

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Часть 2. Переработка электродных материалов

¹Д.А. Шляпин, ¹Ю.В. Суровикин, ¹И.В. Мишаков, ²Д.В. Агафонов,
¹О.В. Нецкина

¹Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск,

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

Описаны подходы к утилизации литий-ионных аккумуляторов с использованием методов гидрометаллургической и пирометаллургической переработки, рассмотрены их преимущества и недостатки. Обозначен глобальный характер проблемы, связанной с высокими темпами роста рынка литий-ионных аккумуляторов и неразвитостью инфраструктуры для их утилизации, что ведёт к загрязнению окружающей среды токсичными компонентами аккумуляторов. Сделан вывод о том, что разработку новых технических решений в этой области необходимо вести, соблюдая баланс между экономической эффективностью и соблюдением экологических норм.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, утилизация, гидрометаллургическая переработка, пирометаллургическая переработка, *direct recycling*, извлечение металлов

Статья поступила в редакцию 05.08.2024, доработана 27.08.2024, принята к публикации 19.09.2024

Methods of Utilization of Lithium-ion Batteries Part 2. Recycling of electrode materials

¹D.A. Shlyapin, ¹Yu.V. Surovikin, ¹I.V. Mishakov, ²D.V. Agafonov, ¹O.V. Netskina

¹Institute of Catalysis SB RAS, 630090 Novosibirsk, Russia,

²Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 190013 Saint-Petersburg, Russia

Approaches to the utilization of lithium-ion batteries using hydrometallurgical and pyrometallurgical recycling methods are described, their advantages and disadvantages are considered. The global nature of the problem associated with high growth rates of lithium-ion batteries market and underdeveloped infrastructure for their utilization, which leads to environmental pollution by toxic components of batteries, is outlined. It is concluded that the development of new technical solutions in this area should be carried out with a balance between economic efficiency and compliance with environmental standards.

Keywords: *lithium-ion batteries, utilization, hydrometallurgical recycling, pyrometallurgical recycling, direct recycling, metal recovery*

Received 05.08.2024, revised 27.08.2024, accepted for publication 19.09.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-40-46

Масштабная электрификация всех сфер жизнедеятельности человечества в рамках перехода на новый технологический уклад, основанный на использовании "зелёных" источников энергии (солнца, ветра, прилива-отлива), производительность которых вариabельна во времени, требует специальных устройств для запасания энергии на пике мощности и дальнейшей передачи потребителям в период ее недостатка. Стационарные системы хранения электрической энергии уже производятся в мире [1], они основаны на применении для этой

задачи литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Переводятся на электротягу с питанием от ЛИА также наземный, морской и воздушный транспорт, а ноутбуки, носимая и бытовая электроника, снабжённые ЛИА, уже давно вошли в наш быт. Небольшие устройства содержат в среднем от 2 до 20 г лития, аккумулятор электромобиля — 20 кг лития, устройство запасания энергии мощностью 10 МВт — не менее 700 кг этого элемента [2]. При этом ЛИА в небольшом электронном устройстве требует замены через три года, в автомобиле, стационарной системе за-

пасания энергии — через пять-десять лет [2]. Общее накопленное количество отработанных ЛИА к 2030 г. может достигнуть 11 млн т, а ежегодный его прирост к 2040 г. — 340 тыс. т [3]. При этом утилизируется менее 1 % выводимых из эксплуатации ЛИА [1], в том числе автомобильных аккумуляторов перерабатывается менее 5 % [4, 5]. К 2035 г. ожидается утилизация всего 7 млн т ЛИА [6], в то время как предполагаемый спрос на литий через 20 лет в 2–6 раз превысит потенциал его действующих месторождений [4]. Проблема приобретает глобальный ха-

ракти и требует адекватных технологических решений.

Цель настоящего обзора — рассмотрение различных подходов к способам утилизации ЛИА.

Методы извлечения лития

Пирометаллургическая переработка. Метод пирометаллургической переработки (ПП) заключается в высокотемпературном восстановлении соединений, входящих в состав электродных материалов ЛИА (рис. 1) [4, 7]. Согласно [3], при ПП (см. рис. 1) отработанные ЛИА подвергаются воздействию высокой температуры в окислительной среде, что приводит к разложению и сгоранию органических материалов, входящих в конструкцию сепаратора и твёрдого электролита ЛИА. В шлаке, оставшемся после сжигания, концентрируются соединения лития, кобальта, никеля, меди, алюминия, кремния, кальция и некоторое количество железа. Кобальт, никель и медь восстанавливаются карботермическим методом; из образующегося сплава далее извлекают отдельные металлы или их соединения. При ПП также расходуется большое количество энергии вследствие необходимости поддержания высокой рабочей температуры (~1500 °C).

