

Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: технологические маршруты, устойчивость и перспективы циркулярной экономики

Литературный обзор

Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: технологические маршруты, устойчивость и перспективы циркулярной экономики

2024

Аннотация

Рост применения литий-ионных аккумуляторов в портативной электронике и электрическом транспорте сопровождается увеличением потока отработавших батарей, содержащих одновременно опасные компоненты и ценные ресурсы. Цель настоящего обзора — систематизировать основные технологические маршруты их переработки и сопоставить их по характеру получаемого продукта, требованиям к сырью, сохранению структуры электродных материалов и перспективам промышленного внедрения. Рассмотрены предварительная и механическая обработка, пирометаллургические и гидрометаллургические процессы, а также прямая регенерация электродных материалов. Показано, что предварительное разделение определяет эффективность последующих стадий, тогда как пирометаллургия сохраняет преимущества при крупномасштабной переработке, а гидрометаллургия развивает селективное извлечение компонентов. Прямая переработка ориентирована на возвращение деградировавших электродных материалов в производство и потенциально сокращает расход энергии и химических реагентов, однако требует дальнейшей разработки и точной адаптации к механизмам деградации различных материалов. Универсального оптимального маршрута не существует: выбор определяется составом сырья и компромиссом между технологическими, экологическими и экономическими критериями. Ключевой перспективой является интеграция низкоуглеродных процессов, расширение перечня перерабатываемых компонентов и согласование технологических решений с регулированием, проектированием аккумуляторов и экономикой пилотного внедрения.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы; переработка; пирометаллургия; гидрометаллургия; прямая регенерация; предварительная обработка; устойчивость; циркулярная экономика.

Актуальность и границы проблемы

Переработка отработавших литий-ионных аккумуляторов формируется на пересечении экологической безопасности, ресурсной политики и развития энергетических технологий. Расширение рынка портативной электроники и электрического транспорта сопровождается ростом объёма аккумуляторных отходов, причём в литературе этот рост описывается как логарифмический. Тем самым проблема имеет не только локальный характер, связанный с обращением с отдельными батареями, но и системное измерение: увеличение масштаба использования аккумуляторов требует заранее сформированной инфраструктуры их безопасного сбора, подготовки и переработки. [1]

Необходимость переработки определяется двойственной природой отработавших батарей. С одной стороны, они могут содержать тяжёлые металлы и токсичные органические вещества, что связывает их накопление с экологическими и санитарными рисками. С другой стороны, катодные материалы содержат ценные и дефицитные компоненты, возвращение которых в хозяйственный оборот создаёт экономический стимул для переработки. Поэтому переработка не сводится к обезвреживанию отходов: она должна одновременно снижать токсичность, предотвращать угрозы безопасности и восстанавливать ресурсный потенциал аккумуляторных материалов. [2][3]

Особое значение имеет литий, поскольку интерес к его извлечению растёт, тогда как глобальный уровень его переработки, согласно приведённым в литературе оценкам, остаётся ниже 1 %. Это расхождение между ресурсной значимостью лития и фактическим масштабом его возврата указывает на незавершённость технологического перехода и на необходимость совершенствования процессов, ориентированных не только на наиболее ценные катодные металлы, но и на комплексное восстановление состава батареи. [4]

Настоящий обзор ограничен технологическими маршрутами переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов, их устойчивостью и условиями промышленного внедрения. В центре внимания находятся стадии предварительной обработки, извлечения компонентов и подготовки продуктов, а также различие между разрушением исходных материалов для получения отдельных компонентов и сохранением функциональной структуры электродов посредством прямой регенерации. Такой подход позволяет рассматривать переработку как элемент циркулярной аккумуляторной экономики, включающей повторное использование, перепрофилирование и собственно возврат материалов в производственный цикл. Для перехода от отдельных технологических решений к устойчивой системе необходимы согласованные действия государства, пользователей, производителей аккумуляторов и переработчиков. [2][5]

