

УДК 542.61

ЭКСТРАКЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА Ni-MH АККУМУЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ С ПОЛИПРОПИЛЕНГЛИКОЛЕМ 425

© 2022 г. М. И. Федорова^а, А. В. Левина^а, Ю. А. Заходяева^{а, *}, А. А. Вошкин^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yz@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 07.02.2022 г.

Показана перспективность совместной переработки катодного и анодного материалов Ni-MH аккумулятора. Проведено растворение в соляной кислоте элементов Ni-MH аккумулятора с последующим экстракционным разделением ионов Ni(II), Co(II), Mn(II), La(III), Al(III) и Zn(II) в двухфазных водных системах на основе полипропиленгликоля 425 с введением ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты из солянокислых растворов выщелачивания. Установлено, что рассматриваемые системы позволяют с высокой эффективностью (от 60 до 90%) извлекать ионы Zn(II), Al(III), La(III). Полученные количественные характеристики экстракции исследуемых ионов металлов позволили разработать новую принципиальную технологическую схему переработки функциональных материалов Ni-MH аккумуляторов, позволяющую получать концентраты отдельных ионов металлов.

Ключевые слова: жидкостная экстракция, двухфазные водные системы, электронные отходы, “зеленая” химия

DOI: 10.31857/S0044457X22070091

ВВЕДЕНИЕ

Перезаряжаемые аккумуляторы являются одним из наиболее перспективных источников энергии, их применяют повсеместно: в портативных электронных устройствах, электромобилях и т.д. [1]. Такие аккумуляторы включают в себя литий-ионные (Li-ion), никель-кадмиевые (Ni-Cd), свинцово-кислотные и никель-металлогидридные (Ni-MH) батареи [2]. Они содержат тяжелые металлы, классифицированные как канцерогены и мутагены, а при неправильной утилизации эти металлы могут нанести серьезный ущерб здоровью человека и окружающей среде [3]. Кроме того, некоторые металлы в составе аккумуляторов имеют высокую стоимость. Например, кобальт является стратегически важным металлом: он выступает незаменимым катодным материалом в Li-ion батареях [4], ключевым компонентом сплава Sm-Co магнитов [5], а поскольку его содержание в земной коре сопоставимо с запасами редкоземельных элементов (РЗЭ), возникает угроза выработки первичных источников кобальта, в связи с чем цена на него с каждым годом увеличивается. РЗЭ, входящие в состав аккумуляторных батарей, являются “критическими металлами”, они имеют огромное значение во всем мире, поскольку характеризуются низкой скоростью переработки

[6], высокой стоимостью [7] и отсутствием металлов-заменителей [8].

Созданные и коммерциализированные в Японии в 1989 г. Ni-MH аккумуляторы являются наиболее широко используемыми перезаряжаемыми аккумуляторами, применяемыми в настоящее время [9]. Ni-MH батареи имеют ряд преимуществ: низкую скорость саморазряда, широкий диапазон рабочих температур, высокую электрохимическую емкость, длительный срок службы и экологическую безопасность [10]. Все это позволило им заменить более дешевые, но менее экологичные Ni-Cd аккумуляторы [11].

Переработка аккумуляторов включает два этапа: механическую обработку и выделение компонентов. Основными составляющими Ni-MH батарей являются катод, анод и анодная сетка. Катод в основном состоит из никеля и покрыт Ni(OH)₂, в то время как анод представляет собой сплав никеля и мишметалла (церия, лантана и др.) [12]. Элементный состав Ni-MH аккумуляторов достаточно широк и включает в себя следующие элементы (мас. %): 17–63 Ni, 8–30 Fe, 12–17 редкоземельные металлы (La, Ce, Nd, Pr, Y), 3.7–5 Co, 1.7–3.1 K, 0.8–2.2 Zn, 0.7–2.3 Mn, 0.2–1.1 Al и другие металлы (Na, Ca, Ag, Pb, Cr, Cu, Ti, V), содержание которых составляет <1% [13]. После ме-

ханической обработки применяют пирометаллургические [14, 15] или гидрометаллургические [16, 17] процессы, например, выщелачивание минеральными кислотами [18–21] или глубокими эвтектическими растворителями [22]. Известны работы, в которых переработку и извлечение металлов проводят, используя растворение целой батарейки [23], однако переработка отдельных составляющих может быть более эффективной [12]. Дальнейшее разделение и выделение металлов из полученных после выщелачивания растворов проводят при помощи осаждения [21, 24], методов жидкостной экстракции [16, 21, 25] и/или их комбинацией.

