

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ НИКЕЛЯ  
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА****Гонова В.А.**

Гонова Виктория Андреевна (ORCID: 0000-0001-8126-5833)  
Ивановский государственный химико-технологический университет,  
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7.  
E-mail: gonovava@mail.ru

*Изучение вопросов научно-практического использования электродиализа в промышленности, в настоящее время, является крайне актуальным. Электродиализ в гальванопроизводстве рекомендуется применять в качестве локальной очистки стоков от отдельных видов покрытий. Количество обрабатываемых стоков зависит от производительности электродиализатора. Очищаются стоки с различной концентрацией. Автором выполнены опыты по исследованию влияния напряжения на электродах, скорости движения потоков в камерах электромембранного аппарата, а также опыты по концентрированию раствора для повторного использования регенерированного раствора. Показано влияние напряжение на электродах, максимальная степень извлечения ионов никеля наблюдалась при напряжении 12 В. Показано влияние скорости движения раствора, для лабораторного аппарата оптимальной является скорость подачи раствора  $W=0,13$  м/с. Проведено концентрирование раствора, полученного в емкости концентрата на стадии обессоливания промывной воды для дальнейшего использования в технологическом цикле. Получен раствор с концентрацией 34,1 г/л. Таким образом, экспериментально доказана возможность очистки промывных вод участка никелирования с помощью ионообменных мембран отечественного производства.*

**Ключевые слова:** электродиализ, ионы никеля, скорость движения потоков, технологический цикл, концентрирование раствора, химическая очистка промывных вод.

**EXPERIMENTAL STUDY OF PURIFICATION OF SOLUTIONS FROM NICKEL IONS BY ELECTRODIALYSIS****Gonova V.A.**

Gonova Victoria Andreevna (ORCID: 0000-0001-8126-5833)  
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,  
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.  
E-mail: gonovava@mail.ru

*The study of the issues of scientific and practical use of electro dialysis in industry, at present, is extremely relevant. Electro dialysis in electroplating is recommended to be used as a local wastewater treatment from certain types of coatings. The amount of wastewater treated depends on the performance of the electro dialyzer. Drains with different concentrations are cleaned. The author carried out experiments to study the effect of voltage on the electrodes, the flow velocity in the chambers of the electromembrane apparatus, as well as experiments on concentrating the solution for reuse of the regenerated solution. The effect of the voltage on the electrodes is shown, the maximum degree of extraction of nickel ions was observed at a voltage of 12 V. The influence of the velocity of the solution is shown, for the laboratory apparatus the optimal speed of the solution supply is  $W = 0,13$  m/ s. The concentration of the solution obtained in the concentrate tank at the stage of desalination of the washing water for further use in the technological cycle was carried out. A solution with a concentration of 34,1 g/l was obtained. Thus, the possibility of cleaning the washing waters of the nickel plating site using ion-exchange membranes of domestic production has been experimentally proved.*

**Keywords:** electro dialysis, nickel ions, flow velocity, technological cycle, solution concentration, chemical cleaning of washing waters.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Развитие промышленности создает серьезную экологическую проблему, связанную с утилизацией промышленных сточных вод. Их очистка – важная задача. Одним из источников вредных примесей является гальваническое производство, основным видом отходов которого являются промывные воды, содержащие катионы металлов. Эффективное выделение неорганических солей из водных растворов этих веществ может быть осуществлено посредством электродиализа [1, 2]. На современном этапе развития технологий ежегодно разрабатываются совершенно новые методики обработки воды. Но до идеального состояния воды еще очень далеко, так как при очистке, всё равно образуются некие отходы, которые влекут за собой затраты экономического характера и экологическое воздействие на окружающую среду.