Основные понятия и технологическая рамка

Переработку отработавших литий-ионных аккумуляторов целесообразно определять как последовательность взаимосвязанных стадий, а не как единичную операцию. В общем виде маршрут включает предварительную обработку сырья, извлечение компонентов и подготовку продуктов к дальнейшему использованию. К основным направлениям относятся пирометаллургия, гидрометаллургия, механическая обработка, биометаллургия, водное выщелачивание и прямая переработка. При этом конкретная технологическая схема может сочетать несколько подходов, поскольку предварительное разделение подготавливает сырьё для последующих термических, химических или регенерационных операций. [2][1]

Принципиальная граница проходит между извлечением компонентов и прямой регенерацией электродных материалов. В первом случае исходная структура аккумулятора в значительной степени преобразуется, чтобы получить отдельные металлы или соединения. Во втором случае деградировавшие электродные материалы рассматриваются как основа для производства свежих активных материалов. Поэтому результатом прямой пе-

переработки является не только возврат химических элементов, но и стремление сохранить либо восстановить функционально значимую структуру электрода. [6]

Последовательность прямой регенерации включает предварительное разделение, точное возвращение лития и устранение дефектов отработавших электродных материалов. Её замкнутый характер определяется тем, что материал возвращается в производство в форме, близкой к исходному активному материалу, а не обязательно переводится в промежуточный раствор или расплав. Вместе с тем пригодность такого маршрута зависит от конкретного механизма деградации электрода; одна и та же стратегия не может автоматически применяться ко всем типам аккумуляторных материалов. [6][7]

Предварительная обработка выполняет не вспомогательную, а структурообразующую функцию. Она включает разрядку, разборку, удаление катодного материала и связующего, классификацию и разделение. Эти операции повышают извлечение ценных компонентов и снижают последующее энергопотребление, поскольку уменьшают неоднородность сырья и позволяют направлять отдельные фракции на более подходящие стадии. Следовательно, эффективность последующего маршрута частично определяется решениями, принятыми ещё до собственно извлечения металлов или регенерации электродов. [1]

Логика основных стадий переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов

Стадия	Основная функция	Значение для дальнейшего маршрута
Предварительная обработка	Разрядка, разборка, удаление отдельных компонентов, классификация и разделение	Повышение извлечения компонентов и снижение последующего энергопотребления
Извлечение	Пирометаллургическое, гидрометаллургическое или иное преобразование сырья	Получение отдельных металлов, соединений или промежуточных продуктов
Прямая регенерация	Возвращение лития и восстановление дефектов электродных материалов	Получение свежих активных материалов с ориентацией на замкнутый цикл
Подготовка продуктов	Формирование продуктов, пригодных для дальнейшего использования	Определение ресурсной и функциональной ценности результата переработки

Карта технологических направлений

Поле переработки литий-ионных аккумуляторов образуют несколько направлений, различающихся не только используемыми операциями, но и типом сохраняемой ценности. Пирометаллургия и гидрометаллургия преимущественно ориентированы на извлечение компонентов, тогда как прямая переработка стремится сохранить функциональную организацию электродного материала. Механическая и предварительная обработка связывают эти направления, поскольку обеспечивают разделение и подготовку неоднородного сырья. В совокупности они образуют не взаимоисключающие технологии, а набор потенциально комбинируемых маршрутов. [2][1]

Пирометаллургическое направление охватывает связующие вещества и электролиты, катодные и анодные материалы. Его развитие связано с возможностью переработки широ-

кого набора компонентов и пригодностью для крупномасштабных процессов. Меньшие требования к исходному сырью и малый объём сточных жидкостей рассматриваются как факторы, поддерживающие промышленную привлекательность пирометаллургии. Вместе с тем перспективность этого подхода связывается не просто с термической обработкой, а с высокоценным использованием сырья и комплексным извлечением ресурсов. [8]

