

**В. А. Семилетова, С. И. Лазарев, О. В. Долгова,  
К. К. Полянский**

## **АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ В РАЗДЕЛЕНИИ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ**

*Ключевые слова:* мембрана, электромембранная технология, электродиализ, обратный осмос, промышленные растворы, разделение.

*В статье проведён сравнительный анализ баромембранных, электродиализных и электробаромембранных технологий для решения задач очистки промышленных растворов, содержащих никель. Определены ключевые преимущества, ограничения и области рационального применения, перечисленных технологий. Экспериментально исследована эффективность разделения растворов, содержащих ионы  $Ni^{2+}$  с применением каждого из рассматриваемых процессов. При очистке растворов использовались различные гетерогенные катионообменные и анионообменные мембраны (МГА-80, МГА-95, МК-40Л и МА-41П), изготовленные ООО «ИП Шекиноазот». В результате экспериментальных исследований по обратному осмосу установили, что применение мембраны МГА-95 обеспечивает более эффективное разделение растворов с невысоким содержанием целевого компонента в ретентате. Наличие у мембраны МГА-95 более мелких нанопор, чем у мембраны МГА-80 и более тонкого селективно-проницаемого слоя, в котором в основном проникают молекулы воды и задерживаются ионы и молекулы растворенного вещества, способствует образованию поляризационного слоя, обладающего динамическими свойствами. Отмечено, что электродиализный метод обладает более высоким преимуществом, так как имеет ионоселективные мембраны с высокими характеристиками по транспортным свойствам, мембраны выпускаются в промышленном масштабе, по высокому диапазону изменения pH и температуры разделяемого раствора, может разделять промышленные растворы с получением высоко концентрированного концентрата и глубоко очищенного дилюата. Показано, что электродиализные методы превосходят другие методы разделения по производительности и позволяют получать растворы с высокой концентрацией извлекаемого компонента. Применение мембранных технологий повышает эффективность очистки промышленных растворов, сокращает энергопотребление и обеспечивает защиту окружающей среды.*

**V. A. Semiletova, S. I. Lazarev, O. V. Dolgova,  
K. K. Polyansky**

## **ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR APPLYING MEMBRANE METHODS TO THE SEPARATION OF NICKEL-CONTAINING AQUEOUS SOLUTIONS**

*Keywords:* membrane, electromembrane technology, electrodialysis, reverse osmosis, industrial solutions, separation.

*The article provides a comparative analysis of baromembrane, electrodialysis and electrobaromembrane technologies for solving the problems of purification of industrial solutions containing nickel. The key advantages, limitations and areas of rational application of the listed technologies are identified. The efficiency of separation of solutions containing  $Ni^{2+}$  ions using each of the processes under consideration has been experimentally investigated. Various heterogeneous cation exchange and anion exchange membranes (MGA-80, MGA-95, MK-40L and MA-41P) manufactured by IP Shchekinoazot LLC were used in the purification of solutions. As a result of experimental reverse osmosis studies, it was found that the use of the MGA-95 membrane provides more efficient separation of solutions with a high content of the target component in the retentate. The presence of smaller nanopores in the MGA-95 membrane than in the MGA-80 membrane and a thinner selectively permeable layer, in which mainly water molecules permeate and ions and solute molecules are trapped, contributes to the formation of a polarization layer with dynamic properties. It is noted that the electrodialysis method has a higher advantage, since it has ion-selective membranes with high characteristics in terms of transport properties, membranes are produced on an industrial scale, with a high range of pH and temperature changes in the separated solution, and can separate industrial solutions to produce highly concentrated concentrate and deeply purified dilute. It has been shown that electrodialysis methods are superior to other separation methods in terms of productivity and make it possible to obtain solutions with a high concentration of the extracted component. The use of membrane technologies increases the efficiency of cleaning industrial solutions, reduces energy consumption and ensures environmental protection.*

### **Введение**

В условиях нарастающих экологических проблем и необходимости повышения эффективности производства, анализ мембранных технологий приобретает все большую актуальность. Промышленные предприятия сталкиваются с вызовами загрязнения окружающей среды, истощения природных ресурсов и ужесточением требований к качеству продукции и её экологической безопасности [1]. Как отмечают ав-

торы [2] мембранные технологии предоставляют эффективные решения для очистки промышленных растворов, разделения смесей и извлечения токсичных веществ, таких как висмут, олово и никель. Это делает их перспективным инструментом для применения в различных отраслях экономики, способствуя устойчивому развитию и повышению конкурентоспособности.

Кроме того, необходимо отметить, что промышленные растворы характеризуются сложным соста-

вом, включающим как органические, так и неорганические соединения. Мембранная технология предлагает универсальное решение для очистки таких сточных вод, позволяющее не только разделять смеси, но и целенаправленно выделять определенные молекулы и ионы из многокомпонентных систем [3]. Такая эффективность обусловлена тем фактом, что затраты энергии в первую очередь направлены на разрыв межмолекулярных связей и сведены к минимально термодинамическим [4].

В дополнение к вышесказанному, возрастающий интерес к устойчивому развитию и внедрению «зеленых» технологий на государственном и международном уровнях подчёркивает важность мембранных технологий в контексте глобальных усилий по охране окружающей среды и рациональному использованию ресурсов [5]. Эволюция мембранных технологий разделения оказала существенное влияние на повышение эффективности очистки и качества биотоплива. В результате научных исследований появилось множество запатентованных мембранных решений, каждое из которых внесло свой уникальный вклад в данную область [6-9].

