

УТИЛИЗАЦИЯ СБРОСНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДНОЙ МАССЫ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

О.В. Чернышова, М.В. Цыганкова, Б.В. Уваров

Оксана Витальевна Чернышова (ORCID 0000-0003-0543-7474)*, Мария Викторовна Цыганкова (ORCID 0000-0002-3552-4731), Борис Владиленович Уваров (ORCID 0000-0002-7851-2378)

Кафедра химии и технологии редких элементов им. К.А. Большакова, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА - Российский технологический университет, пр. Вернадского, 86, Москва, Российская Федерация, 119571

E-mail: oxcher@mail.ru *, tender-mitht@mail.ru, borisuvarov09@gmail.com

Рассмотрена возможность электрохимической очистки фильтрата после стадии осаждения кадмия в технологии переработки никель-кадмиевых аккумуляторных масс с использованием сульфаминовой кислоты в гальваностатическом режиме. Определены оптимальные условия проведения процесса очистки от никеля и кадмия, такие как плотность тока и время. Показано, что увеличение плотности тока более $0,7 \text{ А/см}^2$ практически не влияет на степень извлечения кадмия и никеля, которая составляет 98,8-99,3% и 97,6-97,8%, соответственно. Выявлено, что интенсивное перемешивание электролита в процессе электролиза положительно влияет на степень извлечения кадмия и никеля, однако не позволяет достичь остаточных концентраций этих металлов ниже уровня их предельно допустимых концентраций в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Установлено, что для снижения содержания металлов ниже предельно допустимых концентраций необходимо осуществление процесса электролиза с титановым катодом в течение 14 ч. Использование графитовых материалов с развитой поверхностью или трехмерных электродов, таких как графитированный войлок «ГФА – 10» и углеродная ткань марки «ТГП – 50Р», сокращает время очистки растворов от никеля и кадмия в 2 раза при остаточном содержании кадмия и никеля в растворе после электролиза ниже уровня ПДК (0,003 мг/л и 0,008-0,009 мг/л, соответственно). Полученные катодные и анодные осадки охарактеризованы методом рентгенофазового анализа. Катодные осадки представляют механическую смесь индивидуальных металлов кадмия и никеля. Анодные осадки представлены фазами NiO и Ni(OH)₂. По результатам химического анализа катодный продукт содержит 91,5 - 95,8% кадмия и 4,2 - 8,5% никеля.

Ключевые слова: никель кадмиевые аккумуляторы, переработка, никель, кадмий, щелочные растворы, графитовые материалы, электролиз, гальваностатический режим, концентрации ПДК

UTILIZATION OF WASTE ALKALINE SOLUTIONS FOR PROCESSING THE ELECTRODE MASS OF NICKEL-CADMIUM BATTERIES

O.V. Chernyshova, M.V. Tsygankova, B.V. Uvarov

Oksana V. Chernyshova (ORCID 0000-0003-0543-7474)*, Maria V. Tsygankova (ORCID 0000-0002-3552-4731), Boris V. Uvarov (ORCID 0000-0002-7851-2378)

K.A. Bolshakov Department of Chemistry and Technology of Rare Elements, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA — Russian Technological University, Vernadsky ave., 86, Moscow, 119571, Russia

E-mail: oxcher@mail.ru *, tender-mitht@mail.ru, borisuvarov09@gmail.com

The possibility of electrochemical purification of the filtrate after the stage of cadmium precipitation in the technology of processing nickel-cadmium battery masses using sulfamic acid in the galvanostatic mode is considered. The optimal conditions for carrying out the process of purification from nickel and cadmium, such as current density and time, are determined. It is

shown that an increase in current density over 0.7 A/cm² has practically no effect on the degree of extraction of cadmium and nickel, which is 98.8-99.3% and 97.6-97.8%, respectively. It was found that intensive mixing of the electrolyte during electrolysis has a positive effect on the degree of extraction of cadmium and nickel, however, it does not allow reaching the residual concentrations of these metals below the level of their maximum allowable concentrations in the waters of water bodies of fishery importance. It has been established that in order to reduce the metal content below the maximum permissible concentrations, it is necessary to carry out the electrolysis process with a titanium cathode for 14 h. The use of graphite materials with a developed surface or three-dimensional electrodes, such as graphite felt "GFA - 10" and carbon cloth brand "THP - 50R", reduces the time of cleaning from nickel and cadmium by 2 times to concentrations, with a residual content of cadmium and nickel in solution after electrolysis below the MPC level of 0.003 mg/l and 0.008-0.009 mg/l, respectively. The resulting cathodic and anode deposits were characterized by X-ray phase analysis. Cathodic deposits are a mechanical mixture of individual metals cadmium and nickel. Anode deposits are represented by NiO and Ni(OH)₂ phases. According to the results of chemical analysis, the cathode product contains 91.5 - 95.8% cadmium and 4.2 - 8.5% nickel.

