УДК 66.081. 6-278
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.479-490

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ОПМН-К И АМН-П В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ХЛОРИДА И АЦЕТАТА КАЛЬЦИЯ

© В. А. Горшенина[1], О. А. Абоносимов[1], С. И. Лазарев[1] ✉, Г. С. Баронин[1], К. В. Брянкин[2], И. В. Зарапина[2], М. В. Соколов[3], П. Н. Бернацкий[4]

[1] *Кафедра «Механика и инженерная графика», mig@tstu.ru;*
[2] *кафедра «Химия и химические технологии»;*
[3] *кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[4] *кафедра химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: полимерная мембрана; равновесный коэффициент распределения; электросорбционная активность.

Аннотация: Экспериментально исследованы кинетические коэффициенты электромембранного метода в процессе очистки технологических растворов производств пигментных материалов. Рассмотрены объекты исследования – технологические растворы, содержащие хлорид и ацетат кальция, и полупроницаемые мембраны ацетатцеллюлозного и полимерного видов с различными селективно-проницаемыми характеристиками. Исследовано влияние трансмембранных параметров проведения электромембранного процесса разделения на основные кинетические характеристики мембран ОПМН-К и АМН-П при очистке технологических растворов производств пигментных материалов. Дан анализ влияния трансмембранных параметров на кинетические зависимости коэффициента равновесного распределения мембран ацетатцеллюлозного и полиамидного вида. Получены аппроксимационные выражения для теоретического расчета коэффициента равновесного распределения в зависимости от физико-химической основы материала полупроницаемой мембраны, величины плотности тока, концентрации и температуры технологического раствора. Определены численные значения эмпирических коэффициентов, позволяющих рассчитывать и прогнозировать величины коэффициента равновесного распределения, которые могут быть использованы в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

Введение

Проблема очистки производственно-промышленных сточных вод в полной мере определяет экологическую обстановку водных ресурсов Российской Федерации. Химические производства, производящие красители и пигменты, к которым относится тамбовское предприятие ПАО «Пигмент», являются наиболее

опасными с точки зрения загрязнения окружающей среды. Анализ технологии производства пигментов показывает, что значительное количество сточных вод получается на стадии промывки суспензии. Промывные воды представляют собой водные растворы солей, таких как хлорид и ацетат, являющихся побочными продуктами стадии синтеза. Выбор эффективного метода очистки сточных вод связан с решением сложных задач, обусловленных многообразием растворенных вредных веществ и повышенными требованиями, предъявляемыми к очищенной воде [1 – 4].

В настоящее время существует большое количество методов очистки промышленных сточных вод, зависящих от типа вредных веществ: методы, основанные на использовании сил гравитации, электрофлотация и электрокоагуляция, флотация и коагуляция, фильтрация, отстаивание (седиментация), сорбция на активном угле, реагентный метод – перевод ионов в малорастворимые соединения, мембранные и электромембранные технологии обессоливания [2, 3] и др.

Электромембранное разделение – современный и эффективный метод очистки сточных вод, который показывает высокую степень очистки воды и обеспечивает комплексное разделение веществ [5 – 13]. Мембраны в этом методе играют важную роль в очистке сточных вод от загрязняющих компонентов. Они способны задерживать самые мелкие частицы, тем самым достигая максимального уровня очистки. Несмотря на это, большое количество таких компонентов, как пигменты, может затруднять процесс фильтрации растворов через мембрану. Это происходит из-за их взаимодействия с материалом мембраны, что в свою очередь ведет к снижению ее проницаемости. Работоспособность мембран по очистке сточных вод зависит от объема пропускаемой воды и компонентного состава растворов.

Для разработки схемы очистки необходимы экспериментальные данные по процессу массопереноса через мембрану. Литературные данные по результатам исследований ведущих специалистов в области процесса массопереноса через мембрану [14 – 16] подтверждают утверждение, что электросорбционная активность мембран значительно влияет на процесс электромембранного разделения. Поэтому для расчета массопереноса через мембрану необходимо получить экспериментальные данные по электросорбционной активности мембран, которая определяется их электросорбционной емкостью. Важным свойством мембраны является адсорбция, исследования которой и проводилось в данной работе. Главное внимание было уделено на распределение компонентов растворенных веществ по объему материала мембраны [12, 17].

