Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-2-134-142 Оригинальная статья/Research article
УДК 66.081.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля

Валерия А. Семилетова [1] semiletovatstu@gmail.ru
Константин В. Шестаков [1] kostyanshestakov@mail.ru
Сергей И. Лазарев [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru
Константин К. Полянский [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-8817-1466

1 Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия
2 Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Электродиализ (ЭД) представляет собой перспективный метод очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов, в частности никеля (Ni^{2+}). В данной работе исследована кинетика процесса электродиализа с использованием анионо- и катионообменных мембран (МА-41П и МК-40Л) для удаления Ni^{2+} из растворов с начальными концентрациями от 40 до 160 мг/л. Установлено, что эффективность очистки достигает 99,3%, что подтверждает высокую селективность метода. Ключевым фактором, влияющим на скорость и эффективность процесса, является плотность тока. Оптимальное значение 20 А/м² обеспечивает баланс между высокой степенью очистки и энергозатратами. Увеличение плотности тока свыше этого значения не приводит к значительному росту эффективности, но существенно повышает расход электроэнергии. Кроме того, показано, что при высокой начальной концентрации никеля (160 мг/л) процесс замедляется из-за насыщения мембран и возможного образования осадков. Важным аспектом исследования стал анализ электродиффузионной проницаемости мембран. Установлено, что с ростом плотности тока коэффициент проницаемости снижается на 55%, что связано с увеличением градиента концентрации и изменением свойств мембраны под воздействием электрического поля. На основе экспериментальных данных предложена технологическая схема очистки промышленных стоков, включающая этапы нейтрализации, электродиализа и утилизации концентрата. Очищенная вода может быть возвращена в производственный цикл, а никельсодержащий концентрат — переработан для повторного использования. Результаты работы демонстрируют высокую эффективность электродиализа для очистки сточных вод от никеля и могут быть использованы для оптимизации промышленных процессов с учетом экономических и экологических требований.

Ключевые слова: электродиализ, электродиффузия, никель, технологическая схема, ионообменная мембрана, кинетические характеристики.

Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions

Valeria A. Semiletova [1] semiletovatstu@gmail.ru
Konstantin V. Shestakov [1] kostyanshestakov@mail.ru
Sergey I. Lazarev [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru
Konstantin K. Polyansky [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-8817-1466

1 Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia
2 Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Electrodialysis (ED) is a promising method for purifying wastewater from galvanic industries from heavy metal ions, in particular nickel (Ni^{2+}). In this paper, we study the kinetics of the electrodialysis process using anion- and cation-exchange membranes (MA-41P and MK-40L) to remove Ni^{2+} from solutions with initial concentrations from 40 to 160 mg/l. It was found that the purification efficiency reaches 99.3%, which confirms the high selectivity of the method. The key factor affecting the speed and efficiency of the process is the current density. The optimal value of 20 A/m² ensures a balance between a high degree of purification and energy consumption. Increasing the current density above this value does not lead to a significant increase in efficiency, but significantly increases energy consumption. In addition, it is shown that at a high initial concentration of nickel (160 mg/l), the process slows down due to membrane saturation and possible sedimentation. An important aspect of the study was the analysis of the electrodiffusion permeability of membranes. It was found that with increasing current density, the permeability coefficient decreases by 55%, which is due to an increase in the concentration gradient and a change in the membrane properties under the influence of an electric field. Based on the experimental data, a process flow chart for cleaning industrial wastewater was proposed, including the stages of neutralization, electrodialysis, and concentrate utilization. Purified water can be returned to the production cycle, and nickel-containing concentrate can be recycled. The results of the work demonstrate the high efficiency of electrodialysis for cleaning wastewater from nickel and can be used to optimize industrial processes taking into account economic and environmental requirements..

Keywords: electrodialysis, electrodiffusion, nickel, process flow chart, ion exchange membrane, kinetic characteristics.

Введение

В современном мире проблема загрязнения окружающей среды становится все более актуальной. Одной из ключевых угроз для экосистем являются тяжелые металлы, которые попадают в воду и почву через промышленные выбросы, сельскохозяйственные сточные воды и другие источники антропогенного воздействия. В связи с этим важно постоянно проводить разработку и внедрение эффективных технологий для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов.

Для цитирования
Семилетова В.А., Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К. Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 134–142. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-134-142

For citation
Semiletova V.A., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K. Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 134–142. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-134-142

© 2025, Семилетова В.А. / Semiletova V.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Среди таких технологий особое место занимают мембранные методы разделения, которые благодаря своей высокой эффективности, простоте эксплуатации и компактным размерам становятся все более востребованными [1, 2]. К ним относят ультрафильтрацию, нанофильтрацию, обратный осмос, электродиализ (ЭД) и другие менее распространенные методы [3, 4]. ЭД использует электрическое поле для перемещения ионов через ионообменные мембраны, что позволяет избирательно удалять необходимые компоненты из жидкостей. Данный метод обладает существенными преимуществами и превосходит альтернативные технологии мембранной фильтрации:

Высокая селективность, позволяющая избирательно удалять ионы тяжелых металлов и других загрязнителей. Данное качество делает ЭД особенно эффективным для очистки сточных вод, содержащих специфические загрязнители.