Преимущества ПП, согласно [3, 8]:

- процесс состоит из простых операций;
- отсутствует необходимость в разделении и измельчении;
- в результате образуются продукты, пригодные для производства новых катодных материалов.

Недостатки ПП, согласно [4, 8]:

- выброс парникового газа CO_2 ;
- потребление значительного количества энергии;
- образующийся сплав металлов (кобальта, никеля, меди) требует дальнейшей дорогостоящей переработки;
- большинство материалов, входящих в состав ЛИА (пла-

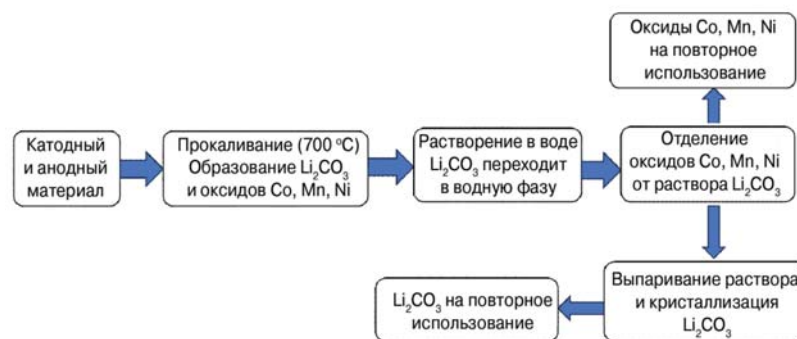


Рис. 1. Принципиальная схема ПП электродных материалов ЛИА [2]

Fig. 1. Principal scheme of the PR electrode materials of the LIA [2]

стик, графит и алюминий), теряются безвозвратно.

Согласно [7], к недостаткам ПП также следует отнести: образование токсичных газов при окислении компонентов электролита; необходимость сжигания полимеров, которые могут быть также вовлечены во вторичный оборот.

ПП экономически целесообразно при реализации в больших масштабах, однако отличается высокой энергоёмкостью. Кроме того, ПП не позволяет индивидуально выделить такие металлы, как литий, алюминий и марганец [4].

Гидрометаллургическая переработка. Метод гидрометаллургической переработки (ГП) предполагает выделение требуемых элементов/компонентов с помощью водных растворов химических реагентов (рис. 2) [4, 7]. Основные используемые реагенты — серная, соляная и азотная кислоты, водный раствор аммиака ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), растворы гидроксидов натрия (NaOH) и калия (KOH) [4, 7, 9]. ГП основана на процессе выщелачивания кислотами или основаниями компонентов, входящих в состав ЛИА, с последующим их концентрированием и очисткой [3]. Необходимой предварительной стадией ГП служит механическая предобработка (МПО) — измельчение компонентов ЛИА. Ионы металлов извлекаются из полученного водного раствора с помощью таких методов, как ионный обмен, экстракция, химическое осаждение, элек-

тролиз. В качестве недостатков данного подхода указывается возможность потери части металлов как на стадии МПО, так и вследствие неполного извлечения металлов из раствора. С помощью ГП можно извлечь из компонентов ЛИА кобальт, литий, марганец, никель и, если присутствует, графит [9], не растворяющийся в результате обработки химическими агентами.

Согласно [3, 8], преимущества ГП:

- высокая чистота извлекаемых материалов;
- возможность повторного использования большинства компонентов ЛИА;
- низкая температура процесса, требующая меньших затрат энергии;
- более низкий уровень выбросов CO_2 по сравнению с ПП.

К недостаткам ГП, согласно [3, 8], следует отнести:

- увеличение стоимости разделения, поскольку такие элементы, как кобальт, никель, марганец, железо, медь и алюминий, в растворе имеют близкие свойства, что осложняет разделение;
- высокие затраты на процесс очистки сточных вод.

Согласно [7], недостатками ГП являются выделение в атмосферу соединений серы при работе с концентрированной серной кислотой и трудности, связанные с летучестью и сложностью регенерации в случае использования аммиака.

