

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОНАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ ИОНОВ Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}

Д. С. Лазарев¹, И. В. Хорохина²✉

*Кафедры: «Механика и инженерная графика», (1);
«Природопользование и защита окружающей среды»,
kotelnikovirina@yandex.ru (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: вольтамперная характеристика; коэффициент задержания; мембрана; нанофильтрация; нейронная сеть; удельный выходной поток; электропроводность.

Аннотация: Изучена кинетика процесса электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств, содержащих ионы Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} . Экспериментально исследованы такие характеристики процесса, как вольтамперометрия, электропроводность, коэффициент задержания мембраны и выходной удельный поток растворителя. На основе полученных экспериментальных данных разработана искусственная нейронная сеть для прогнозирования и расчета кинетических и электрохимических характеристик электронанофильтрационного извлечения компонентов из технологических растворов гальванических производств.

Введение

В современном мире, где проблемы окружающей среды становятся все более острыми, разработка эффективных методов очистки сточных вод является одним из приоритетных направлений исследований. Металлообрабатывающая промышленность, и в частности, гальванические производства, потребляют большие объемы воды [1 – 5]. Как следствие, образуются сточные воды, содержащие в значительном количестве загрязняющие вещества 1–2 классов опасности.

Перспективные методы обезвреживания таких сточных вод – мембранные и электромембранные технологии очистки воды, зарекомендовавшие себя не только в промышленности, но и в производстве питьевой и ультрачистой воды [5 – 11].

Электронанофильтрация – современный доступный метод очистки воды, позволяющий не только задержать целевые ионы, но и сконцентрировать технологические растворы. Исследования кинетических характеристик электронафильтрационной очистки сточных вод и технологических растворов от ионов тяжелых металлов представляют собой важный аспект для оценки эффективности данной технологии. Эффективность процесса напрямую зависит от таких параметров, как величина плотности тока, электропроводность, коэффициент задержания мембраны, выходной удельный поток растворителя.

В целях исследования основных параметров электромембранного разделения проведен эксперимент по очистке модельных растворов, имитирующих реальные сточные воды промышленных объектов г. Тамбова, содержащие ионы Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} . Основные характеристики модельных растворов приведены в табл. 1.

Основные характеристики модельных растворов

Тип раствора	Состав раствора	Исследуемое вещество	Концентрация, мг/л
Промышленные растворы, получаемые в процессе нанесения гальванических покрытий	CuSO ₄ ZnSO ₄ K ₄ P ₂ O ₇ NH ₄ Cl H ₃ BO ₃ CoSO ₄ NiSO ₄	Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Co ²⁺	90...400
Модельный раствор, содержащий: медь и цинк	CuSO ₄ ZnSO ₄	Zn ²⁺ , Cu ²⁺	350
никель и кобальт	NiSO ₄ CoSO ₄	Ni ²⁺ , Co ²⁺	150

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования кинетических характеристик электронофильтрационного процесса разделения растворов проводились на лабораторной установке, основным элементом которой является электромембранная ячейка плоскокамерного типа (рис. 1). Для исследования выбраны следующие марки мембран отечественного производства: ОПМН-П, ОПМН-К.

Чтобы изучить кинетику электронофильтрации, исследовались такие характеристики процесса, как вольтамперметрия, электропроводность λ , коэффициент задержания мембраны R и выходной удельный поток растворителя J . Изучение данных характеристик дает возможность контролировать процесс очистки, повышая его производительность.

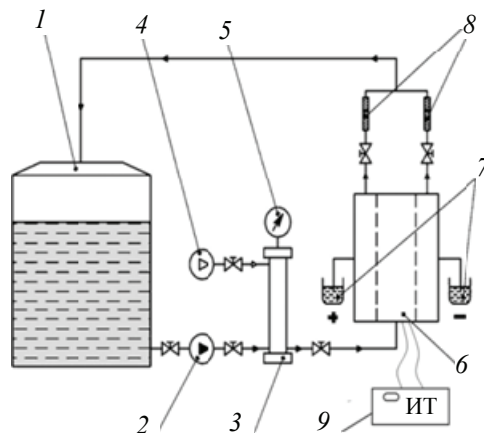


Рис. 1. Схема лабораторной электромембранной установки:

- 1 – емкость для исходного раствора; 2 – насос-дозатор; 3 – гидроаккумулятор;
4 – компрессор; 5 – манометр; 6 – мембранная разделительная ячейка;
7 – емкости для пермеата; 8 – поплавковые ротаметры; 9 – источник постоянного тока

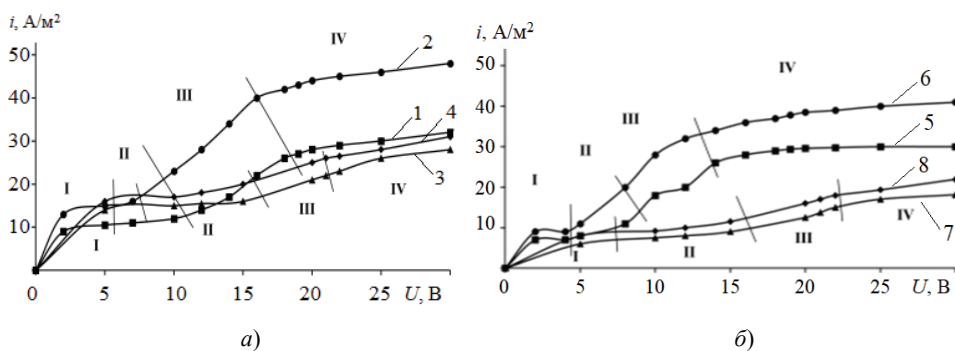


Рис. 2. Вольтамперная характеристика системы «мембрана – раствор»:
a – растворы, содержащие ионы Zn^{2+} (1 – $C_{исх} = 0,3 \text{ кг/м}^3$; 2 – $C_{исх} = 0,6 \text{ кг/м}^3$) и Ni^{2+} (3 – $C_{исх} = 0,3 \text{ кг/м}^3$; 4 – $C_{исх} = 0,6 \text{ кг/м}^3$) – мембрана ОПМН-II;
б – растворы, содержащие ионы Cu^{2+} (5 – $C_{исх} = 0,3 \text{ кг/м}^3$; 6 – $C_{исх} = 0,6 \text{ кг/м}^3$) и Co^{2+} (7 – $C_{исх} = 0,3 \text{ кг/м}^3$; 8 – $C_{исх} = 0,6 \text{ кг/м}^3$) – мембрана ОПМН-K

Обсуждение результатов

На рисунке 2 показана вольтамперная характеристика (ВАХ) мембранной системы, позволяющая оценить величину предельного электродиффузионного тока по ионам соли – параметр, важный для практического применения мембран.

Исследуемые технологические растворы являются проводниками второго рода. Так как протекание тока в таких электролитах всегда сопровождается химическими превращениями, на экспериментальных кривых (см. рис. 2) видно, что ВАХ имеет четыре участка с двумя волнами подъема тока: I – имеет линейную зависимость, характеризующую собой омическое изменение тока, обусловлен омическим сопротивлением обоих диффузионных слоев в неполяризованном состоянии и мембраны; II – «плато» предельного тока с резким увеличением потенциала ВАХ, который свидетельствует о снижении концентрации электролита у межфазной границы «мембрана – раствор» по сравнению с концентрацией в ядре потока; III – вторая волна подъема предельного тока (характерна для электромембранных систем), связанная с возникновением сопряженных эффектов концентрационной поляризации, где протекает процесс регенерации ионов H^+ и OH^- ; IV – участок, в котором происходят структурные изменения в активном слое ионизированной мембраны. Каждый участок ВАХ содержит определенные сведения о мембранной системе и особенностях развития такого явления, как концентрационная поляризация, а угол наклона омического сегмента кривой может быть использован для оценки электрического сопротивления мембраны [12].

Анализируя ВАХ наночистотных мембран, можно отметить зависимость предельного тока от концентрации ионов металла в растворе: с увеличением концентрации ионов металла возрастает величина предельного тока, который отвечает такому состоянию системы «аппарат – мембрана – раствор», при котором концентрация противоионов у поверхности мембраны падает практически до нуля и в то же время укорачивается участок «плато» предельного тока (II).