Жидкостная экстракция является энергосберегающим и дешевым методом концентрирования и разделения металлов с возможностью регенерации и повторного использования компонентов [26]. Традиционно для извлечения металлов из водных растворов в качестве экстрагентов применяют фосфорорганические (2-этилгексилэфир-2-этилгексилфосфорной кислоты [27], ди(2-этилгексил)фосфорная кислота (Д2ЭГФК) [28–30], бис(2,4,4-триметилфенил)фосфиновая кислота (Суапекс 272) [31]) или карбоновые [32] кислоты, соли четвертичных аммониевых оснований [33] и пр., растворенные в органических разбавителях. Поскольку данные экстрагенты обладают не только высокой эффективностью, но и селективностью по отношению к металлам, удается разделить даже близкие и сложно разделяемые металлы. В работе [34] показано, что Д2ЭГФК при pH 2.5 способен извлекать около 75% Fe и 96% Zn; LIX 984 экстрагирует 99.9% Zn при pH 2–3, а Суапекс 302 способен извлекать ~97% Ni при pH 4.

Несмотря на то, что традиционные экстракционные методы имеют ряд преимуществ, они зачастую связаны с использованием органических растворителей, которые, в свою очередь, являются токсичными и пожароопасными [35]. Альтернативой растворителям служат системы на основе водорастворимых полимеров [36–38]. Водорастворимые полимеры биоразлагаемы, не токсичны и уже показали свою эффективность при экстракции ионов металлов из водных растворов [39]. Более того, двухфазные водные системы могут применяться в качестве экологичного разбавителя [40]. Отмечается, что со степенью извлечения >95% удается извлечь Fe(III) и Zn(II) из солянокислых водных растворов при введении Aliquat 336 в двухфазную водную систему на основе полипропиленгликоля 425. Также при введении в данную двухфазную водную систему роданида калия удается ступенчато разделить группу переходных металлов [41]. Степень извлечения не снижается при замене органического разбавителя на двухфазную водную систему.

Настоящая работа является продолжением исследований по экстракционному разделению металлов из солянокислых растворов выщелачивания элементов Ni-MH аккумуляторов. Ее цель заключается в разработке экстракционной системы на основе полипропиленгликоля 425 с добавлением органической кислоты и роданида калия для извлечения и разделения ионов металлов, содержащихся в составе катодного и анодного материалов Ni-MH аккумуляторов, а также в создании принципиальной технологической схемы на основании полученных экспериментальных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах использовали цилиндрические Ni-MH аккумуляторы типоразмера AA емкостью 1900 мА ч и напряжением 1.2 В. Из одной батарейки массой 26.7 г после снятия внешнего корпуса были выделены активные элементы: катод (9.2 г), анодный порошок (9.2 г) и анодная сетка (0.9 г).

Растворение катодного и анодного порошка проводили 4 М соляной кислотой при 90°C в течение 6 ч в круглодонной колбе с обратным холодильником.

Разделение ионов металлов из раствора выщелачивания проводили в экстракционной системе на основе полипропиленгликоля 425 (Acros Organics, CAS № 25322-69-4) при температуре 25°C в градуированных пластиковых пробирках в термостатированном шейкере Enviro-Genie (Scientific Industries, Inc.) при скорости вращения 30 об/мин до установления термодинамического равновесия (30 мин).

Концентрацию ионов Ni(II), Co(II), Mn(II), La(III), Al(III) и Zn(II) в растворах выщелачивания и солевых и полимерных фазах после экстракции определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (Thermo Electron Corp., США).