Применение ГП позволяет извлечь большую часть метал-

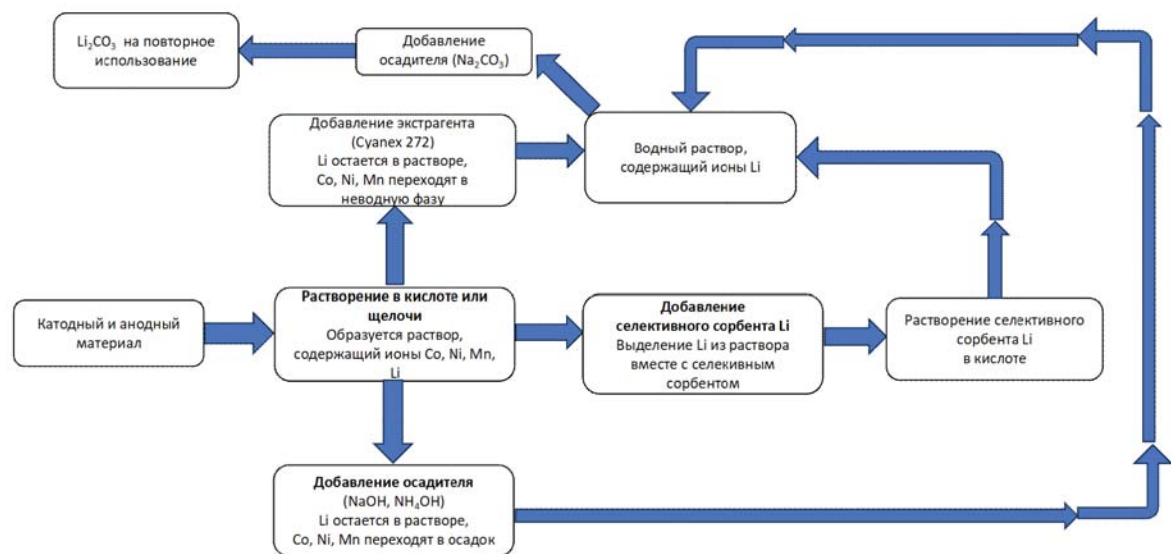


Рис. 2. Принципиальная схема ГП электродных материалов ЛИА [2]
Fig. 2. Principal scheme of the GR electrode materials of the LIA [2]

лов, содержащихся в ЛИА, используя комбинацию методов экстракции и разделения [4]. Тем не менее, при использовании этих методов реализация сложной комбинации процессов извлечения, в целом, оказывается весьма энергозатратной и требует большого количества реагентов.

Варьирование природы используемых растворителей — один из факторов, позволяющих повысить эффективность ГП. В качестве примера можно привести исследование [10], авторы которого задействовали

для извлечения компонентов ЛИА гидрофобные глубокоэвтектические растворители (HDESs) — новый класс растворителей, которые часто представляют собой смеси двух соединений, связанных водородными связями. Применив смеси "метилтриоктиламмоний хлорид (Aliquat 336) — L-ментол" и "Ди (2-этилгексил)фосфорная кислота (DEHPA) — L-ментол" для селективной экстракции ионов металлов, исследователи показали, что в оптимальных условиях: 80 °C; 2 М HCl, 6 ч, соотношение

"твёрдое вещество: жидкость" = 1:25, степень извлечения металлов (Li, Co, Al, Ni) превышает 98 %.

Электрохимическая экстракция лития (ЭЭЛ). Метод извлечения этого металла, по-видимому, наиболее экологичный (см. таблицу) и предполагает выделение лития из активных материалов электродов с помощью трёхэлектродной ячейки, снабжённой селективным литийпроводящим электролитом (рис. 3) [2]. Порошок активного электродного материала помещают в воду и вы-

Сравнительные характеристики методов извлечения лития [2]
Comparative characteristics of lithium extraction methods [2]

Показатель	Метод извлечения				Электрохимическая экстракция
	ПП	ГП			
		осаждение	экстракция	селективная адсорбция	
Эффективность извлечения, %	80–98,9	76–98,2	72–86,2	81,2	75–92
Чистота, %	98–99,95	96,5–99,97	74,2–99,97	>99,5	>99
Температура, °C	650–1700	50–100	60–90	30	Комнатная
Сложность	Две стадии: 1) прокаливание в отсутствие кислорода; 2) мокрая магнитная сепарация	Три стадии: 1) выщелачивание; 2) осаждение других металлов (регулирование pH); 3) осаждение лития;	Четыре стадии: 1) выщелачивание; 2) экстракция; 3) отделение раствора; 4) осаждение	Четыре стадии: 1) выщелачивание; 2) адсорбция на молекулярных ситах; 3) выщелачивание из молекулярных сит; 4) осаждение	Две стадии: 1) режим зарядки; 2) режим разрядки
Потенциальные загрязнители окружающей среды	Летучие органические соединения	Неорганические отходы Отходы, содержащие кислоты	Неорганические отходы. Отходы, содержащие кислоты Органические отходы	Отходы, содержащие кислоты	–
Степень коммерциализации	Процесс коммерциализован		Стадия научных исследований		

