

С. И. Лазарев, М. А. Истомина, О. В. Долгова,
И. В. Гутник

АНАЛИЗ СОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ МЕМБРАН ОПМН-П, ОФАМ-К И АМН-П В ПРОЦЕССЕ НАНОФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ ОЧИСТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ключевые слова: нанофильтрационные мембраны, ионы металлов, концентрация растворов, коэффициент распределения, уравнение Фрейндлиха.

В производственных процессах образуются растворы, которые для их последующего использования в промышленных целях необходимо очищать и концентрировать. Для выполнения данных технологических операций рассматриваются возможности использования нанофильтрационного разделения, где применяются полупроницаемые мембраны, способные сорбировать ионы металлов, содержащихся в промышленных растворах производств. Целью работы явилось выполнение экспериментальных исследований анализа сорбционной емкости нанофильтрационных мембран ОПМН-П, ОФАМ-К и АМН-П в промышленных растворах, содержащих ионы металлов железа, цинка, никеля, кадмия, меди и марганца. Представлены результаты экспериментальных исследований и расчетные значения, по оценке эффективности сорбции нанофильтрационных мембран типов ОПМН-П, ОФАМ-К и АМН-П при удалении ионов металлов разной концентрации из производственных сточных растворов. Результаты анализа сорбционной емкости показали неоднородное поведение мембран относительно разных ионов металлов. Среди исследованных образцов мембрана ОПМН-П показала наибольшую эффективность очистки от катионов металлов по сравнению с мембранами ОФАМ-К и АМН-П. Максимальное извлечение ионов было достигнуто для марганца на мембранах ОПМН-П и АМН-П, тогда как наилучшие показатели удаления ионов меди наблюдались на мембране ОФАМ-К. Рассчитаны коэффициенты распределения ионов металлов согласно уравнению Фрейндлиха, определены конкретные эмпирические коэффициенты для каждой мембраны и типа иона, что даёт возможность предсказывать распределение ионов других металлов. Разница между теоретическими расчётами и экспериментальными данными составляет менее 6% в подавляющем числе случаев, что подтверждает точность выбранных расчетных моделей и обоснованность механизмов, используемых для описания сорбционного процесса.

S. I. Lazarev, M. A. Istomina, O. V. Dolgova,
I. V. Gutnik

ANALYSIS OF THE SORPTION CAPACITY OF OPMN-P, OFAM-K, AND AMN-P MEMBRANES IN THE PROCESS OF NANOFILTRATION SEPARATION OF INDUSTRIAL SOLUTIONS OF PURIFICATION ENTERPRISES

Keywords: nanofiltration membranes, metal ions, concentration of solutions, partition coefficient, Freundlich equation.

In production processes, solutions are formed, which must be purified and concentrated for their subsequent use for industrial purposes. To perform these technological operations, the possibilities of using nanofiltration separation are being considered, where semi-permeable membranes capable of sorbing metal ions contained in industrial solutions are used. The aim of the work was to perform experimental studies of the sorption capacity of OPMN-P, OFAM-K and AMN-P nanofiltration membranes in industrial solutions containing metal ions of iron, zinc, nickel, cadmium, copper and manganese. The results of experimental studies and calculated values for evaluating the sorption efficiency of nanofiltration membranes of the OPMN-P, OFAM-K and AMN-P types when removing metal ions of different concentrations from industrial wastewater solutions are presented. The results of the sorption tank analysis showed the heterogeneous behavior of the membranes relative to different metal ions. Among the studied samples, the OPMN-P membrane showed the highest efficiency of purification from metal cations compared to the OPAM-K and AMN-P membranes. The maximum extraction of ions was achieved for manganese on the OPMN-P and AMN-P membranes, while the best removal of copper ions was observed on the OPAM-K membrane. The distribution coefficients of metal ions are calculated according to the Freundlich equation, and specific empirical coefficients for each membrane and ion type are determined, which makes it possible to predict the distribution of ions of other metals. The difference between theoretical calculations and experimental data is less than 6% in the vast majority of cases, which confirms the accuracy of the selected computational models and the validity of the mechanisms used to describe the sorption process.

Введение

Баромембранные методы разделения и концентрирования промышленных растворов являются в настоящее время интенсивно развивающейся технологией и занимают авангардное значение в XXI веке [1]. Для расширения возможности применения баромембранной технологии необходимо проводить ис-

следования и особенно значение придаются исследованиям, направленные на определение кинетических характеристик процесса.