Современные мембранные системы не только эффективно очищают растворы, но и способны извлекать ценные компоненты, например, ионы металлов из концентрированных промышленных сточных вод. Это позволяет эффективно использовать очищенную воду в повторном цикле, что способствует рациональному использованию ресурсов. В то же время, применение мембранных методов для выделения металлов из разбавленных растворов экономически нецелесообразно. Среди недостатков таких технологий стоит отметить высокие капитальные затраты на установку и эксплуатационные расходы. Кроме того, мембранные установки обратного осмоса требуют предварительной очистки воды от взвешенных частиц и ионов железа для обеспечения стабильной и долговременной работы [10].

Мембранные технологии очистки сточных вод обладают значительными экологическими преимуществами по сравнению с традиционными методами [11]. Благодаря эффективной очистке раствора, фазовые технологии позволяют безопасно возвращать очищенные растворы в естественные водные среды, такие как реки и водохранилища. Затем этот очищенный раствор может быть использован для экологически чистых целей, таких как рыбоводство. Кроме того, очищенный раствор, может быть повторно использован для удовлетворения различных инфраструктурных потребностей в городских условиях, включая орошение зеленых насаждений, уборку улиц и пожаротушение [12].

Электромембранные методы очистки промышленных растворов и технологических жидкостей, реализуемые с помощью специализированного оборудования (включая мембранный электролиз, электродиализ, электродеионизацию, электробаромембранное разделение и другие), находят широкое применение в различных отраслях промышленности [13].

К числу областей применения относятся:

1. Цветная и черная металлургия: очистка растворов и жидкостей, используемых в металлургических

процессах.

2. Получение химических продуктов: производство кислорода, водорода, хлора и других веществ с помощью электрохимических методов.

3. Обеззараживание и дезинфекция: очистка водных растворов от патогенных микроорганизмов.

4. Пищевая промышленность: деминерализация молока, удаление нитратов и нитритов из продуктов питания.

Это некоторые примеры использования электромембранных методов в промышленном секторе. Их универсальность и эффективность делают их ценным инструментом для решения задач очистки и разделения различных водных сред [14-16].

С ростом технологической зрелости мембранных решений наблюдается расширение их ассортимента. Электробаромембранные технологии открывают новые перспективы для совершенствования процессов очистки и разделения, интегрируя достоинства электромембранных методов с традиционными мембранными системами. Высокая эффективность данных технологий обуславливает их всё более широкое применение в таких отраслях, как металлургия, фармацевтика, пищевая промышленность и других, где предъявляются строгие требования к качеству и безопасности продукции. Электробаромембранные устройства обладают значительным потенциалом для применения в очистке сточных вод, концентрировании растворов и промывных водах в технологических процессах. Основные преимущества включают в себя возможность избирательно извлекать ценные компоненты из растворов, без фазовых превращений [17].

Интеграция электролиза с баромембранными процессами привела к существенному улучшению проницаемости мембран и расширению их применения в сфере очистки и разделения веществ [18].

Выполненный обзор работ [1-18] позволил сформулировать цель работы и задачи исследования. Поэтому целью работы явился анализ и оценка перспективности применения баромембранных, электродиализных, электробаромембранных процессов в разделении никельсодержащих водных растворов.

Задачами исследования является:

1. Провести анализ перспективности применения обратноосмотического разделения в очистке никельсодержащих водных растворов.

2. Выполнить анализ перспективности применения электродиализного разделения в очистке никельсодержащих водных растворов.

3. Оценить перспективность применения электрогиперфильтрационного разделения в очистке никельсодержащих водных растворов.

К числу мембранных методов очистки относятся такие процессы, как обратный осмос и ультрафильтрация [19]. Обратный осмос – это метод мембранной очистки растворов, где получается очищенный раствор – пермеат и сконцентрированный – ретентат [20]. Характеристики мембран, используемых в обратном осмосе, электродиализе и электрогиперфильтрации представлены в таблицах 1 и 2.

Схематическое изображение процесса обратного осмоса представлено на рисунке 1.

Таблица 1 - Характеристики мембран

Table 1 - Membrane characteristics

Характеристики	Марки	
	МГА-95	МГА-80
Материал мембраны	ацетатцеллюлоза	
Рабочее давление, МПа	5,0	5,0
Удельная производительность, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент задержания, по 0,15% NaCl, не менее	0,95	0,8
Рабочий диапазон, pH	3-8	2-11
Максимальная температура, °C	50	45

Таблица 2 - Характеристики анионо- и катионообменных мембран

Table 2 - Characteristics of anion- and cation-exchange membranes

Характеристики	Марки	
	МК-40Л	МА-41П
Толщина, мм	0,3-0,5	0,3-0,5
Ионная группа	( $\text{SO}_3\text{H}$ )	$\text{N}(\text{CH}_3)$
Ионная форма – противоион	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$
Инертное связующее	полиэтилен	полиэтилен
Армирующая ткань	полиэфирная	полиамидная