Цель работы – анализ и расчет электросорбционной активности полимерных мембран ОПМН-К и АМН-П в водных растворах хлорида и ацетата кальция.

Методика и объекты экспериментальных исследований

Электросорбционная емкость мембраны – комплексный показатель, зависящий от множества факторов: природы материала, структуры, условий эксплуатации и характеристик раствора. Понимание этих зависимостей позволяет оптимизировать процессы электромембранного разделения и создавать мембраны с заданными свойствами для конкретных задач.

Различные полимеры (ацетат целлюлозы, полиамиды, полисульфоны и др.) обладают разной способностью к электросорбции из-за различий в составе, наличии функциональных групп и пористости. Так, мембраны на основе ацетата целлюлозы (АМН-П) при гидратации увеличивают число гидрофильных ОН-групп, что способствует росту электросорбционной емкости. Полиамидные мембраны (ОПМН-К) демонстрируют перестройку надмолекулярной структуры без разрушения амидных связей, что также влияет на их сорбционные свойства [12, 16].

Морфология поверхности, надмолекулярная структура, наличие пор, их размер и распределение определяют доступность активных центров для сорбции. Мембраны, полученные из растворов полимеров, характеризуются структурой взаимосвязанных, хаотически распределенных в пространстве пустот (межструктурных пространств) в некотором, характерном для данного типа мембран, диапазоне размеров и функционально представляют собой многослойное сито [18]. Пористость, эластичность, толщина мембраны определяют ее способность к набуханию, изменению структуры при гидратации и, как следствие, изменению электросорбционной емкости.

Заряд поверхности. Мембраны могут иметь положительный или отрицательный поверхностный заряд, что влияет на селективность и емкость по отношению к различным ионам.

С увеличением концентрации исходного раствора электросорбционная емкость, как правило, снижается. Это связано с заполнением пор сорбированными веществами, что уменьшает их сечение и ограничивает доступ новых ионов к активным центрам мембраны [12, 13]. Повышение плотности тока способствует увеличению электросорбционной емкости, так как электрическое поле выступает движущей силой для переноса ионов через мембрану. Рост температуры обычно приводит к снижению электросорбционной емкости. Это объясняется увеличением растворимости веществ в растворе и изменением физико-химических свойств мембраны (например, снижением адсорбции при повышении температуры). Вид ионов (размер, заряд, гидратация), а также состав раствора (наличие конкурирующих ионов, pH) существенно влияют на селективность и емкость мембраны.

Для исследования электросорбционной емкости мембран использовали лабораторную установку. Для поддержания необходимого градиента электрического потенциала (плотности тока) использовался источник постоянного электрического тока. Это позволило поддерживать постоянное значение плотности тока на мембране в течение всего опыта. Образцы мембран имели прямоугольную форму с размерами $(14\times4)\times10^{-2}$ м. Толщина каждого образца была предварительно измерена с помощью микрометра. После измерений образцы помещались в измерительную ячейку, заполненную заранее подготовленными водными растворами

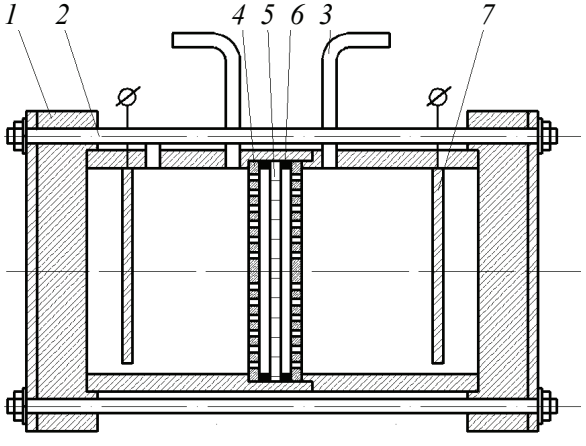

Рис. 1. Измерительная ячейка для исследования электросорбционной активности мембран:
1 – корпус; *2* – шпильки; *3* – трубки контроля уровня раствора в камерах; *4* – перфорированные пластины; *5* – мембрана; *6* – прокладки уплотнения; *7* – электроды