Из большого числа баромембранных процессов лидирующее положение занимает нанофильтрация, которая позволяет на молекулярном уровне, без фазовых превращений разделять растворы на компоненты при низком трансмембранном давлении [2]. Так, в исследовании [3], авторы изучают особенности нанофильтрационных и ультра-фильтрационных

мембран, ранее применявшихся исключительно в баромембранных методиках, теперь же широко используемых в электромембранных и комбинированных бароэлектромембранных процессах, где одновременно действуют два фактора – электрическое поле и давление. В работе представлен набор экспериментально определенных характеристик, а именно удельной проводимости, коэффициента диффузии, чисел переноса ионов, а также вольтамперных характеристик и хронопотенциограмм слабоионизированных наночистот мембран типов АМН-П, ОПМН-П и нескольких образцов трековых мембран в солевых растворах NaCl и CaCl₂. Анализируется взаимосвязь полученных данных с характеристиками структуры и обменной емкости мембран. Установлено, что как наночистотные, так и трековые мембраны способны эффективно избирательно пропускать ионы конкретного знака заряда, особенно ярко данный эффект наблюдается для ионов кальция (Ca²⁺), чей показатель транспорта приближается к 0,98 и существенно превосходит аналогичный показатель для ионов натрия (Na⁺).

Работа [4] посвящена изучению влияния типа осадителя на эксплуатационные характеристики целлюлозных мембран, изготовленных из растворов в ацетате 1-этил-3-метилимидазолия ([Emim]Ac), либо его смеси с диметилсульфоксидом (ДМСО). Процесс формирования плотных структур целлюлозных мембран показал, что использование чистой воды в качестве осадителя приводит к формированию наименее проницаемых мембран с низким показателем пропускания диметилформамида (РДМФ=0,25 кг/(м²·ч·атм)) и высоким уровнем удержания тестируемых примесей – около 65 и 82%, соответственно. Модификация состава осадителей увеличивала показатели проницаемости мембран примерно вдвое, сохраняя высокий уровень показателей удерживания веществ. Лучшие эксплуатационные характеристики получены на мембране, сформированной путем осаждения в 30%-ном водноуксуснокислом растворе: РДМФ=0,67 кг/(м²·ч·атм); эффективность задерживания красителей Orange II и Remazol достигла 66 и 78%.

В статье [5] описан способ изготовления композиционной наночистотной мембраны нейлон-АЦ посредством погружения микропористой нейлоновой основы в 3%-ный раствор ацетата целлюлозы (АЦ) в ацетоне. Поверхностное покрытие АЦ снижает пористость исходной нейлоновой мембраны, делая её гладким и менее пористым материалом. Экспериментально установлено, что применение композитной мембраны нейлон-АЦ3 позволило достичь уровня производительности фильтрования бытовых сточных вод в 39,7 л/(м²·ч) при рабочем давлении 0,7 МПа. Исследования показали, что степень очистки с использованием мембраны нейлон-АЦ3 составляет порядка 64,5%. Эта мембрана демонстрирует хорошую селективность к многовалентным ионам (около 70%) и обеспечивает высокий процент удаления загрязняющих веществ, оцениваемый показателями химической потребности кислорода (ХПК) и биологической потребности кислорода (БПК₅) – около 92%, что сопоставимо с эффективностью коммерческих аналогов.

Исследователи [6] предлагают новые подходы к переработке минерализованных промышленных отходов с использованием методов обратного осмоса и наночистотации. Особое внимание уделено экологической опасности концентрированных отходов, образующихся при обратном осмосе, отличающихся значительным содержанием солей и органики, что усложняет процесс утилизации. Авторы предлагают осуществлять дополнительную обработку такого концентрированного отхода, используя наночистотные мембраны для разделения на фракции, различающиеся по величине удерживаемых компонент. Приведен пример технологии переработки соледержащих стоков установок ионитового смягчения воды, содержащих соли натрия и кальция, демонстрирующий возможность извлечения из многокомпонентных растворов высококонцентрированных фракций NaCl и CaCl₂, пригодных для повторного промышленного использования. Технология включает стадию разбавления концентрата дионизированной водой перед наночистотацией, позволяющую достигать эффективного разделения раствора на отдельные составляющие, благодаря различной селективности задерживающих мембран.

