
ОПМН-П (прианодная)   OPMN P (anode)	0,34	-0,42	-56,61	1,68	-0,13	9,72
ОПМН-П (прикатодная)   OPMN P (near-cathode)	-107,63	-0,28	252,03	1,88	-0,15	9,1

На рисунках 4–6 представлены зависимости коэффициента задержания мембран МГА-95П и ОПМН-П для водного раствора фосфат – ионов от трансмембранного давления и плотности тока.

Анализ зависимости коэффициента задержания от градиента давления показал увеличение коэффициента задержания с ростом давления. С ростом давления увеличивается усилие на активный слой мембраны, которая в результате деформации уплотняется [20, 21].

Также отмечено, что с ростом концентрации растворов для всех мембран коэффициенты задержания незначительно уменьшаются, что характерно для электромембранного разделения весьма разбавленных растворов, к которым можно отнести исследуемые растворы.

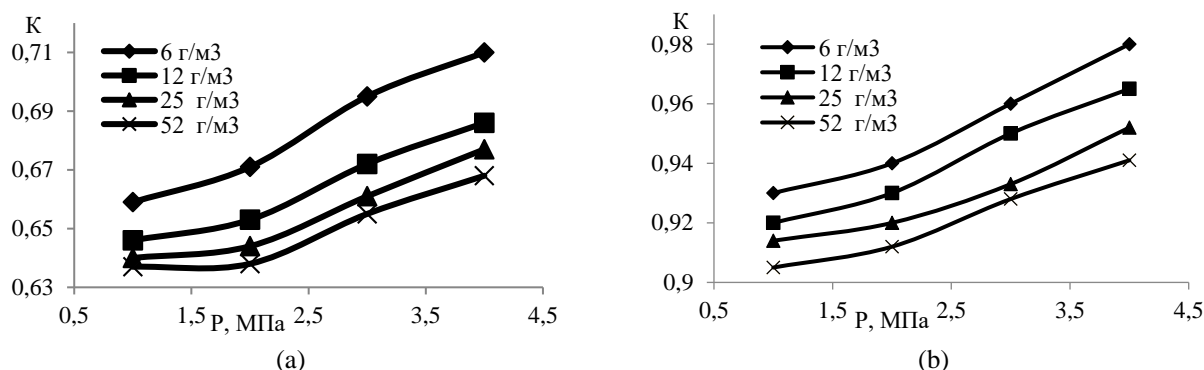


Рисунок 4. Зависимости коэффициента задержания мембраны ОПМН-П (а) и МГА-95П (б) от трансмембранного давления с постоянной плотностью тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 4. Dependences of the retention coefficient of the membrane OPMN-P (a) and MGA-95P (b) on the transmembrane pressure with a constant current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations

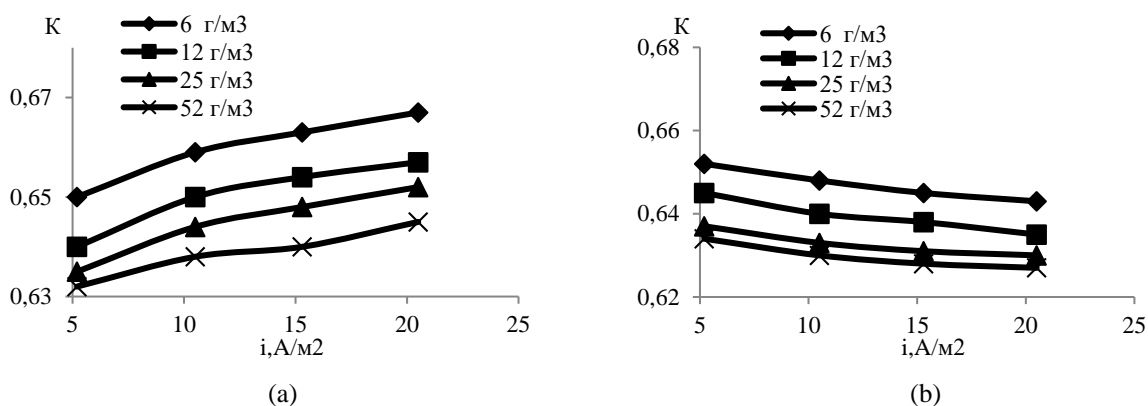


Рисунок 5. Зависимости коэффициента задержания мембраны ОПМН-П прикатодной(а) и прианодной (б) от плотности тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  с постоянным трансмембранном давлении  $P = 2,0 \text{ МПа}$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 5. Dependences of the retention coefficient of the OPMN-P membrane near the cathode (a) and near the anode (b) on the current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  with a constant transmembrane pressure  $P = 2.0 \text{ MPa}$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations

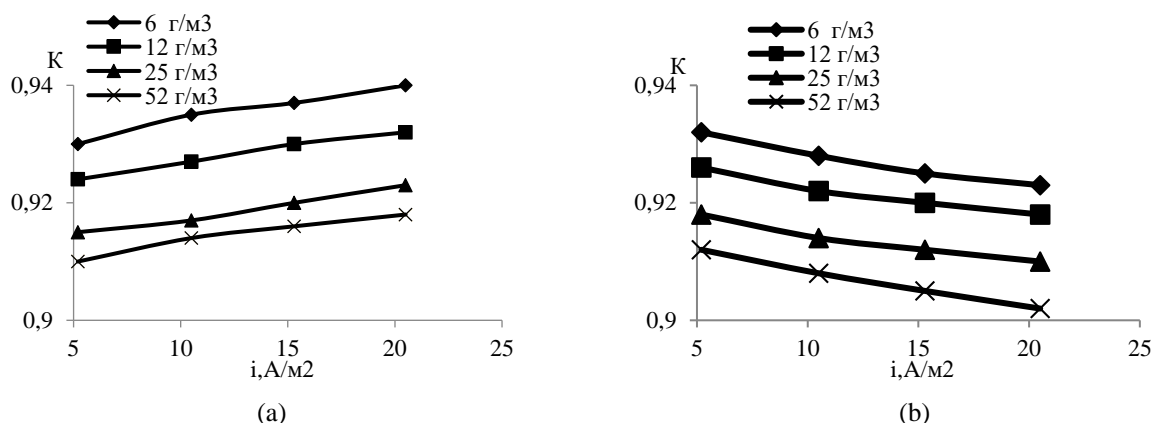


Рисунок 6. Зависимости коэффициента задержания мембраны МГА-95П прикатодной(а) и прианодной (б) от плотности тока  $i = 15,2 \text{ A/m}^2$  с постоянным трансмембранном давлении  $P = 2,0 \text{ МПа}$  при электромембранном разделении модельного раствора фосфат-ионов при различной концентрации

Figure 6. Dependences of the retention coefficient of the MGA-95P membrane near the cathode (a) and near the anode (b) on the current density  $i = 15.2 \text{ A/m}^2$  with a constant transmembrane pressure  $P = 2.0 \text{ MPa}$  during electromembrane separation of a model solution of phosphate ions at different concentrations

Коэффициент задержания также находится в линейной зависимости от плотности тока, однако отмечается различное поведение кривых коэффициента задержания для прианодных и прикатодных мембран. Данное явление вызвано «блокировкой» пор прикатодных мембран за счет отвода основной группы ионов [19,20].

Для теоретического расчета коэффициента задержания с наложением электрического тока было получено выражение следующего вида [22]:

$$K = 1 - \left[ 1 + \left( \frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \times \left[ 1 - \exp \left( - \frac{k_2 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_3 J) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – эмпирические коэффициенты;  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – выход по току;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В таблице 4 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения 4.

Таблица 4.  
Значения эмпирических коэффициентов  
для уравнения 4

Table 4.  
Values of empirical coefficients for equation 4

Мембрана	$k_1$	$k_2$	$k_3$
МГА-95 (прианодная)   MGA 95 (anode)	0,32	1,27	1,05
МГА-95 (прикатодная)   MGA 95 (near-cathode)	0,24	1,23	1,02
ОПМН-П (прианодная)   OPMN P (anode)	2,33	0,52	11,44
ОПМН-П (прикатодная)   OPMN P (near-cathode)	2,24	0,27	10,25

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение.