заданной концентрации (рис. 1). Чтобы определить диффузионное равновесие эксперимент выдерживался в течение 10…12 ч. По окончании периода экспозиции мембраны извлекались из ячейки, а их поверхность аккуратно очищалась от остатков раствора с помощью фильтровальной бумаги. Затем проводились повторные измерения геометрических параметров образцов: длины, ширины и толщины. Образцы вновь погружались в емкости, заполненные чистой дистиллированной водой, для последующей стадии экстракции адсорбированного вещества. Вода в резервуаре пополнялась ежедневно, а сточные воды перекачивались в емкости. Обычно для завершения промывки достаточно четырех замен жидкости. Путем измерения объемов использованной промывочной воды и оценки концентраций извлеченных веществ определялось количество адсорбированных компонентов в мембранах.

Таким образом, зная объем мембраны, объем использованной промывочной воды и определенные концентрации выделившихся веществ, можно рассчитать концентрации адсорбированных веществ непосредственно в образцах полимерных мембран.

Коэффициент равновесного распределения $k_р$ определяется по следующему выражению [12, 17]:

$$k_р = \frac{C_м}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где $C_м$ – концентрация растворенного вещества в полупроницаемой мембране, кг/м^3; $C_{исх}$ – концентрация вещества в исследуемом растворе, кг/м^3.

При проведении экспериментальных исследований электросорбционной емкости использовались отечественные нанофильтрационные мембраны АМН-П на основе полиамида эфиров целлюлозы и ОПМН-К на основе полиамида, промышленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир) (табл. 1). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающей требования к качеству пермеата.

Технические растворы, использованные в экспериментах, включали производные хлорида и ацетата кальция, концентрации которых подбирались таким образом, чтобы максимально соответствовать реальным условиям промышленных стоков ПАО «Пигмент». Предельно-допустимая концентрация раствора (**ПДК**), содержащего $CaCl_2$ (концентрация в промывных водах 0,9…2,0 кг/м^{3}с) – 2 мг/м^3; ПДК раствора, содержащего $Ca(CH_3COO)_2$ (концентрация 0,8…1,9) – 1,9 мг/м^3.

Таблица 1

Основные характеристики мембран

Параметры	Марка мембраны	
	ОПМН-К	АМН-П
Рабочее давление, МПа	1,6	1,6
Минимальная производительность по пермеату при температуре 25 °С, дм^3/м^{2}ч	100	60
Селективность, % по 0,2%-му раствору $MgSO_4$, не менее	95,0	98,0

Результаты и их обсуждение

Коэффициент равновесного распределения находится в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ, их концентрации в исходном растворе, температуры и плотности тока [11, 19].

Полученные данные в ходе экспериментальных исследований по влиянию концентрации исходного раствора и плотности тока на величину коэффициента равновесного распределения водных растворов хлорида и ацетата кальция представлены на рис. 2, 3.

Изображения, представленные на рисунках, свидетельствуют о том, что с увеличением концентрации вещества в исходном растворе сорбционная емкость мембран уменьшается. Такая зависимость объясняется заполнением сорбированными веществами объема пор, сечение которых может значительно уменьшатся. Наиболее малые поры могут целиком заполняться адсорбированными молекулами, и, как следствие, быть «заблокированными» для переноса воды. Все это имеет существенное значение при объяснении зависимости кинетических характеристик от ряда параметров электромембранного разделения растворов.

Температура сильно влияет на процесс сорбции веществ из раствора. В литературе [12, 20] отмечено, что температура может, как способствовать, так и препятствовать сорбции. В данном случае наблюдалось снижение сорбционной способности полимерных мембран при увеличении температуры раствора, так как