Поэтому существует потребность в более глубоком научном изучении обозначенной проблемы, нахождении новых технических решений с применением электродиализа для обессоливания воды и очистки промышленных сточных вод.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с международной терминологией по мембранам и мембранным процессам, рекомендуемой IUPAC [3], электродиализ – это процесс мембранного разделения, при котором ионы переносятся через мембрану под действием внешнего электрического поля [4]. Принципиальная схема электродиализатора представлена на рис. 1. Конструкции подавляющего большинства современных электродиализаторов базируются на схеме многокамерного аппарата, который состоит из значительного числа чередующихся катионо- и анионообменных мембран, вдоль которых прокачивается обрабатываемый раствор [5, 6]. Под действием электрического поля, направленного перпендикулярно мембранам, катионы переносятся через катионообменную мембрану, а анионы – через анионообменную мембрану [7, 8]. В результате в нечетных секциях концентрация увеличивается (камеры концентрирования), в четных секциях – уменьшается (камеры обессоливания).

При наложении электрического поля на мембранную систему ионы сильных электролитов посредством миграции, диффузии и конвекции доставляются к межфазной границе и переносятся через ионообменную мембрану.

Разные числа переноса ионов в мембранах и в растворе позволяют обессоливать и концентрировать растворы электролитов, а также разделять ионные смеси [9].

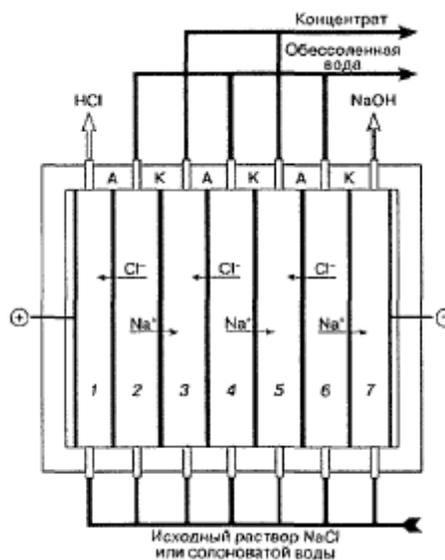


Рис. 1. Принципиальная схема электродиализа  
Fig. 1. Schematic diagram of electrodiolysis

Для увеличения полноты обессоливания необходимы высокие числа переноса противоионов в мембране, увеличение плотности тока и уменьшение толщины диффузионного пограничного слоя. Увеличение плотности тока также имеет свои пределы. В электрохимии принято, что предельный ток обусловлен достижением локальной концентрации на межфазной границе у принимающей стороны мембраны нулевой величины ( $C_s=0$ ). Плотность тока, соответствующую этому условию, называют предельной диффузионной [10].

Долгое время считалось, что нет смысла увеличивать рабочую плотность тока выше предельного значения, однако успехи в развитии технологии водоподготовки, которая в настоящее время чаще всего осуществляется с использованием в качестве первой ступени ионного обмена, обратного осмоса низкого давления или реверсивного и импульсного электродиализа, существенно снизили ограничения, связанные с опасностью осадкообразования в процессе электродиализа. Кроме того, электродиализ оказался одним из немногих, а иногда и единственным методом, позволяющим осуществлять непрерывное, малореагентное селективное извлечение ионных примесей из растворов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цель исследования: определение рациональных технологических параметров процесса электродиализа сточных вод гальванического производства.

Использование электродиализа для обработки промывных вод позволяет получить более концентрированный солевой раствор, а также обессоленный раствор, который можно вновь использовать в качестве технической воды. Для внедрения данного метода требуются данные о влиянии режимных параметров на процесс электродиализа раствора электролита никелирования.

Исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 2, состоящей из трехкамерного электродиализатора с анионообменной мембраной МА-40 и катионообменной мембраной МК-40, регулируемого источника постоянного тока, перистальтического насоса и контрольных приборов для измерения силы тока и напряжения.

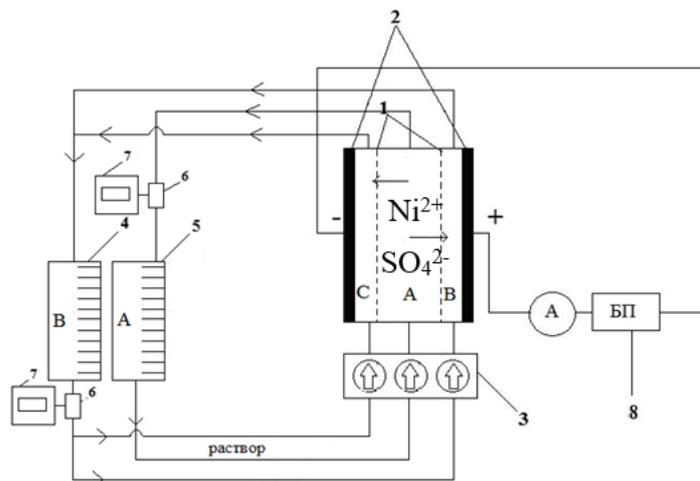


Рис. 2. Схема установки:

- 1 – мембраны, 2 – электроды, 3 – перистальтический насос, 4 – ёмкость концентрата,  
5 – ёмкость с исходным раствором, 6 – кондуктометрический датчик,  
7 – кондуктометр СМ-230, 8 – блок питания

Fig. 2. Installation diagram:

- 1 - membranes, 2 - electrodes, 3 - peristaltic pump, 4 - concentrate container,  
5 - container with initial solution, 6 - conductometric sensor,  
7 - conductometer СМ-230, 8 - power supply

В качестве электродов использованы пластины из титана с оксид-рутениевым покрытием (анод) и нержавеющая сталь (катод). Рабочая поверхность каждой мембраны составляла 112 см<sup>2</sup>. Расстояние между электродами и мембранами и расстояние между мембранами составляло 2 мм. Объем каждой камеры равен 22,5 см<sup>3</sup>. Процесс организован по циркуляционной схеме. Модельный раствор помещался в емкость А и с помощью насоса циркулировал через среднюю камеру обессоливания А. Положительно заряженные ионы Ni<sup>2+</sup> под действие разности потенциалов двигались через катионообменную мембрану в катодную камеру С. Отрицательно заряженные ионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> двигались через анионообменную мембрану в анодную камеру В. Растворы из приэлектродных камер поступали в емкость В и наблюдалось повышение концентрации извлекаемого NiSO<sub>4</sub>. Напротив, в емкости А концентрация рас-

твора уменьшалась. Измерение концентрации растворов в емкости А осуществлялось с помощью кондуктометра СМ-230. Для перехода от значения электропроводности раствора к значениям концентрации использовался калибровочный график, приведенный на рис. 3.

На следующем этапе экспериментальных исследований проводилось изучение влияния скорости движения потоков в камерах электромембранного аппарата на процесс электродиализа раствора электролита никелирования. Опыты проводились с одинаковыми начальными концентрациями и одинаковыми объемами перерабатываемого раствора V=220 мл исходного раствора никелирования в потенциостатическом режиме при разных скоростях W движения раствора: 0,06, 0,13 и 0,175 м/с, которым соответствуют следующие объемные расходы: 37, 80 и 105 мл/мин. Разность потенциалов на электродах одинаковая: 14 В.