Для проведения оценки экономической эффективности предложенной технологической схемы очистки сточных вод ООО «РКС – Тамбов» были проведены следующие расчёты на основе данных предприятия и полученных результатов по удельному потоку и коэффициентам задержания электромембранных процессов в производстве разделения промышленных растворов.

Отходы производства на предприятии отправляются в иловый резервуар, то есть существующая схема очистки представляет собой механическую технологию.

Себестоимость очистки по данным предприятия составляет 215 руб./т.

За месяц на предприятии накапливается 4500 т. отхода (коэффициент перевода 0,7 для осадков) или 3150 м<sup>3</sup>. Предприятие работает в 2 смены, 30 календарных дней.

Разработка технологии переработки осадков на предприятии предусматривает монтаж электромембранного оборудования, пусконаладочные работы и ввод объекта в эксплуатацию,

подготовку кадров, что суммарно оценивается в 3,8 млн. руб. (по данным анализа рынка мембранного оборудования в 2022 г. цены на оборудование отечественных производителей в среднем по России снижены на 10–15%). Производительность оборудования по электромембранной очистке технологических растворов – 270–300 т./сутки. Исходя из режима работы предприятия, средний объём промышленных стоков в сутки составляет 150 т. Поэтому оборудование такой производительности вполне обеспечит процесс очистки.

Расчёт затрат на очистку сточных вод ООО «РКС-Тамбов» при электромембранной технологии (в ценах 2022 г.):

1. Затраты на реагенты 47 руб./т. и составят в среднем за месяц:

$$4500 \times 47 = 211500 \text{ руб.}$$

2. Затраты на энергоносители (в месяц):  
в смену (4 х 37 кВт/час х 12 час. + 2 х 75кВт. /час х 12 час.)х4 = 14304 руб.  
в месяц: 14304 х 30 = 429120 руб.

3. Расходы на оплату труда персонала, включая премии, страховые взносы и взносы на страхование от несчастных случаев на производстве за месяц:

Предусмотрен следующий штат работников, обслуживающих электробаромембранное оборудование: 1 аппаратчик (оклад 15000 р./мес.), 1 технолог (оклад 17000 р./мес.), 1 слесарь (оклад 15000 р./мес.), 1 мастер (17000 р./мес.), 1 лаборант (17000 р./мес.).

Расходы по этой статье за месяц составят: (15000 х 1 + 17000 х 1 + 15000 х 1 + 17000 х 1 + 17000 х 1) х 1,34\* = 108540 руб.

\*Тарифы страховых взносов в 2022 г.: на пенсионное страхование – 22%; на обязательное социальное страхование – 2,9%; на обязательное медицинское страхование – 5,1%; на страхование от несчастных случаев на производстве – 0,2% (класс предприятия – 1).

4. Стоимость годового обслуживания электромембранного аппарата (по данным поставщика оборудования) составляют 72 000 руб. в год.

За месяц затраты составят: 72 000 руб./12 мес. = 6000 руб.

5. Затраты на амортизацию мембранного оборудования при сроке окупаемости, равным 3 года, в месяц составят:

$$3\,080\,000 \text{ руб.} / 3 \text{ года} / 12 \text{ мес.} = 85\,555 \text{ руб.}$$

6. Производственная себестоимость очистки технологического раствора составит в месяц:

$$211500 + 429120 + 108540 + 6000 = 755\,160 \text{ руб.}$$

В расчете на 1 т. отходов равны: 167,8 руб./т. (755160/4500т.).

В таблице 5 приведена сравнительная оценка традиционной и электромембранной технологий очистки технологических растворов на ООО «РКС-Тамбов».

Сравнительная оценка традиционной и электромембранной технологий очистки технологических растворов на ООО «РКС-Тамбов»

Table 5.

