

**КРИТЕРИАЛЬНОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ  
КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ТОКА**

**В. М. Ретивов<sup>1</sup>, А. М. Гонопольский<sup>1</sup>, Д. А. Макаренков<sup>1,2</sup>,  
В. И. Назаров<sup>1,3</sup>, А. П. Попов<sup>1</sup>**

*НИИ «Курчатовский институт» – ИРЕА (1),*

*retivov\_vm@irea.org.ru, г. Москва, Россия;*

*кафедра «Процессы и аппараты химических технологий»,*

*ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (2), г. Москва, Россия;*

*кафедра «Процессы и аппараты химических технологий им. Гельперина Н. И.»,*

*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (3),*

*г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** анализ размерностей; измельчение; кобальтсодержащие соединения; критериальное обобщение; механохимическая деструкция; утилизация источников тока.

**Аннотация:** Рассмотрена технология утилизации отработанных литий-кобальтовых источников тока, включающая стадии вскрытия аккумуляторов в шредере, вторичное измельчение в ножевой роторной мельнице и механохимическую деструкцию в шаровой мельнице с получением механоактивированных частиц с требуемыми характеристиками удельной поверхности и пористости. Показано, что проведение совмещенных процессов выщелачивания и экстракции с механоактивированными частицами позволяет увеличить выход целевого продукта. Для сложного комплекса механических и технологических воздействий на структурированные частицы литий-кобальтовых источников тока предложено использовать метод анализа размерностей для оценки вклада режимных параметров в виде безразмерных критериальных уравнений.

---

### **Введение**

Предложенный в работе [1] технологический процесс утилизации литий-кобальтовых источников тока (ЛКИТ) основан на механохимической деструкции (МХД) электродных масс с целью получения вторичных кобальтсодержащих соединений. Как показано в [2], основные закономерности механохимических превращений определяются степенью разупорядочения структуры, процессами ее релаксации с освобождением запасенной энергии и подвижностью атомов. Характер внутренних изменений электродной массы зависит от физико-химических характеристик источника тока и условий его механического разрушения. Изменения структуры электродной массы влияют на реакционную способность и процессы диффузии, теплопроводности, электропроводности и др. В про-

цессе механохимической деструкции должно обеспечиваться разупорядочение структуры вещества. Механохимическая деструкция приводит к образованию вакансий, точечных дефектов в кристаллической решетке и дислокаций, которые способствуют развитию топохимических превращений, возникновению новых связей, что инициирует различные реакции. В результате возникающих цепных процессов появляются химически активные свежесформированные поверхности. В том случае, когда скорости деформирования массы вещества и скорость образования продуктов химической реакции различаются, настолько, что происходит завершение релаксационных процессов, действует только первый фактор – существование измененной структуры вещества, то есть целевых продуктов [3]. Для сравнения эффективности действия данного фактора необходимо знать энергетический выход соответствующих процессов, поскольку только в единицах энергии можно оценить вероятность химических превращений. Анализ энергетических выходов, являющихся количественной основой МХД электродных материалов литий-кобальтовых источников тока, и их сравнение с энергией соударения мелющих тел в измельчающем аппарате представляют собой критерий эффективности МХД.

Цель работы – исследование возможности использования метода анализа размерностей для получения безразмерных комплексов критериальных уравнений, с помощью которых можно провести оценку режимных параметров процесса утилизации отработанных ЛКИТ, и визуализация экспериментальных данных. Это позволит определить границы максимальной и минимальной эффективности проводимых совмещенных процессов утилизации.

### Материалы и методы исследований

Стадия вскрытия отработанных ЛКИТ проводилась на опытно-экспериментальном шредере ИМ-2×200 с подачей в камеру дробления инертной среды аргона для предотвращения процессов горения и взрыва при вскрытии. Частота вращения валов в шредере  $n_1 = 46$  об/мин. Стадия вторичного измельчения отработывалась на ножевой роторной мельнице ЛНМ-120 при постоянной частоте вращения ножей  $n_2 = 1\,500$  об/мин. Исследование процесса МХД проводили в шаровой барабанной мельнице при постоянном времени помола  $\tau = 2$  ч и диаметре мелющих тел  $d_{ш} = 12$  мм при различных частотах вращения барабана  $n_3 = 104 \dots 112$  об/мин. После процесса помола в шаровой мельнице механоактивированный порошок загружали в реактор с верхнеприводной мешалкой для проведения совмещенных двухстадийных процессов выщелачивания и экстракции. В качестве выщелачивающих агентов использовались дистиллированная вода – п.п. 1 – 7, лимонная кислота, оксалат аммония, трифосфат натрия – соответственно п.п. 8, 9, 10 (табл. 1).

Кинетические параметры процессов измельчения определялись с помощью измерения среднего размера частиц на лазерном гранулометре SK LAZER MICRON SIZER и удельной поверхности – методом Дерягина. Химический и фазовый составы измельченных частиц исследовались по данным рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии, физико-химические свойства кобальтсодержащих соединений – путем использования электронной спектроскопии, ИК-спектроскопии, потенциометрического титрования. Это позволило определять показатель глубины нарушений структуры материала и изменение плотности вещества после помола.

Для обработки результатов экспериментальных исследований в виде критериальных уравнений использовался метод теории подобия и анализа размерностей применительно к процессам измельчения [4].

Таблица 1

Основные технологические параметры совмещенных процессов утилизации источников тока

Номер п/п	Стадия																			
	вскрытия			измельчения			помола в шаровой мельнице			выщелачивания и экстракции										
	$m_1$ , г	$\tau_1$ , мин	$m_2/\tau_1$	$\tau_2$ , мин	$m_3/\tau_2$	$d_{q1}$ , мм	$n_3$ , об/мин	$m_4/\tau_3$	$d_{q2}$ , мкм	$\tau_4$ , мин	Т:Ж	рН	$n_4$ , об/мин	$t_{в/эк}$	Экстрагент (выщелачивание и экстракция)	$m_5$ , г	Концентрация, %			
																	$C_{1(Co)}$	$C_{1(Li)}$	$C_{2(Co)}$	$C_{2(Li)}$
1	149,2	4,5	140,0	40	127,0	1,5	104	122,0	40	120	1:10	8,9	800	70	H <sub>2</sub> O	101,4	11,4	1,4	-	
2	150,0	5,0	138,5	40	123,7	1,2	108	118,6	45		1:12	9,1	750	75			98,3	11,2		1,5
3	921,2	7,0	880,0	260	835,5	1,0	112	117,0	40		1:11	8,9	800				95,3	11,3		1,2
4	1 000	8,0	945,4	260	862,7	1,0	112	135,6	35		1:9	9,2	800				95,0	11,2		2,0
5		9,0	951,3	275	870,4	1,3	104	125,0	50		1:8	8,7	750			99,9	11,5	3,0		
6		9,0	950,8	265	866,7	1,4	108	174,6	55		1:10	8,7	750	80		100,5	11,3	3,2		
7		8,5	934,6	272	884,0	2,0	104	183,0	50		1:10	8,9	700	70		103,4	11,2	1,4		
8	9,5	937,8	270	889,7	1,0	104	126,0	45	1:13		2,5	750	80	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	95,41	0,62	0,16			
9	9,0	940,3	280	896,3	1,0	108	136,4	30	45		1:13	4,6	350	25	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	90,62	-	13,8		0,17
10	9,0	952,6	285	894,2	1,0	108	137,0	40	45		1:13	4,54	350	25	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	нет		0,05		0,13

## Результаты и обсуждение

В экспериментах по утилизации литий-кобальтовых источников тока, в катодных материалах насыпная плотность падает с 2,4 до 0,67 г/см<sup>3</sup>, что соответствует данным [5, 6], по увеличению свободного объема. Таким образом, соотношение плотностей электродной массы до и после МХД также служат критерием эффективности. Для механической деструкции важна взаимосвязь изменений структуры и реакционной способности электродной массы. Существенный вклад в химическую активность вносят деформированные связи, которые являются носителями остаточных внутренних напряжений. Таким образом, природу МХД можно представить следующим образом. Разрушение и трение частиц вещества приводит к разупорядочиванию поверхности, деформированию и разрывам химических связей с обеспечением чисто механической деформационной подвижности. Для перемещения частицы необходимо преодолеть энергетический барьер, чтобы энергия механических воздействий на материал при измельчении оказалась достаточной для разрыва химических связей в макромолекуле кобальтита лития LiCoO<sub>2</sub> [7]. Необходимо отметить, что данные работ [8] по определению энергии разрыва химических связей  $E_{x.c}$  при МХД значительно различаются из-за пренебрежения потерь энергии на соударение мелющих тел различной формы между собой  $E_m$  и со стенками барабанов  $E_b$  различных конструкций шаровых мельниц и диспергаторов. В проведенных экспериментах, в отличие от [9], учет этих потерь позволил сократить разброс данных с 18 % (для ионов лития и кобальта в электродных массах ЛКИТ, то есть с 7 265 кДж/кг [10] и 9 785 кДж/кг [11]) до 5,7 % во всем диапазоне измеряемых параметров. Таким образом, критерием эффективности МХД можно считать соотношение энергии разрыва химических связей с энергией соударения мелющих тел и потерями энергии на их соударения между собой и со стенками камер размольных аппаратов.

Кроме параметров, влияющих на процесс механохимической деструкции, представленных в таблице 1, другими определяющими параметрами также являются:  $E_m$  – модуль упругости электродных материалов;  $V$  – скорость взаимодействия между шарами и измельчаемыми частицами;  $\sigma$  – предел прочности при сжатии электродных материалов;  $\eta$  – коэффициент Пуассона электродных материалов;  $\rho$  – плотность электродных материалов при МХД;  $D_0, D_k$  – характерный диаметр частиц до и после МХД;  $L$  – диаметр барабана шаровой мельницы;  $i$  – степень измельчения электродных материалов при МХД;  $T$  – время процесса МХД;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $k$  – константа скорости разрыва химических связей кобальта;  $l_0$  – характерная длина траектории движения частиц при реакции МХД;  $u$  – скорость перемещения частиц электродной массы при МХД.

Определяемым параметром в данной задаче является конечная концентрация кобальтсодержащих соединений  $C_k$  в продуктах переработки после всех стадий совмещенных процессов.

Для описания процессов вскрытия, измельчения, помола, выщелачивания и экстракции использованы следующие основные технологические параметры и характеристики сырья и реагентов:  $m_1$  – масса партии перед стадией вскрытия в шредере;  $\tau_1$  – время вскрытия в шредере;  $m_2$  – масса партии частиц после стадии вскрытия в шредере и при подаче на стадию измельчения в ножевую роторную мельницу;  $m_2/\tau_1$  – удельная производительность процесса вскрытия;  $\tau_2$  – время измельчения в ножевой роторной мельнице;  $m_3$  – масса партии частиц после измельчения в ножевой роторной мельнице и при подаче на стадию помола в шаровую барабанную мельницу;  $m_3/\tau_2$  – удельная производительность процесса

измельчения;  $d_{ч1}$  – размер частиц после стадии измельчения в ножевой роторной мельнице;  $n_3$  – частота вращения шаровой барабанной мельницы при помоле;  $m_4$  – масса партии частиц после помола в шаровой барабанной мельнице и при загрузке в реактор с мешалкой на стадию выщелачивания;  $m_4/\tau_3$  – удельная производительность процесса помола;  $d_{ч2}$  – размер частиц после стадии помола в мельнице;  $\tau_4$  – время процесса выщелачивания «жидкость–твердое» и экстракции «жидкость–жидкость»;  $T : Ж$  – соотношение между количеством твердой и жидкой фазы в процессах выщелачивания / экстракции в реакторе;  $pH$  – кислотность среды в процессе выщелачивания и экстракции;  $n_4$  – частота вращения перемешивающего устройства верхнеприводной мешалки на стадиях выщелачивания и экстракции;  $t_{в/эк}$  – температура процессов выщелачивания и экстракции;  $m_5$  – масса образующегося осадка в процессе выщелачивания и экстракции;  $C_{1(Co)}$ ,  $C_{1(Li)}$  и  $C_{2(Co)}$ ,  $C_{2(Li)}$  – концентрации кобальта и лития, образующихся соответственно на стадиях выщелачивания и экстракции.

Для оценки сложного комплекса механических и технологических воздействий на структурированные частицы литий-кобальтовых источников тока применялся метод анализа размерностей с использованием характеристических масштабов [12], что позволило оценить вклад режимных параметров в виде безразмерных критериальных уравнений. Для описания совмещенных процессов составлены семь независимых безразмерных комплексов (критериев):

- энергоэффективности процесса МХД, характеризующийся отношением энергии разрыва химических связей катодного материала  $LiCoO_2$  к потерям энергии процесса, затрачиваемым на соударения между мелющими телами и стенкой барабанной шаровой мельницы,  $\Pi_1 = E_{х.с}/(E_M + E_б + E_y)$ , где  $E_y$  – энергия соударения;

- уплотнения, определяющий отношения плотностей материала до и после проведения процесса МХД,  $\Pi_2 = \rho_0/\rho_k$ ;

- измельчения, определяющийся соотношением размера исходного материала и размера частиц после проведения процесса МХД,  $\Pi_3 = D_0/D_k$ ;

- гомотронности (однородности по времени проведения процесса), характеризующий соотношение сил инерции к локальным силам, приводящим к механохимической деструкции,  $\Pi_4 = VT/L$ ;

- Фруда, характеризующий соотношение силы тяжести к силе инерции, возникающей при проведении процесса МХД и сопровождающийся нагревом частиц,  $\Pi_5 = gL/V^2$ ;

- Дамкеллера, характеризующий относительную интенсивность кинетических и внешних диффузионных процессов, возникающих на стадии выщелачивания и экстракции,  $\Pi_6 = kl_0/u$ ;

- обогащения целевым продуктом,  $\Pi_7 = C_k/C_{исх}$ , где  $C_{исх}$  – концентрация соединений кобальта или лития в исходном материале после шредера;  $C_k$  – концентрация кобальта или лития после проведения процессов выщелачивания и экстракции.

В данном случае критериальное уравнение, позволяющее рассчитать эффективность выхода целевого продукта с использованием процесса МХД, записывается в виде

$$\Pi_7 = A \Pi_1^{a_1} \Pi_2^{a_2} \Pi_3^{a_3} \Pi_4^{a_4} \Pi_5^{a_5} \Pi_6^{a_6}, \quad (1)$$

где  $A$  – константа;  $a_i$  – показатели влияния критериев совмещенных процессов.

С учетом расчетов коэффициентов  $A$  и  $a_i$  применительно к процессам извлечения кобальта и лития в условиях проводимых экспериментальных исследований, уравнение (1) запишется в виде

$$\Pi_7 = 0,42\Pi_1^{0,0000275}\Pi_2^{0,186}\Pi_3^{0,29}\Pi_4^{0,91}\Pi_5^{0,34}\Pi_6^{0,71}. \quad (2)$$

Обработка экспериментальных данных для определения  $a_i$  проводилась методом линейного регрессионного анализа. Порогом значимости любого комплекса  $\Pi_i$  выбрана величина  $10^{-3}$ . Диапазоны изменения критериев, рассчитанных по результатам экспериментов, составили

$$\begin{aligned} \Pi_1 &- 0,20\dots0,27; \Pi_2 - 0,051\dots0,29; \Pi_3 - 400\dots486; \\ \Pi_4 &- 24,2\dots32,9; \Pi_5 - 0,250\dots0,41; \Pi_6 - 2,5\dots3,4. \end{aligned}$$

При получении уравнения (1),  $\Pi_i > 10^{-3}$  считались значимыми членами линейного регрессионного уравнения. Учитывая, что  $\Pi_1^{a_1} < 0,001$  в (1), можно полагать, что энергетический критерий  $\Pi_1$ , при проведении процесса механохимической деструкции в барабанных шаровых мельницах с использованием шаров диаметром 20...30 мм, практически не влияет на его эффективность. Тогда критериальное соотношение (1) приобретает при подставлении числовых значений константы  $A$  и степеней  $a_i$  вид

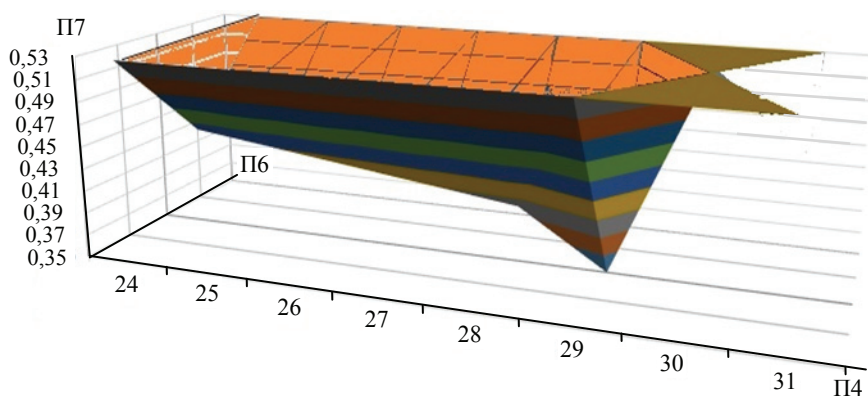
$$\Pi_7 = 0,42\Pi_2^{0,186}\Pi_3^{0,29}\Pi_4^{0,91}\Pi_5^{0,34}\Pi_6^{0,71}. \quad (3)$$

В то же время, при использовании шаров с диаметром 10...15 мм и определенном соотношении массы загружаемых исходных частиц к массе мелющих шаров и частоте вращения барабана в водопадном режиме достигается эффективный помол частиц с разупорядоченной структурой поверхности.

Как следует из (3), наибольшее влияние на эффективность получения вторичных кобальтсодержащих соединений оказывают процессы разрыва химических связей в электродных массах. Соотношение (3) представляет собой эмпирическое уравнение многомерной поверхности границы процесса МХД в шестимерном пространстве состояний. В качестве векторов-осей пространственной области, в данном случае выступают полученные комплексы  $\Pi_i$ . Поверхность ограничивает область технологических режимов МХД. За ее пределами эффективность получения кобальтсодержащих соединений при утилизации литий-кобальтовых источников тока существенно снижается.

Для анализа результатов расчетов воспользуемся методом визуализации многомерных динамических данных [13], который заключается в последовательном, в общем случае многократном, решении задач визуализации исходных данных и анализа полученных графических изображений с последующей формулировкой суждений относительно эффективности получения кобальтсодержащих соединений при утилизации литий-кобальтовых источников тока. С этой целью разработан алгоритм анализа соотношения (3) и создана прикладная программа решения задачи визуализации исходных данных для анализа условий МХД. При этом исходный дискретный набор экспериментальных параметров МХД интерполируется линейно. При разработке программы использовался программный продукт 3ds Max® с внутренним объектно-ориентированным языком программирования MAXScript.

С использованием полученных уравнений решена задача визуализации в виде трехмерного сегмента шестимерной области режимов МХД (рис. 1). В качестве примера выбран сегмент области, ограниченный наиболее значимыми плоскостями:  $\Pi_7 - \Pi_4 - \Pi_6$ . По физическому смыслу сегмент представляет собой часть области реализуемых режимов совмещенных процессов с МХД, за пределами



**Рис. 1. Пример решения задачи визуализации в виде трехмерного сегмента области режимов МХД:**

■  $-0,35 \dots 0,37$ ; ■  $-0,37 \dots 0,39$ ; ■  $-0,39 \dots 0,41$ ; ■  $-0,41 \dots 0,43$ ; ■  $-0,43 \dots 0,45$ ;  
 ■  $-0,45 \dots 0,47$ ; ■  $-0,47 \dots 0,49$ ; ■  $-0,49 \dots 0,51$ ; ■  $-0,51 \dots 0,53$

которых невозможно получение целевого продукта. Из рисунка видно, что сегмент в выбранном ракурсе визуализации поверхности имеет сложную пирамидальную форму, внутри которой не содержатся разрывы функций и их производных, что указывает на устойчивость процесса по отношению его условиям.

Именно наличие локально гладких функций и их производных до  $n$ -го порядка по всем переменным в соотношении (1) является условием выбора трехмерных сегментов поверхности для задачи визуализации устойчивых режимов МХД кобальтсодержащих соединений при утилизации источников тока. Анализ сегмента показывает, что концентрация кобальтсодержащих соединений в выбранном ракурсе визуализации возрастает при большем измельчении электродных масс и росте относительной интенсивности диффузионных процессов.

При сравнении полученных экспериментальных данных с использованием лимонной кислоты, оксалата аммония и трифосфата натрия с данными, полученными по расчетным уравнениям, эффективность выделения целевого продукта составила 53,2 %. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными составило 15 %.

### Выводы

Проанализирована технология утилизации отработанных литий-кобальтовых источников тока, включающая стадии вскрытия аккумуляторов в шредере, вторичного измельчения в ножевой роторной мельнице и механохимической деструкции в шаровой мельнице с получением механоактивированных частиц с требуемыми характеристиками удельной поверхности и пористости и оценен их вклад в эффективность получения целевого продукта.

На основании предложенной технологии проведена серия экспериментальных исследований с различными режимными параметрами процесса переработки литий-кобальтовых источников тока, показывающая эффективность извлечения соединений кобальта в частном случае 53,2 %.

На основе экспериментальных данных с использованием метода анализа размерностей получен безразмерный комплекс критериальных уравнений, позволяющий оценить вклад режимных параметров в процесс утилизации отработанных ЛКИТ.

На основе визуализации многомерных динамических данных разработана область режимов реализации процесса механохимической деструкции, представленная в виде сегмента шестимерного пространства параметров, которая позволяет определять условия эффективности проводимого процесса механохимической деструкции.

*Работа выполнена в рамках научного гранта Российского научного фонда № 21-19-00403 «Исследование процессов механохимической деструкции катодных материалов при извлечении кобальта и его соединений».*

*Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА.*

#### *Список литературы*

1. Рециклинг литийсодержащих соединений из отработанных источников тока / А. М. Гонопольский, Д. А. Макаренков, В. И. Назаров [и др.] // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 5. – С. 10 – 15. doi: 10.18412/1816-0395-2019-5-10-15
2. Ломовский, О. И. Механохимия в решении экологических задач : аналит. обзор / О. И. Ломовский, В. В. Болдырев. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2006. – 221 с.
3. Бутягин, Л. Ю. Разупорядочение структуры и механохимические реакции в твердых телах / Л. Ю. Бутягин // Успехи химии. – 1984. – Т. 53, № 11. – С. 1769 – 1789.
4. Сайтов, В. И. Критерии подобия процесса дробления горных пород несвободным ударом / В. И. Сайтов, В. В. Чупров // Горный информационно-аналит. бюллетень. – 2006. – № 3. – С. 351 – 353.
5. Болдырев, В. В. Исследования по механохимии твердых веществ / В. В. Болдырев // Вестн. Российского фонда фундаментальных исследований. – 2004. – № 3 (37). – С. 38 – 58.
6. Schrader, R. Die mechanische Aktivierung von Quarz / R. Schrader, W. Dusdorf // Kristall und Technik. – 1966. – Vol. 1, Issue 1. – P. 59 – 75.
7. Перер, В. Р. Кинетическая теория прочности твердых тел / В. Р. Перер, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.
8. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л. В. Гурвич, Г. В. Карачевцев, В. Н. Кондратьев [и др.]. – М. : Наука, 1974. – 351 с.
9. Оценка уровня подводимой механической энергии к композиции, при проведении механохимической активации в аппаратах измельчения / М. М. Гараев, Е. Г. Белов, А. М. Коробков, А. И. Прокопчик // Вестн. Казанского технол. ун-та. – 2010. – № 7. – С. 389 – 394.
10. Утилизация литий-ионных источников тока методом механохимической деструкции / А. М. Гонопольский, Д. А. Макаренков, В. И. Назаров, А. П. Попов // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 10. – С. 16 – 19. doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-16-19
11. Андреев, Л. О. Расчет термодинамических свойств оксидов кобальта (III, IV) и кобальтита лития / Л. О. Андреев, О. В. Бушкова, Н. Н. Баталов // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6, № 4. – С. 187 – 191.
12. Гухман, А. А. Теория подобия, анализ размерностей, характеристические масштабы / А. А. Гухман, А. А. Зайцев. – М. : Издательство МГОУ, 1993. – 73 с.
13. Научная визуализация, как метод анализа научных данных / В. Пилюгин, Е. Маликова, А. Пасько, В. Аджиев // Научная визуализация. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 56 – 70.



## Criteria-Based Generalization of Mechanochemical Destruction Parameters of Cobalt-Containing Compounds when Disposing Current Sources

V. M. Retivov<sup>1</sup>, A. M. Gonopolskiy<sup>1</sup>, D. A. Makarenkov<sup>1,2</sup>,  
V. I. Nazarov<sup>1,3</sup>, A. P. Popov<sup>1</sup>

*Kurchatov Institute - IREA (1), retivov\_ym@irea.org.ru, Moscow, Russia;*  
*Department of Processes and Apparatus of Chemical Technologies,*  
*Moscow Polytechnic University (2), Moscow, Russia;*  
*Department of Processes and Apparatus of Chemical Technologies*  
*named after N. I. Gelperin, MIREA - Russian Technological University (3),*  
*Moscow, Russia*

**Keywords:** dimension analysis; grinding; cobalt-containing compounds; criterial generalization; mechanochemical destruction; utilization of power sources.

**Abstract:** The technology of utilization of spent lithium-cobalt power sources is considered, including the stages of opening batteries in a shredder, secondary grinding in a rotary knife mill and mechanochemical destruction in a ball mill to obtain mechanically activated particles with the required characteristics of specific surface area and porosity. It is shown that the combined processes of leaching and extraction with mechanically activated particles can increase the yield of the target product. For a complex set of mechanical and technological effects on structured particles of lithium-cobalt current sources, it is proposed to use the method of dimensional analysis to assess the contribution of operating parameters in the form of dimensionless criterion equations.

### References

1. Gonopol'skiy A.M., Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Klyushenkova M.I., Popov A.P. [Recycling of lithium-containing compounds from waste sources of current], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2019, vol. 23, no. 5, pp. 10-15, doi: 10.18412/1816-0395-2019-5-10-15 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Lomovskiy O.I., Boldyrev V.V. *Mekhanokhimiya v reshenii ekologicheskikh zadach: analiticheskiy obzor* [Mechanochemistry in solving environmental problems: an analytical review], Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2006, 221 p. (In Russ.)
3. Butyagin L.Yu. [Structural disordering and mechanochemical reactions in solids], *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 1984, vol. 53, no. 11, pp. 1769-1789. (In Russ.)
4. Saitov V.I., Chuprov V.V. [Criteria for the similarity of the process of crushing rocks by a non-free blow], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2006, no. 3, pp. 351-353. (In Russ.)
5. Boldyrev V.V. [Research on the mechanochemistry of solids], *Vestnik Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy* [Bulletin of the Russian Foundation for Fundamental Research], 2004, no. 3 (37), pp. 38-58. (In Russ.)
6. Schrader R., Dusdorf W. Die mechanische Aktivierung von Quarz, *Kristall und Technik*, 1966, vol. 1, issue 1, pp. 59-75.

7. Reger V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.Ye. *Kineticheskaya teoriya prochnosti tverdykh tel* [Kinetic theory of strength of solid bodies], Moscow: Nauka, 1974, 560 p. (In Russ.)
8. Gurvich L.V., Karachevtsev G.V., Kondrat'yev V.N. [et al.] *Energiya razryva khimicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu* [Energy of breaking chemical bonds. Ionization potentials and electron affinity], Moscow: Nauka, 1974, 351 p. (In Russ.)
9. Garayev M.M., Belov Ye.G., Korobkov A.M., Prokopchik A.I. [Assessment of the level of supplied mechanical energy to the composition during mechanochemical activation in grinding devices], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2010, no. 7, pp. 389-394. (In Russ.)
10. Gonopol'skiy A.M., Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Popov A.P. [Utilization of lithium-ion current sources by the method of mechanochemical destruction], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2019, vol. 23, no. 10, pp. 16-19, doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-16-19 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Andreyev L.O., Bushkova O.V., Batalov N.N. [Calculation of thermodynamic properties of cobalt (III, IV) and lithium cobaltite oxides], *Elektro-khimicheskaya energetika* [Electro-chemical energetics], 2006, vol. 6, no. 4, pp. 187-191. (In Russ.)
12. Gukhman A.A., Zaytsev A.A. *Teoriya podobiya, analiz razmernostey, kharakteristicheskiye masshtaby* [Similarity theory, dimension analysis, characteristic scales], Moscow: Izdatel'stvo MGOU, 1993, 73 p. (In Russ.)
13. Pilyugin V., Malikova Ye., Pas'ko A., Adzhiyev V. [Scientific visualization as a method of scientific data analysis], *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific visualization], 2012, vol. 4, no. 4, pp. 56-70. (In Russ., abstract in Eng.)
- 

### **Kriterielle Verallgemeinerung der Parameter der mechano-chemischen Zerstörung der kobalthaltigen Verbindungen bei der Entsorgung der Stromquellen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Technologie der Entsorgung der gebrauchten Lithium-Kobalt-Stromquellen betrachtet, einschließlich der Stadien der Batterieöffnung in einem Shredder, sekundäres Mahlen in einer Messerrotormühle und mechano-chemische Zerstörung in einer Kugelmühle, um mechanisch aktivierte Partikel mit den erforderlichen Eigenschaften der spezifischen Oberfläche und Porosität zu erhalten. Es ist gezeigt, dass die kombinierten Prozesse von Auslaugen und Extraktion mit mechanisch aktivierten Partikeln die Ausbeute des Zielprodukts erhöhen können. Für einen komplizierten Komplex mechanischer und technologischer Einflüsse auf strukturierte Partikeln von Lithium-Kobalt-Stromquellen ist vorgeschlagen, die Methode der Dimensionsanalyse zu verwenden, um den Beitrag von Betriebsparametern in Form von dimensionslosen Kriteriumsgleichungen zu bewerten.

---

### **Généralisation des critères des paramètres de la destruction mécano-chimique des composés contenant du cobalt lors de l'élimination des sources de courant**

**Résumé:** Est examinée la technologie d'élimination des sources de courant lithium-cobalt usagées, y compris les étapes d'ouverture des batteries dans le broyeur, le broyage secondaire dans le broyeur rotatif à couteaux et la destruction mécano-

chimique dans le broyeur à boulets pour produire des particules mécano-activées ayant les caractéristiques de surface spécifique et de porosité requises. Est démontré que la réalisation des processus combinés de lixiviation et d'extraction avec des particules mécaniquement activées permet d'augmenter le rendement du produit cible. Pour un complexe d'influences mécaniques et technologiques sur les particules structurées des sources de courant lithium-cobalt, est proposé d'utiliser une méthode d'analyse dimensionnelle pour évaluer la contribution des paramètres de régime sous forme des équations de critères sans dimension.

---

**Авторы:** *Ретивов Василий Михайлович* – кандидат химических наук, исполняющий обязанности директора НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА; *Гонопольский Адам Михайлович* – доктор технических наук, профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА; *Макаренков Дмитрий Анатольевич* – доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА; доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия; *Назаров Вячеслав Иванович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА; доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий им. Гельперина Н. И.», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия; *Попов Александр Павлович* – научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.