Анализ ВАХ позволил определить такой электрохимический параметр системы, как электропроводность раствора.

На рисунке 3 приведены зависимости электропроводности композиционной мембраны, полностью зависящие от количества содержащегося в ней вещества.

Во всех исследуемых растворах концентрации ионов металла не превышали 1 кг/м^3 , следовательно, данные растворы являются слабыми электролитами. С повышением концентрации в них ионов металла электропроводность мембраны

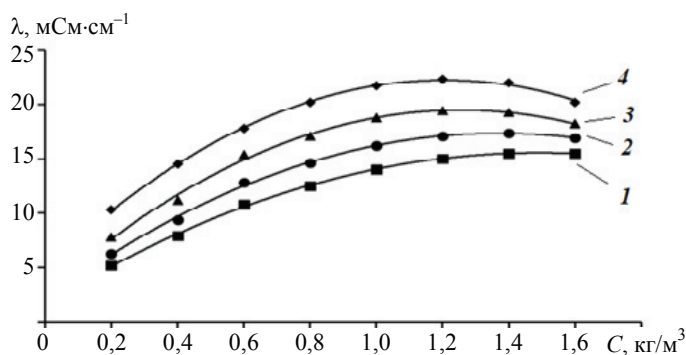


Рис. 3. Зависимость электропроводности композиционных мембран ОПМН-П и ОПМН-К от концентрации ионов металлов:

1 – мембрана ОПМН-П, раствор Zn^{2+} , Cu^{2+} ; 2 – мембрана ОПМН-К, раствор Zn^{2+} , Cu^{2+} ; 3 – мембрана ОПМН-К, раствор Ni^{2+} , Co^{2+} ; 4 – мембрана ОПМН-П, раствор Ni^{2+} , Co^{2+}

возрастает, так как происходит генерация дополнительных носителей электрического заряда. Данный факт не противоречит общепринятым физическим законам.

Однако с дальнейшим увеличением концентрации возникает обратный эффект: степень диссоциации ионов начинает снижаться, что приводит к ухудшению электропроводности. Этот феномен можно объяснить влиянием ионной активности и взаимодействием ионов в растворе. При достижении определенного порога концентрации, количество свободных ионов не поддерживает необходимый уровень проводимости и электропроводность начинает деградировать, что и наблюдается на представленных зависимостях [13].

Определив оптимальную плотность тока для проведения процесса мембранного разделения для каждого типа мембран и растворов, следующим этапом был исследован коэффициент задержания мембран и удельный выходной поток растворителя.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента задержания и удельного выходного потока от трансмембранного давления для модельных растворов, содержащих катионы Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} .

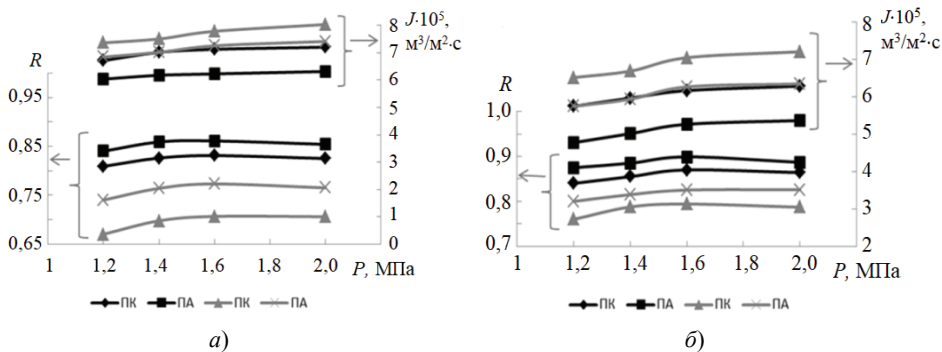


Рис. 4. Изменение задерживающей способности мембраны и удельного выходного потока растворителя в зависимости от трансмембранного давления при электронанофильтрационном разделении растворов, содержащих:

а – Zn^{2+} , Cu^{2+} (черные – для мембраны ОПМН-П с плотностью тока $i = 36 \text{ A/m}^2$, серые – для мембраны ОПМН-К с плотностью тока $i = 28 \text{ A/m}^2$);
 б – Ni^{2+} , Co^{2+} (черные – для мембраны ОПМН-П с плотностью тока $i = 28 \text{ A/m}^2$, серые – для мембраны ОПМН-К с плотностью тока $i = 21 \text{ A/m}^2$);
 ПК – прикатодные мембраны; ПА – прианодные мембраны

Для нанофильтрационных мембран задерживающая способность по всем видам исследуемых ионов в начальном периоде возрастает. Вследствие увеличения трансмембранного давления повышается сила воздействия на рабочую поверхность мембраны, которая в результате деформационных изменений сжимается и, как следствие, уплотняется. После достижения значений трансмембранного давления более 1,6 МПа наблюдается снижение коэффициента задержания. Это связано с постепенным возрастанием количества ионов у активной поверхности мембраны в примембранном слое, где происходит проскок иона вместе с растворителем [14, 15].

Аналогично можно заметить, что по всем исследуемым ионам и мембранам с повышением трансмембранного давления над поверхностью мембраны возрастает удельный выходной поток по растворителю, так как является главной движущей силой процесса разделения.

В условиях, когда трансмембранное давление превышает допустимые значения, происходит значительное изменение в динамике процессов фильтрации. Учитывая, что давление является главным фактором, обеспечивающим движение растворителя через мембрану, возрастает не только скорость потока, но и качество разделения компонентов. При этом важно отметить, что различные ионы и мембраны реагируют на изменение давления по-разному, что приводит к вариациям в выходном потоке. Различия в производительности нанофильтрационных мембран ОПМН-П и ОПМН-К связаны с их пористостью и веществом активного слоя мембран (ОПМН-К – поливиниловый спирт; ОПМН-П – пиперазин).

Стоит отметить, что разделяемый раствор, являясь проводником второго рода, при проведении экспериментального исследования с наложением электрического поля нагревается, что вносит вклад в увеличение удельного выходного потока через прикатодные и прианодные мембраны. Также с увеличением давления мембрана подвергается дополнительным механическим воздействиям, что может приводить к ее структурным изменениям [16, 17].

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана искусственная нейронная сеть (ИНС) для прогнозирования и расчета кинетических и электрохимических характеристик электронанофильтрационного извлечения ионов металлов из технологических растворов гальванических производств. Искусственная нейронная сеть является важным инструментом для изучения и контроля электрохимических процессов, происходящих в системе «мембрана – раствор». Она позволяет получить информацию о состоянии системы и оптимизировать ее работу для достижения желаемых результатов. На рисунках 5 и 6 представлены интерфейсы разработанных ИНС.

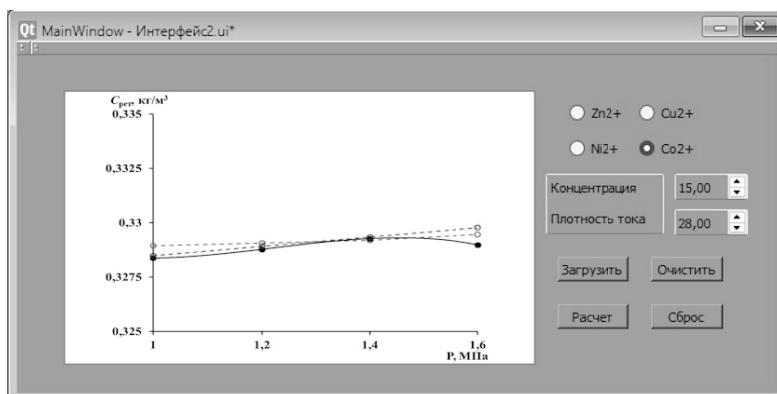


Рис. 5. Интерфейс ИНС для прогнозирования концентрации ионов от давления при постоянной плотности тока