Comparative evaluation of traditional and electromembrane technologies for cleaning technological solutions at RKS-Tambov

Показатели Indicators	Существующая технология очистки Existing treatment technology	Предлагаемая технология очистки Proposed treatment technology
Объём промышленного раствора Volume of industrial solution: – за месяц, т   - per month, tons – в смену, т   - per shift, tons	4500 75	4500 75 3800,00
Капитальные затраты, руб.   Capital expenditures, rub. Эксплуатационные затраты: Operating costs: – на 1 т. раствора, руб.   - per 1 ton of solution, rubles.	215,00	167,80
Эффект от очистки раствора: Effect from solution cleaning: – 1 т. раствора, руб.   - 1 t of solution, rub. – на весь объём очистки, тыс. руб. - for the whole volume of cleaning, thousand rubles.		20,00 195,50

Для дальнейшего использования отходов производства ООО «РКС-Тамбов» предложено её предварительное концентрирование (обезвоживание) мембранным процессом, с использованием специально разработанного электромембранного аппарата.

На Тамбовском рынке концентрат стоков подобных производств оценивается по 10 380 руб./т. Прибыль предприятия от реализации 1 т. сконцентрированного осадка сточных вод рассчитаем по формуле:

$$P_{\text{пл.}} = C_{\text{отп}} - C_{\text{пол}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{пл.}}$  – прибыль от реализации 1 т. концентрата, руб.;  $C_{\text{отп}}$  – цена рыночная за 1 т., руб.;  $C_{\text{пол}}$  – полная себестоимость 1 т. концентрата, руб.

$$П = 10380 - 6716 = 3664 \text{ руб.},$$

где 6716 руб. – это себестоимость концентрата, рассчитанная по данным предприятия и исходя из действующих цен на сырье и материалы, требуемые для его (концентрата) переработки.

Тогда прибыль предприятия от реализации всего объёма концентрата за год составит:

$$П = 3664 \times 48,75 \text{ т. (объём концентрата в месяце)} \times 12 \text{ мес.} = 2143440 \text{ руб.}$$

Отходы ООО «РКС-Тамбов» относятся к 1 классу опасности, по которым норматив платы за размещение отходов производства и потребления установлен 716,26 руб./т.

Расчёт суммы платежа за размещение отходов: сумма платы за размещение отходов ( $П_{\text{л.отх}}$  руб.) в пределах установленных лимитов находится по выражению:

$$П_{\text{л.отх}} = \sum_{i=1}^n H_{\text{бл.отх}} M_{\text{л.отх}} K_{\text{л.отх}} K_{\text{инф}} K_{\text{доп}} K_{\text{мро}}, \quad (6)$$

при  $M_{\text{л.отх}} \leq M_{\text{л.отх.}}^{\text{л.}}$

При размещении отходов в границах городов, населённых пунктов, водоёмов, рекреационных зон и водоохранных территорий применяется коэффициент 5, менее 3 км от границ вышеперечисленных объектов коэффициент 3.

Сумма выплаты за сверхлимитное размещение отходов ( $П_{\text{сл.отх}}$  руб.) находится по выражению:

$$П_{\text{л.отх}} = \sum_{i=1}^n H_{\text{бл.отх}} M_{\text{сл.отх}} K_{\text{э.отх}} K_{\text{инф}} K_{\text{доп}} K_{\text{мро}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{инф}}$  – коэффициент учитывающий инфляцию в 2022 г. = 1,08;  $K_{\text{доп}}$  – дополнительный коэффициент = 1;  $K_{\text{мро}}$  – коэффициент месторасположения объекта размещения отходов = 0,3 (так как объект размещения отходов расположен на территории города);  $K_{\text{э.отх}}$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния почв в рассматриваемом регионе = 2 (для ЦЧР);  $H_{\text{бл.отх}}$  – базовый норматив платы за размещение 1 т. отходов  $i$ -го вида в пределах установленных лимитом, руб./т.:  $M_{\text{л.отх}}$  – фактическое количество размещённых отходов  $i$ -го вида в пределах установленных лимитом.  $M_{\text{сл.отх}}$  – годовой лимит на размещение отходов, установленный для предприятия, равен 0,762 т.