Представленные экспериментальные данные являются результатом серии трех экспериментов и обработаны с использованием методов математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе было проведено растворение катодного и анодного материала Ni-MH аккумуляторов в среде 4 М соляной кислоты. Условия эксперимента были следующие: 1) массовое соотношение кислота : тв. материал = 6 : 1 (для катода) и 8 : 1 (для анода); 2) время растворения 6 ч; 3) температура 90°C. Составы полученных растворов выщелачивания представлены в табл. 1. В виду того, что элементные составы растворов выщелачивания катода и анода близки, они были объ-

Таблица 1. Элементный состав растворов выщелачивания катодного и анодного материалов Ni-MH аккумуляторов

Раствор выщелачивания	C(HCl), моль/л	Концентрации металлов, моль/л					
		Ni(II)	La(III)	Zn(II)	Co(II)	Mn(II)	Al(III)
Катод	0.6	2.343	–	0.104	0.048	0.00699	0.00849
Анод	2	1.983	0.292	–	0.321	0.104	0.0982
Объединенный раствор	1.4	2.191	0.123	0.0605	0.163	0.048	0.0463

единены в один для дальнейшей экстракционной переработки.

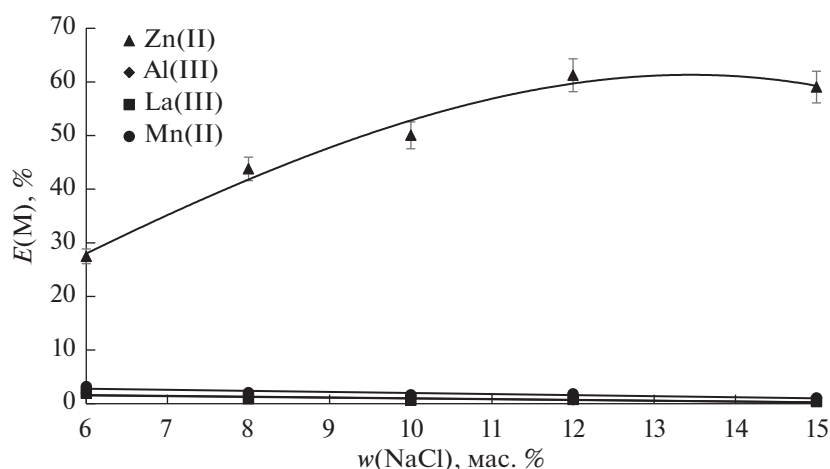
В качестве экстрагентов нами были выбраны ди(2-этилгексил)фосфорная кислота и роданид калия ввиду их высокой экстракционной эффективности по отношению к исследуемым металлам.

На первом этапе было предложено провести электроосаждение Ni и Co из объединенного раствора выщелачивания. Полученный раствор, содержащий Zn(II) (0.0605 моль/л), La(III) (0.123 моль/л), Mn(II) (0.048 моль/л) и Al(III) (0.0463 моль/л), вводили в экстракционную систему полипропиленгликоль 425–хлорид натрия–вода. Для определения наиболее благоприятных условий экстракции нами была проведена серия экспериментов по варьированию содержания хлорида натрия от 6 до 15 мас. % в экстракционной системе полипропиленгликоль 425 (30 мас. %)–NaCl–вода. На рис. 1 представлены зависимости степеней извлечения исследуемых ионов металлов от начального содержания соли в системе. Из рис. 1 видно, что при содержании соли 15 мас. % $E(\text{Zn}) = 60\%$, а степени извлечения других металлов не превышают 1%. Таким образом, двухфазная водная система полипропиленгликоль 425 (30 мас. %)–хлорид натрия

(15 мас. %)–вода решает задачу отделения ионов цинка от ионов лантана, марганца и алюминия.