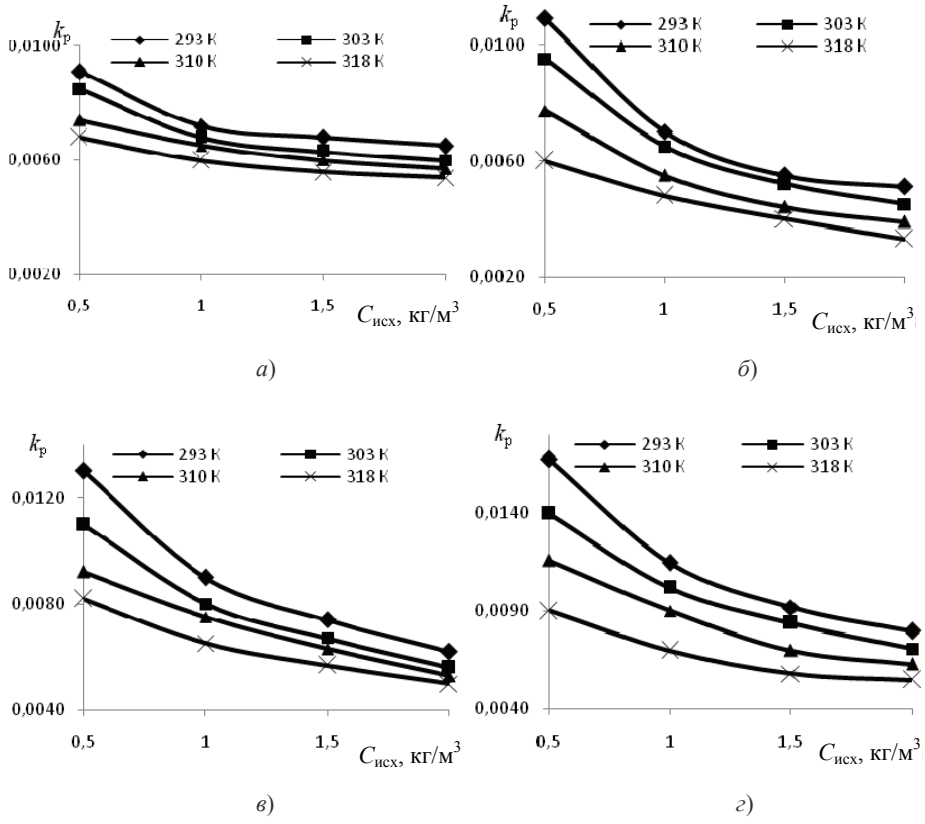

Рис. 2. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембран АМН-П (*а*, *б*) и ОПМН-К (*в*, *г*) при i = 5,12 А/м^2 для растворов, содержащих вещество: *а*, *в* – $CaCl_2$; *б*, *г* – $Ca(CH_3COO)_2$

