

Технологии переработки аккумуляторов: технологические маршруты, устойчивость и перспективы замкнутого цикла

Литературный обзор

Технологии переработки аккумуляторов: технологические маршруты, устойчивость и перспективы замкнутого цикла

2025

Аннотация

Рост применения литий-ионных аккумуляторов в портативной электронике, электромобилях и системах хранения энергии сопровождается увеличением объёма отработавших батарей, содержащих ценные, дефицитные и потенциально опасные компоненты. Цель обзора состоит в систематизации технологических маршрутов переработки аккумуляторов, сопоставлении их результативности и ограничений, а также в выявлении условий перехода от извлечения отдельных металлов к замкнутому материальному циклу. Рассмотрены предварительная и механическая обработка, пирометаллургия, гидрометаллургия, биометаллургия, ионометаллургия и прямая регенерация электродных материалов. Показано, что промышленная практика преимущественно опирается на пирометаллургические и комбинированные механико-гидрометаллургические схемы, тогда как прямая переработка сохраняет функциональную структуру катодов и потенциально снижает ресурсоёмкость процесса. Вместе с тем универсальный маршрут отсутствует: результат определяется химическим составом батареи, её конструкцией, качеством предварительной обработки, составом исходного сырья и требованиями к конечному продукту. Анализ жизненного цикла, стоимости, безопасности и масштабируемости необходим для корректного сравнения технологий. Главный нерешённый вопрос связан с согласованием высокой степени извлечения отдельных компонентов с полноценным восстановлением материалов, включая литий, графит, электролиты, аноды и сепараторы.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, переработка, пирометаллургия, гидрометаллургия, прямая регенерация, циркулярная экономика, анализ жизненного цикла, замкнутый материальный цикл.

Актуальность и границы проблемы

Переработка аккумуляторов стала самостоятельной технологической и ресурсной задачей вследствие быстрого распространения литий-ионных систем. Рост их производства

для электромобилей, портативной электроники и стационарного хранения энергии неизбежно формирует будущие потоки отходов, для которых требуются безопасные процедуры сбора, сортировки, транспортировки и переработки. Обзоры рынка связывают увеличение объёмов списания с необходимостью одновременно развивать повторное использование, вторую жизнь аккумуляторов и извлечение материалов после окончания срока службы [1][2].

Актуальность переработки определяется не только количеством отходов. Отработавшие аккумуляторы содержат тяжёлые металлы, электролиты, органические компоненты и другие вещества, способные создавать экологические риски при ненадлежащем хранении, захоронении или неформальной переработке. Пути загрязнения включают распространение компонентов в почве и воде, выбросы при термической обработке и воздействие пыли или продуктов горения. Поэтому переработка рассматривается одновременно как средство снижения токсикологической нагрузки и как способ восстановления природных ресурсов [3][2][4].

Ресурсное измерение проблемы связано с ценностью катодных металлов и необходимостью уменьшить зависимость от первичного сырья. Кобальт, никель, медь и литий обладают промышленной и стратегической значимостью, однако их извлечение из отработавших батарей распределено между технологическими маршрутами неравномерно. При этом глобальные показатели переработки остаются низкими относительно темпов производства и накопления отходов; в частности, уровень переработки лития в рассматриваемых обзорах оценивается как менее 1% [5]. Разрыв между выпуском аккумуляторов и мощностями переработки означает, что значительная часть отработавших батарей может направляться на захоронение либо длительное хранение, что не соответствует целям циркулярной экономики [6][7].

Настоящий обзор ограничен технологическими маршрутами переработки преимущественно литий-ионных аккумуляторов и связанными с ними критериями эффективности. Рассматриваются стадии от обеспечения безопасности и предварительной подготовки до получения металлов, солей, прекурсоров или регенерированных электродных материалов. Повторное использование и вторая жизнь рассматриваются как взаимосвязанные этапы управления жизненным циклом, но центральное внимание уделяется именно переработке и возможности замыкания материальных потоков.