Минимизация образования шлама. В ЭД-процессе электродиализа не происходит накопления твердых частиц на мембранах, что снижает риск засорения и упрощает обслуживание системы.

Эффективность при низких концентрациях делает ЭД подходящим для обработки сточных вод с малым содержанием загрязнителей.

Данная технология находит широкое применение в таких областях, как очистка сточных вод, опреснение воды, пищевая и химическая промышленность, очистка сточных вод гальванопроизводств. В очистке сточных вод ЭД эффективно удаляет тяжелые металлы, соли и органические загрязнители, что делает его привлекательным для использования на промышленных предприятиях. В пищевой отрасли ЭД применяется для устранения излишков солей и повышения качества продукции. В химической индустрии этот метод используют для выделения чистых химических веществ. [5–7].

В гальванической промышленности ЭД часто используют для извлечения ценных веществ из сильно концентрированных стоков, которые образуются при химической и электрохимической обработке стали и цветных металлов [8, 9]. Одним из наиболее часто применяющихся металлов является никель. Он находит широкое применение в гальваническом производстве благодаря своей исключительной коррозионной стойкости. Процесс никелирования обычно приводит к образованию значительных объемов сточных вод, часто содержащих концентрации катионов Ni^{2+} от 20 до 200 мг/л [10, 11]. Эти сточные воды чаще всего очищают с помощью химического осаждения, что приводит к образованию значительного количества шлама с массовой долей никеля в нем около 31,6% [12]. В исследованиях [13, 14] авторы с помощью ЭД-разделения смогли достичь удаления до 95% никеля из сточных вод, образованных после процесса никелирования. В работе [15] с помощью двухкамерного аппарата для электроосаждения и электродиализа одновременно восстанавливали никель, содержащийся в отработанных ваннах химического никелирования, и без вторичного загрязнения удаляли соединения фосфора. Результаты показали, что количество восстановленного никеля составило 82,34%. Авторы в работе [16] добились снижения концентрации Ni^{2+} в анолите и католите до 0,015 и 0,085 мг/л соответственно при изначально низкой начальной концентрации, равной 1 мг/л, за счет сочетания электродиализа и электроосаждения. В работе [17] исследовался процесс извлечения никеля из твердых шламов с использованием 0,1 М серной кислоты. Процесс включал в себя обработку шлама кислотой, электродиализное концентрирование и электровосстановление для извлечения никеля из полученного раствора на электроде. Выход никеля по току на катоде достигал 96%. Результаты ряда экспериментов [18] показывают, что максимальная степень извлечения ионов никеля достигается при напряжении 12 В, а оптимальная скорость подачи раствора для лабораторного аппарата составляет 0,13 м/с. Также было проведено концентрирование раствора, полученного обессоливанием промывной воды, с целью его повторного использования в технологическом цикле. В результате был получен раствор с концентрацией 34,1 г/л.

На основе проведенного литературного анализа работ [1–18], оценена важность проблемы очистки образующихся в процессе никелирования сточных вод и сформулирована цель работы.

Цель работы – исследование эффективности электромембранной очистки промышленных растворов гальванических производств от ионов никеля и технологическое оформление процесса. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач, включая исследование кинетики ЭД-разделения и коэффициента электродиффузионной проницаемости.

Материалы и методы

Для проведения экспериментов и исследования кинетики ЭД-разделения использовалась специальная установка (рисунок 1), включающая ЭД-ячейку, а также три независимые линии циркуляции растворов, подключенные к ней. Каждая из этих линий предназначена для циркуляции обессоленного, концентрированного и приэлектродного (смешанных анолита и католита) растворов.

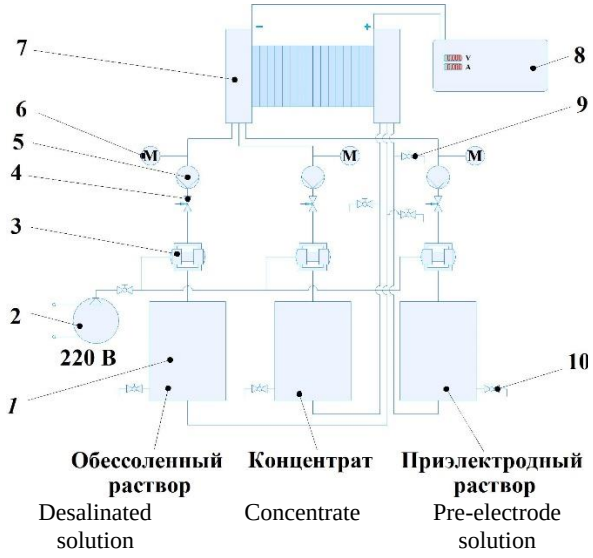


Рисунок 1. Экспериментальная электродиализная установка: *1* – емкости для обессоленного, концентрированного и приэлектродного растворов; 2 – пневматический насос; 3 – масляный компрессор; 4 – контрольный клапан; 5 – расходомер; 6 – манометр; 7 – электродиализная ячейка; 8 – лабораторный источник питания; 9 – выпускной кран для сбора; 10 – выпускной кран для слива

Figure 1. Experimental electrodialysis setup: 1 – tanks for demineralized, concentrated and near-electrode solutions; 2 – pneumatic pump; 3 – oil compressor; 4 – control valve; 5 – flow meter; 6 – pressure gauge; 7 – electrodialysis cell; 8 – laboratory power source; 9 – collection outlet valve; 10 – drainage outlet valve

В электродиализной ячейке, общая схема которой показана на рисунке 2, под воздействием электрического поля ионы перемещаются через ионообменные мембраны, установленные в чередующемся порядке и образующие камеры разделения. Ширина межмембранного канала составляла 0,001 м, а активная площадь мембран – 0,0306 м^2.