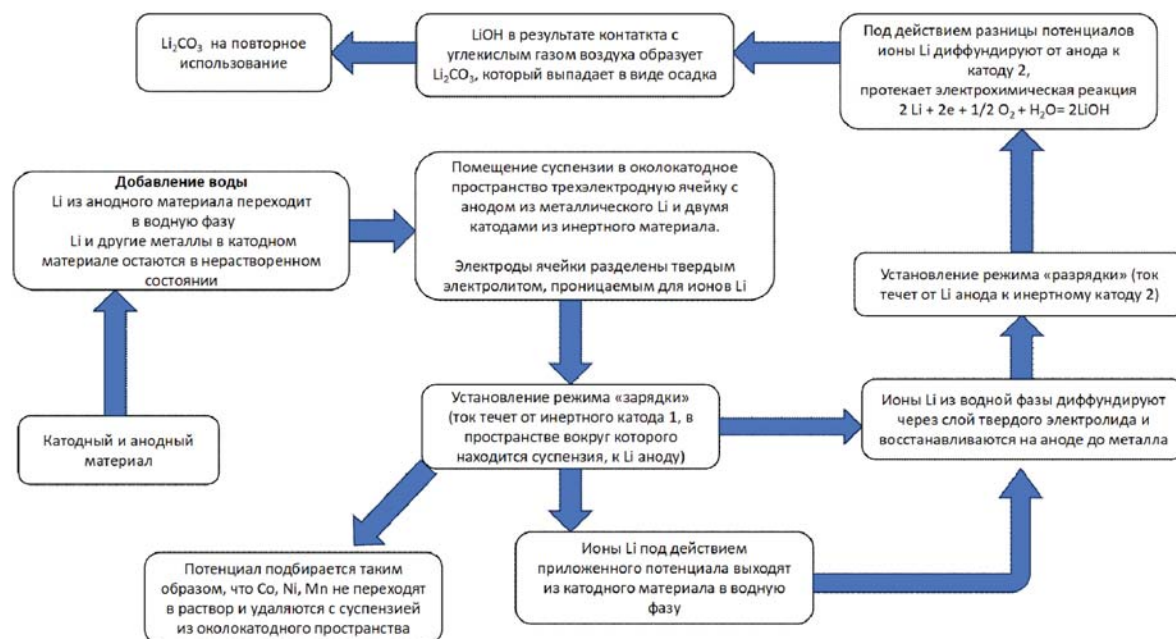
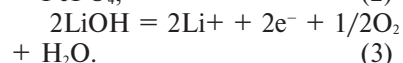
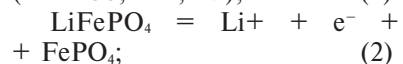
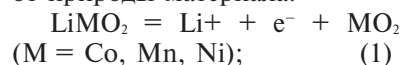


Рис. 3. Принципиальная схема извлечения лития из электродных материалов с помощью электрохимической экстракции [2]

Fig. 3. Principal scheme of lithium recovery from electrode materials by electrochemical extraction [2]

деляют литий с помощью керамического твёрдого электролита, проводящего ионы лития. Когда активный электродный материал помещают в воду, литий, находящийся в катодном материале, не растворяется, тогда как литий, содержащийся в анодном материале, растворяется в воде с образованием LiOH. При установлении режима зарядки литий переходит форму ионов Li(+) под действием приложенного потенциала, который подбирается специально в зависимости от природы материала:



Ионы лития далее диффундируют через твёрдый электролит и отлагаются в виде металла.

При установлении режима разрядки анод, на котором отложился литий ранее, становится катодом, и литий через литийпроводящий твёрдый электролит диффундирует к третьему электроду трехэлектродной ячейки, выполняющему роль анода. Происходит обратная (3) электрохимическая

реакция с образованием LiOH, который, вступая в контакт с CO₂, образует карбонат лития, осаждающийся в прианодном пространстве.

Direct recycling — извлечение основных компонентов без разрушения материалов ЛИА

Процесс Direct Recycling (DR) предполагает переработку с использованием исключительно физических способов разделения электродного материала без применения каких-либо химических процессов [3]. DR направлен на сохранение исходной химической структуры и технологической ценности материалов ЛИА путём их непосредственной переработки и повторного использования [4]. В основе лежит механическая разборка ЛИА с последующим отделением катодного и анодного материалов и их повторным использованием [7]. В подавляющем большинстве случаев предварительная сортировка и разбор отработанного ЛИА могут быть осуществлены только вручную, что связано со значительными отличиями для различных типов ЛИА, в том числе — в

форм-факторах ячеек различных производителей.

DR начинается с этапа разбора ЛИА вручную. При этом отработанные батареи разряжаются и разбираются на отдельные элементы; внешняя оболочка может быть снята и переработана отдельно. Далее с помощью жидкого или сверхкритического CO₂ удаляется электролит, после чего производят измельчение перерабатываемых компонентов и разделение катодных материалов [11, 12]. После удаления CO₂ электролит можно также использовать повторно [12]. Процесс DR, при котором сохраняется и вовлекается во вторичный оборот катодный материал, привлекает внимание благодаря низкому энергопотреблению и высокой скорости переработки [12].