Основные понятия и постановка исследовательской проблемы

Переработка занимает определённое место в иерархии обращения с аккумуляторами после завершения их первоначальной эксплуатации. Если аккумулятор сохраняет достаточную функциональность, приоритет может отдаваться повторному использованию или перепрофилированию, то есть применению во «второй жизни» в менее требовательных режимах. Когда дальнейшая эксплуатация становится невозможной или небезопасной, батарея поступает на переработку, где её материалы разделяются, очищаются и преобразуются в продукты, пригодные для последующего использования. Такой порядок связывает технологию переработки с более широкой логикой циркулярной экономики [1].

Вторая жизнь и переработка не являются взаимозаменяемыми понятиями. Повторное использование сохраняет аккумулятор или его модуль как функциональный объект, тогда как переработка разрушает исходную конструкцию ради восстановления материалов. Экологический и ресурсный эффект этих стратегий зависит от химического типа, остаточного состояния батареи, требований к безопасности и существующей инфраструктуры. Поэтому выбор между ними должен учитывать не только техническую возможность продления эксплуатации, но и последующий маршрут обращения с компонентами [1].

Жизненный цикл аккумулятора включает производство материалов и ячеек, сборку батарейной системы, эксплуатацию, сбор и сортировку, транспортировку, разборку и пе-

переработку. На каждом переходе возникают собственные требования к безопасности и качеству информации. Современная практика обращения охватывает нормативные процедуры, сбор, классификацию, транспортировку, обращение с повреждёнными батареями и технологическую переработку [8]. Следовательно, технологический маршрут нельзя оценивать изолированно от системы сбора и предварительной подготовки исходного сырья.

Химический состав определяет не только перечень извлекаемых компонентов, но и возможную последовательность операций. Катоды разных типов требуют различных условий выщелачивания или регенерации; различия затрагивают также связующие, электролиты, аноды, сепараторы и токосъёмники. Конструкция батареи влияет на доступность отдельных фракций, трудоёмкость разборки и экономику последующих операций. Поэтому характеристики конструкции должны учитываться уже при разработке схем переработки, а не только на стадии эксплуатации отходов [9].

Отсюда следует принцип проектирования с учётом перерабатываемости. Он предполагает совместное рассмотрение технологичности производства, разборки, идентификации материалов, разделения компонентов и последующего восстановления. В инициативе BATTERY 2030+ перерабатываемость и технологичность производства включены в число пяти направлений ускорения аккумуляторных инноваций наряду с разработкой материалов, самовосстановлением и операндным сенсированием [10]. В научной и промышленной повестке поэтому соединяются три уровня: выбор химии аккумулятора, конструктивное решение и адаптивность перерабатывающего процесса.

Ландшафт технологических подходов

Технологическое поле переработки образует последовательность взаимосвязанных стадий, а не набор полностью независимых методов. Обычно процесс начинается с безопасного разряда, демонтажа, измельчения, классификации и разделения фракций. Затем применяются термические, химические, биологические или электрохимические операции, а завершается маршрут очисткой и подготовкой продуктов к дальнейшему использованию. Основными направлениями считаются пирометаллургия, гидрометаллургия, механическая и предварительная обработка, биометаллургия и прямая переработка электродных материалов [11][12].

Пирометаллургия использует высокотемпературную обработку и отличается устойчивостью к вариациям исходного сырья. Она позволяет концентрировать металлы в сплавах или иных промежуточных продуктах, однако сопровождается значительными энергозатратами и не обязательно сохраняет исходную функциональность электродных материалов. В промышленной практике пирометаллургическая стадия часто соединяется с последующей гидрометаллургической очисткой, поскольку одной термической обработки недостаточно для получения продуктов, пригодных для повторного производства аккумуляторов [13][7].