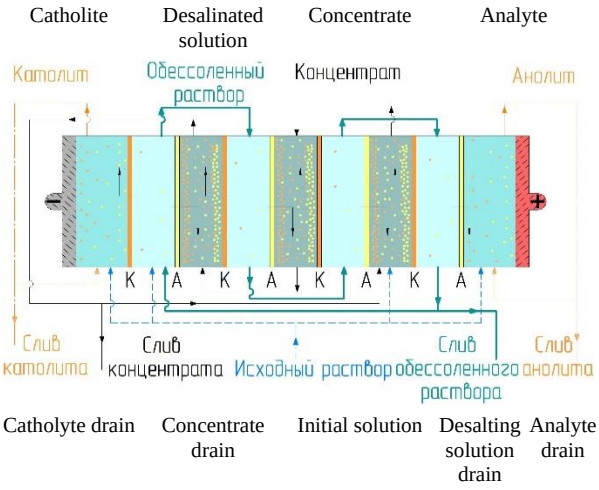


Рисунок 2. Схема электродиализного аппарата

Figure 2. Scheme of electrodialysis apparatus

Исследование коэффициента электродиффузионной проницаемости было проведено на установке, представленной на рисунке 3. Установка состояла из разделительной ячейки, лабораторного источника питания и двух магнитных мешалок. Конструкция разделительной ячейки включала две квадратные камеры из оргстекла, прижатых друг к другу. Между камерами размещалась исследуемая мембрана, зафиксированная пластиковыми решетками. Внутри каждой камеры находился монополярный электрод, к которому подводился постоянный ток от источника питания. Рабочий раствор помещали в обе камеры, где для перемешивания использовались магнитные мешалки с якорями. Герметичность конструкции обеспечивалась силиконовым герметиком

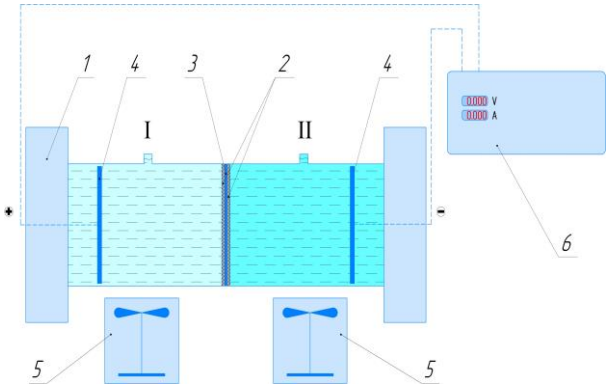


Рисунок 3. Экспериментальная электродиффузионная установка: *1* – прижимная плита; *2* – зажимная решетка; *3* – мембрана; *4* – электрод; *5* – магнитная мешалка; *6* – лабораторный источник питания

Figure 3. Experimental electrodiffusion setup: 1 – pressure plate; 2 – clamping grid; 3 – membrane; 4 – electrode; 5 – magnetic stirrer; 6 – laboratory power source

Для исследований использовались анионо- и катионообменные мембраны МА-41П и МК-40Л. Характеристики мембран представлены в таблице 1. Модельные водные растворы содержали нитрат никеля ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) с различными начальными концентрациями, имитирующими реальные промышленные стоки. Более подробно компонентный состав растворов представлен в таблице 2.

Таблица 1.

Характеристики анионо- и катионообменных мембран

Table 1.

Characteristics of anion and cation exchange membranes

Характеристика Characteristics	Марка | Mark	
	МК-40Л	МА-41П
Толщина, мм | Thickness, mm	0,3–0,5	0,3–0,5
Ионная группа | Ion group	(SO_3 H)	N(CH_3)
Ионная форма – противоион Ionic form - counter ion	Na^+	Cl^-
Инертное связующее Inert binder	полиэтилен polyethylene	полиэтилен polyethylene
Армирующая ткань Reinforcing fabric	полиэфирная polyester	полиамидная polyamide

Таблица 2.

Характеристики исходных модельных растворов

Table 2.

Characteristics of the initial model solutions

Раствор Solution	Исходная концентрация C_0, мг/л Initial C_0 concentration, mg/L	
	Ni^{2+}	NO_3-
H1	40,0	84,5
H2	80,0	169,0
H3	120,0	253,5
H4	160,0	338,0

Перед началом серии экспериментальных исследований был проведен тщательный анализ литературных данных, в результате которого были выбраны оптимальные значения рабочих параметров экспериментов. Плотность тока варьировалась в диапазоне от 10 А/м² до 40 А/м². Средний расход разделяемого раствора в каждой секции был равен 300 л/ч, а исходный объем растворов – 5 л. Каждый отдельный эксперимент проводился в течение 60 минут с обязательным отбором образцов растворов каждые 15 минут.