Гидрометаллургические маршруты формируют отдельную группу процессов извлечения ценных металлов. К её основным подходам относятся выщелачивание, биовыщелачивание и экстракция растворителями. В отличие от общего термического преобразования, данное направление развивает стратегии извлечения и разделения, ориентированные на получение целевых компонентов из подготовленного сырья. Поэтому его аналитическая специфика связана прежде всего с управлением стадиями растворения и последующего выделения продуктов. [3]

Механическая и предварительная обработка выполняют функцию селективной подготовки, которая определяет состав фракций и условия работы последующих стадий. Их значение выходит за рамки физического измельчения или демонтажа: разделение катодных материалов, связующего и других компонентов влияет на полноту извлечения и на энергетическую нагрузку последующего процесса. В этом смысле предварительная обработка является общей основой для пирометаллургических, гидрометаллургических и прямых маршрутов. [1]

Прямая переработка образует наиболее выраженный контраст с маршрутами, ориентированными на извлечение металлов. Её объектом выступает не только химический состав, но и состояние электродного материала после эксплуатации. Процесс предполагает предварительное разделение, возвращение лития и восстановление дефектов, а конечной целью является получение свежего активного материала. Поэтому область применения прямой регенерации связана с теми случаями, когда механизм деградации можно охарактеризовать и соотнести с конкретной стратегией восстановления. [6][7]

Сопоставление основных технологических направлений

Направление	Преимущественный объект обработки	Тип результата	Ключевая область применения
Пирометаллургия	Связующие вещества, электролиты, катодные и анодные материалы	Продукты термического преобразования и извлечённые ресурсы	Крупномасштабная переработка и комплексное использование сырья
Гидрометаллургия	Ценные металлы в подготовленном аккумуляторном сырье	Извлечённые и разделённые компоненты	Выщелачивание, биовыщелачивание и экстракция растворителями
Механическая и предварительная обработка	Смешанное отработавшее аккумуляторное сырьё	Разделённые и классифицированные фракции	Подготовка к последующим технологическим операциям
Прямая переработка	Деградивовавшие электродные материалы	Восстановленные свежие активные материалы	Замкнутый цикл при согласовании метода с механизмом деградации

Методы и доказательная база

Выводы о переработке аккумуляторов в рассмотренных работах опираются на разные типы доказательств. Одну группу составляют технологические характеристики процессов: последовательность стадий, область обрабатываемых компонентов и свойства получаемых продуктов. Другую группу образуют сравнительные оценки энергозатрат, расхода химических реагентов, объёма сточных жидкостей, экологических последствий и масштабируемости. Эти группы нельзя полностью заменить друг другом: технологическая реализуемость ещё не означает оптимальности по совокупности критериев устойчивости. [2][5]

Технологические оценки подчёркивают важность предварительного разделения. Разрядка, разборка, удаление катодного материала и связующего, классификация и разделение повышают извлечение ценных компонентов и снижают последующее энергопотребление. Это позволяет рассматривать предварительную обработку как фактор, влияющий одновременно на качество сырья и на ресурсную нагрузку маршрута. Соответственно, сравнение технологий только по основной стадии — например, по термической обработке или выщелачиванию — может не учитывать вклад начальных операций в общий результат. [1]

Пирометаллургический подход оценивается преимущественно через его охват и пригодность для крупного масштаба. Литература фиксирует развитие процессов переработки основных компонентов аккумуляторов и указывает на меньшие требования к сырью и малый объём сточных жидкостей как на преимущества данного направления. Однако одновременное наличие преимуществ и недостатков означает, что его оценка должна включать не только производительность, но и полноту комплексного извлечения ресурсов. [8]

Гидрометаллургические оценки сосредоточены на выщелачивании, биовыщелачивании и экстракции растворителями. Они позволяют рассматривать переработку как последовательность операций извлечения и разделения, а не как единичное получение смешанного продукта. Вместе с тем сам факт развития стратегий выщелачивания и экстракции не устраняет необходимости сопоставлять их с требованиями к предварительной подготовке сырья и с последующими экологическими и экономическими последствиями. [3]