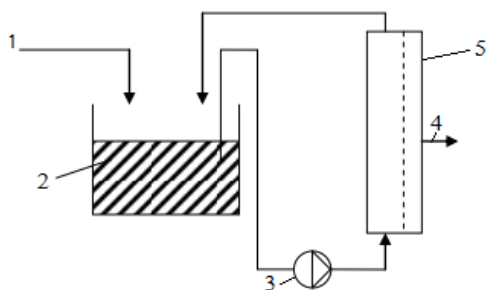


Рис. 1 - Схема процесса разделения растворов с применением обратного осмоса: 1 – поступление чистого растворителя; 2 – исходный раствор; 3 – насос; 4 – слив пермеата; 5 – баромембранный аппарат

Fig. 1 - Scheme of the reverse osmosis solution separation process: 1 – inlet of pure solvent; 2 – initial solution; 3 – pump; 4 – permeate drain; 5 – baromembrane apparatus

Получена зависимость концентрации растворенных веществ в пермеате от концентрации раствора, поступающего на обратноосмотическое разделение, содержащего ионы никеля ( $\text{Ni}^{2+}$ ), график приведен на рисунке 2 [21].

Экспериментальные исследования на мембранах МГА-80 и МГА-95 в процессе обратноосмотического разделения выявили, что концентрация в пермеате растёт с увеличением исходной концентрации для обеих мембран. Однако для мембраны МГА-95 демонстрируется более медленный рост, что говорит о

более высоком коэффициенте задержания никеля, чем для мембраны МГА-80. Это указывает на наличие у мембраны МГА-95 более мелких нанопор, чем у мембраны МГА-80 и более тонкого селективно-проницаемого слоя, в котором проникают в основном молекулы воды и задерживаются ионы и молекулы растворенного вещества, образуя при этом поляризационный слой. Вероятно, образующийся поляризационный слой не только негативно влияет на селективно-проницаемые свойства мембраны МГА-95, но и выступает как динамическая слой мембрана, задерживая ионы никеля. При этом, динамический слой мембраны вероятно влияет и на удельный выходной поток растворителя, и с ростом концентрации растворенного вещества в разделяемом растворе, уменьшая его по величине.

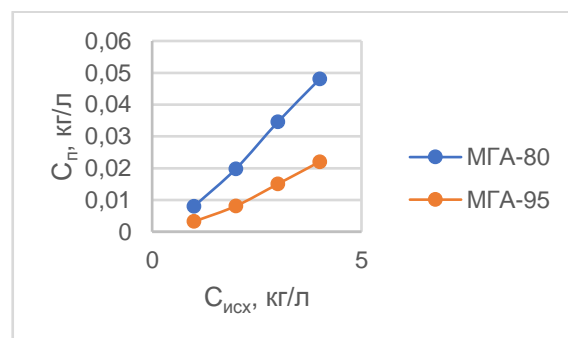


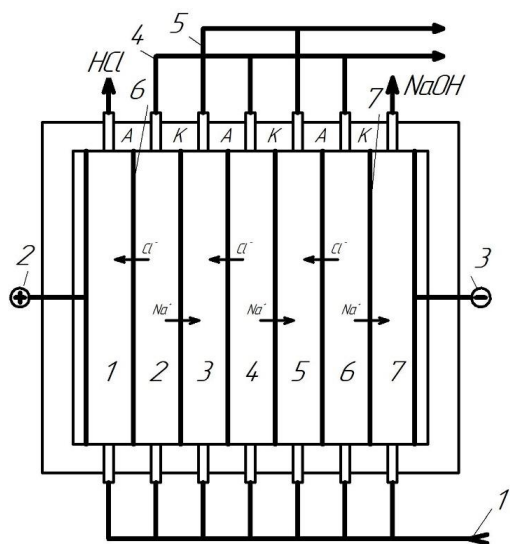
Рис. 2 - Зависимость концентрации никеля в пермеате от исходной концентрации раствора

Fig. 2 - Dependence of the nickel concentration in the permeate on the initial concentration of the solution

Электродиализ, согласно рекомендациям Международной ассоциации по мембранам (IAM), представляет собой электромембранный метод разделения, основанный на миграции ионов через ионообменную мембрану под воздействием приложенного электрического поля [22]. Схема электродиализатора представлена на рисунке 3. Современные электродиализаторы, как правило, имеют многокамерную конструкцию.

В своей конструкции электродиализатор имеет чередующиеся катионообменные и анионообменные мембраны, вдоль которых транспортируется обрабатываемый раствор [24]. При воздействии электрического поля, перпендикулярного плоскости мембран, наблюдается избирательный перенос ионов. Катионы мигрируют через катионообменную мембрану, а анионы – через анионообменную мембрану. В результате чередования нечетных и четных секций создается эффект концентрации и обессоливания. Нечетные секции, функционирующие как камеры концентрирования, способствуют повышению концентрации. Четные секции, в свою очередь, выступают в качестве камер обессоливания и снижают концентрацию ионов в очищенном растворе [25]. Успешное применение электромембранного процесса зависит от экспериментального понимания того, как рабочие параметры влияют на электродиализ промышленных растворов. Поэтому исследование кинетических параметров электродиализа имеет решающее значение [26-28]. На рисунке 4 представлен график изменения

