

Г. Г. Печенова, А. А. Черник

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА АКТИВНОЙ МАССЫ ОТРАБОТАННЫХ МАРГАНЦЕВО-ЦИНКОВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Аннотация. С целью переработки первичных марганцево-цинковых химических источников тока является оптимизация технологии по переработке и разделению компонентов активной массы. Технология предполагает извлечение цинка в виде порошка, так и в виде покрытий. Соединения марганца будут извлекаться в виде диоксида марганца, при этом предполагается уменьшение класса опасности отходов до четвертого. Определен количественный и качественный состав электролита после выщелачивания титрометрическим методом. Наибольшая концентрация в электролите выщелачивания наблюдалась по ионам цинка Zn^{2+} и марганца Mn^{2+} их концентрация составила 34 и 41,36 г/дм³ соответственно. В небольших количествах в растворах присутствовали ионы железа Fe^{2+} . Путем электролитической переработки кислотного и щелочного растворов выщелачивания активной массы отработанных марганцево-цинковых источников тока извлекли цинк в виде покрытия.

Ключевые слова: марганцево-цинковые источники тока, активная масса, электрохимическое извлечение цинка из водных растворов, цинк, марганец

Для цитирования. Печенова, Г. Г. Электрохимическая переработка активной массы отработанных марганцево-цинковых химических источников тока / Г. Г. Печенова, А. А. Черник // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 216–223. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-216-223>

G. G. Pechenova, A. A. Chernik

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF THE ACTIVE MASS OF SPENT MANGANESE-ZINC CHEMICAL CURRENT SOURCES

Abstract. In order to process primary manganese-zinc chemical current sources, the technology for processing and separation of active mass components is optimized. The technology involves the extraction of zinc in the form of powder and in the form of coatings. Manganese compounds will be extracted in the form of manganese dioxide, while reducing the hazard class of waste to the fourth. The quantitative and qualitative composition of the electrolyte after leaching was determined by titrimetric method. The highest concentration in the leaching electrolyte was observed for zinc Zn^{2+} and manganese Mn^{2+} ions, their concentrations were 34 and 41.36 g/dm³, respectively. Fe^{2+} iron ions were present in small amounts in the solutions. Using electrolytic processing of acid and alkaline solutions by leaching the active mass of spent manganese-zinc current sources, zinc in the form of coating was extracted.

Keywords: manganese-zinc current sources, active mass, electrochemical extraction of zinc from aqueous solutions, zinc, manganese

For citation. Pechenova G. G., Chernik A. A. Electrochemical processing of the active mass of spent manganese-zinc chemical current sources. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 216–223 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-216-223>

Введение. Первичные марганцево-цинковые (МЦ) элементы являются наиболее распространенными химическими источниками тока. Ежегодно в Беларусь поставляется около 1000 т МЦ химических источников тока (ХИТ), которые после использования требуют утилизации. Результаты современных исследований показывают, что ХИТ наиболее токсичные компоненты бытового мусора и требуют особого обращения после использования. Переработка МЦ ХИТ позволяет предотвратить загрязнение окружающей среды и сохранить природные ресурсы.

В настоящее время наиболее часто применяется технология переработки МЦ ХИТ, которая заключается в сортировке, дроблении, сепарации и отделении стальной составляющей. Остальная активная масса включает соединения цинка, марганца, графита, которые подверга-

ются захоронению. Данные отходы имеют второй класс опасности и не могут быть захоронены на полигонах промышленных отходов. В связи с этим существует необходимость в разработке технологии переработки активной массы в виде готовых продуктов или уменьшения класса опасности до четвертого.

Цель данной работы – разработка предложений по комплексной электрохимической технологии переработки активной массы отработанных марганцево-цинковых химических источников тока, которая позволит извлекать соединения цинка и марганца в удобной для дальнейшего применения форме. Также данная технология предполагает извлечение цинка как в виде порошка, так и в виде покрытий. Соединения марганца будут извлекаться в виде диоксида марганца.