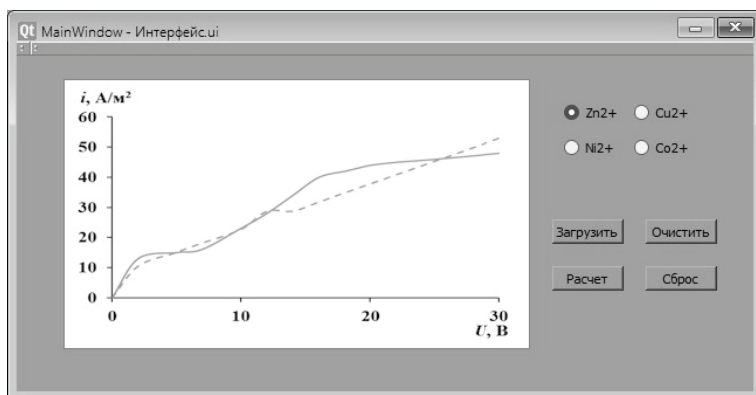


Рис. 6. Интерфейс ИНС для прогнозирования плотности тока от напряжения в системе «мембрана – раствор»

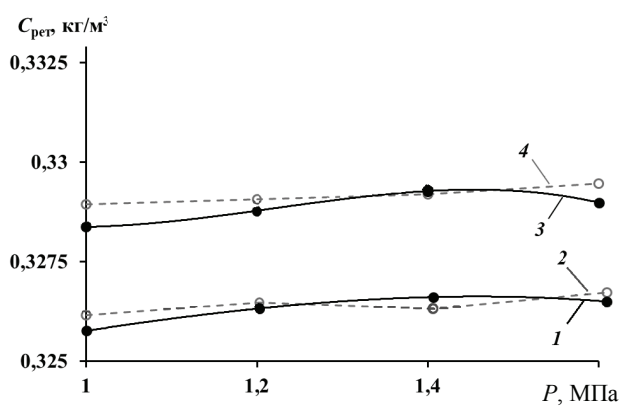


Рис. 7. Зависимости концентрации ионов Co^{2+} в ретенате от трансмембранного давления при разделении технологического раствора, содержащего катионы Co^{2+} и Ni^{2+} , при плотности тока $i = 28 \text{ A/m}^2$:

1, 3 – экспериментальные данные соответственно для мембран ОПМН-К и ОПМН-П;
2, 4 – спрогнозированные ИНС соответственно для мембран ОПМН-К и ОПМН-П

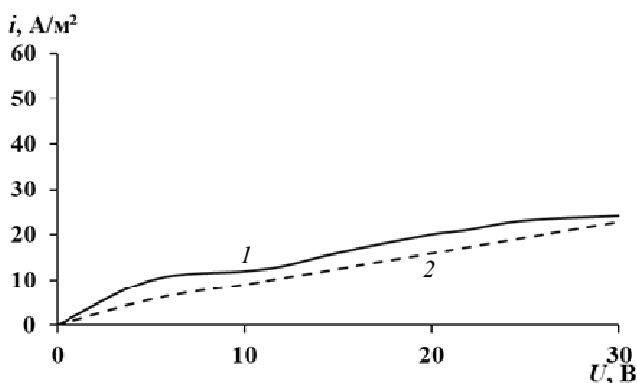


Рис. 8. Зависимость плотности тока от напряжения электрохимической баромембранной системы для ионизированной мембраны ОПМН-К при концентрировании растворов ОАО «Электроприбор» (Тамбов), содержащих ионы Co^{2+} :

1, 2 – результаты соответственно экспериментальных исследований и рассчитанные нейронной сетью

Для проверки адекватности ИНС проведено сравнение экспериментально полученных и спрогнозированных с помощью ИНС зависимостей концентраций ионов Co^{2+} от давления при разделении технологического раствора, содержащего катионы Co^{2+} и Ni^{2+} , с помощью мембран ОПМН-К и ОПМН-П (рис. 7), и плотности тока от напряжения электрохимической баромембранной системы для ионизированной мембраны ОПМН-К (рис. 8).