Гидрометаллургия основана на выщелачивании, разделении растворов, экстракции растворителями, осаждении и других операциях очистки. Её преимущество заключается в возможности селективного извлечения отдельных элементов и получении соединений заданного состава. К основным подходам относятся кислотное или иное выщелачивание, биовыщелачивание и экстракция растворителями. Однако применение реагентов порождает требования к обращению с растворами, остаточными продуктами и возможными выбросами. Сульфатное выщелачивание рассматривается как единственный крупномасштабный гидрометаллургический метод, лежащий в основе ряда пилотных и демонстрационных проектов [14][15].

Биометаллургические процессы и экологичные варианты выщелачивания рассматриваются как способы снижения опасности реагентов и экологической нагрузки. Их перспек-

тивность связана с возможностью извлекать ценные металлы при более мягких условиях, но степень зрелости, скорость и устойчивость таких процессов пока ограничивают их широкое промышленное применение. ИонOMETаллургия также находится преимущественно на стадии разработки. Показательный пример относится к свинцово-кислотным аккумуляторам: соли свинца растворяют в глубоком эвтектическом растворителе Ethaline 200, образованном хлоридом холина и этиленгликолем в молярном соотношении 1:2, после чего ионы свинца восстанавливают катодным электроосаждением; растворитель может быть возвращён в процесс [16].

Прямая переработка отличается от металлургических маршрутов тем, что стремится сохранить функциональную структуру активного материала. Вместо полного разложения катода и последующего синтеза нового материала используются операции удаления загрязнений, восстановления состава и повторного литирования. Это создаёт возможность получать материал, более близкий к исходному аккумуляторному продукту, и потенциально сокращать число стадий, энергозатраты и объём реагентов [17][18]. Вместе с тем прямая регенерация особенно чувствительна к химическому составу, состоянию электродов и качеству разделения исходных фракций.

Сравнительная матрица основных технологических направлений переработки аккумуляторов

Направление	Основной продукт	Сильные стороны	Ключевые ограничения	Степень масштабирования
Пирометаллургия	Металлы, сплавы, промежуточные продукты	Устойчивость к неоднородному сырью, технологическая надёжность	Высокие температуры, энергозатраты, ограниченное сохранение функциональных материалов	Промышленное применение
Гидрометаллургия	Соли и очищенные соединения металлов	Селективное разделение и получение продуктов заданного состава	Расход реагентов, образование растворов и необходимость их очистки	Промышленные, пилотные и демонстрационные проекты
Механическая и предварительная обработка	Концентрированные фракции, чёрная масса	Подготовка сырья и снижение нагрузки на последующие стадии	Зависимость от конструкции, опасность при разборке и загрязнение фракций	Широко используется как часть комбинированных схем
Биометаллургия и экологичное выщелачивание	Растворы и извлечённые металлы	Потенциально более мягкие условия и снижение токсичности процесса	Скорость, стабильность и ограниченная промышленная зрелость	Преимущественно исследовательская и пилотная стадия

Направление	Основной продукт	Сильные стороны	Ключевые ограничения	Степень масштабирования
Прямая регенерация	Восстановленный катодный материал	Сохранение функциональных частиц, потенциальное снижение энергозатрат и выбросов	Требования к сортировке, удалению связующего и электролита, зависимость от химии	Лабораторные, пилотные и отдельные масштабируемые демонстрации

В промышленном отношении наиболее устойчивыми остаются два комбинированных маршрута: пирометаллургия с последующей гидрометаллургией и механическая переработка, нередко после термической предобработки, с последующими металлургическими операциями [13]. Таким образом, граница между направлениями проходит не столько между отдельными дисциплинами, сколько между различными комбинациями стадий. Универсальность пирометаллургии достигается ценой энергозатрат, селективность гидрометаллургии — ценой химической сложности, а прямая регенерация — ценой повышенных требований к исходному сырью.