Key words: nickel-cadmium batteries, processing, nickel, cadmium, alkaline solutions, graphite materials, electrolysis, galvanostatic mode, maximum allowable concentration

Для цитирования:

Чернышова О.В., Цыганкова М.В., Уваров Б.В. Утилизация сбросных щелочных растворов переработки электродной массы никель-кадмиевых аккумуляторов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 2. С. 78–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6701.

For citation:

Chernyshova O.V., Tsygankova M.V., Uvarov B.V. Utilization of waste alkaline solutions for processing the electrode mass of nickel-cadmium batteries. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 2. P. 78–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6701.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие портативной техники, стремление к экологичности и расширению сфер применения неизбежно ведет к росту производства химических источников тока. Производство некоторых типов аккумуляторов и первичных источников тока измеряется десятками миллиардов единиц и будет расти. Аккумуляторы содержат ценные, а зачастую и токсичные элементы, поэтому особенно остро стоит вопрос об их утилизации и последующей переработке. В результате многих исследований установлено, что производство аккумуляторных батарей по степени негативного воздействия на окружающую среду занимает одно из первых мест в промышленности. Экологическая опасность вызвана прежде всего образующимися жидкими и твердыми отходами, которые содержат ионы тяжелых металлов, оказывающих токсичное и канцерогенное действие на живые организмы [1-3].

С появлением на рынке батарей нового поколения тонны лома никель-кадмиевых батарей попадают на свалки в связи с их заменой другими более эффективными альтернативами, такими как литий-ионные или никель-металлгидридные бата-

реи. Лом никель-кадмиевых аккумуляторов содержит ценные компоненты: около 43% катодных и анодных материалов из никеля и кадмия; 5% пластиковых сепараторов; 27% контейнеров из углеродистой стали; 25% металлических пластин – основы для анодного порошка [4].

Возврат материалов отработанных аккумуляторов в производственный цикл позволит решить проблему загрязнения окружающей среды и уменьшить себестоимость продукции. Разработка оптимального способа утилизации отходов производства аккумуляторов, а также отработанных аккумуляторов с получением ценных компонентов является актуальной задачей [5, 6].

Для переработки отработанных щелочных Ni-Cd аккумуляторов предложены несколько вариантов технологических процессов. В большинстве случаев батареи подвергают ручной или механической разделке для концентрирования ценных компонентов и их последующей переработки пиро- или гидрометаллургическими способами [7].

Пирометаллургические способы переработки включают такие процессы как: восстановительный обжиг кадмийсодержащих отходов и дистилляцию кадмия [8-10]. Таким образом, пирометаллургические процессы переработки имеют ряд

недостатков: продуктом технологии является не чистый никель, а его сплав с железом; происходит загрязнение окружающей среды при возгонке кадмия, что приводит к повышению стоимости производства за счет системы пароуловителей; необходимость последующей переработки металлического кадмия на оксид.

По сравнению с пирометаллургическими методами переработки гидрометаллургические способы [11-18] менее энергоемки. Основной этап гидрометаллургической переработки никель-кадмиевых аккумуляторных масс – это выщелачивание. Как правило, в качестве выщелачивающих реагентов используют растворы серной и соляной кислот. Также возможно применение в качестве выщелачивающего реагента раствора сульфаминовой кислоты. Данный реагент является доступным, он менее агрессивен по сравнению с соляной и серной кислотами, кроме того, возможна его регенерация. При реализации такого варианта гидрометаллургической переработки кадмиевых электродов можно избежать основной проблемы – последующего разделения кадмия и железа (II). С применением сульфаминовой кислоты возможно обеспечение замкнутого цикла по токсичным растворам, образующимся после осаждения кадмия и никеля. Ранее проведенные исследования показали перспективность электрохимического извлечения никеля и кадмия из раствора после стадии осаждения кадмия в технологии переработки никель-кадмиевых аккумуляторных масс с использованием сульфаминовой кислоты в потенциостатическом режиме.