В статье [7] авторами получены композитные ионообменные мембраны, содержащие частицы катионита, методом погружения подложки в раствор ацетата целлюлозы (АЦ) в ацетоне. Выявлено, что с увеличением в ацетоне концентрации АЦ, размер частиц последних увеличивается. Выявлено, что в результате погружения подложки в раствор АЦ в ацетоне, поверхность и поры подложки покрываются ультратонким слоем из АЦ. Определены некоторые физико-химические показатели полученных композиционных мембран (водопоглощение, краевой угол смачивания каплей дистиллированной воды). Выявлено, что в результате нанесения ионообменного компонента, увеличивается водопоглощение и снижается значение краевого угла смачивания полученных экспериментальных мембран. Определены размеры пор композиционных мембран, которые составили менее 1 мкм. Определены параметры мембранного разделения с использованием синтезированных композиционных мембран по дистиллированной и водопроводной воде. Найдено, что удельная производительность композитных мембран с увеличением количества слоев АЦ на бумажной основе уменьшается, но выше по сравнению с таковым показателем промышленной наночистотной мембраны марки «ОПМН-П». В своей работе [8] исследователи провели экспериментальное изучение способности слабодиссоциирующих наночистотных мембран марок ОПМН-П и ОПМН-К производства предприятия «Владипор» (г. Владимир) поглощать тяжелые металлы (Cu²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Co²⁺) из технологического раствора. Они разработали специальную методику исследований и создали установку для изучения электрической сорбционной емкости мембран. Ученые установили зависимость сорбционного и электростатического захвата ионов тяжелых металлов этими мембранами от их концентрации в растворе. Полученные ими графики демонстрируют снижение

коэффициента распределения для каждого типа исследуемых ионов с увеличением концентрации. Объясняется этот феномен тем, что поры постепенно забиваются адсорбируемым веществом, уменьшаясь в объёме. Самые мелкие поры становятся практически полностью заблокированы молекулами, что препятствует дальнейшему транспорту воды.

В работе [9] авторы исследовали самодельный ионный гель, предназначенный для улучшения характеристик композитных материалов, изготовленных из поливинилового спирта и целлюлозных нановолокон, путём добавления ионных жидкостей (ИЖ) на основе имидазолия. Были проведены испытания на термическую стабильность и электрохимический анализ. На основании полученных результатов было выбрано оптимальное соотношение добавления ИЖ для дальнейших экспериментов. Анализ синтезированных гелей показал, что некоторые ионы металлов в качестве модифицирующих добавок могут эффективно повышать термическую стабильность. Образец, содержащий 2.0 % по массе 1-этил-3-метилимидазолия *p*-толуолсульфоната ([Emim][TOS]), продемонстрировал оптимальную ионную проводимость, достигающую 0.054 мСм^{-1} . В статье [10] представлены результаты экспериментов по очистке модельных растворов и реальных стоков от соединений хрома при применении нанофильтрационных плоских мембран из полисульфона с разными концентрациями загрязнений. Показано, что во всех случаях степень очистки превышает 98%. Подтверждена высокая эффективность комбинации методов ультрафильтрации и нанофильтрации, позволяющих обеспечить высокий уровень очистки воды и возможность реализации замкнутых циклов оборотного водоснабжения.

Авторами исследования [11] изучено взаимодействие различных экстрагентов полярных и не полярный (диметилсульфоксида, диметилформамида, толуола, метаксилола и других) с материалом PIM-1. Рассчитаны коэффициенты массопереноса указанных растворителей в условиях нанофильтрации органических веществ. Полученные данные свидетельствуют о хорошем взаимодействии всех рассматриваемых растворителей с полимером PIM-1. Наибольшее количество поглощенного вещества и наибольший процент набухания наблюдались для бензола (1.63 г/г, 192%), толуола (1.72 г/г, 186%) и ксилолов (1.61–1.76 г/г, 147–170%). Для полярных растворителей соответствующие показатели составили 1.09–1.48 г/г и 83–108%. Установлено, что значения сорбции и степени набухания коррелируют с показателями растворимости Хансена. Коэффициенты проницаемости неполярных растворителей через мембраны на основе PIM-1 оказались в 1.5–5.5 раза выше аналогичных показателей для полярных растворителей.