Для прямой переработки доказательная база включает описание последовательности регенерации, сравнение расхода реагентов и энергии, а также методы характеристики электродных материалов. Прямая регенерация может снижать расход химических реагентов и энергозатраты по сравнению с маршрутами, которые требуют значительного преобразования материалов, и способна частично обращать структурный распад электроактивных материалов. Однако этот вывод имеет потенциальный, а не универсальный характер: практическое внедрение требует дальнейших разработок, а выбор стратегии должен учитывать механизм деградации конкретного электрода. [6][7]

Сравнительная оценка устойчивости необходима потому, что разные маршруты оптимизируют разные параметры. Один процесс может быть удобен для крупномасштабной переработки и образовывать мало сточных жидкостей, другой — обеспечивать более селективное извлечение, а третий — сохранять структуру электродного материала. Поэтому экологические последствия и компромиссы между технологиями следует анализировать с помощью методологий оценки устойчивости, а не сводить сравнение к одному показателю. [5][2]

Критерии сравнительной оценки маршрутов переработки

Критерий	Что позволяет оценить	Связь с технологическим выбором
Состав и неоднородность сырья	Требования к предварительной обработке и устойчивость процесса к вариациям материала	Определяет пригодность маршрута для конкретного потока аккумуляторов
Извлечение компонентов	Полноту возврата ценных веществ и возможность комплексного использования	Особенно значимо для пирометаллургии и гидрометаллургии
Сохранение структуры электрода	Возможность получить свежий активный материал без полного преобразования исходного	Ключевой критерий прямой регенерации
Энергия и реагенты	Ресурсную нагрузку последовательности операций	Позволяет сопоставить преобразующие и прямые маршруты
Экологические последствия	Компромиссы между выбросами, сточными жидкостями и использованием ресурсов	Требует анализа устойчивости, а не одномерной оценки
Масштабируемость	Пригодность технологии для перехода от лабораторного решения к промышленному процессу	Связывает технологические характеристики с условиями внедрения

Синтез результатов и основные дискуссии

Сопоставление направлений не подтверждает существование единственного универсально лучшего маршрута переработки. Пирометаллургия привлекательна для крупномасштабных процессов и предъявляет меньшие требования к сырью, гидрометаллургия развивает селективное извлечение через выщелачивание и экстракцию растворителями, а прямая регенерация ориентируется на возвращение функциональных свойств электродных материалов. Различия между подходами отражают не только конкуренцию технологий, но и разные определения результата: извлечённый компонент и восстановленный активный материал имеют неодинаковую ресурсную ценность. [8][3][6]

Пирометаллургия имеет сильную позицию там, где приоритетом являются масштаб и способность обрабатывать совокупность компонентов, включая связующие вещества, электролиты, катодные и анодные материалы. Её промышленная привлекательность связана с меньшими требованиями к сырью и малым объёмом сточных жидкостей. Однако переход от переработки отдельных фракций к комплексному извлечению ресурсов сохраняет нерешённые проблемы, поэтому масштабируемость сама по себе не равнозначна полноте и устойчивости процесса. [8]

Гидрометаллургия представляет иной тип технологической логики: ценность маршрута определяется возможностью управлять извлечением и разделением компонентов. Выщелачивание, биовыщелачивание и экстракция растворителями формируют набор инструментов для получения ценных металлов из подготовленного сырья. Это направление особенно значимо в тех случаях, когда требуется селективность, однако его результа-

тивность связана с качеством предварительного разделения и с экологической оценкой используемой последовательности операций. [3][1]

Прямая регенерация меняет сам критерий эффективности. В ней оценивается не только количество извлечённого вещества, но и степень сохранения или восстановления структуры электроактивного материала. Потенциальное снижение расхода реагентов и энергии по сравнению с маршрутами, требующими значительного преобразования материалов, делает этот подход привлекательным с точки зрения замкнутого цикла. Вместе с тем прямое восстановление частично обращает структурный распад, а не устраняет необходимость дальнейших разработок; поэтому его преимущества следует формулировать как перспективные и зависящие от конкретного материала. [6]