Рафинат, содержащий La(III), Mn(II) и Al(III), подвергали дальнейшему экстракционному разделению с использованием системы полипропиленгликоль 425 (38 мас. %)–NaCl (6 мас. %)–H₂O с введением ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты (1.36 моль/л), объемное соотношение полимерной и солевой фаз во всех экспериментах составляло 3 : 1. Концентрация экстрагента и соотношение фаз были выбраны для повышения растворимости образуемых экстрагируемых соединений лантана и алюминия. На первом этапе было исследовано влияние кислотности солевой фазы на экстракцию ионов La(III), Mn(II) и Al(III). На рис. 2 приведена зависимость степени извлечения металлов от pH равновесной солевой фазы. Из рис. 2 видно, что при повышении pH солевой фазы происходит увеличение степеней извлечения лантана и алюминия, что характерно для катионообменной экстракции [42]. Степень извлечения марганца во всем исследуемом диапазоне pH не превышает 7%.

Далее было исследовано влияние концентрации Д2ЭГФК от 1.36 до 2.00 моль/л на экстракцию ионов La(III) (0.123 моль/л), Mn(II) (0.048 моль/л) и Al(III) (0.0463 моль/л) с равновесным

**Рис. 1.** Зависимость степени извлечения исследуемых ионов металлов от начального содержания соли в системе полипропиленгликоль 425 (30 мас. %)–хлорид натрия–вода.

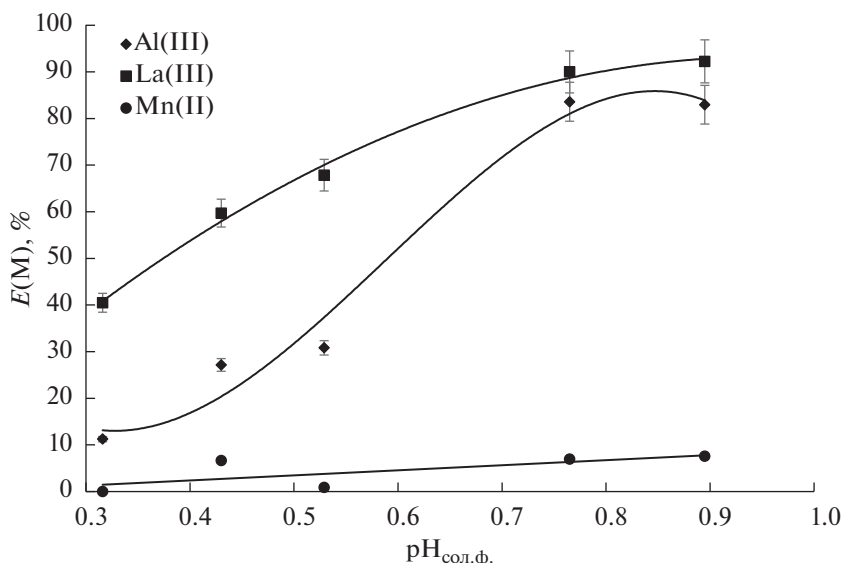


Рис. 2. Зависимость степени извлечения металлов от равновесного значения pH солевой фазы в системе полипропиленгликоль 425 (38 мас. %)–NaCl (6 мас. %)–H₂O, $C(\text{Д2ЭГФК}) = 1.36$ моль/л.