Результаты и обсуждение

Одним из важных этапов исследования было наблюдение за влиянием исходной концентрации никеля и плотности электрического тока на процесс очистки. Эта часть исследования позволила нам глубже понять, как повышение концентрации никеля в растворе и изменение плотности тока воздействуют на эффективность данного процесса.

На рисунке 4 представлены результаты серии экспериментальных исследований, полученных при электродиализном разделении модельных растворов H1, H2, H3 и H4. Получены кинетические зависимости концентрации C ионов Ni^{2+}, нормированной к исходной величине C_0, в процессе ЭД-разделения при плотности тока 10, 20, 30 и 40 А/м^2.

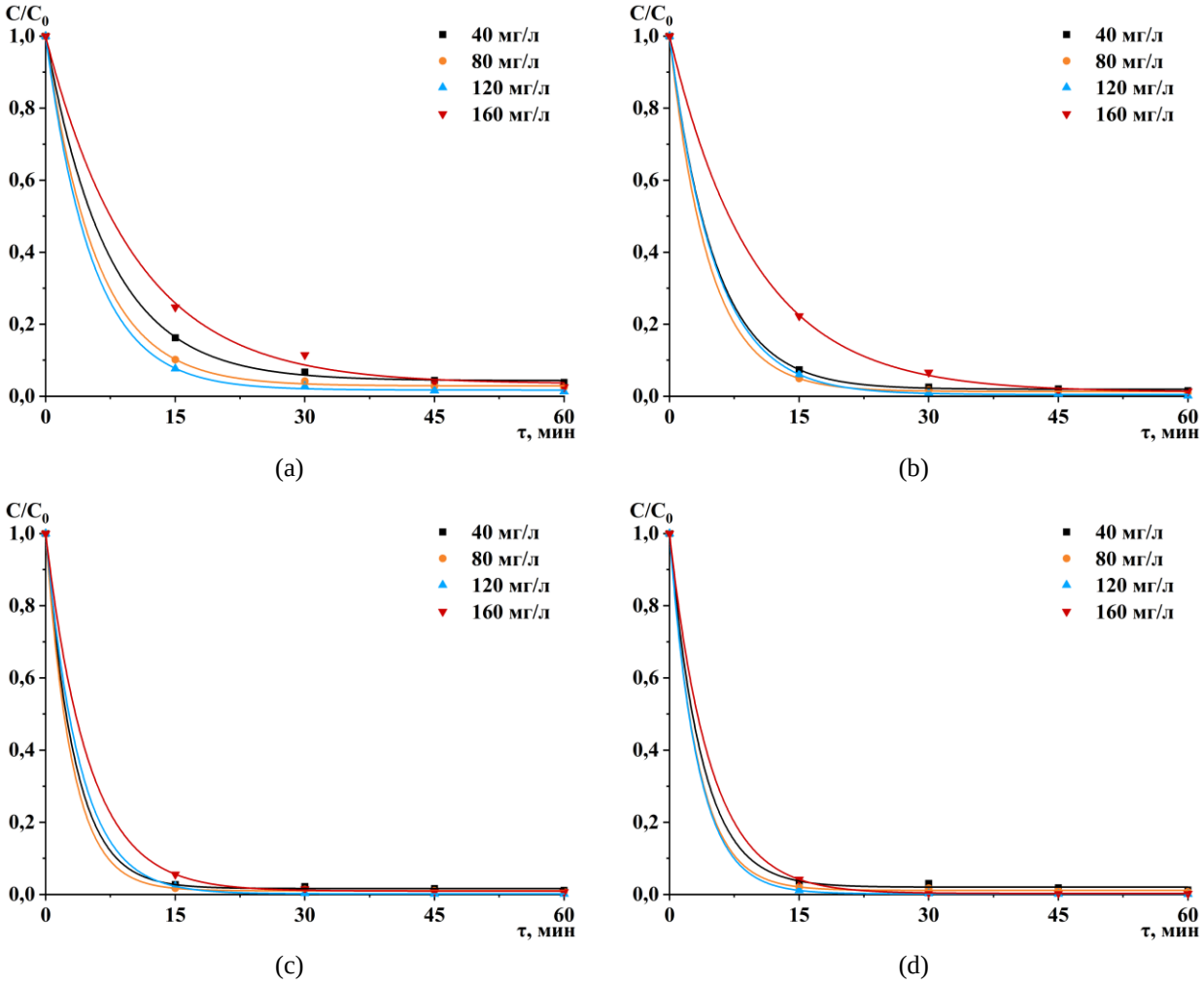


Рисунок 4. Кинетические зависимости концентрации C ионов Ni^{2+}, нормированной к исходной величине C_0, от времени: (a) – 10 А/м^2; (b) – 20; (c) – 30 А/м^2; (d) – 40 А/м^2

Figure 4. Kinetic dependences of the concentration C of Ni^{2+} ions, normalized to the initial value C_0, on time: (a) – 10 A/m^2; (b) – 20; (c) – 30 A/m^2; (d) – 40 A/m^2