Ключевым условием применимости прямой переработки является соответствие стратегии регенерации механизму деградации электрода. Сравнительные исследования рассматривают преимущества, ограничения и пригодность различных стратегий для разных аккумуляторных материалов, что исключает перенос единого решения на весь класс батарей. Практический выбор должен основываться на характеристиках материала и на понимании того, какие изменения могут быть обращены, а какие требуют иного маршрута восстановления. [7][6]

Таким образом, расхождения между технологическими подходами не сводятся к простому спору о превосходстве одной операции над другой. Они обусловлены различиями в составе сырья, цели переработки, степени сохранения структуры материалов и выбранных критериях устойчивости. Системные оценки указывают, что каждый маршрут имеет собственные преимущества и проблемы, а конфликтующие цели устойчивого развития затрудняют выделение единственного оптимального варианта. Поэтому перспективной становится интеграция процессов, в которой предварительная обработка, извлечение компонентов и прямая регенерация подбираются с учётом свойств конкретного потока аккумуляторов. [2][5]

Технологическая оптимизация не может быть отделена от условий отраслевого внедрения. Устойчивая аккумуляторная экономика предполагает сочетание повторного использования, перепрофилирования и переработки, а также согласование действий государства, пользователей, производителей и переработчиков. Дополнительными факторами развития выступают проектирование аккумуляторов с учётом последующей переработки, устранение политических пробелов и финансирование пилотных проектов. В результате объектом оптимизации становится уже не отдельная установка, а связанная система движения материалов от производства и эксплуатации до возврата компонентов в новый цикл. [2][5]

Ограничения, пробелы и перспективы

Главное ограничение пирометаллургического направления связано с созданием комплексных процессов, способных одновременно учитывать преимущества и недостатки отдельных операций. Развитие переработки основных компонентов показывает технологическую зрелость направления, но не устраняет задачу полного и высокоценного использования всех ресурсных фракций. Поэтому дальнейшее совершенствование должно быть направлено не только на масштабирование, но и на более комплексное извлечение ресурсов при контроле экологических последствий. [8]

Прямая переработка сталкивается с иной группой ограничений. Для её практического внедрения необходимы дальнейшие разработки, решение выявленных проблем и использование методов характеристики, позволяющих связать наблюдаемое состояние электрода с подходящей стратегией регенерации. Лабораторная демонстрация возможности восстановить материал ещё не гарантирует устойчивого промышленного результата при изменении состава сырья и механизмов деградации. Поэтому масштабирование прямых

маршрутов требует систематического контроля исходных материалов и адаптивного выбора операций. [7]

Отдельный ресурсный пробел связан с литьем. Несмотря на растущий интерес к его извлечению, глобальный уровень переработки лития остаётся ниже 1 %. Эта оценка не означает отсутствия технологических решений, но показывает ограниченный фактический масштаб возврата лития и сохраняющийся разрыв между исследовательским вниманием и отраслевой практикой. Развитие технологий переработки лития поэтому остаётся приоритетным направлением, особенно в составе маршрутов, ориентированных на комплексное восстановление аккумуляторного сырья. [4]

Перспективы отрасли требуют расширения объекта переработки за пределы ценных катодных материалов. Аноды, сепараторы и электролиты также должны включаться в комплексные технологические схемы. Одновременно переход к электродам с более высокой энергоёмкостью будет менять состав будущих потоков отходов, поэтому существующие методы потребуют адаптации к новым материалам и изменяющимся характеристикам аккумуляторов. [2][3]

Наиболее обоснованное направление дальнейшего развития — интегрированные низкоуглеродные процессы, сочетающие энергоэффективность, экономическую реализуемость и комплексное обращение с компонентами аккумулятора. Их внедрение должно поддерживаться не только технологическими разработками, но и проектированием аккумуляторов с учётом переработки, устранением регуляторных пробелов и финансированием пилотных проектов. Системный характер этих задач означает, что промышленный переход определяется взаимодействием технологических решений с экономикой, регулированием и координацией участников цепочки создания стоимости. [1][5]