концентрации в дилюате от концентрации в исходном растворе. Результаты электродиализа с никелем для катионов  $Ni^{2+}$  показали возрастание концентрации никеля в пермеате по мере увеличения его концентрации в исходном растворе, что подтверждает эффективность мембран МК-40Л и МА-41П. Однако при более высоких концентрациях наблюдается снижение эффективности мембраны в пропускании вещества, что объясняется развитием эффекта концентрационной поляризации - образованием обедненного диффузионного слоя у поверхности мембраны, увеличивающего сопротивление переносу ионов. Дополнительным ограничивающим фактором выступает насыщение заряда мембраны, при котором значительная часть функциональных групп оказывается занята ионами никеля, снижая их доступность для дальнейшего сорбционного взаимодействия. Также, может наблюдаться усиление конкуренции между миграционным переносом под действием электрического поля и встречным диффузионным потоком, обусловленным возросшим концентрационным градиентом.



**Рис. 3 - Принципиальная схема электродиализа [23]: 1 – исходный раствор NaCl или солоноватой воды; 2 – анод; 3 – катод; 4 – обессоленная вода; 5 – концентрат; 6 – анионообменная мембрана; 7 – катионообменная мембрана**

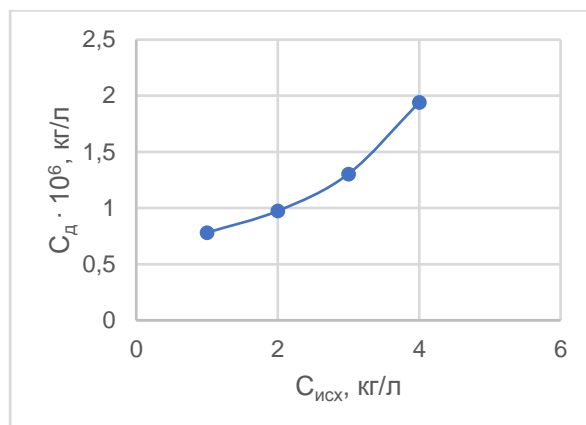
**Fig. 3 - Basic scheme of electrodialysis [23]: 1 – initial solution of NaCl or brackish water; 2 – anode; 3 – cathode; 4 – desalinated water; 5 – concentrate; 6 – anion exchange membrane; 7 – cation exchange membrane**

В настоящий момент исследования в сфере электромембранного разделения сосредоточены на двух ключевых направлениях: оптимизация характеристик уже используемых мембранных компонентов и создании/внедрении новых, более совершенных материалов и технологий.

Как отмечает В. И. Заболоцкий и соавторы основной проблемой при производстве сильных кислот и оснований с помощью биполярных мембран является

загрязнение получаемых продуктов ионами исходной соли, а также высокие удельные энергозатраты процесса. Решение этой проблемы заключается, в первую очередь, в применении биполярных мембран с улучшенными электрохимическими характеристиками. К таким характеристикам относятся:

- высокие числа переноса ионов водорода и гидроксила, что способствует более эффективному разделению кислот и оснований;
- низкое рабочее напряжение, что снижает энергопотребление процесса.



**Рис. 4 - Изменение концентрации в потоке дилюата в зависимости от концентрации исходного раствора**

**Fig. 4 - Change in concentration in the diluent stream, depending on the concentration of the initial solution**

Не менее важной является стоимость биполярных мембран, используемых в процессе. Увеличение стоимости мембран сужает область их применения, делая экономически целесообразным только производство дорогих продуктов [24].

Для повышения эффективности электромембранных процессов предполагается воздействия одновременно на мембрану двух движущих сил электрического потенциала и трансмембранного давления. Этот процесс получил название в научной практике как электробаромембранный метод [29-32].

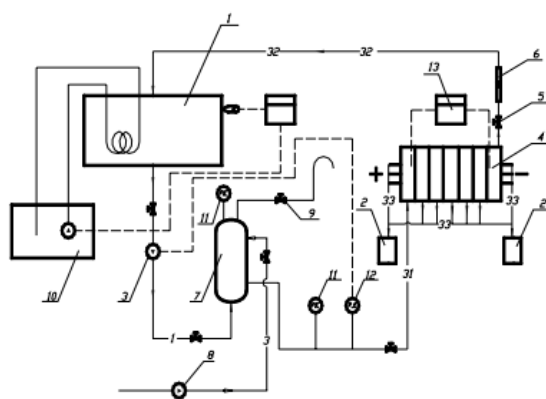
Электродиффузия представляет собой процесс переноса заряженных частиц в растворе под действием электрического поля. В мембранных системах это явление может привести к неоднородному распределению концентраций вещества, что, в свою очередь, изменяет электропроводность и селективность мембраны.

Конвективный перенос обусловлен движением раствора через мембрану под воздействием внешних сил, в то время как диффузионный перенос происходит вследствие движения молекул вещества из областей с высокой концентрацией в области с низкой концентрацией. Исследование всех указанных механизмов переноса имеет принципиальное значение для глубокого понимания процессов массопереноса через мембраны. Это знание, в свою очередь, способствует разработке новых материалов с повышенной эффективностью и селективностью, что находит широкое применение в различных областях, таких как фильтрация воды, очистка газов и других жидкостей,

а также в технологиях разделения и катализа [33].