В то время как для ГП и ПП материалов ЛИА необходимы значительные энергетические затраты [11], при DR образование отходов сводится к минимуму, а катодные материалы вовлекаются в переработку в виде многоразовых катодных смесей вместо отдельных компонентов [3]. Процесс DR более эффективен, чем ГП и ПП, поскольку

последние дают соли металлов, из которых далее необходимо получить аккумуляторные материалы [4]. DR позволяет сохранять ценность оригинальных аккумуляторных материалов при меньших затратах. Теоретически все компоненты ЛИА могут быть переработаны напрямую, включая графит, сепараторы, алюминиевые листы и электролиты. Как катодные, так и анодные материалы можно получить, восстановить и снова использовать без дополнительной обработки.

Методы повторного литирования оказались успешными в восстановлении катодных материалов ЛИА до первоначального состояния. Так, компания Re-Cell [13] показала, что повторное литирование искусственно состаренных коммерческих катодных материалов позволяет восстановить до 95 % их первоначальной ёмкости.

Основной недостаток подхода заключается в том, что в подавляющем большинстве случаев предварительная сортировка и разбор отработанного ЛИА может быть осуществлен только вручную.

Переработка ЛИА в Российской Федерации

В отечественной литературе представлен ряд технических решений, направленных на переработку ЛИА. Как правило, эти решения предполагают сочетание принципов ПП, ГП, МПО. Так, в патенте [14] описан способ переработки использованных ЛИА, включающий последовательные стадии измельчения, механического отсева металлических включений Cu и Al, удаление металлического Fe магнитной сепарацией, удаление органического связующего, выделение углерода методом флотации в концентрат, а лития и кобальта — в хвосты флотации, и наконец, получение из хвостов флотации товарных продуктов на основе кобальта и лития.

Патентом [15] защищен способ переработки ЛИА, включающий дробление, просеивание на виброситах дроблёного материала с получением фракций медно-алюминиевой фольги и пластика, прокаливание электродного материала, выщелачивание лития и его выделение с помощью катионита.

Патент [16] описывает технологию утилизации ЛИА и получения компонентов положительного электрода щелочных Ni-Cd аккумуляторов. Технология предусматривает измельчение и механическое разделение на несколько фракций, получение порошка графита и порошков оксидов Co, Li, Ni, Mn, Al. Оксид лития идёт на вторичное использование, а порошок графита, так же как и смесь гидроксидов никеля (II), кобальта (II), алюминия и марганца, можно применять как компонент положительного электрода щелочных Ni-Cd аккумуляторов.

В работах [17, 18] предложен одностадийный процесс отделения лития от попутных металлов при переработке ЛИА. Электродный материал, состоящий из анодного графита и катодного комплексного оксида, прокаливали при 400 °C, после чего выщелачивали компоненты раствором серной кислоты при температуре 60–90 °C в течение 2–3 ч. Далее в полученный раствор при температуре 40–80 °C добавляли щавелевую кислоту для осаждения нерастворимых в воде солей Co, Cu, Ni, Mn; степень осаждения металлов составляла не менее 99 %. Li при этом остаётся в растворе. После фильтрования в раствор добавляли Na_2CO_3 для получения конечного продукта — Li_2CO_3 . Оксалаты Co, Cu, Ni, Mn отправляются на прокаливание для дальнейшей переработки. Авторы исследования [19] предложили использовать реагент Суапекс®272 (бис(2,4,4-триметилпентил) фосфиновую кислоту) для отделения Mn, Co, Ni от щелочных металлов в растворе, полу-

ченным путём выщелачивания компонентов электродного материала серной кислотой.

В [20] предложена схема извлечения металлов из электродных материалов ЛИА нового поколения, в которых графитовые аноды заменены на литий-титанатные (LTO , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), что даёт преимущество в скорости заряда-разряда и безопасности их работы. Было установлено, что высокая степень извлечения Co, Ni, Mn, Ti и Li (более 97 %) достигается при использовании в качестве реагентов H_2SO_4 , H_2O_2 , температуре 80 °C, соотношении "твёрдое вещество : жидкость" = 0,020 г/мл и времени выщелачивания 4 ч. В случае применения соляной кислоты, температуре 80 °C и массовом соотношении "твёрдое вещество : жидкость" = 0,067 г/мл, времени выщелачивания, равном 4 ч, также достигается высокая степень извлечения для указанных элементов, за исключением титана. В итоге авторами предложен процесс ступенчатого извлечения активных металлов с использованием сначала соляной, а затем серной кислоты.