Рассчитаем общую сумму платы за размещение отходов ( $П_{\text{отх.проект}}$ ):

$$П_{\text{отх.}} = 0,762 \times 716,26 \times 1,08 \times 1 \times 0,3 \times 2 = 353,67 \text{ руб.}$$

Уменьшение суммы платы за производственные отходы после внедрения проекта: экономия в сумме платы за размещение отходов ( $\Delta П$ ) находится по формуле:

$$\Delta П = П_{\text{отх.}}^{\text{баз}} - П_{\text{отх.}}^{\text{проект}}, \quad (8)$$

где  $П_{\text{отх.}}^{\text{баз}}$  – плата за отходы при существующей технологии очистки, руб.;  $П_{\text{отх.}}^{\text{проект}}$  – плата за отходы при мембранной технологии, руб.

По данным предприятия плата за размещение отходов составляет в среднем за год 1615,5 руб.

Тогда экономия за год от внедрения программы составит:

$$\Delta = 353,67 - 1615,5 = -1261,83 \text{ руб.}$$

Используя доходный подход в расчёте экономической эффективности проекта электробаромембранной очистки вод на предприятии, рассчитаем:

Денежный поток за первый год реализации проекта найдём по формуле:

$$ДП_1 = П_Г^{РЕАЛ. ПОР} + \Delta П + Р_{УТИЛ} + П_Г^{ЕДИН}, \quad (9)$$

где  $П_Г^{РЕАЛ. ПОР}$  – прибыль от реализации всего объема концентрата за год, руб.;  $\Delta П$  – экономия в сумме платы за размещение отходов, руб.;  $Р_{УТИЛ}$  – расходы на сторонние организации, утилизирующие осадок сточных вод, руб.;  $П_Г^{ЕДИН}$  – прибыль единовременная от реализации всего объема концентрата за базовый год, руб.

$$ДП_1 = 2143440 + 3432,63 = 2146872,63 \text{ руб.}$$

Денежный поток за последующие годы найдем без  $П_Г^{ЕДИН}$  по формуле:

$$ДП_2 = П_Г^{РЕАЛ. ПОР} + \Delta П + Р_{УТИЛ}, \quad (10)$$

$$ДП_1 = 2143440 + 3432,63 = 2146872,63 \text{ руб.}$$

Индекс доходности: анализируя соотношения суммы приведённых экономических эффектов к величине приведённых капитальных вложений найдём индекс доходности:

$$ИД = \frac{1}{K_{ДОП}} \sum_{i=1}^n ДП_i \frac{1}{(1+E)^i}, \quad (11)$$

где  $ДП_1$  – денежный поток программы, руб.;  $E$  – норма дисконта = 11%, обычно принимается на уровне среднего банковского процента, %;  $K_{ДОП}$  – дополнительные капиталовложения, руб.;

$$ИД = 1/3080000 \times [2146872,63 / (1+0,11)^1 + 2146872,63 / (1+0,11)^2 + 2146872,63 / (1+0,11)^3] = 1,703.$$

$ИД > 1$  – следовательно, проект рентабелен.

Рентабельность продукции: показатель рентабельности характеризует полученную прибыль по отношению к затраченным производственным ресурсам.

Рентабельность продукции (норма прибыли) – относительный уровень прибыли, приходящийся на 1 руб. текущих затрат.

Рентабельность продукции рассчитывается по формуле:

$$R_{ПРОД} = \frac{100 \times П_P}{C_{ПОЛ}}, \quad (12)$$

где  $П_P$  – прибыль от реализации 1 т. концентрата, руб.;  $C_{ПОЛ}$  – полная себестоимость 1 т. концентрата, руб.

$$R_{ПРОД} = (100 \times 3664) / 6716 = 54,56\%$$

Чистый дисконтированный доход:

$$ЧДД = \sum_{i=1}^n ДП_i \frac{1}{(1+E)^i} - K_{ДОП}, \quad (13)$$

где  $E$  – норма дисконта равная приемлемой для инвесторов норме дохода на капитал, принимается = 11%.  $ДП_1$  – денежный поток проекта, руб.;  $K_{ДОП}$  – дополнительные капиталовложения, руб.

$$ЧДД = [2146872,63 / (1+0,11)^1 + 2146872,63 / (1+0,11)^2 + 2146872,63 / (1+0,11)^3] = 5\,246\,379 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений ( $T_{ОКУП}$ ) – это время, в течение которого капитальные вложения окупятся приростом прибыли, вызванной данными капитальными вложениями. Он определяется по формуле:

$$T_{ОКУП} = \frac{T \times K_{ДОП}}{\sum_{i=1}^T ДП_i \frac{1}{(1+E)^i}}, \quad (14)$$