В настоящее время разработаны и реализуются несколько способов переработки использованных марганцево-цинковых ХИТ. Методы переработки включают основные восемь стадий: 1) сортировка по типу химического элемента, затем демонтаж корпусов МЦ ХИТ на составляющие; 2) измельчение в шредере; 3) магнитная сепарация; 4) обжиг при температуре 650 °С в течение 2 ч; 5) измельчение; 6) грохочение; 7) сернокислотное или щелочное выщелачивание, где смесь активной массы помещают в пластиковую емкость и, перемешивая при комнатной температуре в течение 1–3 ч, добавляют 40–48 %-ный раствор серной кислоты и перекись водорода 3–10 %-ной, взятые соответственно в количественном соотношении 2,66:3 и 3,26:10,6 к величине навески ХИТ. Полученную при разложении смесь фильтруют, извлекая маточный раствор, содержащий сульфаты цинка ($ZnSO_4$) и марганца ($MnSO_4$), отделяя осадок в виде графита. Отфильтрованный маточный раствор подвергают нейтрализации при комнатной температуре гидроксидом натрия ($NaOH$) до pH 6–8,8, взятом в количестве 10–15 мас.% от количества маточного раствора. Затем маточный раствор выпаривают до получения сухого остатка, выделяя кристаллы сульфатов цинка ($ZnSO_4$) и марганца ($MnSO_4$) [1]; 8) электролиз, где раствор, содержащий сульфаты цинка и марганца, поступает на бездиафрагменный электролизер с алюминиевым катодом и свинцовым анодом. Электролиз осуществляется без подогрева электролита при плотности тока 2000 А/м². На катоде выделяется компактный металлический цинк (выход по току 80 %), а на аноде – электролитический диоксид марганца (ЭДМ). ЭДМ в виде шлама осаждается на дно электролизера и вместе с отработанным электролитом в виде пульпы возвращается на выщелачивание и выводится из процесса в виде марганцевого концентрата [2].

К недостаткам этих способов относятся: использование очень агрессивных и относительно дорогих кислот и щелочей, требующих дорогостоящего оборудования; способы предусматривают практически полное растворение измельченного тонкого порошка, что является очень длительным процессом, требует повышенных расходов реагентов при выщелачивании и соответственно при переработке растворов; тяжелые санитарные условия при использовании соляной кислоты и аммиака. Также происходит загрязнение раствора выщелачивания железом из окарины и продуктов коррозии, образовавшихся в процессе обжига батарей. При очистке раствора перед электролизом с гидроокисным осадком железа неизбежны потери марганца и цинка, что снижает их извлечение.

Анализ литературных источников показал, что есть множество способов переработки активной массы отработанных МЦ ХИТ, но у них есть недостатки, которые необходимо устранять. Поэтому следует предложить способ комплексной переработки МЦ ХИТ, который будет не энергозатратен, позволит производить комплексную переработку отработанных ХИТ с повышенным извлечением марганца и цинка при удешевлении процесса утилизации сырья в целом, при этом не используя дорогостоящих реагентов и оборудования, исключая вредные выбросы в атмосферу.

Методика эксперимента. Согласно литературным данным [4], активная масса разряженных марганцево-цинковых щелочных элементов стандартного формата АА имеет состав, представленный в табл. 1.

Процесс выщелачивания проводили в растворах 10 %-ной $NaOH$ и 10 %-ной H_2SO_4 в течение 10 мин. Для этого навеску массой 10 г помещали в раствор щелочи или кислоты объемом 250 см³. Анализ электролитов после выщелачивания на содержание ионов цинка, марганца и железа осуществляли титриметрически, согласно методике [13].

Таблица 1. Состав марганцево-цинкового щелочного элемента формы АА

Table 1. Composition of manganese-zinc alkaline element of AA form

Состав	Компоненты	Содержание, мас. %
Анодная масса	ZnO	26,6
	КОН	10
	Загуститель	0,4
Катодная масса	MnO ₂	51
	С	7
	КОН	5
Итого		100 %

Элементный анализ исходной массы отработанных МЦ ХИТ проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, который проводили на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX600.