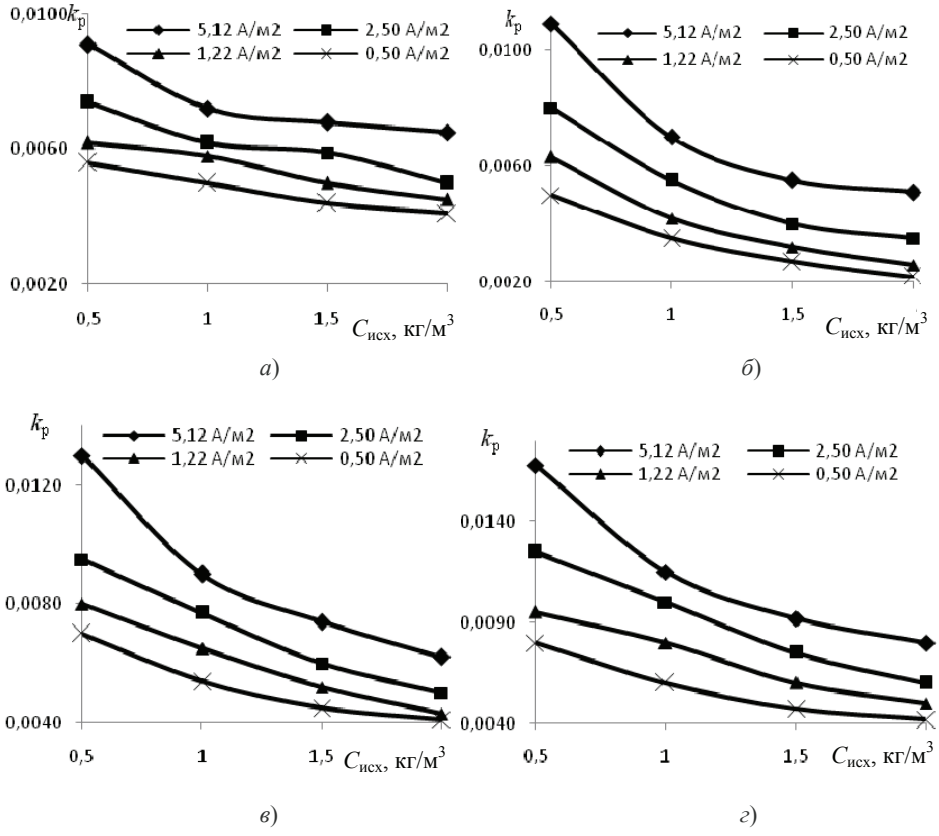

Рис. 3. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембраны АМН-П (*а*, *б*) и ОПМН-К (*в*, *г*) при *T* = 293 К для растворов, содержащих вещество: *а*, *в* – $CaCl_2$; *б*, *г* – $Ca(CH_3COO)_2$

при повышении температуры растворимость вещества в растворе увеличивается. В соответствии с данными из [15, 16], атомы, образующие поверхность адсорбента, взаимодействуют как с молекулами растворенных веществ, так и с молекулами растворителя во время сорбции из растворов. При этом экспериментально установлено, что вещества с более высокой растворимостью в воде адсорбируются менее интенсивно [16].

Следует также отметить, что нарастание плотности тока способствует увеличению коэффициента равновесного распределения, так как электрическое поле играет роль движущей силы, которая способствует переносу ионов в растворе, и

Электросорбционная способность мембран ОПМН-К выше, чему АМН-П, что объясняется физико-химическими свойствами матрицы полупроницаемых мембран и знаком заряда активного слоя мембраны (полиамидные мембраны имеют положительный заряд, ацетилцеллюлозные – отрицательный). Существенное влияние оказывает характер и величина пор полимерных мембран [16, 17].

Для расчета равновесных коэффициентов распределения использовано аппроксимационное уравнение вида [21]

$$k_р = bC^{n-1}\left(\frac{T_0}{T}\right)^m, \qquad (2)$$

где C – концентрация раствора, кг/м^3; T_0, T – реперная (принятая нами 293 К) и рабочая температуры; b, n, m – эмпирические коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов

Раствор	Процесс	Мембрана	*b*	*m*	*n*
Хлорид кальция	Сорбция	ОПМН-К	0,0322	0,613	–3,73
		АМН-П	0,0224	0,883	3,54
	Электросорбция	ОПМН-К	0,0322	0,581	–3,62
		АМН-П	0,0224	0,862	3,42
Ацетат кальция	Сорбция	ОПМН-К	0,0326	0,586	2,63
		АМН-П	0,0322	0,563	4,54
	Электросорбция	ОПМН-К	0,0289	0,556	2,43
		АМН-П	0,0298	0,562	4,32

Расхождение экспериментальных и рассчитанных по формуле (2) значений не превышают 15 %, что является достаточным для инженерных расчетов.

Заключение

Для очистки технологических растворов производств пигментных материалов выбран метод электромембранного разделения как наиболее экономически и экологически эффективный. Результатом проведенных экспериментальных исследований является получение оригинальных данных по коэффициентам равновесного распределения мембран ОПМН-К и АМН-П по растворам хлорида и ацетата кальция в зависимости от изменения основных параметров проведения процесса разделения. Проанализированы зависимости коэффициента равновесного распределения мембран от концентрации растворенных веществ для всех исследуемых мембран и выявлены факторы влияния. Объяснено влияние концентрации, температуры раствора и плотности тока на изменение коэффициента равновесного распределения.

В результате анализа полученных зависимостей и литературных данных других исследователей предложены выражения для математического описания коэффициента равновесного распределения мембран со значениями эмпирических коэффициентов для исследуемых растворов и мембран. Полученные результаты исследований следует использовать в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Список литературы

1. Колесников, В. А. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / В. А. Колесников, С. О. Вараксин, Д. В. Павлов // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 2-3. – С. 50–59.

2. Шаршунов, В. А. Очистка сточных вод и утилизация их отходов / В. А. Шаршунов. – Минск : Мисанта, 2020. – 642 с.