Авторами работы [12] методом динамического изменения давления исследовали транспортные свойства материалов на основе полисульфона с добавлением оксида графена с шагом 0.1% и изменением его концентрации от 0 до 0.5%. Определены проницаемости мембран при давлениях 3–7 МПа и обнаружены нелинейные изменения в их транспорт-

ных свойствах. Установлено, что формирование углеродных структур в гидрофобном полимере делает его проницаемым для воды и что проницаемость таких полимеров зависит нелинейно от концентрации внедренных в них частиц графена, что может быть объяснено в рамках перколяционного подхода. Полученные результаты позволяют ответить на фундаментальные вопросы о механизмах переноса сплошных сред через композиционные материалы и неоднородные структуры. Статья [13] посвящена рассмотрению эффективности метода мембранной очистки сточных вод от тяжелых металлов, включая процессы нанофильтрации и обратного осмоса. Проведённые эксперименты позволили выявить влияние ключевых технологических факторов на селективность и производительность нанофильтрационных и обратноосмотических мембран при удалении ионов металлов (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+}). Была установлена изоэлектрическая точка, соответствующая минимальному уровню селективности используемой нанофильтрационной мембраны при обработке сточных вод, загрязнённых ионами марганца.

Приведенный выше обзор научных исследований подтверждает важность экспериментального определения сорбционной емкости мембран при прогнозировании их массопередающих свойств, поскольку значение этой характеристики зачастую возможно получить только экспериментально. Исходя из этого, основной целью исследования заключалось проведение экспериментального анализа сорбционной емкости нанофильтрационных мембран марок ОПМН-П, ОФМН-К и АМН-П для реальных производственных растворов, содержащими ионы железа, цинка, никеля, кадмия, меди и марганца. Расчетными методами определены коэффициенты распределения с помощью уравнения Фрейндлиха и установлены конкретные численные значения эмпирических коэффициентов для каждой мембраны и иона исследуемого металла.

Эксперименты и расчеты

В качестве объектов исследования использовались нанофильтрационные мембраны ОПМН-П, ОФМН-К и АМН-П отечественного производства, широко применяемые в промышленности для очистки сточных вод. Данные мембраны представляют собой вакуольные с губчатой прослойкой полимерные пленки на полиамидной основе [14]. Краткие характеристики используемых в исследовании мембран представлены в таблице 1.

Исследование сорбционной емкости выбранных мембран было проведено с применением метода переменных концентраций [8]. В экспериментах использовался раствор сточной воды, загрязненной металлами, поступающий на очистные сооружения. Исходные концентрации металлов в растворе представлены в таблице 2.

Загрязненную металлами исследуемую сточную воду наливали в емкость, объем воды составлял 40 мл, далее в емкость помещали заранее подготовленные образцы мембран размером 20 на 20 мм. Мембраны выдерживали в сточной воде при постоянной

температуре ($T=295^{\circ}\text{K}$) в течение 24 часов. После чего повторно определялась концентрация металлов в растворе, по полученным значениям рассчитывали концентрацию исследуемых металлов в образце мембраны.

Таблица 1 - Рабочие характеристики нанофильтрационных мембран

Table 1 - Performance characteristics of nanofiltration membranes

Рабочие характеристики мембран	Тип мембраны		
	АМН-П [15]	ОФАМ-К [16]	ОПМН-П [17]
Рабочее давление, МПа	1.6	3	1.6
Минимальная производительность по воде, при $T=298\text{ K}$, $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$	$1.66\cdot 10^{-5}$	$2.22\cdot 10^{-5}$	$2.77\cdot 10^{-5}$
Коэффициент задержания по 0,15% NaCl, не менее	-	0,95	0,55
Максимальная температура, К	318	323	323
Рабочий диапазон pH	3–8	2–12	2–12

Сорбционную емкость мембран оценивали по значению равновесного коэффициента распределения, рассчитанного на основании данных, полученных экспериментальным путем, по формуле (1), как отношение концентрации целевого иона в мембране после эксперимента и в исходном растворе [8, 18]:

$$K_p = C_m / C_{исх} \quad (1)$$

где C_m – концентрация целевого иона в мембране, моль/л; $C_{исх}$ – исходная концентрация целевого иона в исходном растворе, моль/л.

Таблица 2 – Исходные концентрации металлов в исследуемом растворе

Table 2 – Initial concentrations of metals in the test solution

Вещество	Концентрация, мг/л	Концентрация, моль/дм ³
Кадмий	0.00048	$4.27\cdot 10^{-9}$
Никель	0.0213	$362.9\cdot 10^{-9}$
Медь	0.0221	$347.78\cdot 10^{-9}$
Цинк	0.0202	$308.96\cdot 10^{-9}$
Марганец	0.011	$200.226\cdot 10^{-9}$

Для теоретического расчета равновесного коэффициента распределения было использовано аппроксимационное уравнение на основе уравнения Фрейндлиха [19, 20]:

$$K_p = \frac{b \cdot C_{исх}^n \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^m}{C_{исх}}, \quad (2)$$

где b , n , m – эмпирические коэффициенты, T_0 – нормальная температура, равная 273 К, T – температура раствора, К.