В научной литературе широко освещается тема применения электродиализа для различных целей. Так, исследования А.В. Пермякова и соавторов [34] демонстрируют сравнение гидродинамических, электрохимических и энергетических характеристик при обработке сыворотки методом электродиализа. Работа П.А. Василенко [35] исследует процесс диссоциации молекул воды при электродиализе на высоких плотностях тока в 0,01 М растворе хлорида натрия. Ряд работ демонстрируют эффективность применения электродиализа для очистки сорбита от минеральных примесей и детально исследуют уменьшение потоков водородных ионов. Отмечается, что заряд катионов связан дипольным взаимодействием при гидратации [36, 37].

Схема электробаромембранной установки представлена на рисунке 5 [38].



**Рис. 5 - Схема электробаромембранной установки:** 1 – расходная ёмкость; 2 – ёмкость пермеата; 3 – насос плунжерный; 4 – плоскокамерный аппарат; 5 – дроссель; 6 – поплавковый ротаметр; 7 – ресивер; 8 – компрессор высокого давления; 9 – игольчатый вентиль; 10 – термостат; 11 – образцовый манометр; 12 – электроконтактный манометр; 13 – источник постоянного тока

**Fig. 5 - Diagram of an electrobaromembrane unit:** 1 – flow capacity; 2 – permeate capacity; 3 – plunger pump; 4 – flat-chamber apparatus; 5 – throttle; 6 – float rotameter; 7 – receiver; 8 – high-pressure compressor; 9 – needle valve; 10 – thermostat; 11 – reference pressure gauge; 12 – electrocontact pressure gauge; 13 – DC power supply

В схемах электробаромембранного разделения промышленных растворов и сточных вод, выделяют следующие потоки сконцентрированный - ретентат, очищенный прианодный и прикатодный пермеаты (из одного разделяемого раствора получается три. Современные электробаромембранные технологии претерпевают непрерывное развитие, интегрируя новейшие научные достижения и демонстрируя впечатляющие результаты в области извлечения и очистки металлов. Систематические исследования, направленные на модификацию мембранных материалов и оптимизацию технологических процессов, открывают новые перспективы для применения электробаромембранной технологии в различных отраслях,

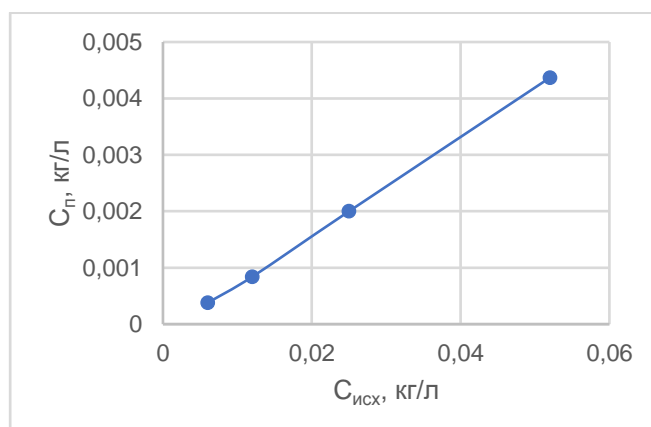
включая электронику, металлургию и переработку отходов.

Электробаромембранные системы являются сложными инженерными сооружениями, функционирующими на основе интеграции нескольких физико-химических явлений:

- мембранной фильтрации;
- электролиза;
- электрофореза.

Данные технологии обеспечивают высокоэффективное разделение и очистку растворов от разнообразных примесей, в том числе тяжёлых металлов, таких как висмут, олово и никель. Многолетние исследования показали, что скорость массопереноса в процессах электроультрафильтрации, электрогиперфильтрации, электронанофильтрации существенно зависит от ряда эксплуатационных параметров и сопутствующих явлений. К числу таких параметров относятся: трансмембранное давление, напряженность электрического поля, температура раствора, гидродинамические условия и состав разделяемого раствора [29].

На рисунке 6 представлена зависимость концентраций в растворе, содержащий  $\text{Ni}^{2+}$ , пермеата от первоначальной концентрации [32].



**Рис. 6 – График зависимости концентраций при процессе электрогиперфильтрации**

**Fig. 6 – Concentration dependence graph during the electrohyperfiltration process**

В ходе электрогиперфильтрации на прианодной мембране концентрация по ионам  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате возрастала с увеличением концентрации никеля в исходном растворе (рис. 6). Рост никеля в пермеате обусловлен увеличением потока ионов никеля из разделяемого раствора, так как согласно рисунку 6 концентрация ионов никеля в исходном растворе возрастает от 0,006 до 0,052 кг/дм<sup>3</sup>. На поток ионов влияет и концентрационная поляризация, образующаяся на мембране МГА-95. Однако наблюдаемый рост эффективности имеет пределы, определяемые насыщением сорбционной емкости мембраны и развитием концентрационной поляризации при повышенных значениях концентрации.

Основной принцип функционирования электробаромембранной установки базируется на применении мембранных структур, обладающих селективной проницаемостью для определенных ионов и молекул под действием электрического поля. В зависимости



от типа – ионно-обменная или пермеабельная – мембрана способна осуществлять изоляцию загрязнителей из раствора. В ходе работы установки подаётся электрический ток, который активирует ионы металлов, делая их мобильными. Под воздействием поля ионы перемещаются к аноду или катоду в соответствии со своим знаком заряда.