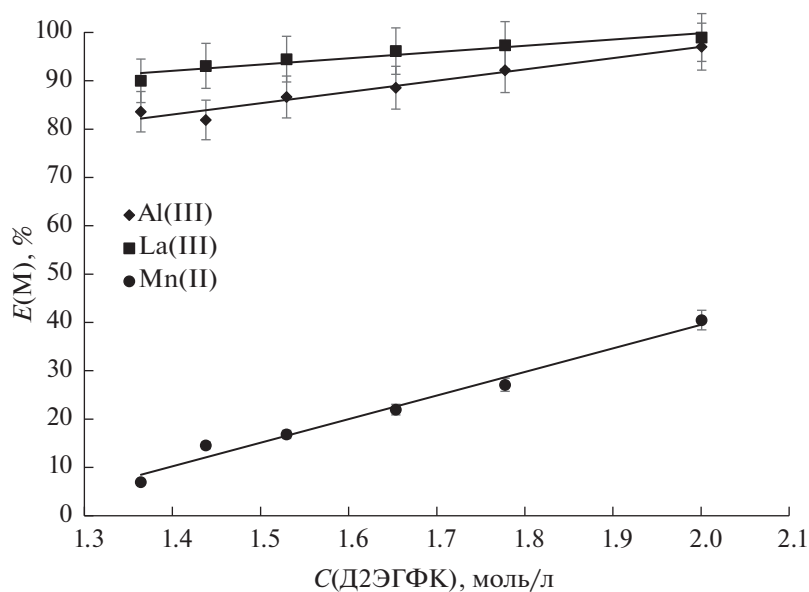


Рис. 3. Зависимость степени извлечения металлов от кислотности солевой фазы в системе полипропиленгликоль 425 (38 мас. %)–NaCl (6 мас. %)–H₂O, $pH_{\text{сол.ф.}} = 0.8$.

значением pH 0.8–0.9. Поскольку исследуемые системы склонны к образованию третьей фазы (плохо растворимые комплексы металлов с Д2ЭГФК, растворимость которых повышается за счет введения избыточного количества экстрагента), нами не рассматривались меньшие количества кислоты. Необходимое значение кислотности солевой фазы поддерживалось путем введения 1 М раствора NaOH. На рис. 3 представлена зависимость степени извлечения ионов La(III), Mn(II) и Al(III) от концентрации Д2ЭГФК. Полу-

ченные зависимости линейно возрастают с увеличением концентрации экстрагента: для La(III) – от 90 до 99%, для Al(III) – от 83 до 97%, для Mn(II) – от 7 до 40%. Таким образом, для задачи отделения ионов лантана и алюминия от ионов марганца необходимо использовать систему с наименьшим возможным содержанием Д2ЭГФК, а именно 1.36 моль/л.

Исследуемые металлы извлекаются в системах с Д2ЭГФК в виде ди(2-этилгексил)фосфатов (уравнение (1)), сольватированных недиссоции-

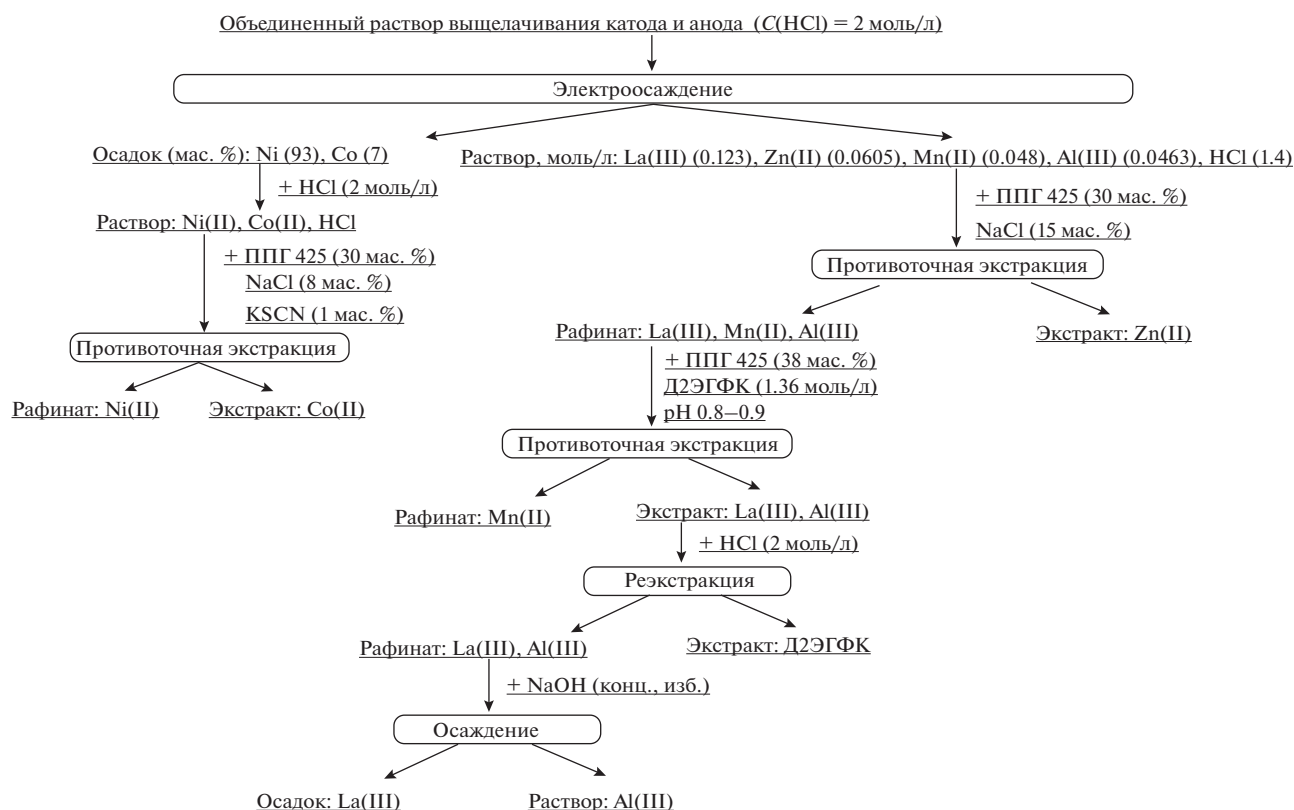
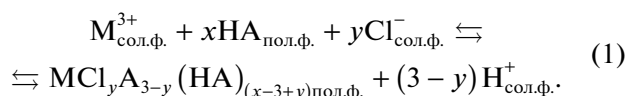