Целью работы является электрохимическая очистка фильтрата после стадии осаждения кадмия в технологии переработки никель-кадмиевых аккумуляторных масс с использованием сульфаминовой кислоты, в гальваностатическом режиме.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного раствора использовали маточный раствор после осаждения кадмия и никеля, содержащий катионы Cd^{+2} – 170 мг/л, Ni^{+2} – 7500 мг/л, $pH \approx 7,2-8,3$).

Электрохимическое извлечение проводили с использованием электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработан ООО ИП "Тетран"), использующего некомпенсационный способ измерения потенциала [19]. Электрохимическая ячейка представляла собой фторопластовую емкость объемом 400 мл; катод – титан металлический ВТ-0 ГОСТ 22178-76, площадь поверхности 22,5 см², ткань углеродная с пироуглеродом «ТПП – 50Р» и графитированный войлок «ГФА – 10»; анод

графитовый «В» ТУ 48-12-56-89, площадь поверхности 28 см², перемешивание осуществляли турбинной мешалкой – 0-400 об./мин. Электролиз проводили при комнатной температуре, плотности тока 0,1-1,2 А/см², в течение 2-14 ч.

Изменение массы электрода определяли на аналитических весах ANDGR-300 с допустимой погрешностью измерений +/-0,0001 г. Процесс вели при температуре 20-25 °С. Элементный анализ проводили с использованием ICP масс-спектрометра для изотопного и элементного анализа ELAN DRC-e (Perkin Elmer, Канада). Рентгеновские исследования порошков проводили на дифрактометре Shimadzu XDR 6000 (излучение $CuK\alpha$, с вращением образца в непрерывном (1 град/мин) и пошаговом (шаг 0,02°, экспозиция 10 с) режимах в интервале углов 2Θ 10-90°). Качественные исследования полученных образцов проводили с использованием микроскопа Levenhuk Rainbow D2L Moonstone при увеличении 40X.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование гальваностатического режима для электрохимического процесса очистки фильтрата от никеля и кадмия, после стадии осаждения кадмия в технологии переработки никель-кадмиевых аккумуляторных масс с использованием сульфаминовой кислоты, определяется возможностью реализации его на технологическом оборудовании, существующем на большинстве предприятий переработки вторичного и техногенного сырья.

Особенностью процессов электрохимического выделения никеля и кадмия из водных растворов является их совместное выделение с водородом. Последовательность выделения на катоде водорода, кадмия и никеля определяется установившейся величиной электродного потенциала. Существенный вклад в его значение вносит величина перенапряжения для указанных элементов.

Величина перенапряжения зависит от многих факторов: pH раствора, температуры, состава электролита, а также плотности тока.

Исследовано влияние величины плотности тока на показатели процесса очистки раствора от кадмия и никеля в течение 4 ч. Результаты приведены в табл. 1.

По окончании процессов на электродах наблюдали образование осадков: на катоде получен слой осадка серого цвета с характерным металлическим блеском, на аноде – рыхлый осадок зеленого цвета.

Данные рентгенофазового анализа катодных осадков, полученных при электролизе раствора с концентрацией кадмия – 170 мг/л, никеля – 7500 мг/л в гальваностатическом режиме при плотностях тока 0,1-1,2 А/см² свидетельствуют о том, что катодные осадки представляют механическую смесь индивидуальных металлов кадмия и никеля. Анодные осадки представлены фазами NiO и Ni(OH)₂. По результатам химического анализа катодный продукт содержит 91,5-95,8% кадмия и 4,2-8,5% никеля. Таким образом, осуществление процесса электролиза при плотности тока 0,7 А/см² позволяет извлечь до 98,8% кадмия и 95% никеля. Однако, в растворе остаточная концентрация кадмия составляет 2 мг/л, никеля – 178,1 мг/л, что значительно превышает ПДК этих металлов в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{Cd} = 0,005 мг/л и ПДК_{Ni} = 0,010 мг/л) [20].

Таблица 1

Содержание элементов в растворах после электролиза

Table 1. The content of elements in solutions after electrolysis

№	I, А/см ²	C _{Cd} , мг/л	E _{Cd} , %	C _{Ni} , мг/л	E _{Ni} , %
1	0,1	160,2	5,7	681,4	90,9
2	0,2	32,2	81,0	555,3	92,6
3	0,5	7,8	95,4	376,8	95,0
4	0,7	2,0	98,8	178,1	97,6
5	0,9	1,4	99,2	156,1	97,9
6	1,2	1,2	99,3	160,1	97,8

Интенсификация процесса электрохимической очистки раствора от никеля и кадмия может быть осуществлена за счет перемешивания [21]. Влияние скорости перемешивания на извлечение никеля и кадмия представлено в табл. 2. Выбор плотности тока 0,7 А/см² обусловлен высокими показателями степени извлечения никеля и кадмия. Продолжительность электролиза 4 ч.