Эксперименты по электродиализному разделению модельных водных растворов, содержащих $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, показали высокую эффективность метода. Степень очистки растворов в ряде случаев от катионов Ni^{2+} составила 98,5–99,3%, что демонстрирует потенциал электродиализа для применения в промышленных условиях. Было установлено, что при увеличении начальной концентрации никеля в растворе процесс очистки замедлялся. Так, в процессе разделения растворов Н1, Н2 и Н3 в большинстве экспериментов при всех плотностях тока кинетические зависимости от времени имели схожую форму и демонстрировали быстрое снижение концентрации ионов никеля. Однако при разделении растворов Н4 с увеличенной исходной концентрацией ионов Ni^2+ процесс очистки проходил значительно медленнее [19–22]. Это может быть связано определенными факторами, которые влияют на эффективность технологии. Например, высокая концентрация ионов никеля в растворе может привести к перенасыщению и замедлению диффузии ионов к мембранам. Также на мембранах могут образовываться осадки, что приводит к их загрязнению, затрудняет движение ионов и в конечном итоге может потребовать более частой замены или очистки мембран. Эти данные подчеркивают важность оптимизации параметров процесса для обеспечения максимальной эффективности очистки при высоких концентрациях никеля.

Исследована эффективность разделения методом ЭД в течение одного часа при различных плотностях тока – от 10 А/м² до 40 А/м. На рисунке 4 представлены зависимости концентрации С ионов Ni^2+, нормированной к исходной величине С0, от плотности тока.

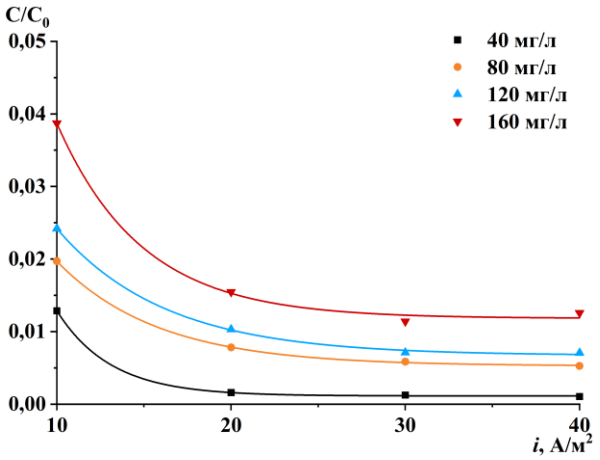


Рисунок 5. Зависимости концентрации C ионов Ni^{2+}, нормированной к исходной величине C_0, от плотности тока после часового ЭД-процесса

Figure 5. Dependences of the concentration of Ni^{2+} ions C, normalized to the initial value C_0, on the current density after an hour-long ED process

С увеличением плотности тока нормированные концентрации уменьшаются, что указывает на эффективное удаление ионов из раствора. Чем выше плотность тока, тем быстрее происходит этот процесс. Это связано с тем, что более высокая плотность тока приводит к усилению электролитических процессов, что, в свою очередь, позволяет более эффективно извлекать загрязняющие вещества. Более высокие начальные концентрации в большинстве экспериментов приводят к меньшему относительному снижению концентрации при той же плотности тока. Это может объясняться насыщением ионообменных мембран либо ограниченностью возможностей переноса ионов при повышенных концентрациях. Как видно на рисунке 4, после достижения плотности тока в 20 А/м² дальнейший прирост эффективности очистки оказывается несущественным по сравнению с увеличением энергозатрат на процесс при большей плотности тока. С последующим увеличением плотности тока затраты на электроэнергию растут пропорционально, однако при этом прирост очистки остаётся минимальным и становится экономически невыгодным. На основании упомянутых наблюдений можно сделать вывод, что оптимальным значением плотности тока для рассматриваемой системы является именно 20 А/м². Такая плотность тока обеспечивает баланс между высокой эффективностью удаления целевых веществ и приемлемыми затратами на электроэнергию, что делает его наиболее целесообразным для использования на практике.

На рисунке 6 рассмотрено влияние плотности тока и исходной концентрации раствора на электродиффузионную проницаемость мембраны МК-40Л для катионов Ni^2+.

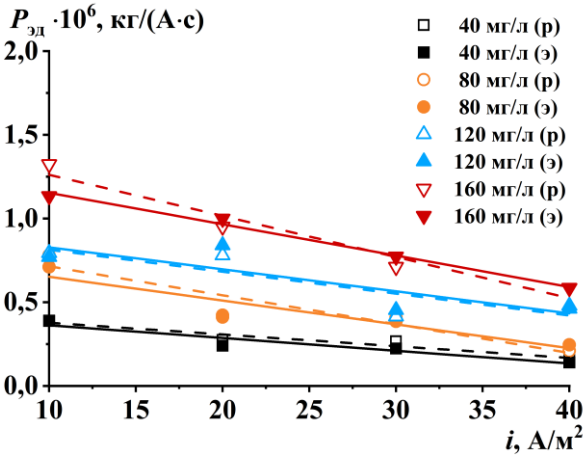


Рисунок 6. Зависимости электродиффузионной проницаемости мембраны МК-40Л для катионов Ni^2+ от плотности тока при разной исходной концентрации C_0