Результаты исследования (см. рис. 7) показывают линейное возрастание всех исследуемых значений трансмембранного давления ΔP (1...1,6 МПа) для обоих типов мембран. Рассчитанные ИНС значения концентрации Co^{2+} в ретентате адекватно совпадают с экспериментально полученными данными по концентрации Co^{2+} в ретентате после процесса нанофильтрационного разделения многокомпонентного раствора, содержащего катионы Co^{2+} и Ni^{2+} . Расхождение значений варьируется в пределах 5 %.

Полученные с помощью нейронной сети результаты ВАХ (см. рис. 8) также хорошо коррелируются с экспериментальными данными. Расхождение значений варьируется в пределах 10 %.

Одним из основных преимуществ нейронных сетей является их способность обучаться на больших объемах данных и выявлять сложные нелинейные зависимости между входными и выходными переменными [18, 19]. Благодаря этому нейронные сети могут адаптироваться к различным условиям и типам сточных вод, что делает их универсальным инструментом для прогнозирования результатов очистки.

Заключение

На основании проведенных исследований получены экспериментальные данные и зависимости по исследованиям кинетических и электрохимических параметров электромембранного извлечения ионов металлов кобальта, никеля, цинка и меди из технологических растворов гальванических производств. Применены цифровые технологии на основе нейронных сетей для прогнозирования вольтамперных и кинетических характеристик электронанофильтрационного разделения водных растворов гальванических производств, содержащих ионы тяжелых металлов. Благодаря высокой точности прогнозирования и хорошей корреляции с экспериментальными данными, нейронные сети помогают улучшить процессы очистки сточных вод и сделать их более эффективными и экологически безопасными.

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

Список литературы

1. Вертинский, А. П. Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика / А. П. Вертинский // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 175 – 182.
2. Семенов, А. Ф. Обзор современных методов очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов / А. Ф. Семенов, Е. Ю. Либерман, В. А. Колесников // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 4(227). – С. 83 – 85.

3. Enhanced chitosan beads-supported Fe⁰ -nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers / T. Liu, X. Yang, Z.-L. Wang, X. Yan // *Water Research*. – 2013. – Vol. 47, No. 17. – P. 6691 – 6700. doi: 10.1016/j.watres.2013.09.006
4. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов ; под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Глобус, 2002. – 352 с.
5. Barakat, M. A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater / M. A. Barakat // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2011. – No. 4. – P. 361 – 377. doi: 10.1007/s00253-016-7646-x
6. Макаrchук, Г. В. Мембранные методы очистки воды / Г. В. Макаrchук, Н. А. Мамаева, К. Д. Шиманский // *Наука и военная безопасность*. – 2022. – № 1(28). – С. 92 – 97.
7. Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals / T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W. H. Lo, S. Babel // *Journal of Chemical Engineering*. – 2006. – No. 118. – P. 83 – 98. doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015
8. Волчек, К. А. Комбинированные мембранные процессы очистки и переработки воды / К. А. Волчек, Г. Г. Каграманов, Е. Н. Фарносова // *Химическая промышленность сегодня*. – 2010. – № 7. – С. 43 – 50.
9. Хорохорина, И. В. Мембранные технологии – экологичные способы очистки сточных вод / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, С. М. Бидуля // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2021. – № 3(81). – С. 37 – 43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043
10. Тураев, Д. Ю. Технология очистки промывной воды гальванического производства от ионов кадмия методом мембранного и безмембранного электролиза / Д. Ю. Тураев, В. А. Колесников, А. Н. Попов // *Теоретические основы химической технологии*. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 75 – 82. doi: 10.31857/S0040357120010224
11. Абоносимов, Д. О. Применение мембранных технологий в очистке сточных вод гальванопроизводств / Д. О. Абоносимов, С. И. Лазарев // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 306 – 313.
12. Хорохорина, И. В. Влияние концентрации ионов Zn²⁺ и Cu²⁺ на вольт-амперные характеристики и электропроводность мембран в процессе электромембранного разделения стоков металлообрабатывающих производств / И. В. Хорохорина // *Вестник технологического университета*. – 2020. – Т. 23, №2. – С. 46 – 49.
13. Гнусин, Н. П. Электродиффузия через неоднородную ионообменную мембрану / Н. П. Гнусин, Н. А. Кононенко, С. Б. Паршиков // *Электрохимия*. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 35 – 40.
14. Извлечение цинка, меди, никеля и кобальта из сточных вод гальванических производств методом электронанофильтрации / С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, К. В. Шестаков, Д. С. Лазарев // *Журнал прикладной химии*. – 2021. – Т. 94, № 8. – С. 1059 – 1064. doi: 10.31857/S0044461821080120
15. Электронанофильтрационная очистка сточных вод машиностроительных производств от некоторых ионов / Р. В. Попов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев, В. М. Дмитриев // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 288 – 294. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.288-294
16. Структурные характеристики мембран и кинетические зависимости электронанофильтрационной очистки сточных вод процесса латунирования / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, Ю. М. Головин, Д. С. Лазарев // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 95 – 102. doi: 10.6060/ivkkt.20206307.6117