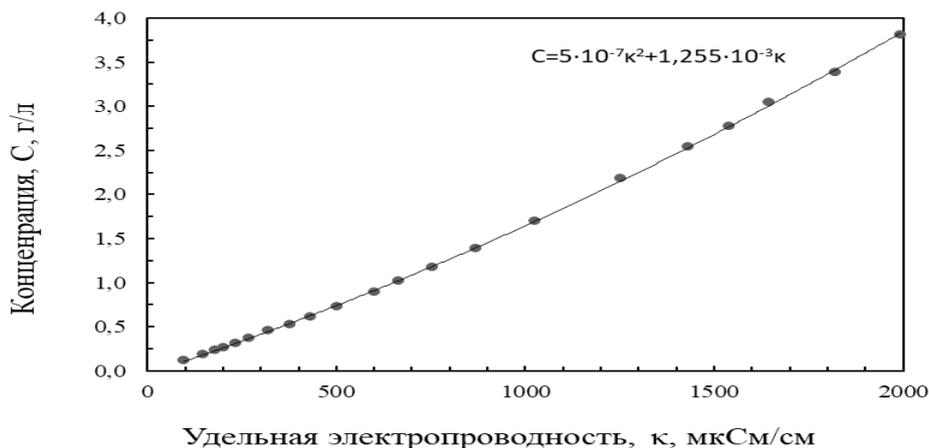


Рис. 3. Калибровочный график  
Fig. 3. Calibration graph

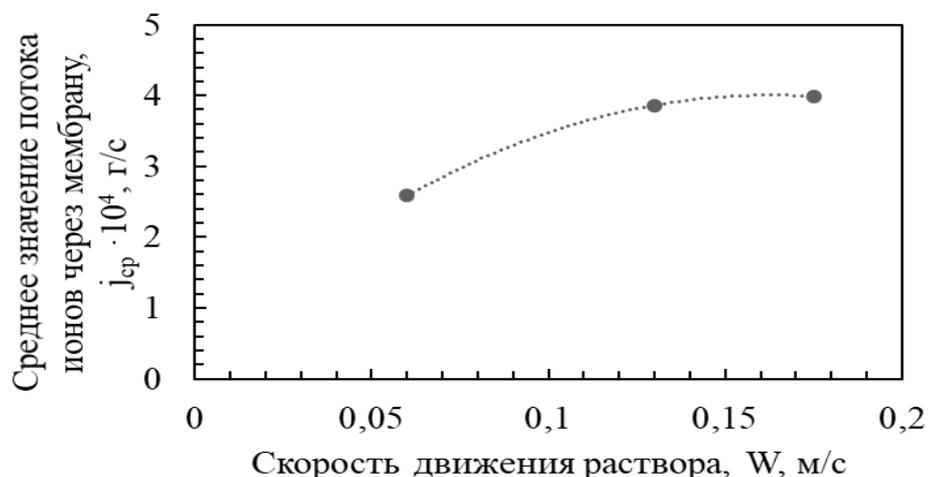


Рис. 4. Зависимость среднего значения потока ионов через мембрану от скорости движения раствора  
Fig. 4. Dependence of the average value of the ion flow through the membrane on the velocity of the solution

Через каждые 2 минуты фиксировали электропроводность обессоливаемого модельного раствора и силу тока. На рис. 4 приведена графическая зависимость среднего значения потока ионов через мембрану от скорости движения раствора. Увеличение скорости движения раствора от 0,06 до 0,13 м/с приводит к уменьшению времени процесса очистки раствора на 16 минут (34,8%).

Дальнейшее увеличение скорости движения раствора приводит к незначительному увеличению потока ионов никеля через мембрану и возрастанию затрат электроэнергии. Поэтому рациональной является скорость движения раствора  $W=0,13$  м/с [9]. Выполнение экспериментов по дальнейшему концентрированию раствора, отобранного из емкости концентрата осуществлялось при следующих условиях (таблица): 1) скорость

движения раствора была одинаковой для всех опытов 0,163 м/с, 2) разность потенциалов на электродах постоянная 14 В, 3) варьировалась начальная концентрация раствора и соотношение объемов растворов в емкости концентрата и дилуата (обессоливаемого раствора).

В таблице приведены основные параметры процесса электродиализа: где  $\tau$  – продолжительность процесса;  $V_{об}/V_{к}$  – соотношение объемов раствора в камере обессоливания и концентрирования;  $n$  – количество обработок раствора;  $i_{ср}$  – средняя за время опыта плотность тока;  $j_{ср}$  – среднее значение потока ионов через мембрану;

$B$  – степень извлечения соли;  $R_{уд}$  – удельный расход энергии на разделение раствора;  $C_{нач.}$ ,  $C_{кон.}$  – начальная и конечная концентрация раствора в камере концентрирования.

Результаты обработки экспериментов по концентрированию раствора  
Table. Results of processing experiments on concentration of the solution

τ, мин	Voб/Vк	n	iср, А/м2	jср·104, г/с	В, доли	Руд, кВт·ч/м3	Снач., г/л	Скон., г/л
66	1	2	30,412	5,034	0,984	23,989	10,1	20,1
60	1	3	52,033	9,705	0,955	34,079	16,6	34,1
55	5	1	43,685	4,291	0,818	6,01	3,5	17,6