Результаты и обсуждения

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, значения эмпирических коэффициентов и расчетные равновесные коэффициенты концентрации для трех видов исследуемых мембран представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований и расчетные значения коэффициентов концентрации

Table 3 - Experimental research results and calculated values of concentration coefficients

Мембрана	Вещество	C_m , моль/л	b	n	m	$K_{p\text{расч}}$	$K_{p\text{экс}}$	ΔK_p , %
ОПМН-П	Кадмий	$0.89\cdot 10^{-9}$	9.4	1.2	0.01	0.199	0.208	4.52
	Никель	$20.32\cdot 10^{-9}$	4.7	1.3	0.1	0.054	0.056	3.70
	Медь	$141.55\cdot 10^{-9}$	17.96	1.231	4.56	0.406	0.407	0.25
	Цинк	$76.62\cdot 10^{-9}$	4.14	1.19	0.1	0.238	0.248	4.20
	Марганец	$91.10\cdot 10^{-9}$	28.15	1.27	0.001	0.437	0.455	4.12
ОФАМ-К	Кадмий	$0.99\cdot 10^{-9}$	9.6	1.19	0.01	0.246	0.232	5.69
	Никель	$30.48\cdot 10^{-9}$	4.6	1.27	0.1	0.083	0.084	1.20
	Медь	$241.71\cdot 10^{-9}$	18.06	1.2	3.6	0.698	0.695	0.43
	Цинк	$86.51\cdot 10^{-9}$	5.03	1.19	0.09	0.289	0.280	3.11
	Марганец	$100.91\cdot 10^{-9}$	20.1	1.239	0.001	0.504	0.504	0.00
АМН-П	Кадмий	$0.79\cdot 10^{-9}$	12.9	1.22	0.1	0.184	0.185	0.54
	Никель	$14.52\cdot 10^{-9}$	3.4	1.3	0.1	0.039	0.040	2.56
	Медь	$51.47\cdot 10^{-9}$	0.2	1	4.01	0.147	0.148	0.68
	Цинк	$66.43\cdot 10^{-9}$	4.96	1.2	1.9	0.214	0.215	0.47
	Марганец	$81.09\cdot 10^{-9}$	25.9	1.27	0.001	0.402	0.405	0.75

Для наглядности сравнение коэффициентов концентрации, полученных экспериментальным путем и расчетным методом, для каждого металла, присутствующего в растворе, представлены на рис. 1, 2, 3 в виде гистограмм.

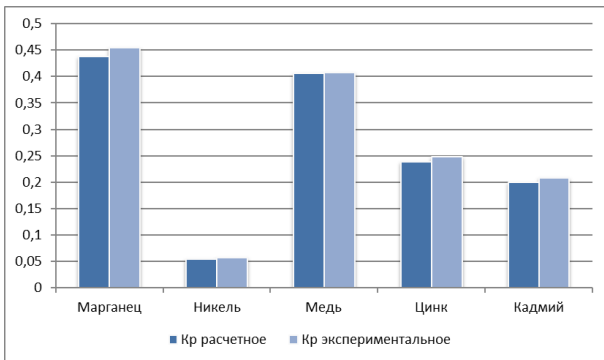


Рис. 1 – Коэффициенты концентрации (расчетный и экспериментальный) мембрана ОПМН-П

Fig. 1 – Concentration coefficients (calculated and experimental) OPMN-P membrane

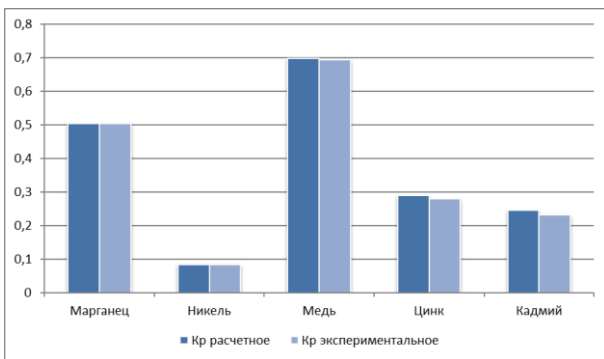


Рис. 2 - Коэффициенты концентрации (расчетный и экспериментальный) мембрана ОФАМ-К