Заключение

Переработка отработавших литий-ионных аккумуляторов необходима одновременно для снижения рисков, связанных с токсичными компонентами, и для восстановления дефицитных ресурсов. Рост объёма аккумуляторных отходов и низкий глобальный уровень переработки лития показывают, что развитие отрасли ещё не соответствует масштабу ресурсной и экологической задачи. [1][4]

Технологическая карта поля включает предварительную обработку, пирометаллургию, гидрометаллургию и прямую регенерацию. Предварительное разделение является общей критической стадией, пирометаллургия сохраняет преимущества для крупномасштабной переработки, гидрометаллургия развивает селективное извлечение, а прямая переработка предлагает путь к сохранению функциональной структуры электродных материалов. Ни один из маршрутов не может рассматриваться вне состава сырья и цели переработки. [1][8][3][6]

Установленный результат обзора состоит в необходимости многокритериального выбора. Энергозатраты, расход реагентов, объём сточных жидкостей, селективность, сохранение структуры материалов и масштабируемость образуют взаимосвязанную систему критериев, между которыми возможны компромиссы. Поэтому дальнейший прогресс должен быть ориентирован на интегрированные низкоуглеродные процессы, охватывающие катоды, аноды, сепараторы и электролиты и адаптирующиеся к изменяющемуся составу аккумуляторов. [2][5]

Наиболее конкретный исследовательский пробел связан с переходом от технологически перспективных решений к масштабируемым системам, устойчивым к неоднородности сырья и способным обеспечивать комплексное возвращение материалов. Для прямой переработки это означает необходимость дальнейшей характеристики и согласования методов с механизмами деградации; для пирометаллургии — решение проблем комплексного извлечения; для отрасли в целом — согласование технологий с проектированием

аккумуляторов, регулированием и экономикой пилотного внедрения. Именно такой системный переход связывает развитие отдельных методов с формированием циркулярной аккумуляторной экономики. [7][8][5]

Список литературы

1. Kaya, M. Современные технологии переработки литий-ионных аккумуляторов. *Circular Economy*, 2022. SCID: 54.1/yyuxm4mt. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773167722000152/pdf>
2. Du, K.-D., Ang, E. H., Wu, X.-L., Liu, Y. Прогресс в области устойчивых технологий переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Energy & Environment Materials*, 2021. SCID: 54.1/fuzbvn3j.
3. Chagnes, A., Pośpiech, B. Краткий обзор гидрометаллургических технологий переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013. SCID: 54.1/yrjb935g.
4. Bae, H., Kim, Y. Технологии переработки лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов: обзор. *Materials Advances*, 2021. SCID: 54.1/9znh72sw. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2021/ma/d1ma00216c>
5. Zanoletti, A., Carena, E., Ferrara, C., Bontempi, E. Обзор переработки литий-ионных аккумуляторов: технологии, устойчивое развитие и нерешённые вопросы. *Batteries*, 2024. SCID: 54.1/kc2uhkkg. <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/38/pdf?version=1705894348>
6. Wu, J., Zheng, M., Liu, T., Wang, Y., Liu, Y., Nai, J., Zhang, L., Zhang, S., Tao, X. Прямое восстановление: устойчивая технология переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Energy Storage Materials*, 2022. SCID: 54.1/7c347r4c. <http://hdl.handle.net/10072/423090>
7. Ji, H., Wang, J., Ma, J., Cheng, H.-M., Zhou, G. Основы, современное состояние и проблемы технологий прямой переработки литий-ионных аккумуляторов. *Chemical Society Reviews*, 2023. SCID: 54.1/z782g9zu.
8. Zhou, M., Li, B., Li, J., Xu, Z. Пирометаллургическая технология переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: эволюция и проблемы. *ACS ES&T Engineering*, 2021. SCID: 54.1/sruftuu3.