Методы и доказательная база оценки технологий

Оценка переработки должна охватывать всю технологическую цепочку. Предварительная обработка включает безопасный разряд, демонтаж, удаление электродных материалов и связующего, классификацию и разделение компонентов. Эти операции способны повысить извлечение ценных материалов и уменьшить последующее энергопотребление, но их результат зависит от конструкции батареи и степени смешения фракций [12]. Ошибка на ранней стадии может изменить физико-химические свойства промежуточного продукта и снизить общий коэффициент переработки либо сделать невозможным применение последующей операции [19].

Для анализа цепочки применяются методы характеризации состава и структуры материалов. Они позволяют определить распределение металлов, фазовый состав, остаточное содержание связующего, свойства электродных частиц и качество регенерированного продукта. При исследовании ионометаллургической схемы для свинцово-кислотных аккумуляторов растворение соединений $PbCO_3$, PbO , PbO_2 и $PbSO_4$ оценивается методом ICP-OES, а механизм электроосаждения исследуется циклической вольтамперометрией, хроноамперометрией, сканирующей электронной микроскопией и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией [16]. Для прямой переработки набор методов характеризации необходим не только для контроля выхода, но и для проверки восстановления электрохимических свойств материала [20].

Экологические последствия сопоставляются с помощью анализа жизненного цикла. Такой подход позволяет учитывать энергопотребление, выбросы, расход первичного сырья, обращение с пластмассами и остатками, а также различия между переработкой и захоронением. Для портативных литий-ионных аккумуляторов переработка по сравнению с захоронением связывается со снижением потребления энергии, выбросов парниковых газов и расхода природных ресурсов. Однако основными источниками воздействия самого процесса могут оставаться производство электроэнергии, сжигание пластмасс и захоронение остатков [21].

Экономическая оценка требует анализа не только стоимости оборудования и реагентов, но и состава входящего потока, цены извлекаемых материалов, масштаба предприятия, логистики и требований к качеству продукта. Системное сравнение коммерческих практик может строиться на качественных матрицах. В одном из исследований процессы 44

коммерческих переработчиков оценивались с использованием матрицы SWAVE по шкале до 20 баллов с учётом стратегической значимости и ценности извлекаемых материалов [22]. Подобные инструменты не заменяют технико-экономического моделирования, но позволяют сопоставлять промышленные практики по единому набору критериев.

Особое значение имеет различие уровней технологической зрелости. Лабораторная демонстрация подтверждает принцип действия на ограниченной массе и контролируемом составе сырья. Пилотный проект проверяет устойчивость процесса, материальные балансы и взаимодействие стадий при увеличении масштаба. Промышленное применение дополнительно требует стабильного снабжения, безопасности, нормативного соответствия, приемлемой стоимости и воспроизводимого качества продукта. Поэтому высокий лабораторный выход нельзя автоматически трактовать как доказательство промышленной конкурентоспособности.

Критерии комплексной оценки маршрутов переработки

Критерий	Что оценивается	Почему критерий необходим
Выход	Доля извлечённых компонентов и потери на отдельных стадиях	Показывает полноту использования исходного сырья
Качество продукта	Чистота металлов, состав солей, свойства катодного материала	Определяет возможность повторного применения и необходимость доочистки
Ресурсоёмкость	Энергия, вода, реагенты и вспомогательные материалы	Связывает технологический результат с затратами и экологическим следом
Экологическое воздействие	Выбросы, отходы, остаточные растворы и использование первичного сырья	Позволяет отличить извлечение металлов от действительно устойчивой переработки
Безопасность	Риски разрядки, демонтажа, термических операций и обращения с реагентами	Определяет пригодность процесса для реальной инфраструктуры
Масштабируемость	Стабильность работы при изменении состава и объёма сырья	Разграничивает лабораторную перспективность и промышленную применимость

Показателен переход от лабораторной прямой регенерации к интегрированным схемам. Описанные процессы могут включать извлечение электролита диоксидом углерода, измельчение, выделение электродов, флотацию, восстановление катода и сборку новых ячеек. В другом варианте предварительная обработка и повторное насыщение литием катодной чёрной массы объединяются без трудоёмкой обработки токсичными растворителями [24][25]. Однако даже такие результаты требуют проверки на более разнообразном сырье и в условиях длительной непрерывной эксплуатации.