Что касается реальных производств по переработке ЛИА, согласно [21], в России промышленная переработка аккумуляторов включает их полный разряд "до нуля" с дальнейшим перемалыванием и сжиганием в специальных печах. Потом из полученного шлака гидрометаллургическими методами извлекаются ценные элементы, в первую очередь литий, кобальт и никель. Сообщается, что в ноябре 2023 г. в Дзержинске начато строительство экотехнопарка по переработке ЛИА. Проектирование и строительство предприятия ведёт "Концерн Титан-2", возводящий предприятия атомной отрасли. В экотехнопарке предусмотрены семь технологических линий мощностью до 50 тыс. т в год для переработки батарей с получением лития, алюминия, меди, железа, никеля, марганца, графита, кадмия

и кобальта. В настоящее время переработкой ЛИА занимается группа компаний "Мегаполис Ресурс", центры сбора отходов которой расположены во многих городах России [22].

Заключение

В мире наблюдается резкое увеличение количества отработанных ЛИА, попадающих в абсолютном большинстве на свалки, где находящиеся в них токсичные компоненты отравляют окружающую среду, а самовозгорание ЛИА служит причиной пожаров в местах складирования отходов. В то же время ресурсы действующих и перспективных месторождений лития ограничены, существует высокая вероятность нехватки лития в ближайшем будущем. Экологические и экономические факторы послужили основой для реализации во многих странах мира политики, направленной на регулирование переработки ЛИА и создание благоприятных условий для строительства соответствующих предприятий.

Однако, несмотря на прогресс, достигнутый в разработке и усовершенствовании методов переработки ЛИА, число предприятий в этой сфере по-прежнему немногочисленно. Сложившаяся ситуация обусловлена рядом факторов [4].

- **Фактор времени.** Развитие и создание инфраструктуры для процессов переработки большого количества ЛИА и их разнообразных компонентов требует

значительных временных затрат.

- **Экономический фактор.** Строительство типичного завода по переработке отходов, в зависимости от его местоположения и размера, оценивается в 3 млн долл. США и более, включая требования к земле, оборудованию, коммунальным услугам и рабочей силе. Стоимость энергии, необходимой для работы завода, затраты на реагенты для переработки ЛИА и очистку сточных вод делают переработку ЛИА весьма затратной отраслью. При этом затраты на добычу лития в настоящее время ниже, чем на его получение из отработанных ЛИА. Хотя переработка ЛИА, изготовленных из кобальтсодержащих материалов, имеет некоторую экономическую выгоду вследствие высокой рыночной стоимости этого металла, некоторые ЛИА, такие как LFP, изготавливаются из относительно недорогих металлов, вследствие чего экономическая ценность их компонентов не компенсирует высокую стоимость их переработки.

- **Технологический фактор.** Некоторые из описанных в литературе процессов эффективны лишь в лабораторном масштабе, однако пока непригодны для крупномасштабной переработки (например, переработка ЛИА вручную вследствие больших временных затрат или сложные многостадийные процессы).

- **Экологический фактор.** Образование токсичных отходов при ПП приводит к

значительному загрязнению воздуха. Несмотря на то, что некоторые химические реагенты можно использовать повторно, при ГП неизбежно требуется очистка сточных вод. В ряде случаев уже было обнаружено загрязнение тяжёлыми металлами почвы, воздуха и воды вблизи мест переработки ЛИА. Кроме того, большинство предприятий, осуществляющих переработку ЛИА, сосредоточены на извлечении из них ценных металлов, а не на реализации процесса в режиме замкнутого цикла, что предполагает неизбежную нагрузку на окружающую среду.

- **Фактор безопасности.** По-прежнему существуют опасения по поводу безопасности переработки ЛИА, что связано с вероятностью взрыва во время транспортировки, сортировки, обработки и хранения большого количества батарей с различными требованиями к разрядке.

Поскольку доля основных секторов потребления ЛИА (электромобили и стационарные системы накопления энергии) в России невелика, отрасль их переработки находится в стадии становления. При этом уже существуют защищённые патентами отечественные технические решения по утилизации ЛИА. Государство осознаёт масштаб потенциальной нагрузки на окружающую среду, и, действуя через госкорпорации, решает задачи по строительству специализированных предприятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0034).

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental order for Boreskov Institute of Catalysis (project No FWUR-2024-0034).

Литература

1. <https://energy-storage.ru/> (дата просмотра — 02.09.2024).
2. Bae H., Kim Y. Technologies of lithium recycling from waste lithium-ion batteries: a review. *Materials advances*. 2021. V. 2. Iss. 10. P. 3234–3250. <https://doi.org/10.1039/D1MA00216C>.
3. Öztürk M. et al. Comparison of waste lithium-ion batteries recycling methods by different decision-making techniques. *Environmental Research and Technology*. 2023. V. 6. Iss. 3. P. 226–241. <https://doi.org/10.35208/ert.1243162>.

References

1. <https://energy-storage.ru/> (дата просмотра — 02.09.2024).
2. Bae H., Kim Y. Technologies of lithium recycling from waste lithium-ion batteries: a review. *Materials advances*. 2021. V. 2. Iss. 10. P. 3234–3250. <https://doi.org/10.1039/D1MA00216C>.
3. Öztürk M. et al. Comparison of waste lithium-ion batteries recycling methods by different decision-making techniques. *Environmental Research and Technology*. 2023. V. 6. Iss. 3. P. 226–241. <https://doi.org/10.35208/ert.1243162>.

4. Makwarimba C.P. et al. Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries. *Iscience*. 2022. V. 25. Iss. 5. 104321. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104321>
5. <https://www.weforum.org/agenda/2021/05/electric-vehicle-battery-recycling-circular-economy/>.
6. Muller P., Duboc R., Malefant E. Recycling electric vehicle batteries: ecological transformation and preserving resources. *Field Actions Science Reports. The journal of field actions*. 2021. Iss. 23. P. 74–81. <https://journals.openedition.org/factsreports/6690>.
7. Самарин А.Ш., Иванов А.В., Федотов С.С. Метод переработки материалов металл-ионных аккумуляторов на основе соединений ванадия и титана. Пат. РФ RU2792869C1. Приоритет от 07.12.2022. <https://patents.google.com/patent/RU2792869C1/ru?q=RU2792869C1>.
8. Chen M. et al. Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. *Joule*. 2019. T. 3. №. 11. C. 2622–2646. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014>.
9. Danino-Perraud R. "The recycling of lithium-ion batteries: A strategic pillar for the european battery Alliance," *Etudes de l'Ifri*. <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/recycling-lithium-ion-batteries-strategic-pillar-european-battery-2020>.
10. Kozhevnikova A.V. et al. Application of hydrophobic deep eutectic solvents in extraction of metals from real solutions obtained by leaching cathodes from end-of-life Li-ion batteries. *Processes*. 2022. T. 10. №. 12. C. 2671. <https://doi.org/10.3390/pr10122671>.
11. Ciez R.E., Whitacre J.F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*. 2019. T. 2. №. 2. C. 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>.
12. Huang B. et al. Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*. 2018. T. 399. C. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116>.
13. <https://recellcenter.org/>.
14. Наумов К.Д., Сапьянов С.А. Способ переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов. Пат. РФ RU2768719C1. Приоритет от 22.09.2021. https://yandex.ru/patents/doc/RU2768719C1_20220324.
15. Рычков В.Н., Кириллов Е.В., Кириллов С.В., Буньков Г.М., Дедюхин И.А., Смышляев Д.В., Боталов М.С. Способ переработки литий-ионных аккумуляторов. Пат. РФ RU2768846C1. Приоритет от 09.06.2021. https://yandex.ru/patents/doc/RU2768846C1_20220325.
16. Волинский В.В., Ушаков А.В., Брагин С.В., Ушакова Е.В., Ежов И.А. Способ переработки литий-ионных аккумуляторов с получением компонентов положительного электрода щелочных аккумуляторов. Пат. РФ RU2789852C1. Приоритет от 25.04.2022. https://yandex.ru/patents/doc/RU2789852C1_20230214.
17. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16225>.
18. <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-izvlecheniya-litiysoderzhaschih-soedineniy-organicheskimi-reagentami-iz-litii-ionnyh-akkumulyatorov>.
19. Юрасова О.В. и др. Извлечение кобальта, никеля и марганца из растворов переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов экстракционными методами. *Успехи в химии и химической технологии*. 2023. T. 37. №. 17. C. 54. <https://elibrary.ru/item.asp?edn=vsgllz>.
20. Кожевникова А. В. и др. Выделение концентрата Ti (IV) из отработанных литий-ионных аккумуляторов. Теоретические основы химической технологии. 2023. T. 57. №5. C. 553–562. <https://doi.org/10.31857/S0040357123050111>.
21. <https://vc.ru/volts/965072-vsya-pravda-o-pererabotke-li-ion-batarei-v-rossii>.
22. <https://eco2eco.ru/>.
4. Makwarimba C.P. et al. Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries. *Iscience*. 2022. V. 25. Iss. 5. 104321. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104321>
5. <https://www.weforum.org/agenda/2021/05/electric-vehicle-battery-recycling-circular-economy/>.