Таблица 2

Влияние скорости перемешивания на электрохимическое извлечение никеля и кадмия

Table 2. Effect of stirring rate on the electrochemical extraction of nickel and cadmium

№	v, об./мин	C _{Cd} , мг/л	E _{Cd} , %	C _{Ni} , мг/л	E _{Ni} , %
1	100	31,5	81,4	527,5	93,0
2	200	1,8	98,9	433,3	93,2
3	300	0,8	99,5	160,3	97,9
4	400	1,7	99,0	170,2	97,7

Полученные экспериментальные данные показывают, что перемешивание электролита со

скоростью 100 об./мин значительно снижает степень извлечения кадмия (до 81,4%). Степень извлечения никеля снижается незначительно (до 93%). Увеличение скорости перемешивания электролита до 400 об./мин приводит к увеличению степени извлечения кадмия и никеля до 99% и 97,7%, соответственно. Наименьшие остаточные концентрации кадмия – 0,8 мг/л и никеля – 160 мг/л, полученные при перемешивании электролита, превышают ПДК_{Cd} и ПДК_{Ni}, соответственно, в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Таким образом, введение перемешивания в процессе электрохимического выделения кадмия и никеля из раствора сульфаминовой кислоты не целесообразно. Все дальнейшие исследования были проведены в гальваностатическом режиме в отсутствие перемешивания.

Снижение остаточных концентраций кадмия и никеля, вплоть до ПДК, повышение степени извлечения компонентов может быть достигнуто увеличением длительности электрохимического процесса. Соответственно, исследовано влияние длительности процесса электролиза в интервале времени 2-14 ч, результаты представлены на рис. 1.

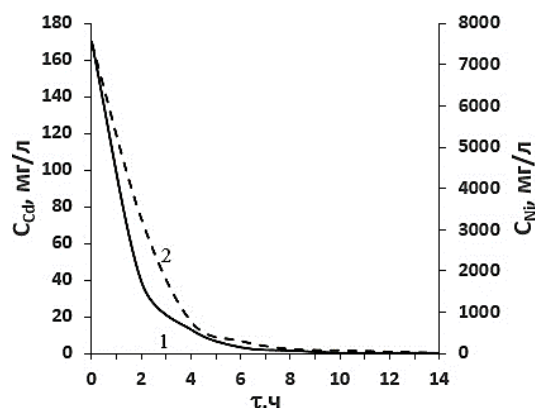


Рис. 1. Зависимость влияния продолжительности электролиза на изменение остаточных концентрации металлов в растворе (материал катода – титан), где 1 – кадмий, 2 – никель
Fig. 1. Dependence of the influence of the duration of electrolysis on the change in the residual concentration of metals in the solution (cathode material is titanium), 1 – cadmium, 2 – nickel

Полученные результаты показывают, что увеличение времени электролиза позволяет существенно повысить степень извлечения ценных компонентов (практически до 100%). В случае использования титанового катода через 14 ч остаточная концентрация кадмия снизилась до 0,004 мг/л, никеля – 0,01 мг/л.

Увеличение производительности процесса электролиза может быть реализовано за счет увеличения рабочей площади катода, что достигается

применением электродов с развитой поверхностью или трехмерных электродов.

Для значимого увеличения производительности процесса электрохимического извлечения целевых компонентов с целью повышения экономической рентабельности применяют различные виды таких электродов, при этом отношение величины удельной площади поверхности электрода к его геометрической площади составляет 100-1000.

Ассортимент материалов на основе графита, которые могут использоваться в качестве электродных материалов для реализации электрохимических процессов, многообразен: графитовые ткани, графитовые войлоки, пенографит [22]. Перспективность применения тканей и войлоков обусловлена их технологичностью – с ними удобно работать, при этом они обладают высокими величинами электропроводности и удельной поверхности.

Для оценки целесообразности применения графитовых материалов - мягкого графитированного войлока «ГФА – 10» и углеродной ткани марки «ТПП – 50Р» (ТУ 1915-002011250473-97) в качестве катодной основы проведены технологические эксперименты при плотности тока 0,7 А/см² (рис. 2 и 3) по извлечению никеля и кадмия.