3. Алекина, Е. В. Анализ методов очистки сточных вод, используемых на машиностроительных предприятиях / Е. В. Алекина, И. А. Сумарченкова // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 1(97). – С. 56–61.

4. Исследование процесса очистки сточных вод на ПАО «Пигмент» / Т. А. Сухорукова, В. Я. Борщев, Л. Г. Михайлова, Е. Г. Михайлова, Н. Н. Осипов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 129–134. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134

5. Paidar, M. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective / M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 209. – P. 737–756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209

6. Свитцов, А. А. Введение в мембранные технологии / А. А. Свитцов. – Москва : ДеЛи принт, 2007. – 207 с.

7. Джубари, М. К. Очистка сточных вод заводов по производству пигментов в два этапа: приготовление активированного угля и процесс электродиализа / М. К. Джубари, Б. С. Таха // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 155–159. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.020.

8. Rouquerol, J. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications / J. Rouquerol, F. Rouquerol, K. Sing. – Elsevier, 1998. – 467 p.

9. Алексеева, Н. В. Ультрафильтрационное разделение промывных вод производства пигментов алого, желтого и оранжевого / Н. В. Алексеева, В. Ю. Литницкий, А. Я. Куликов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 282–288. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.282-288

10. Some Kinetic Dependence of Electrohyper Filtration Method of Purification of Waste Water from Iron Ions / A. A. Levin, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, O. A. Kovaleva, I. V. Khorokhorina, M. A. Kuznetsov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 295–306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306

11. Мембраны и мембранные технологии : монография / А. Б. Ярославцев [и др.] ; отв. ред. А. Б. Ярославцев. – Москва : Научный мир, 2013. – 616 с.

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

13. Котенев, С. И. Кинетические характеристики электромикрофильтрационной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ / С. И. Котенев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 317–327. doi: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.317-327

14. Karge, H. G. Adsorption and Diffusion / H. G. Karge, J. Weitkamp // Molecular Sieves – Science and Technology. – 2008. – Vol. 7. – 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1

15. Ягодовский, В. Д. Адсорбция : учебное пособие для студентов / В. Д. Ягодовский. – Москва : Бином ; Лаб. знаний, 2015. – 216 с.

16. Ямпольский, Ю. П. Методы изучения свободного объема в полимерах / Ю. П. Ямпольский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 1. – С. 66–87.

17. Сорбционные характеристики обратноосмотических мембран / В. Л. Головашин, С. В. Ковалев, К. С. Лазарев, П. А. Чепеняк //Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10, № 2. – С. 201–207.

18. Неугодова, Н. П. Современные направления в мембранной нанофильтрации биофармпрепаратов. Часть 3. Способы обеспечения безопасности фильтроэлементов / Н. П. Неугодова, Г. В. Долгова, Г. А. Сапожникова [и др.] // Мембраны. – 2008. – № 2(38). – С. 14–17.

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

20. Равновесный коэффициент распределения и потенциал поля поверхностных сил ультрафильтационных мембран в растворах биохимических производств/ С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, А. А. Лавренченко, А. А. Арзамасцев, Д. А. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 87–95. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.087-095

Experimental Investigation and Calculation of the Electro-Sorption Activity of OPMN-K and AMN-P Polymer Membranes in Aqueous Solutions of Calcium Chloride and Calcium Acetate

© V. A. Gorshenina[1], O. A. Abonosimov[1], S. I. Lazarev[1] ✉, G. S. Baronin[1], K. V. Bryankin[2], I. V. Zarapina[2], M. V. Sokolov[3], P. N. Bernatsky[4]

[1] *Department of Mechanics and Engineering Graphics, mig@tstu.ru;*
[2] *Department of Chemistry and Chemical Technologies;*
[3] *Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[4] *Department of Chemistry, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation*

Keywords: polymer membrane; equilibrium distribution coefficient; electrosorption activity.