Fig. 2 - Concentration coefficients (calculated and experimental) OFAM-K membrane

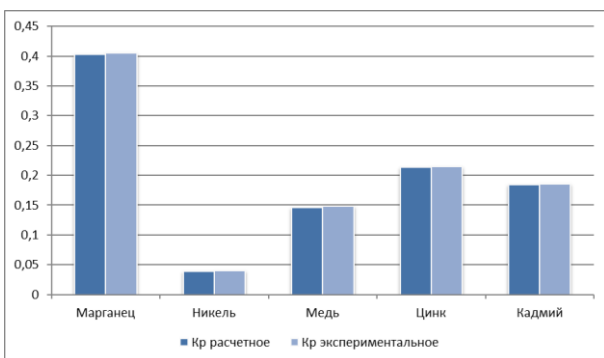


Рис. 3 - Коэффициенты концентрации (расчетный и экспериментальный) мембрана АМН-П

Fig. 3 - Concentration coefficients (calculated and experimental) AMN-P membrane

На гистограммах можно наблюдать, что зависимость между концентрацией металла в растворе и сорбционной емкостью мембран отсутствует. Так для никеля, меди и цинка, концентрации которых в исследуемом растворе схожи (как массовые, так и

мольные), получены отличные значения коэффициентов распределения. Сорбционная емкость никеля по сравнению с медью почти в 8 раз ниже для мембран ОПМН-П и ОФАМ-К, а для мембраны АМН-П в 5 раз. Сорбционная емкость мембран по цинку так же значительно отличается от значений, установленных для меди и никеля. Высокие результаты сорбции получены для марганца на всех исследуемых мембранах, несмотря на его низкую концентрацию в растворе (в более чем 40 раз ниже концентрации меди, никеля и цинка). Для мембран ОПМН-П и ОФАМ-К получены схожие коэффициенты концентрации, из общей картины выпадает только медь, сорбция ионов которой максимальна на мембране ОФАМ-К. Мембрана АМН-П показала наименьшие значения коэффициентов распределения для всех металлов, присутствующих в растворе. Значительно падает сорбция меди по сравнению с двумя другими мембранами, при этом сорбция других металлов остаются на уровне мембраны ОПМН-П. Как мы видим из рисунков 1, 2 и 3 вероятно на значения коэффициента распределения оказывает влияния не только вид металла, но и ряд других параметров рассматриваемой системы мембрана – раствор. К таким параметрам относятся многокомпонентность, концентрация ионов металла в многокомпонентной системе, влияния межмолекулярного взаимодействия между ионами металлов.

Расхождение между значениями коэффициентов концентрации, полученных экспериментальным и эмпирическим путем (на основании уравнения Фрейндлиха) не превышает 6% для всех исследуемых мембран и металлов, входящих в состав промышленного раствора. Стабильно высокая сходимость результатов получена для меди, расхождение менее 1% для всех мембран. Наименьшие отклонения в значениях экспериментальных и расчетных коэффициентов концентрации для всех металлов получены на мембране АМН-П.

Заключение

Экспериментально исследованы, интерпретированы и теоретически рассчитаны данные по сорбционной способности полупроницаемых мембран ОПМН-П, ОФАМ-К и АМН-П в виде равновесных коэффициентов распределения по ионам металлов железа, цинка, никеля, кадмия, меди и марганца для промышленных растворов очистных предприятий, что позволяет сделать следующие выводы:

1. Экспериментально полученные данные по сорбционной емкости нанофильтрационных мембран, наглядно продемонстрировали различную сорбционную способность мембран ОПМН-П, ОФАМ-К и АМН-П в зависимости от вида иона металла. Наибольшую сорбционную способность проявляют нанофильтрационные мембраны ОПМН-П и АМН-П по ионам марганца, а мембрана ОФАМ-К по ионам меди. Наименьшую сорбционную способность нанофильтрационные мембраны ОПМН-П, ОФАМ-К проявляют по ионам никеля.

2. Проведены расчеты коэффициентов распределения для нанофильтрационных мембран типов

ОПМН-П, ОФАМ-К и АМН-П применительно к водным растворам очистных сооружений, содержащим ионы металлов (железа, цинка, никеля, кадмия, меди и марганца). Численные значения эмпирических коэффициентов определялись путем решения уравнения Фрейндлиха отдельно для каждого типа мембраны и конкретного металлического иона. Установлено, что расхождение между результатами расчетов и данными эксперимента составляет менее 6%, что подтверждает надежность предложенной методики расчета и позволяет применять её для прогнозирования процессов сорбции ионов металлов вышеуказанными мембранами из промышленных растворов очистных установок.