Figure 6. Dependences of the electrodiffusion permeability of the MK-40L membrane for Ni^2+ cations on the current density at different initial concentrations of C_0

Из данных видно, что электродиффузионная проницаемость мембраны МК-40Л для катионов Ni^{2+} уменьшается с увеличением плотности тока для всех концентраций раствора, что свидетельствует о снижении эффективности электродиффузионного переноса. Значения коэффициента электродиффузионной проницаемости Рэд колеблются в диапазоне от $0{,}140\times10^{-6}$ до $1{,}324\times10^{-6}$ кг/(А×с). Снижение его значений при увеличении плотности тока наблюдается для всех начальных концентраций растворов и составляет в среднем 55%. Это явление можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, увеличение плотности тока ведет к усилению градиента концентрации по обеим сторонам мембраны, что усложняет процесс массопереноса. Из-за возрастающего сопротивления переносу вещества электродиффузия постепенно замедляется. Во-вторых, высокая плотность тока может вызывать увеличение температуры раствора в области мембраны, что, в свою очередь, может приводить к изменению физико-химических свойств самой мембраны. Кроме того, снижение электродиффузионной проницаемости может быть связано с более интенсивным взаимодействием катионов с матрицей мембраны, что ограничивает свободное движение ионов.

Для подтверждения полученных экспериментальных данных был проведен теоретический расчет значений коэффициента электродиффузионной проницаемости $P_{эд}$. Его проводили на основе уравнения [23]:

$$P_{эд} = kC_0^n i^m \exp(C_0 g)\exp(A/T),$$

где k – эмпирический коэффициент, $м^5/(А^2\cdot с)$; C_0 – концентрация вещества в исходном растворе, $кг/м^3$; i – плотность тока, $А/м^2$; n, m – безразмерные эмпирические коэффициенты; g – эмпирический коэффициент, $м^3/кг$; A – эмпирический коэффициент, К; T – абсолютная температура раствора, К.

Экспериментальные и расчетные значения производительности близки друг к другу, что свидетельствует о хорошей корреляции между теоретическими предположениями и реальными результатами измерений. Тем не менее наблюдаются незначительные отклонения, особенно выраженные при высоких концентрациях и низких напряжениях, которые могут быть вызваны ошибками измерений и расчетов. В целом разница между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями не превышала 10%.

Практическое применение

Разработка и внедрение эффективных технологических схем – залог успешной работы мембранных систем очистки, способствующий как экономии ресурсов, так и охране окружающей среды. Эффективные схемы позволяют достигать более высокого уровня удаления загрязняющих веществ, что обеспечивает безопасность и пригодность воды для различных нужд, а правильное проектирование уменьшает потребление энергии и ресурсов, что снижает общие расходы на эксплуатацию системы.

Технологическая схема процесса электродиализной очистки сточных вод, предлагаемая для гальванического производства, изображена на рисунке 7. Схема предназначена для электродиализной очистки кислых промышленных растворов, содержащих ионы никеля. Кислые промышленные растворы сначала собираются в накопительной емкости *1*, после чего насосом *2* они подаются в аппарат для нейтрализации растворов *3*. Затем, нейтрализованный раствор поступает в электродиализатор *4* для очистки от ионов никеля. Очищенный раствор (дилюат) направляется в резервуар *5* для хранения очищенной воды, который предполагается повторно использовать в процессе гальванического производства. Концентрат, содержащий большое количество никеля, отправляется в емкость *6* для последующего концентрирования или использования в строительном производстве.

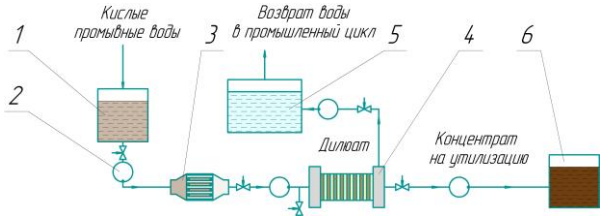


Рисунок 7. Технологическая схема разделения промышленных растворов с применением электродиализной очистки: *1* – емкость сбора кислых промывных вод; *2* – насос; *3* – аппарат нейтрализации растворов; *4* – электродиализатор; *5* – емкость сбора очищенной воды, *6* – емкость сбора растворов, подлежащих утилизации

Figure 7. Technological scheme of separation of industrial solutions using electrodialysis purification: 1 – tank for collecting acidic wash water; 2 – pump; 3 – solution neutralization apparatus; 4 – electrodialyzer; 5 – tank for collecting purified water; 6 – tank for collecting solutions subject to disposal

Технологическая схема обладает высокой степенью адаптивности, позволяя оперативно реагировать на изменяющиеся производственные условия или прогнозируемый рост объемов обработки. Это достигается за счет модульной структуры, гибкой конфигурации параметров и возможности интеграции новых компонентов. Такая гибкость позволяет существенно увеличивать производительность системы, избегая при этом значительных капитальных вложений в новое оборудование или кардинальную перестройку всего процесса. Оптимизация отдельных узлов, перенастройка алгоритмов и масштабирование вычислительных ресурсов позволяют эффективно справляться с растущими потребностями и поддерживать конкурентоспособность предприятия.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Метод электродиализа является высокоэффективным для очистки водных растворов от ионов никеля, достигая степени очистки более 99%, при этом скорость удаления напрямую зависит от плотности тока. Это подтверждает возможность использования электродиализного метода для промышленной очистки растворов от тяжелых металлов. Было установлено, что скорость и эффективность очистки зависят от начальной концентрации никеля в растворе. При увеличении начальной концентрации процесс электродиализной очистки замедляется.