Abstract: The kinetic coefficients of the electromembrane method were experimentally investigated during the purification of process solutions from pigment material production. The study focused on process solutions containing calcium chloride and calcium acetate, as well as semipermeable membranes – specifically cellulose acetate and polymer types-with varying selective permeability characteristics. The influence of transmembrane parameters of the electromembrane separation process on the key kinetic characteristics of OPMN-K and AMN-P membranes was examined in the context of purifying process solutions from pigment material production. An analysis is presented regarding the influence of transmembrane parameters on the kinetic dependencies of the equilibrium distribution coefficient for cellulose acetate and polyamide membranes. Approximation formulae have been derived for the theoretical calculation of the equilibrium distribution coefficient based on the physicochemical properties of the semipermeable membrane material, current density, and the concentration and temperature of the process solution. Numerical values for empirical coefficients have been determined to enable the calculation and prediction of the equilibrium distribution coefficient; these values can be utilized in the design of laboratory, pilot, and industrial-scale units for the separation, purification, and concentration of process streams and wastewater.

References

1. Kolesnikov V.A., Varaksin S.O., Pavlov D.V. [Wastewater treatment in various industries using best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Clean Water: Problems and Solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Sharshunov V.A. *Ochistka stochnykh vod i utilizatsiya ikh otkhodov* [Wastewater treatment and waste utilization], Minsk: Misanta, 2020, 642 p. (In Russ.)

3. Alekina Ye.V., Sumarchenkova I.A. [Analysis of wastewater treatment methods used at machine-building enterprises], *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water Purification. Water Treatment. Water Supply], 2016, no. 1(97), pp. 56-61. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Sukhorukova T.A., Borshchev V.YA., Mikhaylova L.G., Mikhaylova Ye.G., Osipov N.N. [Study of the wastewater treatment process at PJSC Pigment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 129-134. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209

6. Svittsov A.A. *Vvedeniye v membrannyye tekhnologii* [Introduction to Membrane Technologies], Moscow: DeLi print, 2007, 207 p. (In Russ.)

7. Gubari M.Q., Taha B.S. Wastewater Treatment of Pigment Production Plants in Two Stages: Prepared Activated Carbon and Electrodialysis Process, *Polzunovskiy Vestnik*, 2023, no. 2, pp. 155-159. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.020

8. Rouquerol J., Rouquerol F., Sing K. *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*, Elsevier, 1998, 467 p.

9. Alekseyeva N.V., Litnitskiy V.Yu., Kulikov A.Ya. [Ultrafiltration separation of wash waters from scarlet, yellow, and orange pigment production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 282-288. doi: 10.17277/vestnik.2019.02. pp.282-288 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Levin A.A., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Khorokhorina I.V., Kuznetsov M.A. Some Kinetic Dependence of Electrohyper Filtration Method of Purification of Waste Water from Iron Ions, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 295-306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02. pp.295-306

11. Yaroslavtsev A.B. (Ed.) [et al.], *Membrany i membrannyye tekhnologii: monografiya* [Membranes and Membrane Technologies: Monograph], Moscow: Nauchnyy mir, 2013, 616 p. (In Russ.)

12. Konovalov D.N., Lazarev S.I., Lua Pepe, Polyanskiy K.K. [Investigation of Kinetic and Sorption Characteristics of OFAM-K and OPMN-K Membranes during the Electro-nanofiltration Separation of an Aqueous Potassium Sulfate Solution], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2023, vol. 85, no. 1, pp. 24-32. doi: org/10.20914/2310-1202-1-24-32 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Kotenev S.I. [Kinetic Characteristics of the Electromicrofiltration Purification of Process Solutions from Synthetic Surfactants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 317-327. doi: 10.17277/vestnik. 2024.02.pp.317-327 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Karge H.G., Weitkamp J. *Adsorption and Diffusion*, Molecular Sieves – Science and Technology, 2008, vol. 7, 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1

15. Yagodovskiy V.D. *Adsorbtsiya: uchebnoye posobiye dlya studentov* [Adsorption: A Textbook for Students], Moscow: Binom; Lab. znaniy, 2015, 216 p. (In Russ.)