6. Muller P., Duboc R., Malefant E. Recycling electric vehicle batteries: ecological transformation and preserving resources. *Field Actions Science Reports. The journal of field actions*. 2021. Iss. 23. P. 74–81. <https://journals.openedition.org/factsreports/6690>.
7. Samarina A.Sh., Ivanov A.V., Fedotov S.S. Metod pererabotki materialov metall-ionnykh akkumulyatorov na osnove soedinenii vanadiya i titana. Pat. RF RU2792869S1. Prioritet ot 07.12.2022. <https://patents.google.com/patent/RU2792869C1/ru?q=RU2792869C1>.
8. Chen M. et al. Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. *Joule*. 2019. T. 3. №. 11. C. 2622–2646. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014>.
9. Danino-Perraud R. "The recycling of lithium-ion batteries: A strategic pillar for the european battery Alliance," *Etudes de l'Ifri*. <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/recycling-lithium-ion-batteries-strategic-pillar-european-battery-2020>.
10. Kozhevnikova A.V. et al. Application of hydrophobic deep eutectic solvents in extraction of metals from real solutions obtained by leaching cathodes from end-of-life Li-ion batteries. *Processes*. 2022. T. 10. №. 12. C. 2671. <https://doi.org/10.3390/pr10122671>.
11. Ciez R.E., Whitacre J.F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*. 2019. T. 2. №. 2. C. 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>.
12. Huang B. et al. Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*. 2018. T. 399. C. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116>.
13. <https://recellcenter.org/>.
14. Naumov K.D., Sap'yanov S.A. Sposob pererabotki otrabotannykh litii-ionnykh akkumulyatorov. Pat. RF RU2768719C1. Prioritet ot 22.09.2021. https://yandex.ru/patents/doc/RU2768719C1_20220324.
15. Rychkov V.N., Kirillov E.V., Kirillov S.V., Bun'kov G.M., Dedyukhin I.A., Smyshlyayev D.V., Botalov M.S. Sposob pererabotki litii ionnykh akkumulyatorov. Pat. RF RU2768846S1. Prioritet ot 09.06.2021. https://yandex.ru/patents/doc/RU2768846C1_20220325.
16. Volynskii V.V., Ushakov A.V., Bragin S.V., Ushakova E.V., Ezhov I.A. Sposob pererabotki litii-ionnykh akkumulyatorov s polucheniem komponentov polozhitel'nogo elektroda shchelochnykh akkumulyatorov. Pat. RF RU2789852S1. Prioritet ot 25.04.2022. https://yandex.ru/patents/doc/RU2789852C1_20230214.
17. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16225>.
18. <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-izvlecheniya-litiysoderzhaschih-soedineniy-organicheskimi-reagentami-iz-litii-ionnyh-akkumulyatorov>.
19. Yurasova O.V. i dr. Izvlechenie kobal'ta, nikelya i margantsa iz rastvorov pererabotki otrabotannykh litii-ionnykh akkumulyatorov ekstraktsionnymi metodami. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2023. T. 37. №. 17. S. 54. <https://elibrary.ru/item.asp?edn=vsgllz>.
20. Kozhevnikova A. V. i dr. Vydelenie kontsentrata Ti (IV) iz otrabotannykh litii-ionnykh akkumulyatorov. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2023. T. 57. № 5. S. 553–562. <https://doi.org/10.31857/S0040357123050111>.
21. <https://vc.ru/volts/965072-vsya-pravda-o-pererabotke-li-ion-batarei-v-rossii>.
22. <https://eco2eco.ru/>.

Д.А. Шляпин – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук" (ИК СО РАН), e-mail: dash@catanalysis.ru • Ю.В. Суровикин – канд. техн. наук, доцент, ИК СО РАН, e-mail: suruv@mail.ru • И.В. Мишаков – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, ИК СО РАН, e-mail: mishakov@catanalysis.ru • Д.В. Агафонов – канд. техн. наук, зав. кафедрой, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), e-mail: agafon1949@rambler.ru • О.В. Нецкина – канд. хим. наук, зав. отделом, ИК СО РАН, e-mail: netskina@catanalysis.ru

D.A. Shlyapin – Cand. Sci. (Chem.), Leading Research Fellow, Boreskov Institute of Catalysis, e-mail: dash@catanalysis.ru • Yu.V. Surovikin – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Boreskov Institute of Catalysis, e-mail: suruv@mail.ru • I.V. Mishakov – Cand. Sci. (Chem.), Leading Research Fellow, Boreskov Institute of Catalysis, e-mail: mishakov@catanalysis.ru • D.V. Agafonov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), e-mail: agafon1949@rambler.ru • O.V. Netskina – Cand. Sci. (Chem.), Head of Department, Boreskov Institute of Catalysis, e-mail: netskina@catanalysis.ru