где  $E$  – норма дисконта%;  $ДП$  – денежный поток проекта, руб.;  $T$  – количество шагов расчёта;  $K_{ДОП}$  – дополнительные капиталовложения, руб.

$$T_{ОКУП} = (3 \times 3080000) / 5246379 = 1,76 \text{ или } 2 \text{ года.}$$

Результаты расчета экономической эффективности электроомембранной технологии в сравнении с существующей технологией на предприятии сведём в итоговую таблицу 6.

Таблица 6.

Результаты экономического расчёта базового и проектного вариантов

Table 6.

The results of the economic calculation of the base and design options

Технико-экономические показатели Technical and economic indicators	Существующая схема очистки Existing scheme	Предлагаемая Proposed scheme	Затраты на весь объем очистки, руб. Costs for the entire purification volume, rubles	Изменение величины Change of value
	Затраты на 1 т. очистки, руб. Costs per 1 ton of cleaning, rubles			
Себестоимость   Cost of sales	215	167,80		– 212400 *
Прибыль от реализации концентрата   Profit from concentrate sales	0	3664	+2143440	+2143440
Плата за размещение отходов (экологический эффект)   Waste disposal fee (environmental effect)	1615,5	353,67		-1261,83*
Индекс доходности   Profitability index				1,703
Рентабельность продукции   Product profitability				54,56%
Чистый дисконтированный доход, руб.   Net discounted income, rubles.				5246379
Срок окупаемости, лет   Payback period, years				2
Итого:   Total:				~200000 руб.

\* Знак "минус" в расчётах означает экономию, то есть эффект от внедрения электроомембранной технологии, выражается в снижении затрат на очистку и уменьшении платы за размещение отходов.

Как показывают данные вышеприведенной таблицы, внедрение проекта очистки сточных вод позволит получить эффект в общей сумме 200 000 руб., в том числе экономический – 212 400 руб. и экологический – около 1300 руб.

Прибыль от реализации концентрата в сумме 3664 руб. с 1 тонны, а на весь объем – 2 143 440 руб.

При этом уменьшится плата за экологию до 353,67 руб. В суммарном выражении эффект по этой составляющей составит 2 143 794 руб.

Индекс доходности составит 1,703, то есть больше 1, что считается рентабельным бизнесом. Высокий показатель и рентабельности продукции. Он равен 54,56%, то есть с каждого рубля затрат предприятие сможет получить прибыль в размере 54,56 коп. Срок окупаемости проекта составляет 2 года, что следует признать хорошим показателем, то есть через 2 года вложенные в проект денежные ресурсы вернутся в хозяйственный оборот. Рассчитанный срок окупаемости предположительно может быть уменьшен, так как цена концентрата нами не проиндексирована на величину инфляции.

### **Заключение**

В результате проведенных экспериментальных исследований по электромембранному разделению технологических растворов очистных сооружений ООО «РКС – Тамбов» можно сделать следующие выводы:

Получены и интерпретированы экспериментальные данные по коэффициенту задержания и выходному удельному потоку растворителя технологических растворов в зависимости от концентрации разделяемого раствора, трансмембранного давления и плотности тока.

Выявлены аппроксимационные зависимости и вычислены значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета удельного потока и коэффициента задержания электрохимического мембранного процесса разделения технологических растворов в зависимости от физико-химической природы мембраны, концентрации, трансмембранного давления и плотности тока.

Представленные критериальные зависимости могут быть использованы при прогнозировании и разработке лабораторных, пилотных и промышленных электромембранных аппаратов и установок.