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема переработки отработанных Ni-Mn аккумуляторов.

рованными молекулами кислоты с возможным включением хлорид-ионов, что характерно для лантаноидов [42]:



Тогда константа экстракции по уравнению (1) будет иметь вид:

$$K = \frac{[M_{\text{пол.ф.}}^{3+}][\text{H}_{\text{сол.ф.}}^{+}]^{(3-y)}}{[M_{\text{сол.ф.}}^{3+}][\text{HA}_{\text{пол.ф.}}]^x[\text{Cl}_{\text{сол.ф.}}^{-}]^y}$$

Путем логарифмирования полученного выражения, получим:

$$\begin{aligned} \lg K &= \lg D(M) - (3-y)\text{pH} - \\ &- x\lg[\text{HA}_{\text{пол.ф.}}] - y\lg[\text{Cl}_{\text{сол.ф.}}^{-}]. \end{aligned}$$

Для определения составов экстрагируемых комплексов нами были построены билигарифмические зависимости коэффициентов распределения металлов от pH и концентрации экстрагента. В табл. 2 представлены параметры уравнений полученных прямых и их коэффициенты детерминации. Тангенс угла наклона полученных в билигарифмических координатах прямых для зависимости коэффициента распределения La(III) и

Al(III) от концентрации экстрагента равен 6 в обоих случаях. Это свидетельствует об участии в образовании экстрагируемых соединений металлов шести молекул D2ЭГФК. Для зависимостей коэффициентов распределения лантана и алюминия от значений pH солевой фазы тангенсы углов наклона равны 2 и 3 соответственно. На основании полученных данных предложены следующие механизмы экстракции:

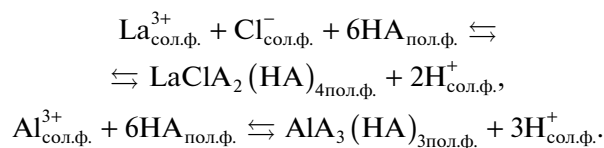


Таблица 2. Параметры уравнений ($y = ax + b$) билигарифмических зависимостей коэффициентов распределения лантана и алюминия от кислотности равновесной солевой фазы и концентрации D2ЭГФК (моль/л) и их коэффициенты детерминации

Ион	pH _{сол.ф.}			C(D2ЭГФК)		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Al(III)	2.99	-2.29	0.95	5.88	-0.79	0.96
La(III)	2.26	-1.33	0.99	5.98	-0.34	0.98

Разделение ионов кобальта и никеля возможно с использованием роданида калия, так как ионы Co(II) способны образовывать тиоцианатные анионные комплексы с большими константами устойчивости, чем ионы Ni(II) ($K_{уст}(Co(II)) = 200$, $K_{уст}(Ni(II)) = 64.5$). Исследование межфазного распределения Ni(II) и Co(II) в системах с полипропиленгликолем 425 и KSCN было проведено ранее [41]. При введении в систему полипропиленгликоль 425 (30 мас. %)–NaCl (8 мас. %)–H₂O роданида калия (1 мас. %) в полимерную фазу количественно извлекаются ионы кобальта и не экстрагируются ионы никеля. Таким образом может быть решена задача разделения ионов никеля и кобальта в предложенной “зеленой” экстракционной системе.