Электролиз электролитов выщелачивания проводили в электрохимической ячейке с графитом в качестве анода и стальным катодом. Поляризацию осуществляли с помощью МНИПИ источника тока Б5 – 78/6 в диапазоне плотности тока от 0,5 до 2 А/дм². Для анализа ионного состава в процессе электролиза отбирали пробы каждые 30 мин. Электрохимические исследования электродных процессов в электролитах выщелачивания проводили с использованием модульного потенциостат-гальваностата Autolab PGSTAT 302N в трехэлектродной ячейке ЯСЭ-2 с графитовым анодом. В качестве катода использовали пластины из стали Ст 3 размером 2×4 см. Электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод.

Результаты и их обсуждение. Результаты титрования электролита после выщелачивания активной массы представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, наибольшая концентрация в электролите выщелачивания наблюдалась по ионам марганца Mn²⁺. При этом тип источника тока мало влияет на концентрацию ионов цинка и марганца в электролите выщелачивания. Большое значение имеет сам электролит выщелачивания. Так, в 10 %-ном растворе NaOH в электролит переходит в ~1,5 раза больше ионов марганца Mn²⁺ и цинка Zn²⁺. Необходимо отметить, что минимальное время выщелачивания составило 5 мин.

Таблица 2. Состав электролита после выщелачивания активной массы

Table 2. The composition of the electrolyte after leaching of the active mass

Определяющий ион	Выщелачивание			
	10 % NaOH		10 % H ₂ SO ₄	
	Тип МЦ источников тока			
	щелочная	солевая	щелочная	солевая
	С, г/дм ³	С, г/дм ³	С, г/дм ³	С, г/дм ³
Zn (I)	34	37	24,7	28,3
Mn (II)	57,24	55,36	39,8	41,36
Fe (I)	0,0012	0,001	3,07	3,005

Нерастворимая часть осадка после выщелачивания подвергалась анализу с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Данные анализа представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что исходный состав активной массы содержит следующие элементы: Zn, Mn, Al, C_{графит}, Si с массовыми долями 33,43, 50,50, 0,85, 11,05, 0,28 мас. % соответственно. После 5 мин выщелачивания в раствор перешло 42 % цинка, 10 % марганца, 9 % графита, 8 % кремния и 2 % алюминия. Со временем выдержки 24 ч выщелачивания в раствор перешло 85 % цинка, 12 % марганца, 9 % графита, 8 % кремния и 2 % алюминия. Значит, независимо от вида обработки количество выщелачиваемых компонентов остается неизменным. Основным фактором является время, чем больше времени для выщелачивания активной массы, тем больше переходят в раствор ионы цинка,

