

## КОМПЛЕКСНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ Li, Fe, Al и Cu ИЗ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ LFP АККУМУЛЯТОРОВ

© 2024 г. А. М. Саломатин<sup>a, b</sup>, И. В. Зиновьева<sup>a</sup>, Ю. А. Заходяева<sup>a, \*</sup>, А. А. Вошкин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
Ленинский пр-т, 31, Москва, 119071 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,  
Покровский бул., 11, Москва, 109028 Россия

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

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 29.03.2024 г.

Принята к публикации 02.04.2024 г.

Исследовано комплексное выщелачивание катодного и анодного материалов литий-железо-фосфатных аккумуляторов. Установлено влияние природы минеральной кислоты (азотной, серной, соляной) на степень выщелачивания Li, Fe, Al и Cu. В качестве наиболее подходящего выщелачивающего агента выбрана соляная кислота. Изучено влияние параметров процесса выщелачивания активных материалов: времени процесса, температуры, концентрации соляной кислоты, соотношения твердое тело : жидкость. Для полного выщелачивания меди в качестве окислителя использована перекись водорода. Установлены условия наиболее полного извлечения целевых элементов: 25°C, 2 ч, 2 М раствор соляной кислоты, 0,05 М раствор H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, соотношение твердое тело : жидкость = 1 : 50. Показана возможность достаточного полного выщелачивания основных элементов из отработанных LFP-аккумуляторов при комнатной температуре.

*Ключевые слова:* выщелачивание, литий-ионные аккумуляторы, катод, анод, ионы металлов

DOI: 10.31857/S0044457X24070158, EDN: XNATAH

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно резолюции Генеральной ассамблеи ООН “Повестка дня на период до 2030 г.”, одной из целей в области устойчивого развития является обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства [1]. Ключевой этап такого перехода — создание энерго- и материалосберегающих технологий, которые в будущем позволят увеличить повторное использование природных материалов и свести постоянные затраты невозобновляемых ресурсов к минимуму.

Спрос на литий-ионные аккумуляторы в 2022 г. вырос на 65% по сравнению с 2021 г., что в основном является результатом роста продаж персональных электромобилей [2]. Рынок одного из распространенных типов литий-ионных аккумуляторов — литий-железо-фосфатного (LFP) — достиг исторического максимума в связи с его активным использованием в электромобилях китайского производства [3, 4]. Батареи LFP различаются по составу, однако

основными элементами, входящими в состав батарей, являются железо и фосфор [5]. Увеличение использования LFP приводит к необходимости разработки современных технологий для его переработки.

К наиболее развивающимся методам переработки химических источников тока относится гидрометаллургический [6, 7], который обладает рядом достоинств по сравнению с энергозатратным и часто неселективным пирометаллургическим методом [8]. Традиционно гидрометаллургический метод включает в себя механический разбор разряженной батареи и удаление нерастворимых составных элементов, очистку и разделение полученных материалов, растворение (ключевой этап), дальнейшее выделение и разделение металлов из раствора [9].

В связи с этим первичной наукоёмкой задачей в гидрометаллургической переработке аккумуляторов является эффективный перевод твердых компонентов в раствор (выщелачивание). Для этой задачи успешно применяются рас-

творы минеральных кислот [10–14]. Для увеличения эффективности или селективности процесса помимо варьирования таких параметров, как время выщелачивания, температура и концентрация кислоты, к минеральным кислотам часто добавляют различные окислители [15, 16]. Так, при выщелачивании раствором серной кислоты катодного материала состава  $\text{LiFePO}_4$  показано, что добавление  $\text{H}_2\text{O}_2$  в мольном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{Li} = 2$  позволяет достичь селективного выщелачивания лития 96.8% даже при сравнительно низких концентрациях  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.3 моль/л) за 120 мин при  $60^\circ\text{C}$  [17]. Другим окислителем, использование которого описано в литературе, для выщелачивания  $\text{LiFePO}_4$  является  $\text{NaClO}$ . В системе с 0.6 М раствором соляной кислоты гипохлорит натрия в соотношении с литием 1 : 0.6 позволяет достичь селективного выщелачивания лития >95% при степени выщелачивания железа <0.1% за 20 мин при температуре  $15^\circ\text{C}$  [18].

Интересным направлением исследований в процессах выщелачивания активных материалов аккумуляторов является применение гидрофильных глубоких эвтектических растворителей [19, 20]. Они уже проявили себя как перспективные выщелачивающие агенты в извлечении металлов [13, 21, 22], однако их применение ограничивается сложностью последующего извлечения и разделения металлов из раствора, в связи с чем их использование в процессах выщелачивания в настоящее время значительно уступает минеральным кислотам [23].

Ценные материалы из литий-железо-фосфатных аккумуляторов содержатся как в катодном, так и в анодном материале. В процессе перемещения ионов лития между анодным и катодным электродами для накопления и высвобождения энергии часть ионов лития попадает в поры графита. Также этап полного механического отделения катода от анода, необходимый для селективности описанных выше методов, является достаточно трудозатратным. В связи с этим интерес представляет совместное выщелачивание катода и анода LFP-аккумуляторов, не описанное ранее в литературе. Поэтому целью данной работы является разработка эффективного метода совместного выщелачивания катода и анода LFP-аккумулятора при комнатных условиях, а также подбор оптимальных условий для получения раствора, пригодного для дальнейшей экстракции. Для этого были изучены со-

ставы исходных материалов и количественные характеристики выщелачивания минеральными кислотами при различных условиях, в том числе в присутствии окислителя.