Электробаромембранные системы конструируются из ряда важных элементов:

- камер для подачи исходного раствора,
- мембранных фильтров,
- электродов (анода и катода)
- систем регулирования потока и давления.

Мембраны, применяемые в данных системах, производятся из полимерных материалов с высокой селективностью и стойкостью к воздействию агрессивных сред. В качестве примера можно привести мембраны на основе полиамида или полифенилсульфона, которые характеризуются необходимой прочностью и длительным сроком службы [39].

Электробаромембранные технологии характеризуются высокой степенью адаптивности к специфическим требованиям производства. Это достигается за счет возможности модификации конфигурации мембранной установки в зависимости от типа обрабатываемого раствора и желаемых результатов очистки. Кроме того, выбор материалов мембран и параметров работы может быть оптимизирован для достижения максимальной эффективности процесса. Такая гибкость позволяет широко применять электробаромембранные системы в различных условиях эксплуатации.

Электробаромембранные технологии, помимо применения в металлургии и электронике, демонстрируют высокую эффективность в химической промышленности. В частности, они используются для очистки промышленных сточных вод от загрязняющих веществ, таких как тяжёлые металлы и органические растворители. Например, внедрение данных технологий на одном из химических предприятий позволило существенно снизить концентрацию загрязнителей в сточных водах, приведя их в соответствие с современными экологическими стандартами. Показатели эффективности данного предприятия свидетельствуют об удалении не менее 90 % всех токсичных соединений [40]. Это достижение позитивно сказалось не только на состоянии окружающей среды, но и на экономической эффективности предприятия за счет снижения затрат на очистку сточных вод и их последующую переработку.

### Заключение

Выполненный анализ перспективности применения электромембранных методов в разделении никельсодержащих водных растворов позволил сделать следующие выводы

1. В настоящем анализе оценена перспективность использования мембранных методов, рассмотрена теоретическая и практическая сторона применения баромембранных, электромембранных, и электробаромембранных технологий, описано, как эти технологии могут быть использованы в различных отрас-

лях промышленности. Выделены преимущества и недостатки рассматриваемых мембранных процессов.

2. Экспериментальными исследованиями по обратному осмосу с мембранами МГА-80 и МГА-95 было установлено, что использование мембраны МГА-95 обеспечивает более эффективное разделение растворов с невысоким содержанием целевого компонента. Наличие у мембраны МГА-95 более мелких нанопор, чем у мембраны МГА-80 и более тонкого селективно-проницаемого слоя, в котором в основном проникают молекулы воды и задерживаются ионы и молекулы растворенного вещества, образуя при этом поляризационный слой, обладающий динамическими свойствами.

3. Проведенное сравнение электромембранных технологий показало, что электродиализные методы в ряде случаев обладают более высоким преимуществом, так как во-первых имеет ионоселективные мембраны с высокими характеристиками по транспортным свойствам, по широкому диапазону изменения pH и температуры разделяемого раствора; во-вторых отечественные мембраны выпускаются в промышленном масштабе; в-третьих данными методами можно разделять промышленные растворы с получением высококонцентрированного концентрата и глубоко очищенного дилюата.

*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. М. М. Лин, В. О. Шитова, Г. Г. Каграманов, *Успехи в химии и химической технологии*, 2(171), 109-110 (2016).
2. И. О. Исакова, В. Э. Ткачева, *Вестник Казанского технологического университета*, 19(10), 143-146 (2016).
3. Е. А. Татаринцева, Л. Н. Ольшанская, Е. А. Бухарова, *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*, (3), 53-64 (2021).
4. M.A. Abd El-Ghaffar, H.A. Tieama, *Chemical and Biomolecular Engineering*, 2, 2, 57-82 (2017).
5. Ю. Д. Ефимова, *Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов*, 20-22 (2021).
6. K. Selatile, SS Ray, N. Kumar, V. Ojijo *Двумерные материалы для экологических применений*, 245-268 (2023).
7. С. Синха Рэй, Х. Сингх Бахши, Р. Дангаяч, Р. Сингх, *Мембраны*, 10, 7, 140 (2020).
8. В. В. Егоров, Е. Н. Лазарева, Л. Н. Ольшанская, А. В. Яковлев, *Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов*, 57-60 (2017).
9. М.К. Кйалуэ, А.Г. Липин, *Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет*, 304–306 (2023).
10. Y. Yu, S. Lee, S.K. Maeng, *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7, 2, 111-120 (2016).
11. В.И. Заболоцкий, М.В. Шарафан, Н.В. Шельдешов, Е.Г. Ловцов, *Электрохимия*, 44, 155 (2008).
12. Д. О. Торопов, *Молодой ученый*, 26 (577), 95-102