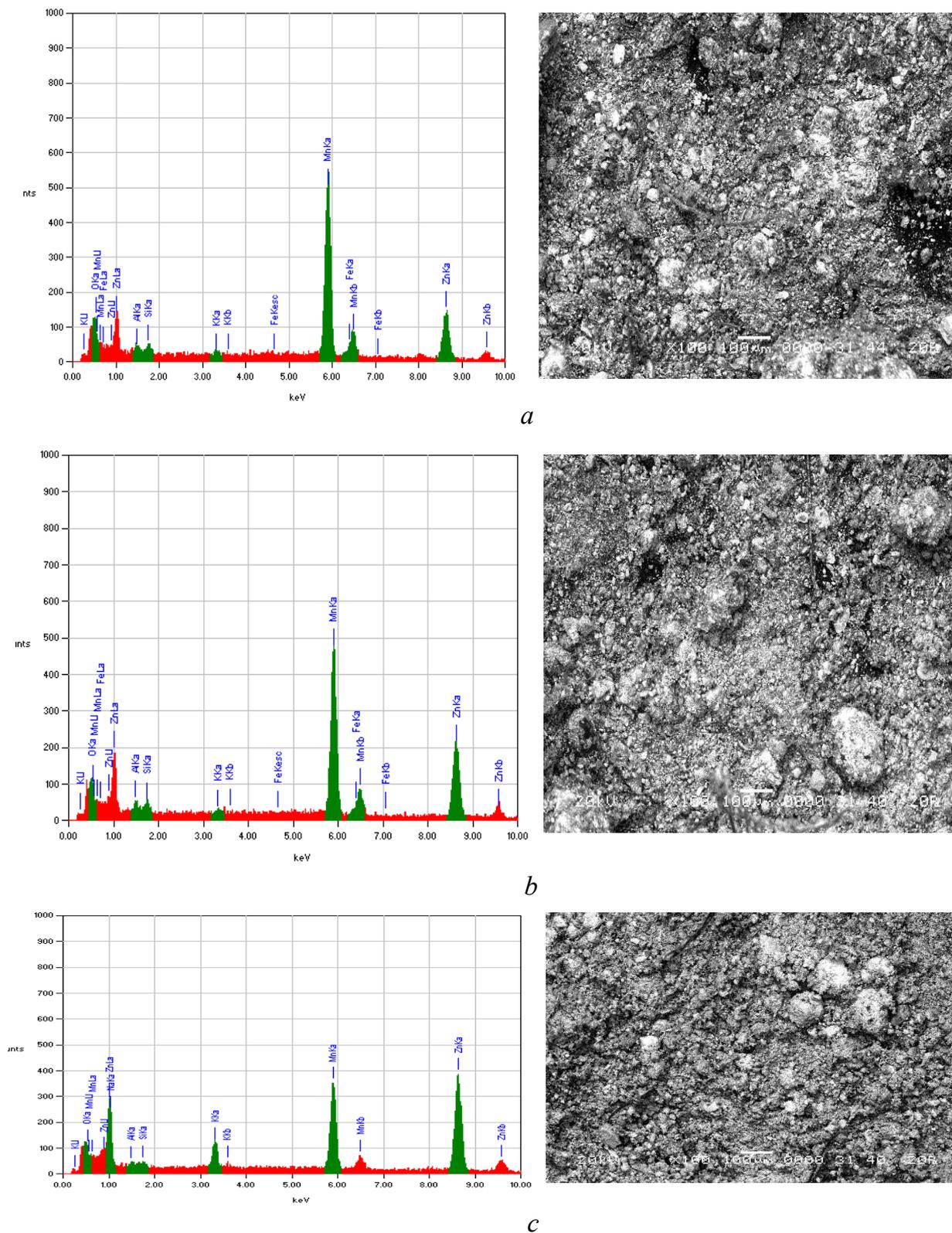


Рис. 1. Энергодисперсионная рентгенофазовая спектроскопия: *a* – 10 %-ной NaOH с активной массой марганцево-цинковых источников тока; *b* – 10 %-ной H₂SO₄ с активной массой марганцево-цинковых источников тока; *c* – активная масса марганцево-цинковых источников тока

Fig. 1. Energy dispersive X-ray phase spectroscopy: *a* – 10 % NaOH with active mass of manganese-zinc current sources; *b* – 10 % H₂SO₄ with active mass of manganese-zinc current sources; *c* – active mass of manganese-zinc current sources

которые можно извлекать в дальнейшем при помощи электролиза в виде готовых продуктов. Результаты энергодисперсионной рентгенофазовой спектроскопии показаны в табл. 3. Кинетика катодного процесса представлена на рис. 2, 3.

Изучение катодной поляризации раствора 10 %-ного раствора щелочи NaOH после выщелачивания активной массы со временем выдержки 5 мин показало, что наибольшая поляризация наблюдается в гидроксиде натрия по сравнению с серной кислотой. Начальный потенциал поляризации цинка составляет $E = -0,7$ В, где цинк осаждается при более высокой поляризации и с лучшим распределением тока и металла по катодной поверхности, формируются светло-серые мелкокристаллические осадки. Начальный потенциал кислого раствора выщелачивания активной массы составил $E = -0,5$ В. При плотности тока от 6 до 8 А/дм² наблюдается предельный ток, выше которого можно осажать порошки цинка, если плотность тока меньше предельного, то цинк осаждается в виде компактных кристаллических осадков. Так как на стальной матрице снятие осадка является сложным процессом, а чтобы его упростить, можно использовать графитовую матрицу.