16. Yampol'skiy Yu.P. [Methods for Studying Free Volume in Polymers], *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2007, vol. 76, no. 1, pp. 66-87. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Golovashin V.L., Kovalev S.V., Lazarev K.S., Chepenyak P.A. [Sorption Characteristics of Reverse Osmosis Membranes], *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and Chromatographic Processes], 2010, vol. 10, no. 2, pp. 201-207. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Neugodova N.P., Dolgova G.V., Sapozhnikova G.A. [et al.], [Modern Trends in Membrane Nanofiltration of Biopharmaceutical Products. Part 3. Methods for Ensuring the Safety of Filter Elements], *Membrany* [Membranes], 2008, no. 2(38), pp. 14-17. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and process efficiency of electrochemical membrane wastewater separation at treatment facilities], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Lavrenchenko A.A., Arzamastsev A.A., Rodionov D.A. [Equilibrium distribution coefficient and surface force field potential of ultrafiltration membranes in biochemical production solutions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 87-95. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.087-095 (In Russ., abstract in Eng.)

Experimentelle Untersuchungen und Berechnung der Elektrosorptionsaktivität der Polymermembranen OPMN-K und AMN-P in wässrigen Lösungen von Calciumchlorid und -acetat

Zusammenfassung: Die kinetischen Koeffizienten der Elektromembrantrennung bei der Reinigung von Prozesslösungen für die Pigmentherstellung sind experimentell untersucht. Untersuchungsobjekte sind Prozesslösungen mit Calciumchlorid und Acetat sowie semipermeable Membranen aus Celluloseacetat und Polymeren mit unterschiedlichen selektiven Permeabilitätseigenschaften. Der Einfluss der Transmembranparameter des Elektromembrantrennprozesses auf die wichtigsten kinetischen Eigenschaften der Membranen OPMN-K und AMN-P während der Reinigung der Prozesslösungen ist analysiert. Es ist die Analyse des Einflusses der Transmembranparameter auf die kinetischen Abhängigkeiten des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten von Celluloseacetat- und Polyamidmembranen vorgestellt. Näherungsformeln für die theoretische Berechnung des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten in Abhängigkeit von den physikochemischen Eigenschaften des semipermeablen Membranmaterials, der Stromdichte sowie der Konzentration und Temperatur der Prozesslösung sind hergeleitet. Es sind numerische Werte für empirische Koeffizienten ermittelt, die es ermöglichen, die Werte des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten zu berechnen und vorherzusagen. Diese können bei der Auslegung von Labor-, Pilot- und Industrieanlagen verwendet werden, die in industriellen Prozessen zur Trennung, Reinigung und Konzentration von Industrie- und Abwasser eingesetzt werden.

Études expérimentales et calcul de l'activité électro-sorbiente des membranes polymériques OPMN-K et AMN-P dans des solutions aqueuses de chlorure et acétate de calcium

Résumé: Sont étudiés expérimentalement les coefficients cinétiques de la méthode électromémbrane dans le processus de la purification des solutions technologiques des industries pigmentaires. Les objets de recherche examinés sont des solutions technologiques contenant du chlorure et de l'acétate de calcium, ainsi que des membranes semi-perméables à la base de cellulose acétate et de polymères présentant de différentes caractéristiques de perméabilité sélective. Est étudiée l'influence des paramètres transmembranaux du processus de la séparation électromémbrane sur les principales caractéristiques cinétiques des membranes OPMN-K et AMN-P lors de la purification des solutions technologiques de la production des matières pigmentaires. Est présentée une analyse de l'influence des paramètres transmembranaux sur les dépendances cinématiques du coefficient de la distribution à l'équilibre des membranes à la base de cellulose acétate et de polyamide. Sont obtenues des expressions d'approximation pour le calcul théorique du coefficient de la distribution d'équilibre en fonction de la base physico-chimique du matériau de la membrane semi-perméable, de la densité de courant, de la concentration et de la température de la solution technologique. Sont établies des valeurs numériques des coefficients empiriques pour calculer et prévoir les valeurs du coefficient de la répartition à l'équilibre qui peuvent être utilisées dans la conception des installations de laboratoire, pilotes et industrielles utilisées dans les procédés de production de séparation, de traitement et de concentration des eaux usées et des procédés industriels.

Авторы: ***Горшенина Виктория Александровна*** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Абоносимов Олег Аркадьевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Лазарев Сергей Иванович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; ***Баронин Геннадий Сергеевич*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Брянкин Константин Вячеславович*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; ***Зарапина Ирина Вячеславовна*** – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; ***Соколов Михаил Владимирович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация, ***Бернацкий Павел Николаевич*** – доктор химических наук, доцент, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация.