

**А.А. Анарбаев, Н.С. Бородин, Б.Н. Кабылбекова\***  
д.т.н., профессор, ЮКУ имени М.Ауезова, Шымкент, Казахстан  
магистрант, ЮКУ имени М.Ауезова, Шымкент, Казахстан  
к.т.н., доцент, ЮКУ имени М.Ауезова, Шымкент, Казахстан  
\*Автор для корреспонденции: balzhan.kbn@bk.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ ЛИТИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ЦЕЛЕВЫЕ ПРОДУКТЫ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены методы обработки литий-ионных аккумуляторов и использованных источников лития для литиевых соединений. Приведена классификация источников первичного и вторичного литиевого тока, описаны их конструктивные особенности, химический состав электродных материалов и основные опасные компоненты. Были проанализированы основные этапы обработки с акцентом на селективное извлечение лития и сопутствующих металлов (Co, Ni, Mn, Cu, Al), включая механическую подготовку, пирометаллургические и гидрометаллургические методы. Особое внимание было уделено современным исследованиям, запатентованным технологиям и комбинированным схемам переработки, а также тенденциям развития низкотемпературных и экологически ориентированных процессов. Рассмотрены экологические и экономические аспекты рециклинга, в том числе снижение негативного воздействия на окружающую среду, затраты энергии и перспективы промышленного внедрения переработки литиевых источников тока. Приведены результаты исследований получения хлоридной соли и карбоната лития из источников тока, использованных путем разложения соляной кислоты. Определены оптимальные параметры процесса получения хлорида и карбоната лития, температура процесса, время обработки и концентрация соляной кислоты. Полученный продукт карбоната лития соответствует требованиям ГОСТ.

**Ключевые слова:** литий-ионные батареи, батареи, гидрометаллургия, пирометаллургия, вторичные ресурсы, хлорид лития, карбонат лития.

### **Введение**

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост производства и потребления литий-ионных источников тока, что обусловлено развитием портативной электроники электротранспорта и систем накопления энергии.

Захоронение или неконтролируемое складирование отработанных литиевых источников тока связано с серьёзными экологическими рисками. Аккумуляторы содержат токсичные электролиты, органические растворители, и соединения тяжелых металлов, которые при разрушении корпуса способны мигрировать в почву и грунтовые воды, вызывая загрязнение окружающей среды.

Целью данной статьи является анализ современных подходов к переработке отработанных литий-ионных аккумуляторов с получением литиевых солей.

В статье кратко рассматриваются механические, пирометаллургические и гидрометаллургические методы переработки, а также комбинированные технологические схемы. Особое внимание уделяется гидрометаллургическим процессам, как наиболее перспективным с точки зрения селективности извлечения металлов, энергоэффективности и снижения экологической нагрузки.

Литиевые источники тока представляют собой электрохимические системы, в которых литий или соединения лития используются в качестве активного компонента. Источники тока получили широкое распространение в портативной электронике, энергетике, медицине и электротранспорте.

Отработанные источник тока состоит из сложных соединений литий–оксид марганца и литий–сульфооксид хлор, а также органические полимерно-литиевые и неорганический литий фосфатных солей [1].

Наличие таких компонентов органические электролиты, соли лития, а также тяжёлые металлы, такие как кобальт и никель требует строгого соблюдения мер безопасности при обращении с отработанными литиевыми источниками тока и обосновывает необходимость их специализированной переработки.

В литературе выделяют три основных подхода: механическую подготовку, пирометаллургические методы и гидрометаллургические процессы.

Эти методы не требуют химического воздействия и обеспечивают предварительное концентрирование полезных фракций, снижая объёмы перерабатываемого материала на следующих стадиях [2].

Существует пирометаллургические методы - термические переработки, основанные на нагреве измельчённой «чёрной массы» до высоких температур для плавления и получения металлических сплавов. Однако литий в этих процессах, как правило, переходит в силикатный шлак и требует дополнительной обработки. Недостатком является высокие энергетические затраты из-за необходимости нагрева до больших температур; потери лития в шлаковой фазе; выбросы  $\text{CO}_2$  и других загрязнителей без применения дорогих систем очистки газов и низкая селективность по отношению к ценным переходным металлам.

Наиболее распространенный способ переработки литийсодержащих отходов -кислотное и щелочное выщелачивание. Главная стадия гидрометаллургии — это выщелачивание, при котором активные материалы растворяются в водных растворах кислот или щелочей. После щелочного выщелачивания, отходов получают гидроксид, хлорид, и карбонат лития как целевой продукт для аккумуляторной промышленности.

В одной из работ предложена модель прогностического управления процессом разрядки, позволяющая поддерживать безопасные температурные условия при подготовке батарей к дальнейшей переработке[3].

Важной тенденцией развития является внедрение низкотемпературных процессов и принципов «зелёной» химии, которые направлены на снижение энергетических затрат, уменьшение использования агрессивных кислот и переход на более безопасные реагенты и растворители. Среди таких решений — применение глубоких эвтектических растворителей с высокой селективностью, что позволяет значительно повысить эффективность извлечения ценных элементов при снижении экологических воздействий [4].

С экономической точки зрения переработка батарей также может быть выгодной: восстановление 80–95 % ценных компонентов создаёт вторичные сырьевые потоки, которые способны заместить часть импортируемых материалов в производстве новых аккумуляторов. В ряде стран существуют жёсткие требования по сбору, отдельному накоплению и утилизации аккумуляторных отходов: например, в Европейском союзе действует Battery Regulation, устанавливающий обязательные цели по эффективности переработки и восстановлению материалов, а также правила по учёту и маркировке батарей в цепочке поставок [5].

В России и Казахстане нормативные акты в основном ориентированы на общие правила обращения с опасными отходами и аккумуляторами как видом отходов, включая требования о отдельном накоплении, передаче специализированным организациям и соблюдении правил хранения.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования были проведены с использованием современных приборов физико-химического анализа масс-спектрометр, РЭМ и РФА. Эксперименты проведены на

лабораторной экспериментальной установке. Установка состоит из специального согревающего термостата и холодильника, электромешалки, а также контактного термометра и регулятора [6-7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использовали отработанные источники тока и полученный из него литиевые пластинки. Пластинки частично окисленные поверхности растворяли в соляной кислоте при температуре  $30^{\circ}\text{C}$  в течение 20-25 минут. Опыты проведены на экспериментальной установке (рис.1)



Рисунок 1- Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рисунок 1) состоит из специального согревающего реактора с мешалкой и контактного термометр, а также снабжена обратным холодильником и автоматизированного пульта управления. В реактор загружают соляная кислота заданной концентраций и сюда же поступает измельченный отработанный литиевые пластинки. В реакторе происходит за счет взаимодействия  $\text{HCl}$  и стружки литиевых батареек и образуются хлорид лития.

Поученные результаты исследования приведены ниже (таблица 1).

Таблица 1- Результаты разложения литиевых пластинок с соляной кислоты

| № опытов                         | Масса $\text{HCl}$ (25%), г | Масса образца,г | Время растворения,мин | Масса раствора $\text{LiCl}$ , г. | Степень образования $\text{LiCl}$ , % |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Температура $30^{\circ}\text{C}$ |                             |                 |                       |                                   |                                       |
| 1                                | 20                          | 1,0             | 20                    | 20,98                             | 98,9                                  |
| 2                                | 20                          | 1,0             | 25                    | 20,99                             | 99,6                                  |

Из таблицы 1 видно, что взаимодействия соляной кислоты отхода - смеси литий и оксид лития достигается при продолжительности процесса 20-25 минут и температуре  $30^{\circ}\text{C}$ . Степень образования хлорида лития составляет 98,9-99,6%. Таблице 2 приведены состав раствора хлорида лития.

Таблица 2 - Состав раствора хлорида лития

| № | Наименование    | Содержание веществ, г/л | Примечание              |
|---|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | $\text{LiCl}$   | 327,37                  | Раствор мутный жидкость |
| 2 | $\text{NaCl}$   | 0,24                    |                         |
| 4 | $\text{CaCl}_2$ | 0,02                    |                         |
| 5 | $\text{MnCl}_2$ | 0,001                   |                         |
| 6 | $\text{FeCl}_2$ | 0,004                   |                         |

Из данных таблиц 2 видно, что кроме соли  $\text{LiCl}$  раствор содержит примеси  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$ . На рисунке 2 показан дифрактограмма полученного концентрата хлорида лития.

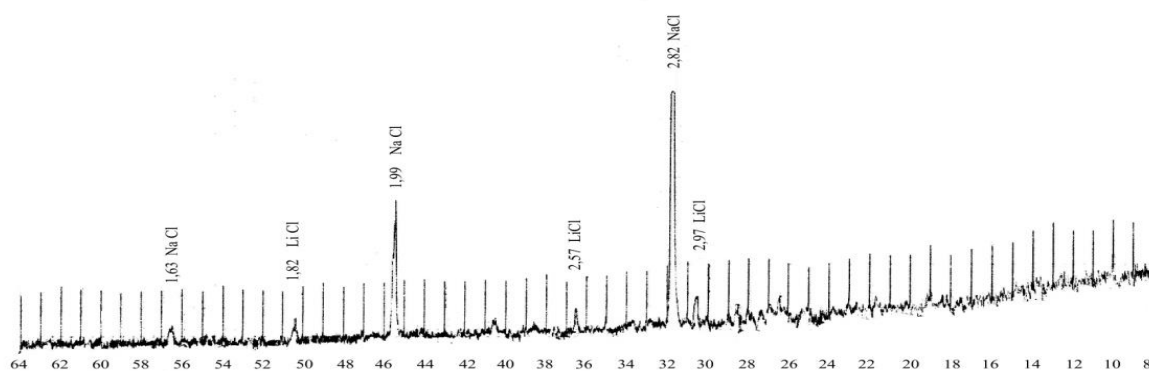


Рисунок 2- Рентгенограмма полученного осадка

На рентгенограмме осадка (рисунок 2) наблюдается соединение хлорида лития (2,97, 2,57, 1,82A°) и хлорид натрия (2,83, 1,88, 1,52A°).

Раствор хлорид лития обрабатывают кальцинированной содой при температуре 95-100°C. При этом протекает реакция с образованием  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  и  $\text{NaCl}_{\text{р-р}}$ .

Причем в осадок выпадает кристаллы  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  растворимость которого при 100°C составляет 0,71%. С повышением температуры растворимость  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  снижается.

Выпавший белый осадок карбонат лития фильтруют и осадок промывают горячей водой для удаления растворимых примеси  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$ . В таблице 3 приведены химический состав фильтрата и сухого осадка карбоната лития после сушки при температуре 110-120°C. Получен сухой порошок карбоната лития в количестве 284,21 г.

Таблица 3-Химический состав фильтрата и сухого осадка карбоната лития

| № | Наименование проб | Состав, %                |                       |              |               |                         |                    |      | H <sub>2</sub> O |
|---|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------------------|--------------------|------|------------------|
|   |                   | $\text{Li}_2\text{CO}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | H.o. |                  |
| 1 | Сухой продукт     | 99,9                     | 0,02                  | 0,004        | 0,006         | 0,008                   | -                  | -    | 0,62             |
| 2 | Фильтрат          | 0,01                     | 52,21                 | 0,10         | 0,03          | 0,01                    | -                  | -    | 47,64            |

Полученный карбонат лития по составу соответствует требованиям ТУ 6-09-3728-83

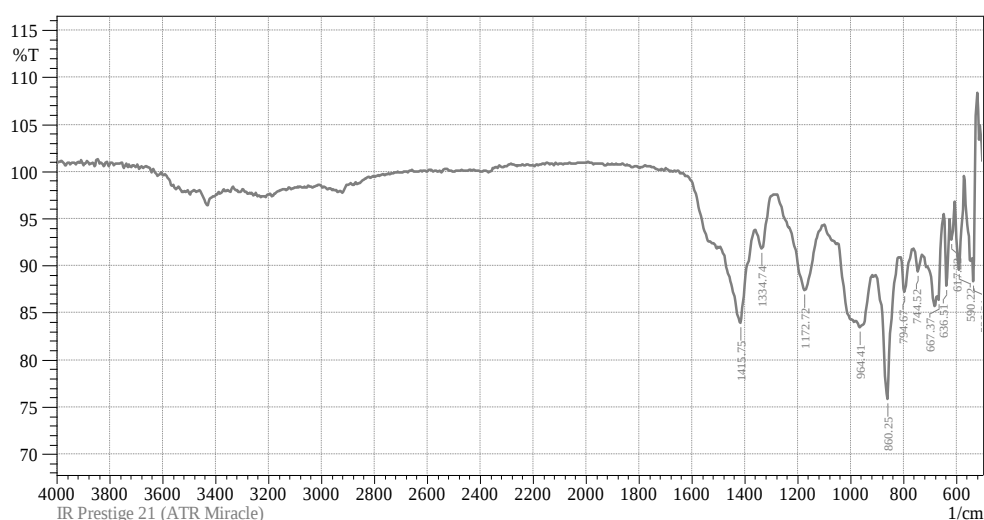


Рисунок 3- Ик-спектр полученного  $\text{Li}_2\text{CO}_3$

Из рисунка 3 видно, что интенсивность 740,67, 860,52, 1172,72, 1415,75  $\text{cm}^{-1}$  соответствует связи  $\text{Li-CO}_3^{2-}$ . Анализ полученного карбоната лития показывают содержание (масс, %):  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -99,9;  $\text{Na}_2\text{O}$ -0,02;  $\text{CaO}$ -0,004;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -0,008;  $\text{Cl}$ -0,006;  $\text{SO}_4^{2-}$ -отс., Н.о.-отс.,  $\text{H}_2\text{O}$ -0,62 и продукт карбонат лития высокой чистоты соответствует требованиям «Литий углекислый - карбонат лития» ТУ 6-09-3728-83.

### Закключение

Таким образом, современные исследования и технологические разработки по переработке литий-ионных источников тока направлены на создание устойчивых, экономически эффективных и экологически безопасных технологических схем, способных обеспечить замкнутый цикл материалов между производством и вторичной переработкой. Переработка Li-ион аккумуляторов представляет собой не только экологическую необходимость, но и экономически значимый сектор, требующий развития технологий, инвестиций и совершенствования правовой среды для реализации потенциала замкнутого цикла материалов. Переработка хлорида лития полученные из отработанных батареек источника тока с карбонатом натрия позволяет получить карбонат лития высокой чистоты содержанием  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -99,9%. Вместе с тем успешная реализация технологий переработки в промышленном масштабе требует совершенствования нормативно-правовой базы, обеспечения безопасного обращения с опасными компонентами и дальнейшего научно-технического развития процессов.

### Список литературы

1. Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future // *Materials Today*. — 2015. — Vol. 18, No. 5. — P. 252–264.
2. Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z. et al. Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes // *JOM*. – 2016. – Vol. 68, No. 10. – P. 2632–2638.
3. Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A. et al. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective // *Batteries*. — 2019. — Vol. 5 [45], No.4. — P. 68.
4. Thompson, D.L., Hartley, J.M., Lambert, S.M. et al. The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review // *Green Chemistry*. — 2020. — Vol. 22, No. 22. — P. 7585–7603.
5. Gaines, L. Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course // *Sustainable Materials and Technologies*. — 2018. — Vol. 17. — e0006
6. Zhang, Y., Wang, L., & Zhao, H. (2025). Deep eutectic solvent (DES) for one-step leaching and regeneration of NMC cathode material. *Green Chemistry*, 27(4), 1820-1833.
7. Chen, Q., et al. (2025). Selective recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using methanesulfonic acid and L-ascorbic acid. *Hydrometallurgy*, 225, 106321.

### References

1. Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future // *Materials Today*. — 2015. — Vol. 18, No. 5. — P. 252–264.
2. Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z. et al. Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes // *JOM*. – 2016. – Vol. 68, No. 10. – P. 2632–2638.
3. Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A. et al. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective // *Batteries*. — 2019. — Vol. 5 [45], No.4. — P. 68.

4. Thompson, D.L., Hartley, J.M., Lambert, S.M. et al. The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review // Green Chemistry. — 2020. — Vol. 22, No. 22. — P. 7585–7603.
5. Gaines, L. Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course // Sustainable Materials and Technologies. — 2018. — Vol. 17. — e0006
6. Zhang, Y., Wang, L., & Zhao, H. (2025). Deep eutectic solvent (DES) for one-step leaching and regeneration of NMC cathode material. Green Chemistry, 27(4), 1820-1833.
7. Chen, Q., et al. (2025). Selective recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using methanesulfonic acid and L-ascorbic acid. Hydrometallurgy, 225, 106321.

**А.А. Анарбаев, Н.С. Бородин, Б.Н. Кабылбекова\***

т.ғ.д., профессор, abib\_28@mail.ru, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан  
магистрант, nikita.borodin.2016@bk.ru, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

\*т.ғ.к., доцент, balzhan.kbn@bk.ru, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

## **ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЛИТИЙ ТОК КӨЗДЕРІН МАҚСАТТЫ ӨНІМДЕРГЕ ҚАЙТА ӨНДЕУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ**

### **Түйін**

Жұмыста литий-ионды аккумуляторлар мен литийді қосуға арналған батареяның пайдаланылған литий көздерін өңдеу әдістері қаралды. Бастапқы және қайталама литийлік ток көздерінің жіктелуі келтірілген, олардың құрылымдық ерекшеліктері, электродты материалдардың химиялық құрамы және негізгі қауіпті компоненттері сипатталған. Механикалық дайындықты, пирометаллургиялық және гидрометаллургиялық әдістерді қоса алғанда, литий мен ілеспе металдарды (Co, Ni, Mn, Cu, Al) селективті алуға екпін жасай отырып, өндеудің негізгі кезеңдері талданды. Қазіргі заманғы зерттеулерге, патенттелген технологияларға және қайта өндеудің құрамдастырылған схемаларына, сондай-ақ төмен температуралық және экологиялық бағдарланған процестердің даму үрдістеріне ерекше назар аударылды. Рециклингтің экологиялық және экономикалық аспектілері, оның ішінде қоршаған ортаға жағымсыз әсерді төмендету, энергия шығындары және литийлік ток көздерін қайта өндеуді өнеркәсіптік енгізу перспективалары қаралды. Тұз қышқылын ыдырату жолымен пайдаланылған ток көздерінен хлорид тұзы мен литий карбонатын алуды зерттеу нәтижелері келтірілген. Литий хлориді мен карбонатын алу процесінің оңтайлы параметрлері, процесс температурасы, өндеу уақыты және тұз қышқылының концентрациясы айқындалды. Алынған литий карбонаты өнімі МЕМст талаптарына сәйкес келеді.

**Кілттік сөздер:** литий-ионды аккумуляторлар, батареялар, гидрометаллургия, пирометаллургия, қайталама ресурстар, литий хлориді, литий карбонаты.

**A.A. Anarbayev, N.S. Borodin, B.N. Kabylbekova\***

Doctor of Technical Sciences, Professor, abib\_28@mail.ru, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan  
master's student, nikita.borodin.2016@bk.ru, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

\*candidate of Technical Sciences, associate professor, balzhan.kbn@bk.ru, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

## **INVESTIGATION OF THE PROCESS OF RECYCLING SPENT LITHIUM CURRENT SOURCES INTO TARGET PRODUCTS**

### **Abstract**

The paper discusses methods for processing spent lithium sources of lithium-ion batteries and batteries into a lithium compound. Primary and secondary lithium current sources are classified, their design features, chemical composition of electrode materials and main hazardous components are described. The key stages of processing were analyzed, including mechanical preparation, pyrometallurgical and hydrometallurgical methods, with an emphasis on the selective extraction of lithium and related metals (Co, Ni, Mn, Cu, Al). Particular attention is paid to modern research, patented technologies and combined processing schemes, as well as trends in the development of low-temperature and environmentally oriented processes. Ecological and economic aspects of recycling are considered, including reduction of negative impact on environment, energy consumption and prospects of industrial introduction of lithium current sources processing. The results of the study of obtaining a salt of lithium chloride and carbonate from spent current sources by decomposition of hydrochloric acid are given. Optimum parameters of the process for producing lithium chloride and carbonate, process temperature, treatment time and hydrochloric acid concentration are determined. The resulting product lithium carbonate meets the requirements of GOST. Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, батарейек, гидрометаллургия, пиromеталлургия, вторичные ресурсы, хлорид лития. карбонат лития.

**Keywords:** lithium-ion batteries, batteries, hydrometallurgy, pyrometallurgy, secondary resources, lithium chloride. lithium carbonate.