Поляризационные кривые в растворе на графитовых электродах показали, что чем больше время выщелачивания, тем меньше становится поляризация раствора, так как с увеличением времени в раствор переходит большое количество ионов цинка. Начальная поляризация в щелочном растворе со временем выдержки 24 ч составила $-0,3$ В, в кислом растворе выщелачивания $-0,1$ В.

Т а б л и ц а 3. Энергодисперсионная рентгенофазовая спектроскопия активной массы МЦ ХИТ
Table 3. Energy dispersive X-ray phase spectroscopy of the active mass of MZ CCS

Элемент	Исходный состав активной массы, мас.%	Переработанная активная масса, мас.%			
		$\tau = 5$ мин		$\tau = 24$ ч	
		10 % H ₂ SO ₄	10 % NaOH	10 % H ₂ SO ₄	10 % NaOH
Zn	33,43	20,27	19,8	6,58	4,5
Mn	50,50	48,81	45,94	44,62	43,13
C _{графит}	11,05	8,86	8,53	9,16	9,08
Si	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25
Al	0,85	0,84	0,83	0,83	0,83

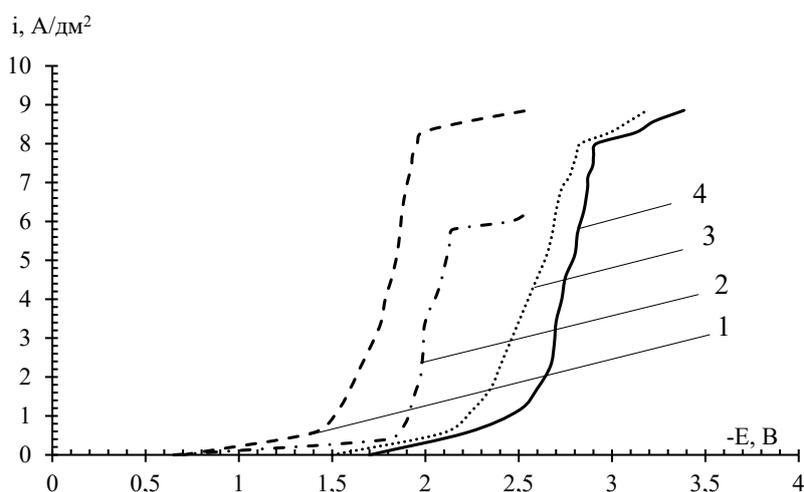


Рис. 2. Поляризационные кривые катодного процесса на стальном катоде с цинковым анодом в 10 %-ном растворе H₂SO₄ после выщелачивания активной массы: 1 – солевые МЦ ХИТ (катод сталь и анод цинк); 2 – щелочные МЦ ХИТ (катод сталь и анод цинк). В 10 %-ном растворе NaOH после выщелачивания активной массы: 3 – солевые МЦ ХИТ (катод сталь и анод цинк); 4 – щелочные МЦ ХИТ (катод сталь и анод цинк)

Fig. 2. Polarization curves of the cathode process on a steel cathode with a zinc anode in a 10 % H₂SO₄ solution after leaching of the active mass: 1 – salt MZ CCS (cathode steel and anode zinc); 2 – alkaline MZ CCS (cathode steel and anode zinc). In 10 % NaOH solution after active mass leaching: 3 – salt MZ CCS (cathode steel and anode zinc); 4 – alkaline MZ CCS (cathode steel and anode zinc)

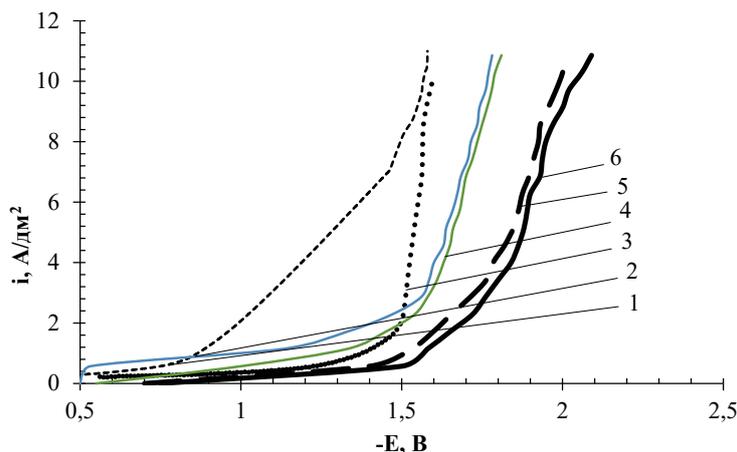


Рис. 3. В 10 %-ном растворе H_2SO_4 после выщелачивания активной массы: 1 – щелочные МЦ ХИТ в течение 24 ч; 2 – щелочные МЦ ХИТ в течение 5 мин.; 4 – солевые МЦ ХИТ в течение 5 мин. В 10 %-ном растворе NaOH после выщелачивания активной массы: 3 – щелочные МЦ ХИТ в течение 24 ч; 5 – щелочные МЦ ХИТ в течение 5 мин; 6 – солевые МЦ ХИТ в течение 5 мин

Fig. 3. In 10 % H_2SO_4 solution after active mass leaching: 1 – alkaline MZ CCS during 24 hours; 2 – alkaline MZ CCS during 5 min.; 4 – salt MZ CCS during 5 min. In 10 % NaOH solution after active mass leaching: 3 – alkaline MZ CCS during 24 hours; 5 – alkaline MZ CCS during 5 min; 6 – salt MZ CCS during 5 min

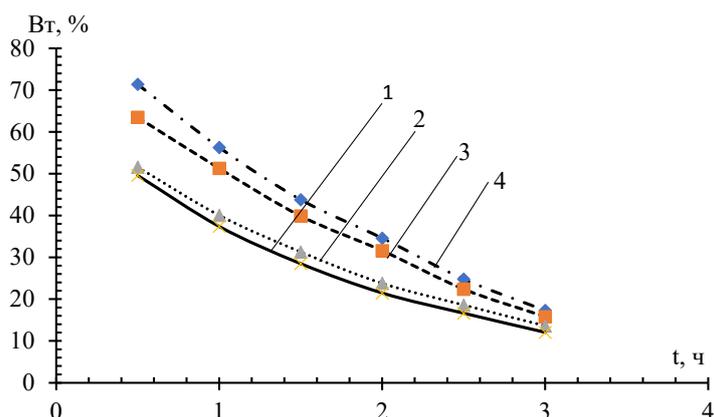


Рис. 4. Зависимость выхода по току цинка от времени: 1 – 10 % H_2SO_4 (солевые); 2 – 10 % H_2SO_4 (щелочные); 3 – 10 % NaOH (солевые); 4 – 10 % NaOH (щелочные)

Fig. 4. Zinc current output versus time: 1 – 10 % H_2SO_4 (saline); 2 – 10 % H_2SO_4 (alkaline); 3 – 10 % NaOH (saline); 4 – 10 % NaOH (alkaline)

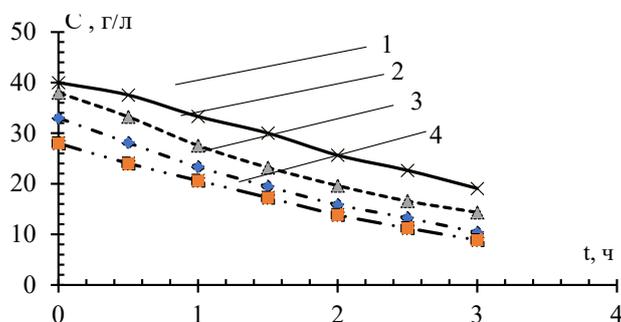


Рис. 5. Зависимость напряжения ячейки от времени: 1 – 10 % NaOH (солевые); 2 – 10 % NaOH (щелочные); 3 – 10 % H_2SO_4 (солевые); 4 – 10 % H_2SO_4 (щелочные)