2. Для достижения максимальной производительности рассматриваемой системы рекомендуется использовать оптимальное значение плотности тока 20 А/м², которое обеспечивает баланс между высокой эффективностью удаления целевых веществ и приемлемыми затратами на электроэнергию и делает процесс разделения наиболее целесообразным для использования на практике.

3. Предлагается технологическая схема очистки растворов от никеля с применением ЭД, где обессоленный раствор можно повторно использовать в процессе производства, а концентрат использовать для восстановление ценных компонентов или утилизации.

Благодарности

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

Литература

1 Xiang H., Min X., Tang C., Sillanpää M., Zhao F. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49.

2 Juve J., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 435. No. 2.

3 Abdullah N., Rahman M.A., Othman M.H.D. et al. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2019. Vol. 76. Pp. 17–38. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.029

4 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К., Игнатов Н.Н. Восстановление железа, никеля и меди из сточных вод производства печатных плат методом электродиализа // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. № 5. С. 547–542.

5 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S. et al. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 155. Pp. 130–138.

6 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Крылов А.В., Лазарев Д.С., Ломакина О.В. Влияние исходной концентрации ионов металлов в многокомпонентных растворах на процесс электродиализной очистки // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 3. С. 21–25.

7 Benvenuti T., Bernardes A.M., Rodrigues M.A.S. Electrodialysis treatment of nickel wastewater // Electrodialysis and Water Reuse: Novel Approaches. 2014. Pp. 133–144.

8 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б. Применение биполярного электродиализа с модифицированными мембранами при очистке хромсодержащих сточных вод гальванического производства // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 10. С. 4–9.

9 Бывшева О.С., Ильина С.И., Быков И.В. и др. Применение электрохимических методов очистки гальваностоков // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 65–2. С. 84–92.

10 dos Santos C.S.L., de Almeida Neto A.F., Vieira M.G.A. Electrodialysis for removal of chromium (VI) from effluent: Analysis of concentrated solution saturation // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol. 7. No. 5. Pp. 103380. doi: 10.1016/j.jece.2019.103380

11 Juve J.M.A., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 435. Pp. 134857.

12 Nemati M., Hosseini S.M., Shabanian M. Novel electrodialysis cation exchange membrane prepared by 2 acrylamido 2 methylpropane sulfonic acid; heavy metal ions removal // Journal of Hazardous Materials. 2017. Vol. 337. Pp. 90–104. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.074

13 Benalla S., Elazhar F., Zouahri A. et al. Feasibility of electrodialysis in heavy metals removal from brassware wastewaters // Desalination and Water Treatment. 2021. Vol. 240. Pp. 106–114.

14 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S. et al. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 155. Pp. 130–138.

15 Yan K., Wei Y., Zhao S. et al. An efficient Two-Chamber Electrodeposition-Electrodialysis combination craft for nickel recovery and phosphorus removal from spent electroless nickel plating bath // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 295. Pp. 121283. doi: 10.1016/j.seppur.2022.121283

16 Wang C., Li Y., Liu X. et al. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition // Chemosphere. 2021. Vol. 263. Pp. 128208 doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128208

17 Klishchenko R., Chebotarova R. Removal of nickel from electroplating wastewater by a combination of electrodialysis and electrodeposition // Journal of Water Chemistry and Technology. 2023. Vol. 45. No. 4. Pp. 378–382.

18 Гонова В.А. Экспериментальное исследование очистки растворов от ионов никеля методом электродиализа // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2023. № 1 (73). С. 37–41.

19 Lv M., Zhang Y., Li Y. et al. Recovery of boron and zinc from wastewater via electrodialytic metathesis // Desalination. 2024. Vol. 586. Pp. 117900. doi: 10.1016/j.desal.2024.117900

20 Liu Y., Zhang H., Wang X. et al. Recovery of nickel, phosphorus and nitrogen from electroless nickel-plating wastewater using bipolar membrane electrodialysis // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 382. Pp. 135326.

21 Li Y., Wang J., Chen X. et al. A novel electrochemical membrane filtration system operated with periodical polarity reversal for efficient resource recovery from nickel nitrate laden industrial wastewater // Water Research. 2024. Vol. 266. Pp. 122424. doi: 10.1016/j.watres.2024.122424.

22 Чепеняк П.А., Головашин В.Л., Лазарев С.И. Электродиффузионная проницаемость ультрафильтрационных мембран в водных фосфатсодержащих растворах // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 8. С. 52–56.

References

1 Xiang H., Min X., Tang C., Sillanpää M., Zhao F. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. Journal of Water Process Engineering. 2022. vol. 49. Art. 102951.

2 Juve J., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. Chemical Engineering Journal. 2022. vol. 435. no. 2. Art. 134857.