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

Литература

1. Н. А. Платэ, *Крит. технологии. Мембраны*, **1**, 4-13 (1999).
2. Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, П. Луа, Е. И. Горелова, О. А. Ковалева, М. И. Михайлин, А. А. Левин, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, **26**, 2, 270-283 (2020). DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.270-283
3. В.В. Сарапулова, Е.Л. Пасечная, В.Д. Титорова, Н.Д. Письменская, П.Ю. Апель, В.В. Никоненко, *Мембраны и мембранные технологии*, **10**, 5, 350-370 (2020). DOI: 10.1134/S2218117220050065
4. Т.С. Анохина, В.Я. Игнатенко, А.В. Костюк, С.О. Ильин, А.В. Волков, С.В. Антонов, *Мембраны и мембранные технологии*, **10**, 3, 153-164 (2020). DOI: 10.1134/S2218117220030025
5. Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В., Дряхлов В.О., Фазуллина Л.И., Шайхiev И.Г., Головнина Е.А. *Мембраны и мембранные технологии*, **11**, 5, 345-359 (2021). DOI: 10.1134/S2218117221060031
6. Г.А. Первов, В.Д. Спицов, М.Ж. Говорова, *Мембраны и мембранные технологии*, **11**, 6, 469-476 (2021). DOI: 10.1134/S2218117221050096
7. Д.Д. Фазуллин, Л.И. Фазуллина, Г.В. Маврин, И.Г. Шайхiev, *Вестник технологического университета*, **25**, 1, 56-60 (2022)
8. И.В. Хорохорина, *Вестник технологического университета*, **23**, 3, 67-70 (2020).
9. G.L. Chen, S.W. Liao, G.S. Guo, C.M. Shu, *J Therm Anal Calorim*, **150**, 8745-8757 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14067-1>.
10. И.Г. Чигаев, *Ползуновский вестник*, **1**, 125-130 (2021). DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.017. – EDN WDVTP.T.
11. А.А. Юшкин, Т.С. Анохина, С.Д. Баженов, И.Л. Борисов, Р.М. Budd, А.В. Волков, *Мембраны и мембранные технологии*, **8**, 6, 434-439 (2018). DOI: 10.1134/S2218117218060111
12. А.С. Гиззатов, Ю.С. Еремин, А.М. Грехов, *Инженерно-физический журнал*, **98**, 6, 1619-1625 (2025).
13. М.М. Лин, Г. Г. Каграманов, *Экология и промышленность РФ*, **29**, 12, 28-31 (2025). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-12-28-31>
14. Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (дата обращения: 07.02.2026).
15. А.Е. Улюкина, С.С. Гусев, С.А. Свиридов, Д.Н. Блинов, П.Н. Попова, *Агроинженерия*, **27**, 6, 45-51 (2025). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-45-51>
16. Д.Н. Коновалов, С.И. Лазарев, К.К. Полянский, *Инженерно-физический журнал*, **97**, 2, 432-438 (2024).
17. М.Г. Киясова, А.В. Ломакина, А.О. Абоносимов, Т.Ю. Селиванов, В.Н. Шель, В.К. Брянкин, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, **30**, 4, 670-680 (2024). DOI: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.670-680
18. О.А. Абоносимов, *Вестник Западно-Казахстанского инновационно-технологического университета*, **33**, 1, 183-192 (2025). DOI: 10.62724/202510301
19. А.А. Антипова, К.В. Шестаков, С.И. Лазарев, *Вестник Технологического университета*, **28**, 8, 14-20 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_14
20. В. Ю. Богомолов, С. И. Лазарев, К. К. Полянский, А. Е. Стрельников, *Сорбционные и хроматографические процессы*, **18**, 1, 104-110 (2018).