Fig. 5. Cell voltage versus time: 1 – 10 % NaOH (saline); 2 – 10 % NaOH (alkaline); 3 – 10 % H_2SO_4 (saline); 4 – 10 % H_2SO_4 (alkaline)

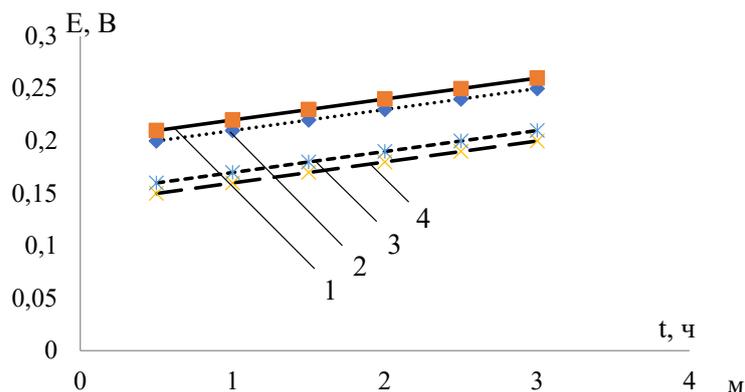


Рис. 6. Зависимость напряжения электролитической ячейки от времени: 1 – 10 % H₂SO₄ (солевые); 2 – 10 % H₂SO₄ (щелочные); 3 – 10 % NaOH (солевые); 4 – 10 % NaOH (щелочные)

Fig. 6. Electrolytic cell voltage versus time: 1 – 10 % H₂SO₄ (saline); 2 – 10 % H₂SO₄ (alkaline); 3 – 10 % NaOH (saline); 4 – 10 % NaOH (alkaline)

Зависимости выхода по току цинка от времени (рис. 4) при постоянной плотности тока 0,5 А/дм² как для солевых, так и для щелочных МЦ ХИТ показали, что с увеличением времени выход по току цинка падает, так как концентрация ионов цинка в растворе от времени также уменьшается (рис. 5), но увеличивается напряжение электролитической ячейки (рис. 6). Это говорит о том, что с течением времени ионы цинка Zn²⁺ переходят в металлический цинк Zn и образуется компактный осадок на поверхности металла.

Заключение. Таким образом, применение щелочных электролитов выщелачивания дает возможность в значительной степени перевести соединения цинка в растворимую форму, а электроэкстракция позволяет выделить цинк в виде компактного осадка или порошка по сравнению с кислыми электролитами выщелачивания. При выщелачивании в большом количестве в раствор переходят ионы цинка Zn²⁺ и марганца Mn²⁺, при этом сам тип источника питания не влияет на состав электролита. Также оптимизировали параметры электролитического осаждения цинка в виде порошка и компактного кристаллического осадка.

Список использованных источников

1. Способ утилизации использованных химических источников тока марганцево-цинковой системы: пат. 2734205 РФ, С 22 В 19/30 / П. А. Зимовец. – Оpubл. 13.10.2020.
2. Способ утилизации отработанных химических источников тока: пат. 2164955 РФ, С 22 В 7/00, С 22 В 19/00, С 22 В 47/00 / А. Н. Птицын, Л. И. Галкова, В. В. Ледвий, С. В. Скопов. – Оpubл. 04.10.2001.
3. Способ утилизации отработавших источников тока: пат. 2723168 РФ, В 09 В3/00 / А. А. Климов. – Оpubл. 09.06.2020.
4. Свердел, Е. С. Комплексная переработка отходов сухих гальванических элементов / Е. С. Свердел // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI, № 9 (77). – С. 13–16.
5. Иванова, Н. П. Химические источники тока: учеб. пособие / Н. П. Иванова, И. М. Жарский, В. В. Жилинский. – Минск: БГТУ, 2010. – 218 с.
6. Иванова, Н. П. Гидроэлектрометаллургия: учеб. пособие / Н. П. Иванова, И. А. Великанова. – Минск: БГТУ, 2010. – 103 с.
7. Багоцкий, В. С. Химические источники тока / В. С. Багоцкий, А. М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
8. Химические источники тока: справ. / под ред. Н. В. Коровина, А. М. Скундина. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 740 с.
9. Печенова, Г. Г. Электрохимическое извлечение цинка из активной массы отработанных марганцево-цинковых источников тока / Г. Г. Печенова, А. А. Черник // Современные электрохимические материалы и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 18–20 мая 2021 г. – Минск: БГТУ, 2021. – С. 272–274.
10. Чем опасны батарейки для окружающей среды и человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://istochnikipitaniyu.ru>. – Дата доступа: 25.10.2021.
11. Все, что нужно знать про вред батареек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://teslabatteries.kiev.ua>. – Дата доступа: 25.10.2021.
12. Что происходит с выброшенной на природу батарейкой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://recyclomag.ru/article/chto-proishodit-s-vybroshej-na-prirodu-batarejkoj>. – Дата доступа: 03.12.2021.
13. Жендарева, О. Г. Методы анализа гальванических ванн / О. Г. Жендарева, З. С. Мухина. – М.: Оборонгиз, 1963. – 290 с.