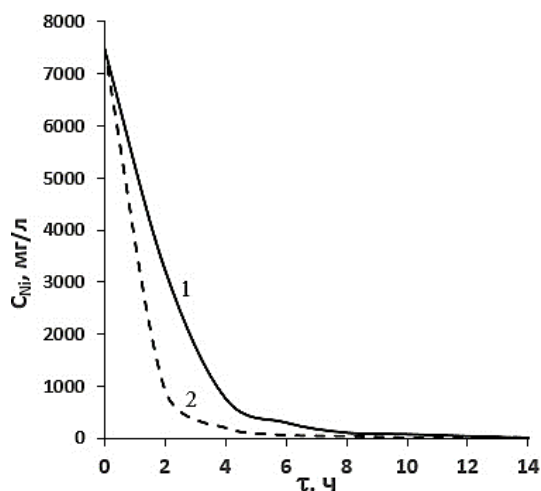


Рис. 2. Зависимость влияния продолжительности электролиза на изменение остаточной концентрации никеля в растворе, где 1 – материал катода - титан, 2 – материал катода – углеродная ткань

Fig. 2. Dependence of the influence of the duration of electrolysis on the change in the residual concentration of nickel in the solution, 1 – the cathode material – titanium, 2 – the cathode material – carbon fabric

Из представленных данных видно, что при использовании в качестве катодного материала углеродной ткани марки «ТПП – 50Р» удается понизить остаточную концентрацию кадмия до 0,003 мг/л, никеля – до 0,009 мг/л, что ниже уровня ПДК этих ме-

таллов в водах водных объектов рыбохозяйственного значения.

Для качественной оценки морфологии полученных катодных осадков (рис. 4-5) использован микроскоп Levenhuk Rainbow D2L Moonstone с увеличением 40X. Все полученные катодные осадки характеризуются наличием гладкой и блестящей поверхности, имеющей характерный серый металлический блеск. Слева показана поверхность до начала эксперимента, справа-после.

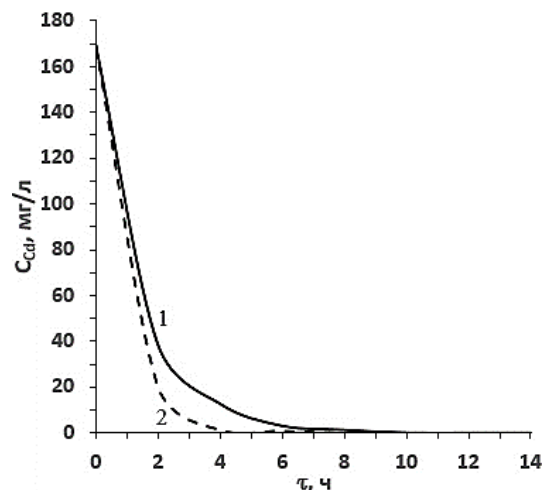


Рис. 3. Зависимость влияния продолжительности электролиза на изменение остаточной концентрации кадмия в растворе, где 1 – материал катода - титан, 2 – материал катода – углеродная ткань

Fig. 3. Dependence of the effect of the duration of electrolysis on the change in the residual concentration of cadmium in solution, 1 – the cathode material – titanium, 2 – the cathode material – carbon fabric

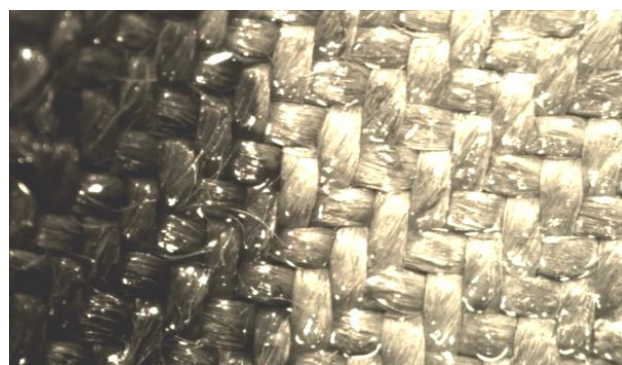


Рис. 4. Осаждение металла на поверхности углеродной ткани марки «ТПП – 50Р», увеличение ×40

Fig. 4. Deposition of metal on the surface of the carbon fabric of brand "TNP - 50R", ×40 magnification

Сопоставительные результаты электрохимических процессов по очистке фильтрата от кадмия и никеля в гальваностатическом режиме, после стадии осаждения кадмия, при использовании сульфаминовой кислоты и различных катодных материалов приведены в табл. 3.