На основании экспериментальных данных нами была разработана принципиальная технологическая схема переработки отработанных Ni-МН аккумуляторов (рис. 4). Созданная схема позволяет получить концентраты отдельных металлов, входящих в состав Ni-МН аккумуляторов, используя экологически безопасную экстракционную систему на основе полипропиленгликоля 425 и хлорида натрия с минимальным количеством экстрагентов (KSCN и Д2ЭГФК).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования показано, что целесообразна совместная переработка катодного и анодного материалов ввиду схожести их элементного состава. Подобраны условия, позволяющие разделить ионы Ni(II), La(III), Zn(II), Co(II), Mn(II) и Al(III) с использованием двухфазной водной системы на основе полипропиленгликоля 425 и минимального количества экстрагентов (Д2ЭГФК и роданид калия). По полученным экспериментальным данным разработана оригинальная принципиальная технологическая схема переработки отработанных химических источников тока.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24170 с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Innocenzi V., Ippolito N.M., De Michelis I. et al.* // J. Power Sources. 2017. V. 362. P. 202. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.034>
2. *Assefi M., Maroufi S., Yamauchi Y. et al.* // Curr. Opin. Green Sustain. Chem. 2020. V. 24. P. 26. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.005>
3. *Zhang X., Li L., Fan E. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2018. V. 47. № 19. P. 7239. <https://doi.org/10.1039/C8CS00297E>
4. *Chagnes A., Pospiech B.* // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2013. V. 88. № 7. P. 1191. <https://doi.org/10.1002/jctb.4053>
5. *Orefice M., Audoor H., Li Z. et al.* // Sep. Purif. Technol. 2019. V. 219. P. 281. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.029>
6. *Gunn G. (ed.) Critical Metals Handbook.* Oxford: John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118755341>
7. *Silvas F.P.C., Jiménez Correa M.M., Caldas M.P.K. et al.* // Waste Manag. 2015. V. 46. P. 503. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.030>
8. *Omodara L., Pitkääho S., Turpeinen E.-M. et al.* // J. Clean. Prod. 2019. V. 236. P. 117573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.048>
9. *Nitta N., Wu F., Lee J.T. et al.* // Mater. Today. 2015. V. 18. № 5. P. 252. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
10. *Xu Y., Mulder F.M.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.073>
11. *Hazotte C., Leclerc N., Meux E. et al.* // Hydrometallurgy. 2016. V. 162. P. 94. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.02.019>
12. *Larsson K., Ekberg C., Ødegaard-Jensen A.* // Waste Manag. 2013. V. 33. № 3. P. 689. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.001>
13. *Fedorova M.I., Zakhodyaeva Y.A., Baranchikov A.E. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 2. P. 266. [*Федорова М.И., Заходяева Ю.А., Баранчиков А.Е. и др.* // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 2. С. 274. <https://doi.org/10.31857/S0044457X210200821> <https://doi.org/10.1134/S003602362102008X>]
14. *Müller T., Friedrich B.* // J. Power Sources. 2006. V. 158. № 2. P. 1498. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.046>
15. *Tang K., Cifjia A., Van D. et al.* // J. Min. Metall., Sect. B: Metall. 2013. V. 49. № 2. P. 233. <https://doi.org/10.2298/JMMB120808004T>
16. *Larsson K., Ekberg C., Ødegaard-Jensen A.* // Hydrometallurgy. 2013. V. 133. P. 168. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.01.012>
17. *Zhang P., Yokoyama T., Itabashi O. et al.* // Hydrometallurgy. 1998. V. 50. № 1. P. 61. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(98\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(98)00046-2)
18. *Gharabaghi M., Irannajad M., Azadmehr A.R.* // Chem. Eng. Res. Des. 2013. V. 91. № 2. P. 325. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.11.016>
19. *Meshram P., Pandey B.D., Mankhand T.R.* // Hydrometallurgy. 2015. V. 158. P. 172. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.10.028>