3 Abdullah N., Yusof N., Lau W.J., Jaafar J., Ismail A.F. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2019. vol. 76. pp. 17-38. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.029

4 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K., Ignatov N.N. Recovery of iron, nickel and copper from wastewater from printed circuit board production by electrodialysis. Journal of Applied Chemistry. 2021. vol. 94. no. 5. pp. 547-552.

5 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M., Zoppas-Ferreira J. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis. Journal of Cleaner Production. 2017. vol. 155. pp. 130-138.

6 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Krylov A.V., Lazarev D.S., Lomakina O.V. Influence of the initial concentration of metal ions in multicomponent solutions on the process of electrodialysis purification. Bulletin of the Technological University. 2023. vol. 26. no. 3. pp. 21-25. (in Russian)

7 Benvenuti T., Garcia-Gabaldon M., Perez-Herranz V., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M. Electrodialysis treatment of nickel wastewater. In: Electrodialysis and Water Reuse: Novel Approaches. 2014. pp. 133-144.

8 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Application of bipolar electrodialysis with modified membranes in the treatment of chromium-containing wastewater from galvanic production. Ecology and Industry of Russia. 2021. vol. 25. no. 10. pp. 4-9. (in Russian)

9 Byvsheva O.S., Ilyina S.I., Bykov I.V. et al. Application of electrochemical methods for cleaning galvanic effluents. Trends in the Development of Science and Education. 2020. no. 65-2. pp. 84-92. (in Russian)

10 dos Santos C.S.L., de Almeida Neto A.F., Vieira M.G.A. Electrodialysis for removal of chromium (VI) from effluent: Analysis of concentrated solution saturation. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. vol. 7. no. 5. Art. 103380. doi: 10.1016/j.jece.2019.103380

11 Juve J.M.A., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. Chemical Engineering Journal. 2022. vol. 435. Art. 134857.

12 Nemati M., Hosseini S.M., Shabanian M. Novel electrodialysis cation exchange membrane prepared by 2 acrylamido 2 methylpropane sulfonic acid; heavy metal ions removal. Journal of Hazardous Materials. 2017. vol. 337. pp. 90-104. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.074

13 Benalla S., Elazhar F., Tahaikt M., Elmidaoui A. Feasibility of electrodialysis in heavy metals removal from brassware wastewaters. Desalination and Water Treatment. 2021. vol. 240. pp. 106-114.

14 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M., Zoppas-Ferreira J. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis. Journal of Cleaner Production. 2017. vol. 155. pp. 130-138.

15 Yan K., Xue C., Liu Q., Wei L., Guo X., Liu C. An efficient Two-Chamber Electrodeposition-Electrodialysis combination craft for nickel recovery and phosphorus removal from spent electroless nickel plating bath. Separation and Purification Technology. 2022. vol. 295. Art. 121283. doi: 10.1016/j.seppur.2022.121283

16 Wang C., Wu Y., Bai L., Zhao Y., Yan L., Jiang Q. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition. Chemosphere. 2021. vol. 263. Art. 128208. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128208

17 Klishchenko R., Chebotarova R. Removal of nickel from electroplating wastewater by a combination of electrodialysis and electrodeposition. Journal of Water Chemistry and Technology. 2023. vol. 45. no. 4. pp. 378-382.

18 Gonova V.A. Experimental study of cleaning solutions from nickel ions by electrodialysis. Modern science-intensive technologies. Regional supplement. 2023. no. 1(73). pp. 37-41. (in Russian)

19 Lv M., Chen N., Liu Y., Zhang W., Du X., Yang Y. Recovery of boron and zinc from wastewater via electrodialytic metathesis. Desalination. 2024. vol. 586. Art.117900. doi: 10.1016/j.desal.2024.117900

20 Liu Y., Li X., Yan K., Ren Z., Wei L., Guo X. Recovery of nickel, phosphorus and nitrogen from electroless nickel-plating wastewater using bipolar membrane electrodialysis. Journal of Cleaner Production. 2023. vol. 382. Art. 135326.

21 Li Y., Wang Y., Li J., Wang L., Xu T. A novel electrochemical membrane filtration system operated with periodical polarity reversal for efficient resource recovery from nickel nitrate laden industrial wastewater. Water Research. 2024. vol. 266. Art. 122424. doi: 10.1016/j.watres.2024.122424

22 Chepenyak P.A., Golovashin V.L., Lazarev S.I. Electrodiffusion permeability of ultrafiltration membranes in aqueous phosphate-containing solutions. News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology. 2012. vol. 55. no. 8. pp. 52-56. (in Russian)

Сведения об авторах

Валерия А. Семилетова ассистент, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, semiletovatstu@gmail.ru

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

Сергей И. Лазарев д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, kaf-kit@vfreu.ru

https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Information about authors

Valeria A. Semiletova assistant, nature management and environmental protection department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, semiletovatstu@gmail.ru

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

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

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, management of socio-economic systems and business processes department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia, kaf-kit@vfreu.ru

https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Вклад авторов

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

Contribution

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 02/03/2025	**После редакции** 09/04/2025	**Принята в печать** 29/05/2025
Received 02/03/2025	**Accepted in revised** 09/04/2025	**Accepted** 29/05/2025