References

1. N. A. Plate, *Critical technologies. Membranes*, **1**, 4-13 (1999).
2. D. N. Kononov, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev, P. Lua, E. I. Gorelova, O. A. Kovaleva, M. I. Mikhailin, A. A. Levin, *Bulletin of Tambov State Technical University*, **26**, 2, 270-283 (2020). DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.270-283
3. V.V. Sarapulova, E.L. Pasechnaya, V.D. Titorova, N.D. Pisenskaya, P.Yu. Apel, V.V. Nikonenko, *Membranes and membrane technologies*, **10**, 5, 350-370 (2020). DOI: 10.1134/S2218117220050065
4. T.S. Anokhina, V.Ya. Ignatenko, A.V. Kostyuk, S.O. Ilyin, A.V. Volkov, S.V. Antonov, *Membranes and membrane technologies*, **10**, 3, 153-164 (2020). DOI: 10.1134/S2218117220030025
5. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Dryakhlov V.O., Fazullina L.I., Shaikhiev I.G., Golovkina E.A. *Membranes and membrane technologies*, **11**, 5, 345-359 (2021). DOI: 10.1134/S2218117221060031
6. G.A. Pervov, V.D. Spitsov, M.J. Govorova, *Membranes and membrane technologies*, **11**, 6, 469-476 (2021). DOI: 10.1134/S2218117221050096
7. D.D. Fazullin, L.I. Fazullina, G.V. Mavrin, I.G. Shaikhiev, *Herald of Technological University*, **25**, 1, 56-60 (2022)
8. I.V. Khorokhorina, *Herald of Technological University*, **23**, 3, 67-70 (2020).
9. G.L. Chen, S.W. Liao, G.S. Guo, C.M. Shu, *J Therm Anal Calorim*, **150**, 8745-8757 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14067-1>
10. I.G. Chigaev, *Polzunovsky Bulletin*, **1**, 125-130 (2021). DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.017. – EDN WDVTP.T.
11. A.A. Yushkin, T.S. Anokhina, S.D. Bazhenov, I.L. Borisov, P.M. Budd, A.V. Volkov, *Membranes and membrane technologies*, **8**, 6, 434-439 (2018). DOI: 10.1134/S2218117218060111
12. A.S. Gizzatov, Yu.S. Eremin, A.M. Grekhov, *Engineering Physics Journal*, **98**, 6, 1619-1625 (2025).
13. M.M. Lin, G. G. Kagramanov, *Ecology and Industry of the Russian Federation*, **29**, 12, 28-31 (2025). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-12-28-31>
14. Vladipor: website of CJSC NTC Vladipor. [electronic resource]. URL: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (date of access: 02/07/2026).

15. A.E. Ulyukina, S.S. Gusev, S.A. Sviridov, D.N. Blinov, P.N. Popova, *Agroengineering*, **27**, 6, 45-51 (2025). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-45-51>
16. D.N. Konovalov, S.I. Lazarev, K.K. Polyansky, *Engineering and Physics Journal*, **97**, 2, 432-438 (2024).
17. M.G. Kiyasova, A.V. Lomakina, A.O. Abonosimov, T.Y. Selivanov, V.N. Shel, V.K. Bryankin, *Bulletin of Tambov State Technical University*, **30**, 4, 670-680 (2024). DOI: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.670-680
18. O.A. Abonosimov, *Bulletin of the West Kazakhstan University of Innovation and Technology*, **33**, 1, 183-192 (2025). DOI: 10.62724/202510301
19. A.A. Antipova, K.V. Shestakov, S.I. Lazarev, *Herald of Technological University*, **28**, 8, 14-20. (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_14
20. V. Y. Bogomolov, S. I. Lazarev, K. K. Polyansky, A. E. Strelnikov, *Sorption and chromatographic processes*, **18**, 1, 104-110 (2018).

© **С. И. Лазарев** – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Механика и инженерная графика», Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия, e-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru; **М. А. Истомина** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ТГТУ, e-mail: hrebtova1997@gmail.com ; **О. В. Долгова** – к.т.н., доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды» ТГТУ, e-mail: o.v.dolgova@mail.ru; **И. В. Гутник** - к.т.н., доцент кафедры «Инжиниринг нанотехнологий», ТГТУ, e-mail: i.v.gutnik@yandex.ru.

© **S. I. Lazarev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Full Professor, Head of the Mechanics and Engineering Graphics department, Tambov State Technical University (TSTU), Tambov, Russia, e-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru; **M. A. Istomina** – PhD-student of the Mechanics and engineering graphics department, TSTU, e-mail: hrebtova1997@gmail.com; **O. V. Dolgova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Nature Management and Environmental Protection department, TSTU, e-mail: o.v.dolgova@mail.ru; **I. V. Gutnik** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Nanotechnology Engineering department, TSTU, e-mail: i.v.gutnik@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 08.04.26.