Настоящая работа направлена на увеличение эффективности выщелачивания ценных элементов (Li, Fe, Al, Cu), содержащихся в отработанных LFP-аккумуляторах, а также на уменьшение воздействия на окружающую среду путем приближения к нулевой эмиссии отходов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы катодного и анодного материалов были взяты из отработанного аккумулятора типа LFP (IFR 18650,  $\text{LiFePO}_4$ , 3.2 В, 1500 мАч). Перед началом работы аккумулятор был полностью разряжен и механически разобран на основные составные части (пластиковая оболочка, металлический корпус, анодный и катодный материалы, сепаратор). Полученные катодный и анодный материалы были высушены при  $100^\circ\text{C}$  в течение суток. Масса катодного материала составляла 13.18 г, анодного – 11.43 г. Соотношение катод : анод в экспериментах было принято в соответствии с соотношением в аккумуляторе 1.15 : 1.

Для проведения рентгенофазового анализа (РФА) пленку анода приклеивали к пластилину и выравнивали по поверхности кюветы. В случае образцов катода было подготовлено три пробы: 1) пленка, утопленная в пластилине, выровненная по поверхности кюветы; 2) аккуратно счищенный с поверхности пленки порошок; 3) подложка без нанесенного порошка, приклеенная на пластилин и выровненная по поверхности бесфоновой кюветы. Анализ всех проб проводили с помощью универсального рентгеновского дифрактометра DX2700BH (Наоуан Instrument Co., КНР), оснащенного анодом с  $\text{CuK}_\alpha$ -излучением, SDD-детектором Ketek. Съемку проводили в режиме фиксированной выдержки в точке с шагом 0.02, шелевой геометрии: DS, SS  $1^\circ$ , RS 0.2 мм. Также был выполнен анализ образцов катода с помощью универсального рентгеновского дифрактометра DX27-mini (Наоуан Instrument Co., КНР), оснащенного анодом с  $\text{CoK}_\alpha$ -излучением, Fe-фильтром и позиционно-чувствительным детектором Pixet-1D. Съемку проводили в режиме фиксированной скорости 3 град/мин, шель DS  $1^\circ$ . Качественный РФА осуществляли в программном обеспече-

нии Crystallographica Search-Match, оснащенном кристаллографической базой данных PDF2.

Качественный состав катодных и анодных материалов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр СПЕКТРОСКАН-МАКС GVM, Спектрон, Россия). Для анализа использовали поверхности материалов без отделения их от алюминиевой и медной подложек.

Эксперименты по выщелачиванию проводили в двугорлой круглодонной колбе объемом 100 мл, снабженной системой контроля температуры, обратным холодильником и магнитной мешалкой (US-4150D, ULAB, Китай; скорость перемешивания  $300 \pm 20$  об/мин, точность поддержания температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $< 100^\circ\text{C}$ );  $\pm 1\%$  ( $> 100^\circ\text{C}$ ), точность контроля температуры  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ). Для изучения эффективности выщелачивания в зависимости от условий проведения процесса использовали серную кислоту марки “х. ч.” (СпектроХим), соляную кислоту “х. ч.” (Aldosa), азотную кислоту “х. ч.” (Aldosa) и перекись водорода “ос. ч.” (37%, Химмед). Катодный и анодный материалы перед растворением взвешивали на аналитических весах AND HR-100AZ (Япония). Заранее приготовленные растворы выщелачивающих агентов помещали в колбу и добавляли измельченные катодный и анодный материалы. Смесь выдерживали при различных температурах в течение варьированного времени проведения процесса при постоянном перемешивании. Затем реакционную массу охлаждали до комнатной температуры, фильтровали и разбавляли для последующего анализа. Концентрацию металлов в полученных растворах выщелачивания определяли методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе Thermo Scientific ICAP PRO XP (США). Относительная погрешность определения не превышала 1%. Достоверность полученных результатов была проверена путем анализа стандартных образцов (NPS, США) и модельных смесей на их основе.

Для достоверного определения количественного содержания элементов в составе катодных и анодных материалов проводили полное выщелачивание в царской водке при трех различных соотношениях твердое тело : жидкость (тв : ж) = 1 : 50, 1 : 25 и 1 : 10 и температуре  $80^\circ\text{C}$  в течение 6 ч.

Степень выщелачивания металлов ( $L$ , %) рассчитывали как отношение количества металла в полученном растворе выщелачивания к количеству металла в растворе полного выщелачивания:

$$L(\%) = \frac{n_{\text{водн}}}{n_{\text{полн}}} \times 100,$$

где  $n_{\text{водн}}$  — количество металла в водной фазе после выщелачивания,  $n_{\text{полн}}$  — количество металла в растворе полного выщелачивания.

Представленные экспериментальные данные являются результатом серии из трех экспериментов и обработаны методами математической статистики: относительное стандартное отклонение 1–2%, относительная погрешность не более 5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Исследование активных материалов LFP-аккумулятора*

В рамках данного исследования проведен качественный и количественный анализ активных материалов из отработанного LFP-аккумулятора.

На рис. 1–3 представлены дифрактограммы катода и анода. Съемку образца пленки анода проводили с точкой экспозиции 0.2 в интервале углов  $2\theta$   $20^\circ$ – $120^\circ$  в течение 20 мин. По данным

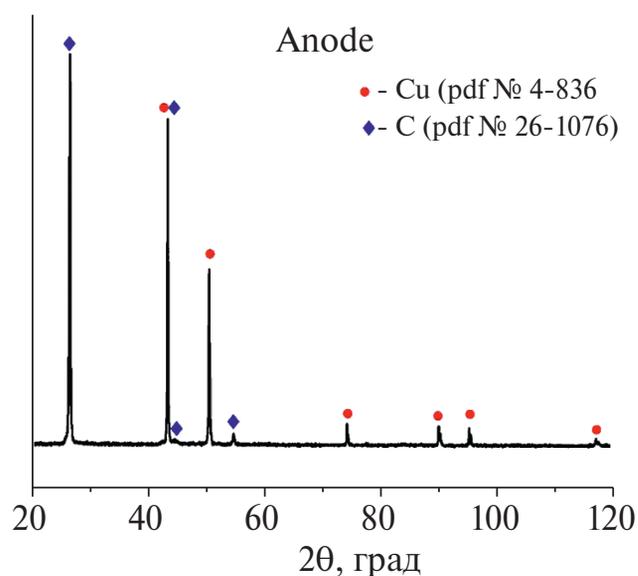


Рис. 1. Дифрактограмма образца пленки анода, полученная на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении.

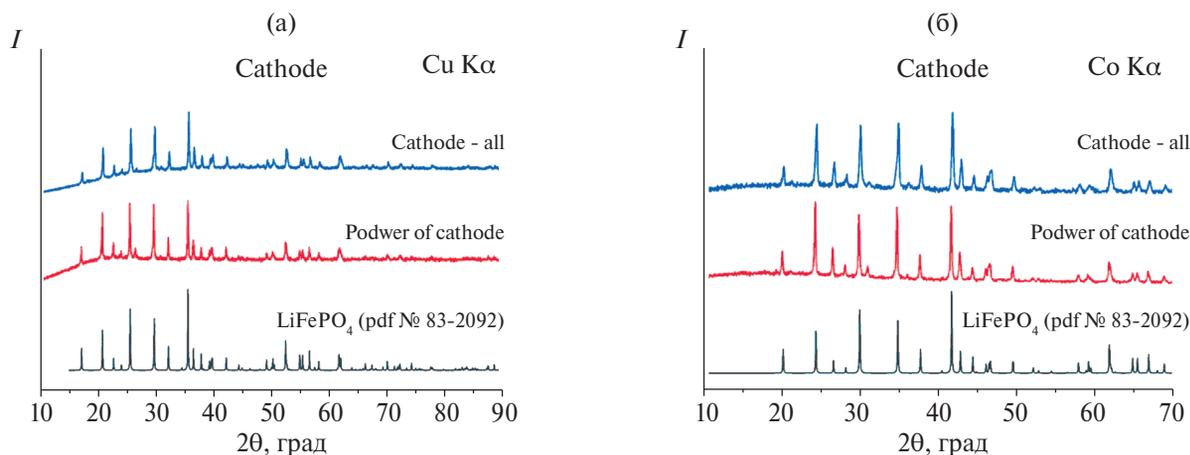


Рис. 2. Дифрактограммы образцов катода, полученные на  $\text{CuK}_\alpha$ - (а) и  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении (б).

РФА установлена смесь фаз  $\text{Cu}$  (pdf № 4-836) и  $\text{C}$  (pdf № 26-1076) (рис. 1), что подтверждает предполагаемый состав пленки анода — медная подложка с нанесенным на нее графитом.

Съемку образцов проводили на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении с точкой экспозиции 3 в интервале углов  $2\theta$   $10^\circ$ – $90^\circ$  в течение 4.5 ч. По данным РФА (рис. 2а), в обоих образцах установлена одна фаза  $\text{LiFePO}_4$  (pdf № 83-2092). Отмечено, что на малых углах происходит “рост” базовой линии по шкале интенсивности, что можно объяснить эффектом флуоресценции от Fe. Поэтому данные образцы были сняты на  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении (скорость 3 град/мин,  $2\theta$   $10^\circ$ – $70^\circ$ , 25 мин на образец). РФА показал отсутствие “роста” базовой

линии по шкале интенсивности (рис. 2б), что подтверждает регистрацию явления флуоресценции образцов на медном излучении.

Съемку подложки катода проводили на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении с точкой экспозиции 8 в интервале углов  $2\theta$   $25^\circ$ – $120^\circ$  в течение 9 ч. По данным РФА установлена смесь фаз  $\text{CaCO}_3$  (pdf № 72-1651) и  $\text{Al}$  (pdf № 4-787) (рис. 3).

Количественный РФА был выполнен с помощью ПО MDI Jade 6.5. По результатам анализа установлен массовый и объемный состав подложки на поверхности:  $\text{CaCO}_3$  — 42.8 мас. % (42.8 об. %),  $\text{Al}$  — 57.2 мас. % (57.2 об. %). Также возможно присутствие аморфной фазы порядка 1%. По результатам РФА частично подтвержден предполагаемый состав катода — алюминиевая подложка с нанесенным на нее порошком  $\text{LiFePO}_4$ . Подложка представляет собой смесь алюминия и кальцита.

Состав поверхности катодного и анодного материалов исследован методом рентгенофлуоресцентного анализа (табл. 1). Данный метод не позволяет оценить содержание некоторых элементов, в том числе лития, углерода и кислорода [24], поэтому массовые проценты в таблице указаны без их учета. Из полученных данных видно, что основными элементами в этих материалах являются Fe, P, Cu и Al. Их содержание установлено неточно, поскольку они находятся в основном в подложке, на которую нанесен катодный порошок. Также найдены следовые количества Si, Mn, Ti, S и Cr, однако их извлечение нецелесообразно и в дальнейшем рассматриваться не будет.

Анализ полученного раствора полного выщелачивания в смеси соляной и азотной кислот

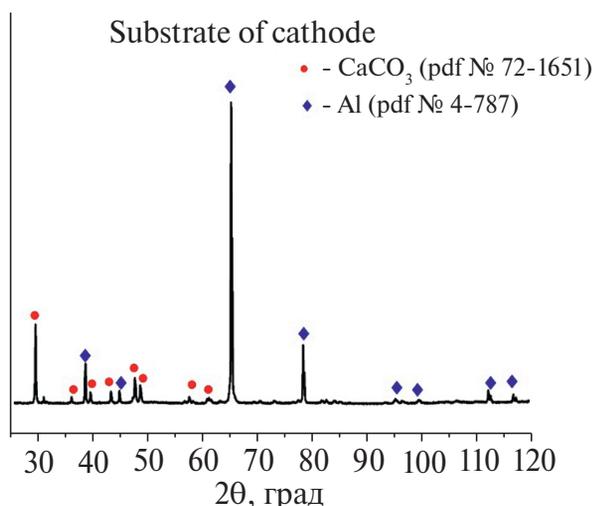


Рис. 3. Дифрактограмма подложки катода, полученная на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении.

**Таблица 1.** Состав поверхности катодного и анодного материалов, определенный методом рентгенофлуоресцентного анализа

Элемент	Катодный материал, мас. %	Анодный материал, мас. %
Fe	72.43	0.13
P	24.56	3.42
Si	0.98	–
Al	0.94	0.61
Mn	0.56	–
S	0.12	0.45
Ti	0.33	–
Cr	0.06	–
Cu	0.02	92.58

**Таблица 2.** Количественное содержание элементов в растворе полного выщелачивания катода и анода

Элемент	мг/л	Элемент	мг/л
Li	840	Ca	300
P	3690	Mn	41
Fe	6107	S	23
Cu	6841	Si	9
Al	2680	Cr	3

был выполнен методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Результат показан в табл. 2, из которой видно, что основными металлами (за исключением незначительных количеств Ca и Mn), содержащимися в активных материалах, являются Li, Fe, Cu и Al.

#### *Выщелачивание активных материалов LFP-аккумулятора*

Для оптимизации условий комплексного кислотного выщелачивания катодного и анодного материалов LFP-аккумуляторов исследовано влияние природы минеральной кислоты, времени протекания процесса, температуры, добавления окислителя, соотношения жидкости и твердого вещества на эффективность растворения основных элементов – Li, Fe, Al, Cu.

В качестве выщелачивающих агентов были выбраны наиболее распространенные и коммерчески доступные водные растворы минеральных кислот: HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub>.

Одной из ключевых характеристик выщелачивания как с научной, так и с практической точки зрения, является время протекания

процесса. Для изучения влияния времени на эффективность выщелачивания были проведены эксперименты длительностью от 15 до 180 мин. Остальные параметры процесса были неизменными: исходная концентрация кислоты 2 моль/л, соотношение тв : ж = 1 : 25, температура 25°C. Экспериментальные данные по выщелачиванию железа, лития, алюминия и меди из активных материалов LFP-аккумулятора растворами соляной, серной и азотной кислот показаны на рис. 4.

При выщелачивании раствором соляной кислоты эффективность выщелачивания для Fe, Li и Al практически достигает своего максимума в данных условиях уже через 15 мин и лишь незначительно меняется с течением времени (<5%), однако для Cu увеличение времени протекания процесса с 15 до 180 мин приводит к многократному увеличению степени выщелачивания – от 1.9 до 27.8%. Вероятнее всего, это связано с тем, что образующийся хлорид меди(II) отравляет поверхность непрореагировавшей меди и приводит к постепенному увеличению скорости реакции.

При использовании раствора азотной кислоты полученная зависимость несколько отличается. Cu растворяется полностью уже через 15 мин, а степень выщелачивания Fe и Li остается постоянной (88 и 75%) независимо от времени проведения. Сравнительно низкая эффективность выщелачивания Al связана с тем, что алюминий первично покрыт оксидной пленкой стабильного и малорастворимого в азотной кислоте Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Раствор серной кислоты проявляет высокую способность к селективному выщелачиванию Li и Fe: за короткое время (15 мин) степень их выщелачивания составляет 96 и 100% соответственно, тогда как степень выщелачивания Cu даже при 180 мин составляет <1%. Эффективность выщелачивания Al постепенно возрастает с течением времени: с 16.2% за 15 мин до 52.2% за 180 мин.

Исучена кинетика выщелачивания катодного и анодного материалов соляной кислотой при температуре 80°C. Показанная на рис. 5 зависимость степени выщелачивания от времени практически полностью совпадает с зависимостью при комнатной температуре. Следовательно, данный процесс можно проводить при комнатной температуре без каких-либо потерь, что является безусловным преимуществом.

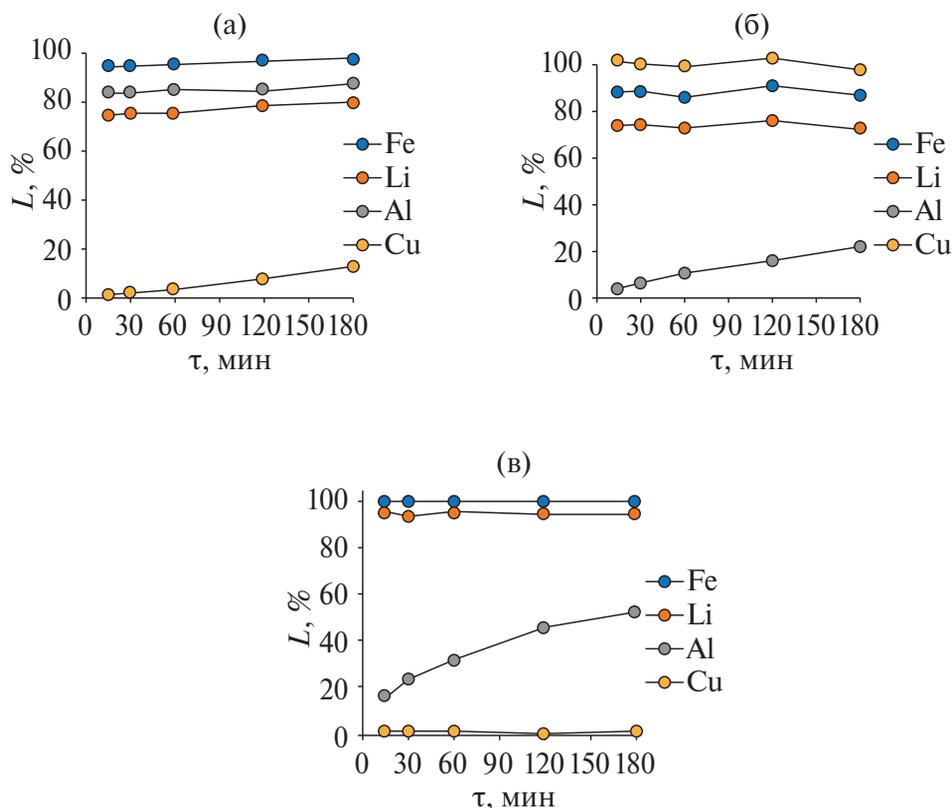


Рис. 4. Зависимость степени выщелачивания металлов от времени протекания процесса для ряда минеральных кислот: а – HCl, б – HNO<sub>3</sub>, в – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

По причине того, что анион Cl<sup>-</sup> образует с железом(III) и медью(II) более стабильные анионные комплексы, чем нитрат-анион (что удобнее для дальнейшей анионообменной экстракции), и из-за эффективности выщелачивания для дальнейших исследований в качестве оптимальной выбрана соляная кислота.

В диапазоне концентраций HCl от 1 до 4 моль/л (рис. 6) наблюдается незначительный рост (<7%) степени выщелачивания Fe, Li и Al, в то же время степень выщелачивания Cu при концентрации соляной кислоты 1 моль/л максимальна в данном диапазоне и составляет 44.1%, при увеличении концентрации она падает и находится на уровне 20%.

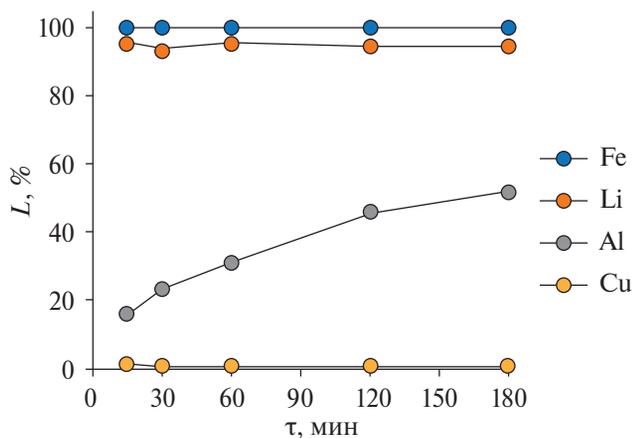


Рис. 5. Зависимость степени выщелачивания металлов от времени для раствора HCl (тв : ж = 1 : 25, 80°C, 2 моль/л).

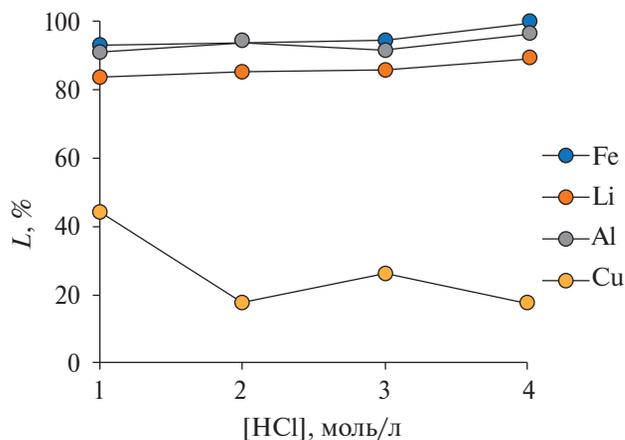


Рис. 6. Зависимость степени выщелачивания от концентрации раствора HCl (тв : ж = 1 : 25, 25°C, 120 мин).

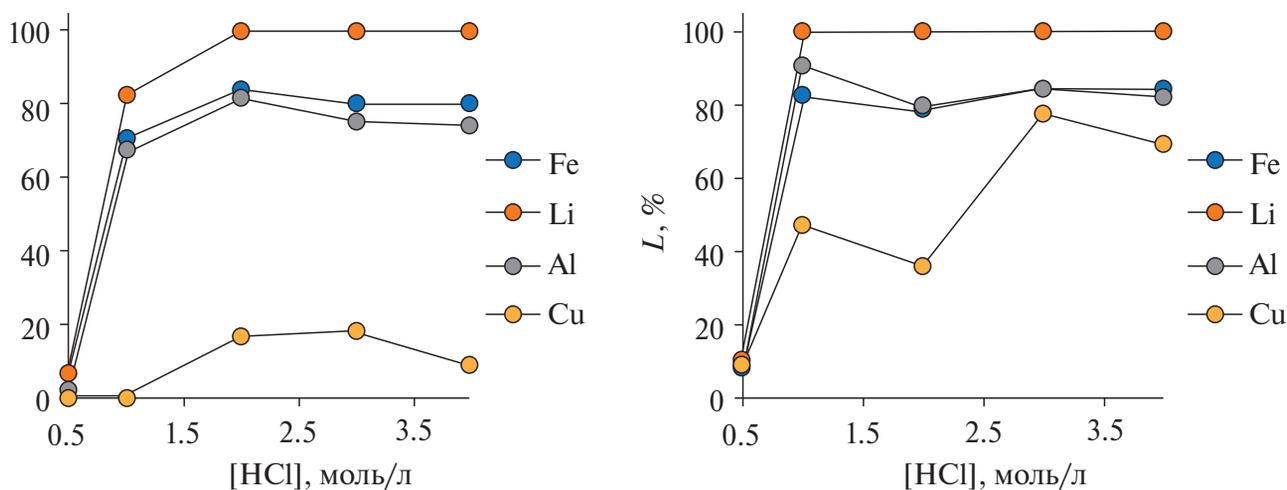
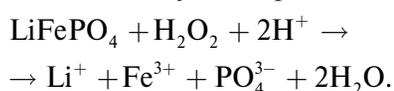


Рис. 7. Зависимость степени выщелачивания от концентрации HCl (25°C, 120 мин) при соотношении тв : ж = 1 : 10 (а), 1 : 50 (б).

Установлена также зависимость степени выщелачивания от концентрации HCl в диапазоне от 0.5 до 4 моль/л при соотношении фаз 1 : 10 и 1 : 50 (рис. 7).

Зависимости имеют ряд сходств: при минимальной концентрации кислоты 0.5 моль/л степень извлечения всех металлов составляет <10%. Литий при обоих соотношениях выщелачивается полностью при концентрации кислоты >1 моль/л. Также увеличение концентрации кислоты с 2 до 4 моль/л в обоих случаях не приводит к изменению степени выщелачивания железа и алюминия. Медь лучше выщелачивается при соотношении 1 : 50, вероятнее всего, по причине лучшего образования комплекса  $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ , который катализирует растворение металлической меди [25].

Для более полного выщелачивания меди использовали окислитель –  $\text{H}_2\text{O}_2$ , который успешно применялся в качестве окислителя для железа в аналогичном выщелачивании катода LFP [5]. Его достоинствами являются коммерческая доступность, экологичность и отсутствие продуктов, мешающих дальнейшей экстракции. В данном случае растворение  $\text{LiFePO}_4$  происходит в соответствии со следующей реакцией:



Проводили выщелачивание 2 М раствором HCl при комнатной температуре в течение 120 мин при различных концентрациях перек-

сида водорода в диапазоне от 0.05 до 0.5 моль/л (рис. 8).

Из полученной зависимости видно, что даже при концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.05 моль/л степень выщелачивания Cu возрастает с 17.3 до 100%, в то же время степень выщелачивания Fe, Li и Al возрастает не так существенно. Последующее увеличение концентрации пероксида водорода практически не влияет на эффективность выщелачивания Li, Al и Cu по сравнению с 0.05 М раствором  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Степень выщелачивания железа при концентрации пероксида водорода от 0.05 до 0.2 моль/л остается на уровне 94%, однако при увеличении концентрации от 0.2 до 0.3 моль/л она снижается до 76.9%, а при последующем увеличении концентрации пероксида водорода изменяется мало.

Исследовано также выщелачивание в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$  при соотношении тв : ж = 1 : 10 и 1 : 25 (рис. 9).

Для эффективного выщелачивания меди оптимальным является соотношение 1 : 50 при минимальной концентрации пероксида водорода 0.05 моль/л, так как в этих условиях медь выщелачивается количественно. Литий растворяется полностью независимо от добавления  $\text{H}_2\text{O}_2$  аналогично железу и алюминию: степени их выщелачивания при обоих соотношениях составляют ~80% и практически не меняются в зависимости от концентрации перекиси водорода.

На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности достаточного пол-

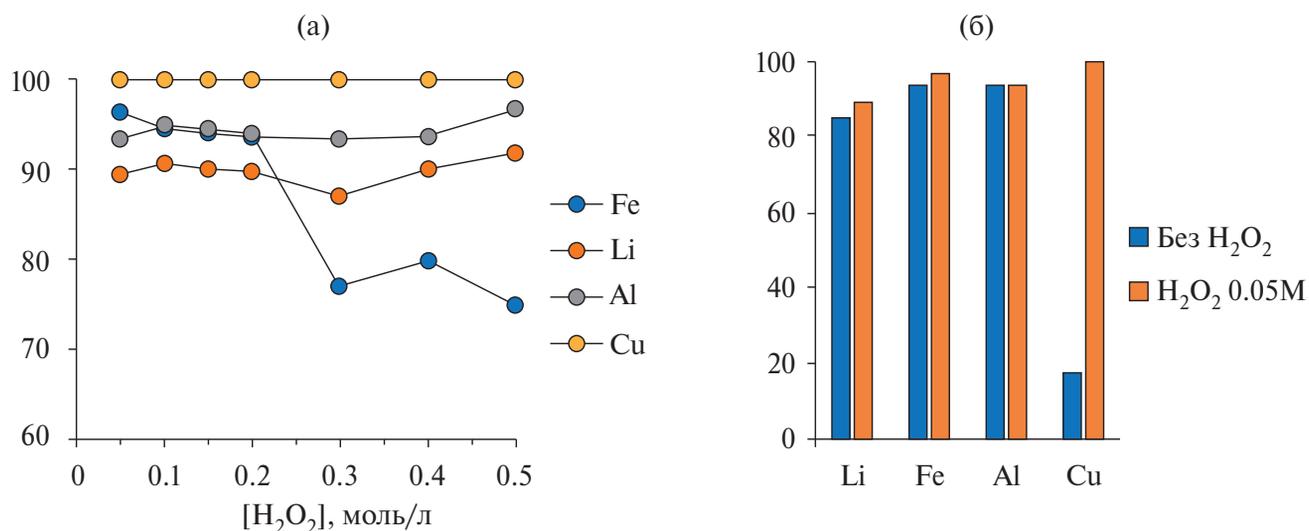


Рис. 8. Зависимость степени выщелачивания от концентрации  $H_2O_2$  (тв : ж = 1 : 25, 25°C, 120 мин, 2 моль/л HCl).

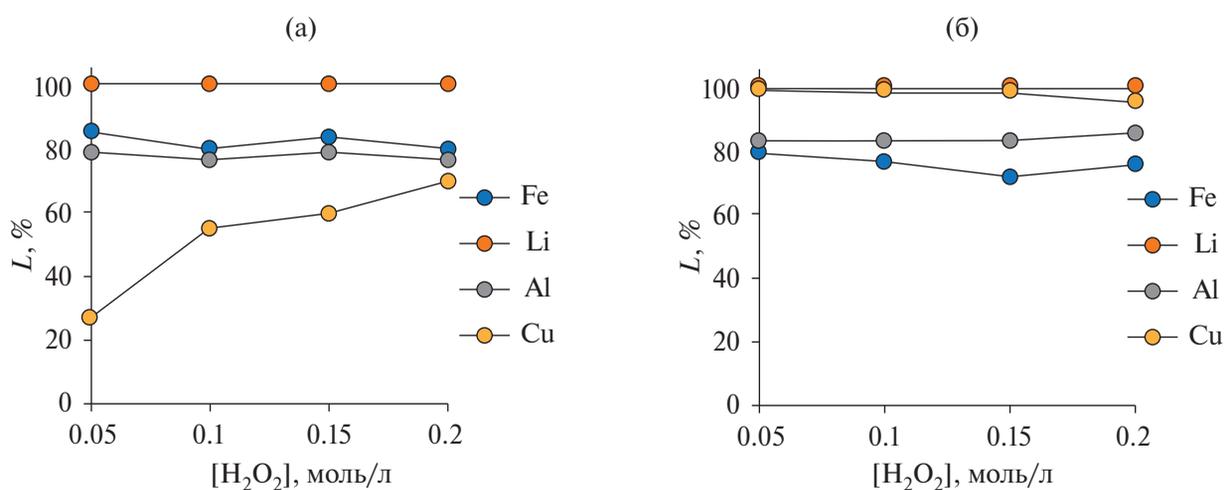


Рис. 9. Зависимость степени выщелачивания от концентрации  $H_2O_2$  (25°C, 120 мин, 2 моль/л HCl) при соотношениях тв : ж = 1 : 10 (а), 1 : 50 (б).

ного выщелачивания основных элементов из отработанных LFP-аккумуляторов при комнатной температуре.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый эффективный метод комплексного выщелачивания Li, Fe, Al и Cu из активных материалов LFP-аккумулятора. Установлен качественный и количественный состав исследуемого аккумулятора. Определены условия выщелачивания, при которых достигается наиболее полное извлечение целе-

вых элементов: 25°C, 120 мин, 2 М раствор HCl, 0.05 М раствор  $H_2O_2$ , соотношение твердое тело : жидкость = 1 : 50. Следует отметить, что процесс выщелачивания с использованием соляной кислоты и перекиси водорода обеспечивает максимальное использование ресурсов отработанного активного материала LFP-аккумуляторов, что имеет широкие перспективы для промышленного применения. Из полученных растворов выщелачивания Li, Fe, Al и Cu могут быть выделены с помощью экстракционного метода.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10275, <https://rscf.ru/project/23-79-10275/>).

Исследования проводили с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликт интересов отсутствует.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The United Nations* // 2015.
2. *The Global EV Outlook* // 2023.  
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
3. *Fallah N., Fitzpatrick C.* // *J. Energy Storage*. 2023. V. 68. P. 107740.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107740>
4. *Fan T., Liang W., Guo W. et al.* // *J. Energy Storage*. 2023. V. 71. P. 108126.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108126>
5. *Hu J., Huang W., Yang L. et al.* // *Nanoscale*. 2020. V. 12. № 28. P. 15036.  
<https://doi.org/10.1039/D0NR03776A>
6. *Yao Y., Zhu M., Zhao Z. et al.* // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018. V. 6. № 11. P. 13611.  
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03545>
7. *Davis K., Demopoulos G.P.* // *RSC Sustain*. 2023. V. 1. № 8. P. 1932.  
<https://doi.org/10.1039/D3SU00142C>
8. *Dobó Z., Dinh T., Kulcsár T.* // *Energy Reports*. 2023. V. 9. P. 6362.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.264>
9. *Zhou L.-F., Yang D., Du T. et al.* // *Front. Chem.* 2020. V. 8.  
<https://doi.org/10.3389/fchem.2020.578044>
10. *Vasconcelos D. da S., Tenório J.A.S., Botelho Junior A.B. et al.* // *Metals (Basel)*. 2023. V. 13. № 3. P. 543.  
<https://doi.org/10.3390/met13030543>
11. *Aaltonen M., Peng C., Wilson B.P. et al.* // *Recycling*. 2017. V. 2. № 4. P. 20.  
<https://doi.org/10.3390/recycling2040020>
12. *Song D., Wang T., Liu Z. et al.* // *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. V. 10. № 1. P. 107102.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107102>
13. *Федорова М.И., Левина А.В., Заходяева Ю.А. и др.* // *Журн. неорганической химии*. 2022. Т. 67. № 7. С. 1000.  
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22070091>
14. *Кожевникова А.В., Уварова Е.С., Милевский Н.А. и др.* // *Теорет. основы хим. технологии*. 2023. Т. 57. № 5. С. 553.  
<https://doi.org/10.31857/S0040357123050111>
15. *Nicol M.J.* // *Hydrometallurgy*. 2020. V. 193. P. 105328.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105328>
16. *Huang Z., Chen T., Zhou Y. et al.* // *Processes*. 2020. V. 8. № 12. P. 1534.  
<https://doi.org/10.3390/pr8121534>
17. *Li H., Xing S., Liu Y. et al.* // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. № 9. P. 8017.  
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01594>
18. *Liu W., Li K., Wang W. et al.* // *Can. J. Chem. Eng.* 2023. V. 101. № 4. P. 1831.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.24617>
19. *Gradov O.M., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A. et al.* // *Metals (Basel)*. 2021. V. 11. № 12. P. 1964.  
<https://doi.org/10.3390/met11121964>
20. *Зиновьева И.В., Федоров А.Я., Милевский Н.А. и др.* // *Теорет. основы хим. технологии*. 2021. Т. 55. № 4. С. 480.  
<https://doi.org/10.31857/S0040357121040199>
21. *Kozhevnikova A.V., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A. et al.* // *Processes*. 2022. V. 10. № 12. P. 2671.  
<https://doi.org/10.3390/pr10122671>
22. *Dong L., Li Y., Shi P. et al.* // *J. Power Sources*. 2023. V. 582. P. 233564.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233564>
23. *Binnemans K., Jones P.T.* // *J. Sustain. Metall.* 2023. V. 9. № 2. P. 423.  
<https://doi.org/10.1007/s40831-023-00681-6>
24. *Kadachi A.N., Al-Eshaikh M.A.* // *X-Ray Spectrometry*. 2012. V. 41. № 5. P. 350.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2412>
25. *Iwai M., Majima H., Awakura Y.* // *Hydrometallurgy*. 1988. V. 20. № 1. P. 87.  
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(88\)90028-X](https://doi.org/10.1016/0304-386X(88)90028-X)

## CO-LEACHING OF Li, Fe, Al, AND Cu FROM ACTIVE MATERIALS OF LFP BATTERIES

A. M. Salomatin<sup>a, b</sup>, I. V. Zinov'eva<sup>a</sup>, Yu. A. Zakhodyaeva<sup>a, \*</sup>, A. A. Voshkin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Moscow, 119071 Russia*

<sup>b</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow, 109028 Russia*

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

Co-leaching of the cathode and anode materials of lithium iron phosphate (LFP) batteries was studied. It was determined that the nature of mineral acid (nitric, sulfuric, hydrochloric) affects the degree of leaching of Li, Fe, Al, and Cu. Hydrochloric acid was chosen as the most suitable leaching agent. The effect of the following parameters of the leaching of active materials was investigated: process duration, temperature, hydrochloric acid concentration, and solid : liquid ratio. For complete leaching of copper, hydrogen peroxide was used as an oxidizing agent. The conditions for the most complete extraction of target elements were found to be 25°C, 2 h, 2 M hydrochloric acid solution, 0.05 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution, solid : liquid ratio 1 : 50. The possibility of sufficiently complete leaching of the main elements from spent LFP batteries at room temperature was demonstrated.

*Keywords:* leaching, lithium-ion batteries, cathode, anode, metal ions