- (2025).
13. А. Ю. Харина, С. Я. Елисеев, *Конденсированные среды и межфазные границы*, 19, 1, 126 – 132 (2017).
  14. О.А. Козадерова, С.И. Нифталиев, К.Б. Ким, *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*, 62, 3, 30-36 (2019).
  15. В.А. Гонова, А.Г. Липин, *Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 21 апреля 2021 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет*, 353–355 (2021).
  16. Д.Ю. Тураев, В.А. Колесников, А.Н. Попов, *Теоретические основы химической технологии*, 55, 1, 87-98 (2021).
  17. Н.А. Платэ, *Мембранная наука и технология. Выступления и интервью*, 440 (2012).
  18. В. И. Заболоцкий, Н. П. Березина, В. В. Никоненко, А. А. Шудренко, *Наука Кубань*, 3, 4-10 (2010).
  19. Е. А. Потапова, Н. А. Третьякова, *Система управления экологической безопасностью*, 196-200 (2020).
  20. М.К. Джубари, Н.В. Алексеева, М.Ю. Балабанова, *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82, 4 (86), 227-235 (2020).
  21. В. И. Коновалов, В. Б. Коробов, О. А. Абоносимов, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 6, 3, 425–434 (2000).
  22. В.А. Гонова, А.Г. Липин, *Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет*, 332–334 (2022).
  23. В. Гонова, *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*, 73(1), 37–41 (2023).
  24. С. В. Натарева, Д.Е. Захаров, Н.М. Шилов, *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*, 3(67), 70–76 (2021).
  25. Е. С. Печенкина, М. Н. Бобров, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 30(3), 505-520 (2024).
  26. М.К. Джубари, Н.В. Алексеева, *Южно-сибирский научный вестник*, 2, 60-70 (2021).
  27. В.А. Семилетова, К.В. Шестаков, С.И. Лазарев, К.К. Полянский, *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 87(2), 112-120 (2025).
  28. В.И. Заболоцкий, Н.А. Романюк, С. А. Лоза, *Мембраны и мембранные технологии*, 13, 1, 3-14 (2023).
  29. А. Г. Первов, Д. В. Спицов, Ж. М. Говорова, *Мембраны и мембранные технологии*, 11(5), 345-359 (2021).
  30. С. В. Федосов, Ю. П. Осадчий, А. В. Маркелов, Н. Е. Пахотин, *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*, 2 (14), 80-89 (2020).
  31. С. Л., Захаров, Ю. П. Осадчий, А. В. Маркелов, Н. Е. Пахотин, *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 1, 15-19 (2019).
  32. Д. С. Лазарев, И. В. Хорохорина, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 1, 118-128 (2025).
  33. С.И. Лазарев, И.В. Хорохорина, К.С. Лазарев, В.Ю. Богомолов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 11, 69 (2017).
  34. А.В. Пермяков, И.А. Евдокимов, Т.В. Вобликова, *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 102, 1, 270-283 (2014).
  35. П.А. Василенко, С.В. Утин, В.И. Заболоцкий, К.А. Лебедев, *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ)*, 126(2) (2017).
  36. А.Е. Куценко, О.М. Аминов, В.А. Шапошник, *Сорбционные и хроматографические процессы*, 15, 1, 67-73 (2015).
  37. Т.С. Бадесса, В.А. Шапошник, М.Р. Нартова, *Конденсированные среды и межфазные границы*, 17, 1, 24-28 (2015).
  38. X. Fan, H. Zhao, X. Quan, Y. Liu, *Water Res.*, 88, 285-292 (2016).
  39. L. Pérez-Manriquez, P. Neelakanda, K.-V. Peinemann, *J. Membr. Sci.*, 554, 1-5 (2018).
  40. К. В. Шестаков, *Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент*, 147-149 (2022).

## References

1. M. M. Lin, V. O. Shitova, G. G. Kagramanov, *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2(171), 109-110 (2016).
2. I. O. Iskhakova, V. E. Tkacheva, *Herald of Technological University*, 19(10), 143-146 (2016).
3. E. A. Tatarintseva, L. N. Olshanskaya, E. A. Bukharova, *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Studies*, (3), 53-64 (2021).
4. M.A. Abd El-Ghaffar, H.A. Tieama, *Chemical and Biomolecular Engineering*, 2, 2, 57-82 (2017).
5. Yu. D. Efimova, *Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources*, 20-22 (2021).
6. K. Selatile, S.S. Ray, N. Kumar, V. Ojijo *Two-dimensional materials for environmental applications*, 245-268 (2023).
7. S. Sinha Ray, H. Singh Bakshi, R. Dangayach, R. Singh, *Membranes*, 10, 7, 140 (2020).
8. V. V. Egorov, E. N. Lazareva, L. N. Olshanskaya, A. V. Yakovlev, *Current Problems in the Theory and Practice of Electrochemical Processes*, 57-60 (2017).
9. M.K. Kyalue, A.G. Lipin, *Conference Proceedings. In 3 parts, Yaroslavl, April 20–21, 2022. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University*, 304–306 (2023).
10. Y. Yu, S. Lee, S.K. Maeng, *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7, 2, 111-120 (2016).
11. V.I. Zabolotsky, M.V. Sharafan, N.V. Shel'deshov, E.G. Lovtsov, *Electrochemistry*, 44, 155 (2008).
12. D.O. Toropov, *Young Scientist*, 26 (577), 95-102 (2025).
13. A.Yu. Kharina, S.Ya. Eliseev, *Condensed Media and Interphase Boundaries*, 19, 1, 126 – 132 (2017).
14. O.A. Kozaderova, S.I. Niftaiev, K.B. Kim, *News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*, 62, 3, 30-36 (2019).
15. V.A. Gonova, A.G. Lipin, *Conference Proceedings. In 3 parts, Yaroslavl, April 21, 2021. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University*, 353–355 (2021).
16. D.Yu. Turaev, V.A. Kolesnikov, A.N. Popov, *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 55, 1, 87-98 (2021).
17. N.A. Platte, *Membrane Science and Technology. Speeches and Interviews*, 440 (2012).
18. V. I. Zabolotsky, N. P. Berезина, V. V. Nikonenk, A. A. Shudrenko, *Science of Kuban*, 3, 4-10 (2010).
19. E. A. Potapova, N. A. Tretyakova, *Environmental Safety Management System*, 196-200 (2020).
20. M.K. Dzhubari, N.V. Alekseeva, M.Yu. Balabanova, *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82, 4 (86), 227-235 (2020).
21. V. I. Kononov, V. B. Korobov, O. A. Abonosimov, *Bulletin of Tambov State Technical University*, 6, 3, 425–434 (2000).
22. V.A. Gonova, A.G. Lipin, *Conference Proceedings. In 3 parts, Yaroslavl, April 20–21, 2022. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University*, 332–334 (2022).
23. V. Gonova, *Modern Science-Intensive Technologies. Regional Application*, 73(1), 37–41 (2023).