Проведен расчет экономической эффективности технологической схемы очистки сточных вод ООО «РКС – Тамбов» с использованием электромембранного аппарата и оценена ее рентабельность.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания.*

### **Литература**

- 1 Gogina E., Makisha N. Information technologies in view of complex solution of waste water problems // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 587–589. P. 636–639. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.636
- 2 Сажия В.В., Полковников А.Б., Селдиас И. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России // Успехи в химии и химической технологии. 2009. №. 12(105). С. 94–108. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20211358>
- 3 Павлов Д.В. Разработка новых технологий и оборудования для систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий // Водоснабжение и канализация. 2011. № 1–2. С. 84–89.
- 4 Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane electrolysis – History, current status and perspective // Electrochim. Acta. 2016. V. 209. P. 737–756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
- 5 Ярославцев А.Б. Мембраны и мембранные технологии. 2013. 602 с.
- 6 Aliano A., Cicero G. AC Electroosmosis: Basics and lab-on-a-chip applications // Encyclopedia of Nanotechnology. 2012. P. 25–30. doi: 10.1007/978-90-481-9751-4\_125
- 7 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. doi: 10.31857/S0424857021050066
- 8 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. doi: 10.31857/S0424857020060158
- 9 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.
- 10 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. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3633
- 11 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.
- 12 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. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3634
- 13 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.

14 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. doi: 10.6060/ivkkt.20216410.6456

15 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. doi: 10.6060/ivkkt.20206309.6196

16 Абоносимов О.А., Кузнецов М.А., Ковалева О.А., Поликарпов В.М. и др. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на очистных предприятиях // Вестник ТГТУ. 2017. № 4. Т. 23. С. 641–655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641–655

17 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. doi: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.187–191

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

19 Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. URL: [www.vladipor.ru/catalog/show](http://www.vladipor.ru/catalog/show)

20 Дубяга В.П., Бесфамильный И.Б. Нанотехнологии и мембраны // Крит. технологии. Мембраны. 2005. № 3. С. 11–16. doi: 10.1016/0011–9164(91)85060–8

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

22 Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Зарапина И.В., Котенев С.И. и др. Критериальные зависимости процесса массопереноса электробаромембранного разделения технологических растворов от тяжелых металлов // Вестник ТГТУ. 2019. Т. 25. № 3. С. 442–452. doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.442–452

### References

1 Gogina E., Makisha N. Information technologies in view of complex solution of waste water problems. Appl. Mech. Mater. 2014. vol. 587–589. pp. 636–639. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.636

2 Sazhiya V.V., Polkovnikov A.B., Seldias I. Problems of ecology and environmental management in the context of economic development of Russia. Advances in chemistry and chemical technology. 2009. no. 12(105). pp. 94–108. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20211358> (in Russian).

3 Pavlov D.V. Development of new technologies and equipment for recycling water supply systems of industrial enterprises. Water supply and sewerage. 2011. no. 1–2. pp. 84–89. (in Russian).

4 Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane electrolysis – History, current status and perspective. Electrochim. Acta. 2016. vol. 209. pp. 737–756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209

5 Yaroslavl'tsev A.B. Membranes and membrane technologies. 2013. 602 p. (in Russian).

6 Aliano A., Cicero G. AC Electroosmosis: Basics and lab-on-a-chip applications. Encyclopedia of Nanotechnology. 2012. pp. 25–30. doi: 10.1007/978–90–481–9751–4\_125

7 Kononenko N.A., Demina O.A., Loza N.V., Dolgoplov S.V. et al. Theoretical and experimental study of the limiting diffusion current in systems with modified perfluorinated sulfonic cation exchange membranes. Electrochemistry. 2021. vol. 57. no. 5. pp. 283–300. doi: 10.31857/S0424857021050066 (in Russian).

8 Yurova P.A., Stenina I.A., Yaroslavl'tsev A.B. Influence on the transport properties of cation exchange membranes MK 40 modification with perfluorosulfopolymer and cerium oxide. Electrochemistry. 2020. vol. 56. no. 6. pp. 568–573. doi: 10.31857/S0424857020060158 (in Russian).

9 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).

10 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. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3633 (in Russian).

11 Mavletov M.N., Yarul'lin A.Z., Berezin N.B., Mezhevich Zh.V. Local treatment of wastewater from galvanic production using 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).

12 Vasilyeva V.I., Saud A.M., Akberova E.M. Separation of aqueous-salt solutions of phenylalanine by electrodialysis using membranes with different mass fractions of sulfonic cation exchange resin. Sorption and chromatographic processes. 2021. vol. 21. no. 4. pp. 498–509. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3634 (in Russian).