Таким образом, использование электродиализа для обработки сточных вод позволит получить более концентрированный солевой раствор и, тем самым, вернуть в технологический процесс значительную долю раствора сульфата никеля, а также обессоленный раствор, который можно вновь использо-

зовать в качестве технической воды.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article*

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

- Гонова В.А., Липин А.Г.** Извлечение ионов никеля из сточных вод в электромембранном аппарате. Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции, Ярославль, 21 апреля 2021 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2021. С. 253–255. EDN PZKJAT.
- Жилинский В.В., Слесаренко О.А.** Электрохимическая очистка сточных вод и водоподготовка: учеб.-метод. пособие для студентов. Минск: БГТУ, 2014. 85 с.
- Koros W.J., Ma Y.H., Shimidzu T.** Международная терминология по мембранам и мембранным процессам. Рекомендации Международного объединения специалистов по теоретической и прикладной химии. (IUPAC, 1996). *Критические технологии. Мембраны: информ. аналит. журн.* 1999. №2. С. 24–37.
- Пилат Б.В.** Основы электродиализа. М.: Авваллон, 2004. 456 с.
- Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.** Электродиализ природных и сточных вод. Москва, 2001. 144 с.
- Натареев С. В., Захаров Д.Е., Шилов Н.М.** Очистки воды от ионов тяжелых металлов в проточном емкостном аппарате. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* 2021. № 3(67). С. 70–76. DOI 10.6060/snt.20216703.00010.
- Липин А.Г., Бурчу М.П., Липин А.А.** Кинетика массопереноса при электродиализе растворов органических веществ и электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 112–115.
- Липин А.Г.** Мембранные процессы: учеб. пособие. Иваново, 2019. 88 с.
- Гонова, В.А., Липин А.Г.** Электродиализная очистка сточных вод от ионов никеля. Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. С. 332–334. EDN SOBCEK.
- Методы очистки сточных вод. Интернет-ресурс: <https://mognovse.ru/ztf-borisov-igore-anatoleevich-metodi-ochistki-stochnih-vod-20-stranica-2.html>
- Gonova V.A., Lipin A.G.** Extraction of nickel ions from wastewater in an electromembrane apparatus. Seventy-fourth All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students of higher educational institutions with international participation: a collection of conference materials, Yaroslavl, April 21, 2021. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2021. P. 253–255. EDN PZKJAT.
- Zhilinsky V.V., Slesarenko O.A.** Electrochemical wastewater treatment and water treatment: textbook. allowance for students. Minsk: BSTU, 2014. 85 p.
- Koros W.J., Ma Y.H., Shimidzu T.** International terminology for membranes and membrane processes. Recommendations of the International Association of Specialists in Theoretical and Applied Chemistry. (IUPAC, 1996). *Critical technologies. Membranes: inform. analyte magazine.* 1999. N 2. P. 24–37.
- Pilat B.V.** Fundamentals of electrodiagnosis. M.: Avvallon, 2004. 456 p.
- Vurdova N.G., Fomichev V.T.** Electrodiagnosis of natural and waste waters. Moscow, 2001. 144 p.
- Natareev S.V., Zakharov D.E., Shilov N.M.** Purification of water from heavy metal ions in a flow capacitive apparatus. *Modern science-intensive technologies. Regional application.* 2021. N 3(67). P. 70–76. DOI 10.6060/snt.20216703.00010.
- Lipin A.G., Burchu M.P., Lipin A.A.** Kinetics of mass transfer during electrodiagnosis of solutions of organic substances and electrolytes. *Izv. universities. Chemistry and chem. technology.* 2014. V. 57. Issue. 1. P. 112–115.
- Lipin A.G.** Membrane processes: textbook. allowance. Ivanovo, 2019. 88 p.
- Gonova, V.A., Lipin, A.G.** Electrodiagnosis wastewater treatment from nickel ions. Seventy-fifth All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates with International Participation: Conference Proceedings. In 3 parts, Yaroslavl, April 20–21, 2022. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2022. P. 332–334. EDN SOBCEK.
- Methods of wastewater treatment. Internet resource: <https://mognovse.ru/ztf-borisov-igore-anatoleevich-metodi-ochistki-stochnih-vod-20-stranica-2.html>