17. Iritani, E. Compression and expansion properties of filter cake accompanied with step change in applied pressure in membrane filtration / E. Iritani, N. Katagiri, G. Inagaki // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – Vol. 198. – P. 3 – 9. doi: 10.1016/j.seppur.2016.11.067

18. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В. Н. Штепа, В. А. Кудинов, О. Н. Прокопья, Э. Н. Муслимов // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2024. – № 1(133). – С. 149 – 155.

19. Hamed, M. M. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks / M. M. Hamed, M. G. Khalafallah, E. A. Hassanien // *Environmental Modelling & Software*. – 2004. – Vol. 19, No. 10. – P. 919 – 928. doi: 10.1016/j.envsoft.2003.10.005

Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}

D. S. Lazarev¹, I. V. Khorokhorina²✉

*Departments: Mechanics and Engineering Graphics (1);
Nature Management and Environment Protection,
kotelnikovirina@yandex.ru (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: current-voltage characteristic; retention coefficient; membrane; nanofiltration; neural network; specific output flux; electrical conductivity.

Abstract: The kinetics of the process of electro-nanofiltration purification of process solutions of galvanic production containing ions Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} was studied. Such characteristics of the process as voltammetry, electrical conductivity, membrane retention coefficient and output specific flow of the solvent were experimentally studied. Based on the obtained experimental data, an artificial neural network was developed for forecasting and calculating the kinetic and electrochemical characteristics of electro-nanofiltration extraction of components from process solutions of galvanic production.

References

1. Vertinskiy A.P. [Modern methods of wastewater treatment: application features and problems], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2019, no. 1, pp. 175-182. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Semenov A.F., Liberman Ye.Yu., Kolesnikov V.A. [Review of modern methods of wastewater treatment in galvanic industries from heavy metal ions], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2020, vol. 34, no. 4(227), pp. 83-85. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Liu T., Yang X., Wang Z.-L., Yan X. Enhanced chitosan beads-supported FeO - nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers, *Water Research*, 2013, vol. 47, no. 17, pp. 6691-6700. doi: 10.1016/j.watres.2013.09.006

4. Vinogradov S.S.; Kudryavtsev V.N. (Ed.) *Ekologicheskii bezopasnoye gal'vanicheskoye proizvodstvo* [Environmentally safe galvanic production], Moscow: Globus, 2002, 352 p. (In Russ.)

5. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater, *Arabian Journal of Chemistry*, 2011, no. 4, pp. 361-377. doi: 10.1007/s00253-016-7646-x
6. Makarchuk G.V., Mamayeva N.A., Shimanskiy K.D. [Membrane methods of water purification], *Nauka i voyennaya bezopasnost'* [Science and military security], 2022, no. 1(28), pp. 92-97. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo W.H., Babel S. Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Journal of Chemical Engineering*, 2006, no. 118, pp. 83-98. doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015
8. Volchek K.A., Kagramanov G.G., Farnosova Ye.N. [Combined membrane processes for water purification and recycling], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2010, no. 7, pp. 43-50. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bidulya S.M. [Membrane technologies – environmentally friendly methods of wastewater treatment], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 3(81), pp. 37-43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Turayev D.Yu., Kolesnikov V.A., Popov A.N. [Technology of purification of galvanic production wash water from cadmium ions by membrane and membraneless electrolysis], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2020, vol. 54, no. 1, pp. 75-82. doi: 10.31857/S0040357120010224 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [Application of membrane technologies in wastewater treatment from galvanic industries], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Khorokhorina I.V. [Effect of Zn^{2+} and Cu^{2+} ion concentration on the current-voltage characteristics and electrical conductivity of membranes in the process of electromembrane separation of metalworking industry wastewater], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2020, vol. 23, no. 2, pp. 46-49. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Gnusin N.P., Kononenko N.A., Parshikov S.B. [Electrodifusion through a non-uniform ion-exchange membrane], *Elektrokimiya* [Electrochemistry], 1994, vol. 30, no. 1, pp. 35-40. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Shestakov K.V., Lazarev D.S. [Extraction of zinc, copper, nickel and cobalt from wastewater of galvanic industries by the method of electron-nanofiltration], *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 2021, vol. 94, no. 8, pp. 1059-1064. doi: 10.31857/S0044461821080120 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Popov R.V., Lazarev S.I., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A., Dmitriyev V.M. [Electron-nanofiltration purification of wastewater from mechanical engineering industries from some ions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 288-294. doi: 10.17277/ vestnik.2017.02.pp.288-294 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Lazarev D.S. [Structural characteristics of membranes and kinetic dependencies of electron-nanofiltration treatment of wastewater from the brass plating process], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2020, vol. 63, no. 7, pp. 95-102. doi: 10.6060/ivkkt.20206307.6117 (In Russ., abstract in Eng.)
17. Iritani E., Katagiri N., Inagaki G. Compression and expansion properties of filter cake accompanied with step change in applied pressure in membrane filtration, *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 198, pp. 3-9. doi: 10.1016/j.seppur.2016.11.067

18. Shtepa V.N., Kudinov V.A., Prokopenya O.N., Muslimov E.N. [Predictive control of the biological wastewater treatment process based on neural network pH forecasting], *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Brest State Technical University], 2024, no. 1(133), pp. 149-155. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Hamed M.M., Khalafallah M.G., Hassanien E.A. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks, *Environmental Modelling & Software*, 2004, vol. 19, no. 10, pp. 919-928. doi: 10.1016/j.envsoft.2003.10.005

Kinetische Eigenschaften der Reinigung der technologischen Lösungen der galvanischen Produktion durch Elektronen-Nanofiltration aus Ionen Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}

Zusammenfassung: Es ist die Kinetik des Prozesses der Elektronen-Nanofiltrationsreinigung von technologischen Lösungen der galvanischen Produktion, die die Ionen Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} enthalten, untersucht. Die folgenden Prozesseigenschaften sind experimentell untersucht: Volt-Amper-Metrie, elektrische Leitfähigkeit, Membranretentionskoeffizient und auslassspezifischer Lösungsmittelfluss. Basierend auf den erhaltenen experimentellen Daten ist ein künstliches neuronales Netzwerk zur Vorhersage und Berechnung der kinetischen und elektrochemischen Eigenschaften der Elektronen-Nanofiltrationsextraktion von Komponenten aus Prozesslösungen der galvanischen Produktion entwickelt.

Caractéristiques cinétiques de la filtration d'électron des solutions de traitement de la production de galvanoplastie des ions Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}

Résumé: Est étudiée la cinétique du processus de la purification d'électron par filtration des solutions technologiques des productions galvaniques contenant des ions Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} . Sont étudiés expérimentalement les caractéristiques du procédé telles que la voltamétrie, la conductivité électrique, le coefficient de rétention de la membrane et le débit spécifique de sortie du solvant. A la base des données expérimentales obtenues, est mis au point un réseau neuronal artificiel pour prédire et calculer les caractéristiques cinétiques et électrochimiques de l'extraction électronanofiltration de composants à partir de solutions technologiques de production galvanique.

Авторы: *Лазарев Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Хорохорина Ирина Владимировна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.