13 Chigaev I.G., Komarova L.F. Study of nanofiltration and ion exchange as complex methods for purifying natural groundwater. Bulletin of the Technological University. 2019. vol. 22. no. 4. pp. 99–102. (in Russian).

14 Vinnitsky V.A., Chugunov A.S., Ershov M.V. Influence 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. doi: 10.6060/ivkkt.20216410.6456 (in Russian).

15 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kovaleva O.A. Analysis of the kinetic characteristics of baromembrane and electric baromembrane separation of ammonium nitrate solution. Izv. universities Chemistry and chem. technology. 2020. vol. 63. no. 9. pp. 28–36. doi: 10.6060/ivkkt.20206309.6196 (in Russian).

16 Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M. et al. Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at treatment plants. Vestnik TSTU. 2017. no. 4. vol. 23. pp. 641–655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641–655 (in Russian).

17 Abonosimov O.A. Study of hydrodynamic permeability of reverse osmosis membranes in solutions of heavy metal salts. Questions of modern science and practice. University named after IN AND. Vernadsky. 2016. vol. 1. no. 59. pp. 187–191. doi: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.187–191 (in Russian).

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

19 Vladipor: website of JSC STC Vladipor. Available at: [www.vladipor.ru/catalog/show](http://www.vladipor.ru/catalog/show) (in Russian).

20 Dubyaga V.P., Besfamilny I.B. Nanotechnologies and membranes. Crit. technologies. Membranes. 2005. no. 3. pp. 11–16. doi: 10.1016/0011–9164(91)85060–8 (in Russian).

21 Konovalov D.N., Lazarev S.I., Lua Pepe, 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. Proceedings of VSUET. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 24–32. (in Russian).

22 Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Zarapina I.V., Kotenev S.I. et al. Criteria dependences of the mass transfer process of electric pressure membrane separation of technological solutions from heavy metals. Vestnik TSTU. 2019. vol. 25. no. 3. pp. 442–452. doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.442–452 (in Russian).

#### Сведения об авторах

**Олег А. Абоносимов** д.т.н., профессор, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, [abontam@inbox.ru](mailto:abontam@inbox.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-51057782>

**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](mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-07465161>

**Марина А. Хребтова** аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, [hrebtowa@icloud.com](mailto:hrebtowa@icloud.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, [kaf-kit@vfreu.ru](mailto:kaf-kit@vfreu.ru)

**Сергей И. Котенев** аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, [kotenev.igor@yandex.ru](mailto:kotenev.igor@yandex.ru)

**Дмитрий С. Лазарев** аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, [sergey.lazarev.1962@mail.ru](mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru)

#### Вклад авторов

**Олег А. Абоносимов** 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

**Марина А. Хребтова** провела эксперимент

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

**Сергей И. Котенев** обзор литературных источников по исследуемой проблеме

**Дмитрий С. Лазарев** провел эксперимент, выполнил расчёты

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors

**Oleg N. Abonosimov** Dr. Sci. (Engin.), professor, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, [abontam@inbox.ru](mailto:abontam@inbox.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-51057782>

**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](mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-07465161>

**Marina A. Hrebtova** graduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, [hrebtowa@icloud.com](mailto:hrebtowa@icloud.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, [kaf-kit@vfreu.ru](mailto:kaf-kit@vfreu.ru)

**Sergey I. Kotenev** graduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, [kotenev.igor@yandex.ru](mailto:kotenev.igor@yandex.ru)

**Dmitriy S. Lazarev** graduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, [sergey.lazarev.1962@mail.ru](mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru)

#### Contribution

**Oleg N. Abonosimov** 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

**Marina A. Hrebtova** conducted an experiment

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

**Sergey I. Kotenev** review of the literature on an investigated problem

**Dmitriy S. Lazarev** conducted an experiment, performed computations

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 30/06/2023	После редакции 16/07/2023	Принята в печать 18/08/2023
Received 30/06/2023	Accepted in revised 16/07/2023	Accepted 18/08/2023