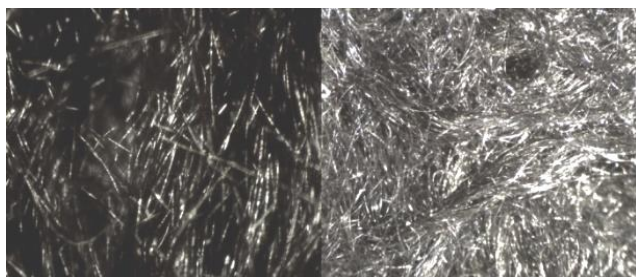


Рис. 5. Осаждение металла на поверхности графитированного войлока «ГФА – 10», увеличение $\times 40$

Fig. 5. Deposition of metal on the surface of graphite felt "GFA-10", magnification $\times 40$

Таблица 3

Результаты выделения никеля и кадмия в технологическом процессе на графитовых материалах и титане

Table 3. Results of extraction of nickel and cadmium in the technological process on graphite materials and titanium

№ п/п	Материал	Концентрация в растворе после электролиза		τ, ч
		Ni, мг/л	Cd, мг/л	
1	ТГП 50Р	0,008	0,003	6
2	ГФА-10	0,009	0,003	7
3	Титан	0,010	0,004	14

Применение титанового катода позволяет очищать раствор электролита до остаточных концентраций кадмия и никеля в растворе ниже ПДК при плотности тока $0,7 \text{ A/cm}^2$ в течение 14 ч. Применение графитовых материалов, таких как мягкий графитовый войлок (ГФА-10) и ткань углеродная с пироуглеродом (ТГП-50Р), в качестве катода сокращает время электрохимической очистки почти в 2 раза, при остаточном содержании кадмия и никеля в растворе после электролиза ниже уровня ПДК ($0,003 \text{ мг/л}$ и $0,008\text{-}0,009 \text{ мг/л}$, соответственно).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарева Е.Н., Ольшанская Л.Н., Егоров В.В. Стриженко А.А. Применение гальваношламов при изготовлении товаров народного потребления. *Вестн. Харьков. нац. автомоб.-дорож. ун-та*. 2011. № 52. С. 83–86.
2. Костылева Н.В., Рачёва Н.Л. Характеристики загрязняющих веществ. Справочник. Пермь: ФГБУ УралНИИ «Экология». 2017. 283 с.
3. Куленцан А.Л., Марчук Н.А. Анализ воздействия на человека и окружающую среду загрязняющих веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 116–121. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6531.
4. Hazotte C., Leclerc N., Diliberto S. Meux E., Lopicque F. End-of-life nickel-cadmium accumulators: Characterization of electrode materials and industrial Back Mass. *Environ. Technol.* 2015. V. 36. P. 796–805. DOI: 10.1080/09593330.2014.962621.
5. Тихомирова А. Отрасль-лидер. Никелевый взлет. *Прямые инвестиции*. 2010. № 11. С. 40.

ВЫВОДЫ

На основании полученных экспериментальных данных предложен способ электрохимической очистки фильтрата от кадмия и никеля в гальваностатическом режиме, после стадии осаждения кадмия при переработке никель-кадмиевых аккумуляторных масс с использованием сульфаминовой кислоты.

Установлены оптимальные параметры процесса электроэкстракции никеля и кадмия – плотность тока $0,7 \text{ A/cm}^2$, отсутствие перемешивания, температура – $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Показано, что ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения достигается по содержанию никеля и кадмия из растворов при переработке отходов никель-кадмиевых аккумуляторов при длительности процесса 14 ч с использованием титанового катода.

Показано, что использование углеродсодержащих материалов в качестве катода при прочих равных условиях позволяет снизить время электролиза, при котором достигается ПДК металлов, до 6–7 ч.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА при поддержке Минобрнауки России (RF 2296.61321X0010, №075-15-2021-689 от 01.09.2021).

The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use of RTU MIREA with the support of the Russian Ministry of Education and Science (RF 2296.61321X0010, No. 075-15-2021-689 dated 09/01/2021).

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.