24. S.V. Natareev, D.E. Zakharov, N.M. Shilov, *Modern Science-Intensive Technologies. Regional Application*, 3(67), 70–76 (2021).
25. E. S. Pechenkina, M. N. Bobrov, *Bulletin of Tambov State Technical University*, 30(3), 505-520 (2024).
26. M.K. Dzhubari, N.V. Alekseeva, *South Siberian Scientific Bulletin*, 2, 60-70 (2021).
27. V.A. Semiletova, K.V. Shestakov, S.I. Lazarev, K.K. Polyansky, *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 87(2), 112-120 (2025).
28. V.I. Zabolotsky, N.A. Romanyuk, S.A. Loza, *Membranes and Membrane Technologies*, 13, 1, 3-14 (2023).
29. A.G. Pervov, D.V. Spitsov, Zh.M. Govorova, *Membranes and Membrane Technologies*, 11(5), 345-359 (2021).
30. S. V. Fedosov, Yu. P. Osadchy, A. V. Markelov, N. E. Pakhotin, *Bulletin of the Volga State Technological University. Series "Materials. Structures. Technologies"*, 2 (14), 80-89 (2020).
31. S. L. Zakharov, Yu. P. Osadchy, A. V. Markelov, N. E. Pakhotin, *Repair. Restoration. Modernization*, 1, 15-19 (2019).
32. D. S. Lazarev, I. V. Khorokhorina, *Bulletin of Tambov State Technical University*, 1, 118-128 (2025).
33. S.I. Lazarev, I.V. Khorokhorina, K.S. Lazarev, V.Yu. Bogomolov, *Chemical and Oil and Gas Engineering*, 11, 69 (2017).
34. A.V. Permyakov, I.A. Evdokimov, T.V. Voblikova, *Polytematicheskaya Seteyaya Elektronnaya Nauchnaya Zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarno-Tekhnicheskogo Universiteta*, 102, 1, 270-283 (2014).
35. P.A. Vasilenko, S.V. Utin, V.I. Zabolotsky, K.A. Lebedev, *Multidisciplinary online scientific journal of Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubSAU)*, 126(2) (2017).
36. A.E. Kutsenko, O.M. Aminov, V.A. Shaposhnik, *Sorption and Chromatographic Processes*, 15, 1, 67-73 (2015).
37. T.S. Badesa, V.A. Shaposhnik, M.R. Nartova, *Condensed Media and Interfacial Boundaries*, 17, 1, 24-28 (2015).
38. X. Fan, H. Zhao, X. Quan, Y. Liu, *Water Res.*, 88, 285-292 (2016).
39. L. Pérez-Manríquez, P. Neelakanda, K.-V. Peinemann, *J. Membr. Sci.*, 554, 1-5 (2018).
40. K. V. Shestakov, *Modern Solid-Phase Technologies: Theory, Practice, and Innovation Management*, 147-149 (2022).

© **В. А. Семилетова** – ассистент кафедры Природопользование и защита окружающей среды (ПЗОС), Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия, semiletovatstu@gmail.com; **С. И. Лазарев** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Механика и инженерная графика», ТГТУ, sergey.lazarev.1962@mail.ru; **О. В. Долгова** – кандидат технических наук, доцент кафедры ПЗОС, ТГТУ, o.v.dolgova@mail.ru; **К. К. Полянский** – д.т.н., профессор, кафедра «Коммерции и товароведения», Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Воронеж, Россия, kaf-kit@vfreu.ru.

© **V. A. Semiletova** – Senior Lecturer of the Department of Natural Resource Use and Environmental Protection (NRUEP), Tambov State Technical University (TSTU), Tambov, Russia, semiletovatstu@gmail.com; **S. I. Lazarev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, TSTU, sergey.lazarev.1962@mail.ru; **O.V. Dolgova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the NRUEP department, TSTU, o.v.dolgova@mail.ru; **K.K. Polyansky** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department Commerce and commodity science, Voronezh branch of the Plekhanov Russian Economic University, Voronezh, Russia, kaf-kit@vfreu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 07.11.25.

Дата принятия рукописи в печать – 05.12.25.