20. Meshram P., Pandey B.D., Mankhand T.R. // Waste Manag. 2016. V. 51. P. 196.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.018>
21. Fernandes A., Afonso J.C., Dutra A.J.B. // Hydrometallurgy. 2013. V. 133. P. 37.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.017>
22. Landa-Castro M., Aldana-González J., Montes de Oca-Yemha M.G. et al. // J. Alloys Compd. 2020. V. 830. P. 154650.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154650>
23. Zhang P., Yokoyama T., Itabashi O. et al. // J. Power Sources. 1999. V. 77. № 2. P. 116.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00182-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00182-7)
24. Bertuol D.A., Bernardes A.M., Tenório J.A.S. // J. Power Sources. 2009. V. 193. № 2. P. 914.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.05.014>
25. Innocenzi V., Vegliò F. // J. Power Sources. 2012. V. 211. P. 184.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.064>
26. Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A. et al. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. № 1. P. 123.
<https://doi.org/10.1039/C3CS60275C>
27. Tanaka M., Narita H. // Hydrometallurgy. 2021. V. 201. P. 105588.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105588>
28. Sun M., Liu S., Zhang Y. et al. // J. Mol. Liq. 2019. V. 280. P. 252.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.025>
29. Lupi C., Pilone D. // Miner. Eng. 2020. V. 150. P. 106278.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106278>
30. Mishra B.B., Devi N. // Mater. Today Proc. 2020. V. 30. P. 254.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.355>
31. Guimarães A.S., Silva L.A., Pereira A.M. et al. // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 239. P. 116570.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116570>
32. Deng Y., Ding Y., Huang Z. et al. // J. Mol. Liq. 2021. V. 329. P. 115549.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115549>
33. Wu X., Zhang G., Zeng L. et al. // Hydrometallurgy. 2020. V. 195. P. 105401.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105401>
34. Soeezi A., Abdollahi H., Shafaei S.Z. et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2020. V. 30. № 2. P. 518.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65232-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65232-3)
35. Huang Y., Chen D., Chen S. et al. // J. Clean. Prod. 2021. V. 297. P. 126452.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126452>
36. Fedorova M.I., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A. et al. // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V. 54. № 2. P. 313. [Федорова М.И., Зиновьева И.В., Заходяева Ю.А. и др. // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 202. <https://doi.org/10.31857/S0040357120020037>] <https://doi.org/10.1134/S0040579520020037>
37. Zakhodyaeva Y.A., Rudakov D.G., Solov'ev V.O. et al. // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 2. P. 159. [Заходяева Ю.А., Рудаков Д.Г., Соловьев В.О. и др. // Теорет. основы хим. технологии. 2019. Т. 53. № 2. С. 131. <https://doi.org/10.1134/S0040357119020180>.] <https://doi.org/10.1134/S0040579519020180>
38. Zakhodyaeva Y.A., Rudakov D.G., Solov'ev V.O. et al. // J. Chem. Eng. Data 2019. V. 64. № 3. P. 1250.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01138>
39. de Oliveira W.C.M., Rodrigues G.D., Mageste A.B. et al. // Chem. Eng. J. 2017. V. 322. P. 346.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.044>
40. Fedorova M.I., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V. 54. № 3. P. 425. [Федорова М.И., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А. // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 3. С. 304. <https://doi.org/10.31857/S0040357120030021>] <https://doi.org/10.1134/S0040579520030021>
41. Voshkin A.A., Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V. // KnE Mater. Sci. 2020. P. 227.
<https://doi.org/10.18502/kms.v6i1.8072>
42. Lee G.S., Uchikoshi M., Mimura K. et al. // Sep. Purif. Technol. 2009. V. 67. № 1. P. 79.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.03.033>