REFERENCES

1. Lazareva E.N., Olshanskaya L.N., Egorov V.V. Strizhenko A.A. The use of galvanic sludge in the manufacture of consumer goods. *Vestn. Khar'kov. Nats. Avtomob.-Dorozh. Un-ta*. 2011. N 52. P. 83–86 (in Russian).
2. Kostyleva N.V., Racheva N.L. Characteristics of contaminants. Directory. Perm: FGBU UralNII "Ecology". 2017. 283 p. (in Russian).
3. Kulentsan A.L., Marchuk N.A. Analysis of the impact on humans and the environment of pollutants. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 116–121 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6531.
4. Hazotte C., Leclerc N., Diliberto S. Meux E., Lopicque F. End-of-life nickel-cadmium accumulators: Characterization of electrode materials and industrial Back Mass. *Environ. Technol.* 2015. V. 36. P. 796–805. DOI: 10.1080/09593330.2014.962621.

6. **Козуб С.Н.** Анализ современного состояния и выбор сырья технологии вторичного кадмия. *Технол. аудит и резервы пр-ва*. 2015. Т. 21. № 1/4. С. 37–41. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38113.
7. **Blumbers E., Serga V., Platacis E., Maiorov M., Shishkin A.** Cadmium Recovery from Spent Ni-Cd Batteries: A Brief Review. *Metals*. 2021. N 11. P. 1714–1727. DOI: 10.3390/met11111714.
8. **Huang K., Li J., Xu Z.** Characterization and recycling of cadmium from waste nickel–cadmium batteries. *Waste Manag.* 2010. V. 30. P. 2292–2298. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.05.010.
9. **Assefi M., Maroufi S., Yamauchi Y., Sahajwalla V.** Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni–Cd and Ni–MH batteries: A mini-review. *Green Sustainable Chem.* 2020. V. 24. P. 26–31. DOI: 10.1016/j.cogsc.2020.01.005.
10. **Hung Y., Yin L., Wang J., Wang Ch., Tsai Ch., Kuo Y.** Recycling of Spent Nickel–Cadmium Battery Using a Thermal Separation Process. *Environ. Progr. Sust. Energy*. 2018. V. 37. N 2. P. 645–654. DOI: 10.1002/ep.12714.
11. **Mahandra H., Singh R., Gupta B.** Recycling of Zn-C and Ni-Cd spent batteries using Cyphos IL 104 via hydrometallurgical route. *J. Cleaner Product.* 2018. V. 172. P. 133–142. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.129.
12. **Волынский В.В., Лопашев А.В., Казаринов И.А., Гришин Н.А.** Переработка отходов кадмия (II) аккумуляторной промышленности. *Журн. приклад. химии*. 2006. Т. 79. Вып. 11. С. 1844–1847.
13. **Assefi M., Maroufi S., Mayyas M., Sahajwalla V.** Recycling of Ni-Cd Batteries by Selective Isolation and Hydrothermal Synthesis of Porous NiO Nanocuboid. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6(4). P. 4671–4675. DOI: 10.1016/J.JECE.2018.07.021.
14. **Дмитренко В.П., Жерин И.И., Холин Ю.Ю., Песецкий В.И.** Оптимизация процессов переработки положительных активных масс щелочных аккумуляторов. *Электротехн. энергетика*. 2007. Т. 7. Вып. 4. С. 68–72.
15. **Волкова Е.Н., Демидов А.И.** Получение монокристаллов сульфата никеля при переработке оксидно-никелевых электродов щелочных аккумуляторов. *Журн. приклад. химии*. 2010. Т. 83. Вып. 10. С. 1733–1735.
16. **Волкова Е. Н., Демидов А.И., Чердынцев В.В. Щетинин И.В.** Комплексная гидрометаллургическая переработка активной массы оксидно-никелевых электродов отработанных щелочных аккумуляторов. *Цветные металлы*. 2012. № 4. С. 21–25.
17. **Карелов С.В., Барашев А.Р., Анисимова О.С., Мамяченков С.В.** Исследование селективного выщелачивания кадмия из активной массы отрицательных электродов щелочных аккумуляторов. *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2010. № 2. С. 12–14.
18. **Барашев А.Р., Карелов С.В., Анисимова О.С. Мамяченков С.В.** Инновационная технология переработки отрицательных ламелей щелочных аккумуляторов с применением регенерируемого растворителя. *Металлург*. 2011. № 5. С. 22–24.
19. **Чернышова О.В., Елемесов Т.Б., Дробот Д.В.** Применение импульсного тока для растворения жаропрочного сплава ЖС32-ВИ. *Тонкие хим. технологии*. 2021. Т. 16. № 5. С. 438–447. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-438-447.
20. **Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приложение к приказу Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года №552.**