References

1. Zimovets P. A. *Method of disposal of used chemical current sources of the manganese-zinc system*. Patent of the Russian Federation No. 2734205. Publ. date 13 October 2020 (in Russian).
2. Ptitsyn A. N., Galkova L. I., Ledviy V. V., Skopov S. V. *Method of disposal of spent chemical current sources*. Patent of the Russian Federation No. 2164955. Publ. date 04 October 2001 (in Russian).
3. Klimov A. A. *Method of disposal of spent current sources*. Patent of the Russian Federation No. 2723168. Publ. date 09 June 2020 (in Russian).
4. Sverdel E. S. Complex processing of waste of dry galvanic cells. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii = Advances in chemistry and chemical technology*, 2007, vol. XXI, no. 9 (77), pp. 13–16 (in Russian).
5. Ivanova N. P., Zharsky I. M., Zhilinsky V. V. *Chemical current sources. Laboratory workshop*. Minsk, BSTU, 2010. 218 p. (in Russian).
6. Ivanova N. P., Velikanova I. A. *Hydroelectrometallurgy*. Minsk, BSTU, 2010. 103 p. (in Russian).
7. Bagotsky V. S., Skundin A. M. *Chemical current sources*. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 360 p. (in Russian).
8. Korovin N. V., Skundin A. M. (eds.). *Chemical current sources: handbook*. Moscow, Publishing House of MEI, 2003. 740 p. (in Russian).
9. Pechenova G. G., Chernik A. A. Electrochemical extraction of zinc from the active mass of spent manganese-zinc current sources. *Sovremennye elektrokhimicheskie materialy i oborudovanie: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Minsk, 18–20 maya 2021 g.* [Modern electrochemical materials and equipment: materials of International Scientific and Technical. conf., Minsk, May 18–20, 2021]. Minsk: BSTU, 2021, pp. 272–274 (in Russian).
10. *What are the dangers of batteries for the environment and humans*. Available at: <https://istochnikipitaniy.ru>. (accessed 25 October 2021) (in Russian).
11. Everything you need to know about the harm of batteries. Available at: <https://teslabatteries.kiev.ua>. (accessed 25 October 2021) (in Russian).
12. What happens to a battery thrown into nature. Available at: <https://recyclemag.ru/article/chto-proishodit-s-vybros-hennoj-na-prirodu-batarejkoy> (accessed 03 December 2021) (in Russian).
13. Zhendareva O. G., Mukhina Z. S. *Methods of analysis of galvanic baths*. Moscow, Publishing house "Oborongiz", 1963. 290 p. (in Russian).

Информация об авторах

Печенова Гюльнара Георгиевна – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gulnara.pech@gmail.com

Черник Александр Александрович – канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexachernik@gmail.com

Information about the authors

Pechenova Gulnara G. – Postgraduate Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: gulnara.pech@gmail.com

Chernik Alexander A. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: alexachernik@gmail.com