21. **Дамаскин Б.Б., Петрий О.А.** Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа. 1983. 400 с.
22. **Якименко Л.М.** Электродные материалы в прикладной электрохимии. М.: Химия. 1977. 264 с.
5. **Tikhomirova A.** Branch-leader. Nickel Takeoff. *Pryamy Investitsii*. 2010. N 11. P. 40 (in Russian).
6. **Kozub S.N.** Analysis of the current state and choice of raw materials for secondary cadmium technology. *Tekhnol. Audit Rezervy Pr-va*. 2015. V. 21. N 1/4. P. 37–41 (in Russian). DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38113.
7. **Blumbers E., Serga V., Platacis E., Maiorov M., Shishkin A.** Cadmium Recovery from Spent Ni-Cd Batteries: A Brief Review. *Metals*. 2021. N 11. P. 1714–1727. DOI: 10.3390/met11111714.
8. **Huang K., Li J., Xu Z.** Characterization and recycling of cadmium from waste nickel–cadmium batteries. *Waste Manag.* 2010. V. 30. P. 2292–2298. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.05.010.
9. **Assefi M., Maroufi S., Yamauchi Y., Sahajwalla V.** Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni–Cd and Ni–MH batteries: A mini-review. *Green Sustainable Chem.* 2020. V. 24. P. 26–31. DOI: 10.1016/j.cogsc.2020.01.005.
10. **Hung Y., Yin L., Wang J., Wang Ch., Tsai Ch., Kuo Y.** Recycling of Spent Nickel–Cadmium Battery Using a Thermal Separation Process. *Environ. Progr. Sust. Energy*. 2018. V. 37. N 2. P. 645–654. DOI: 10.1002/ep.12714.
11. **Mahandra H., Singh R., Gupta B.** Recycling of Zn-C and Ni-Cd spent batteries using Cyphos IL 104 via hydrometallurgical route. *J. Cleaner Product.* 2018. V. 172. P. 133–142. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.129.
12. **Volynsky V.V., Lopashev A.V., Kazarinov I.A., Grishin N.A.** Recycling of cadmium (II) waste from the battery industry. *Zhurn. Priklad. Khim.* 2006. V. 79. N 11. P. 1844–1847 (in Russian).
13. **Assefi M., Maroufi S., Mayyas M., Sahajwalla V.** Recycling of Ni-Cd Batteries by Selective Isolation and Hydrothermal Synthesis of Porous NiO Nanocuboid. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6(4). P. 4671–4675. DOI: 10.1016/J.JECE.2018.07.021.
14. **Dmitrenko V.P., Zherin I.I., Kholin Yu.Yu., Pesetsky V.I.** Optimization of processing processes of positive active masses of alkaline batteries. *Elektrokhim. Energetika*. 2007. V. 7. N 4. P. 68–72 (in Russian).
15. **Volkova E.N., Demidov A.I.** Obtaining single crystals of nickel sulfate in the processing of oxide-nickel electrodes of alkaline batteries. *Zhurn. Priklad. Khim.* 2010. V. 83. N 10. P. 1733–1735 (in Russian).
16. **Volkova E.N., Demidov A.I., Cherdyntsev V.V. Shchetinin I.V.** Complex hydrometallurgical processing of the active mass of oxide-nickel electrodes of spent alkaline batteries. *Tsvetnyye Metally*. 2012. N 4. P. 21–25 (in Russian).
17. **Karelov S.V., Barashev A.R., Anisimova O.S., Mamyachenkov S.V.** Investigation of selective leaching of cadmium from the active mass of negative electrodes of alkaline batteries. *Izv. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2010. N 2. P. 12–14 (in Russian).
18. **Barashev A.R., Karelov S.V., Anisimova O.S. Mamyachenkov S.V.** Innovative technology for the processing of negative lamellas of alkaline batteries using a regenerated solvent. *Metallurg*. 2011. N 5. P. 22–24 (in Russian).
19. **Chernyshova O.V., Yelemessov T.B., Drobot D.V.** Application of pulse current for dissolution of heat-resistant GS32-VI alloy. *Tonkiye Khim. Tekhnol.* 2021. V. 16. N 5. P. 438–447 (in Russian). DOI 10.32362/2410-6593-2021-16-5-438-447.
20. **Water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance. Appendix to the order of the Ministry of Agriculture of Russia dated December 13, 2016. N 552. (in Russian).**
21. **Damaskin B.B., Petriy O.A.** Introduction to electrochemical kinetics. М.: Vyssh. shkola. 1983. 400 p. (in Russian).
22. **Yakimenko L.M.** Electrode materials in applied electrochemistry. М.: Khimiya. 1977. 264 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 12.07.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 17.11.2022