Синтез результатов и основные дискуссии

Главное различие между традиционной металлургической переработкой и прямой регенерацией связано с характером конечного продукта. Пирометаллургические и гидроме-

таллургические маршруты обычно дают сплавы, растворы, соли или прекурсоры, которые затем должны быть включены в новый цикл синтеза аккумуляторных материалов. Прямая переработка стремится сохранить функциональные частицы катода и восстановить их свойства без полного разложения и повторного синтеза. Поэтому она потенциально сокращает энергозатраты, стоимость и выбросы углекислого газа, хотя эта возможность зависит от состава сырья и зрелости процесса [17][18].

Традиционные маршруты, тем не менее, сохраняют важное преимущество — относительную технологическую надёжность при неоднородном сырье. Они способны обрабатывать смешанные потоки, тогда как прямая регенерация требует более строгого разделения химических типов и контроля состояния электродов. Именно поэтому промышленная практика пока преимущественно ориентирована на механическую обработку, пирометаллургию и гидрометаллургию. Возникающий компромисс состоит в том, что устойчивость к вариациям сырья может сопровождаться потерей функциональной ценности материалов, а высокая селективность — повышенными требованиями к сортировке и подготовке.

Ещё один устойчивый результат связан с неравномерностью извлечения компонентов. Кобальт, медь и никель обычно являются более привлекательными целевыми металлами, тогда как литий во многих технологических схемах извлекается реже и с меньшим выходом. Графит, марганец и компоненты электролита технически могут быть выделены, но их переработка часто затруднена сравнительно низкой стоимостью и сложностью разделения [13]. Такая селективность объясняет расхождение между высокой эффективностью извлечения отдельных металлов и более широкой целью циркулярной экономики, предполагающей восстановление максимально широкого спектра материалов.

С позиции циркулярной экономики переработка должна оцениваться не только по массе извлечённого металла. Важны пригодность продукта для повторного производства, сокращение потребности в первичном сырье, сохранение материалов внутри аккумуляторной цепочки и минимизация остаточных отходов. Более сложные интегрированные процессы могут обеспечивать более широкий спектр продуктов, но одновременно увеличивают число стадий, расход реагентов и требования к контролю. Следовательно, повышение полноты материального цикла не является автоматически экологически или экономически оптимальным решением [7].

Экологическое преимущество переработки также не является безусловным. Оно зависит от энергетического баланса, источника электроэнергии, состава реагентов, возможности извлекать пластмассы и способа обращения с остатками. Низкотемпературные процессы, способные извлекать больше компонентов, могут иметь меньшую нагрузку, тогда как производство электроэнергии, сжигание пластмасс и захоронение остатков остаются значимыми источниками воздействия [21]. Поэтому сравнение маршрутов требует одинаковых границ системы и сопоставимых функциональных единиц.

Вопрос о существовании универсального оптимального маршрута решается в пользу многокритериального выбора. Конфликт между извлечением металлов, сохранением электродной структуры, снижением энергозатрат, безопасностью и стоимостью не позволяет ранжировать технологии по одному показателю. На выбор влияют химический состав, конструкция батареи, ценность ресурсов, экологическая опасность, нормативные требования и доступная инфраструктура. Методологии анализа устойчивости и жизненного цикла позволяют описывать эти компромиссы, но сами результаты зависят от исходных допущений и сценариев [26][27].

В этой системе прямая регенерация представляет не замену всех существующих маршрутов, а дополнительный уровень технологической специализации. Она наиболее привлекательна там, где химический состав известен, катодный материал можно отделить без существенного загрязнения, а восстановленный продукт может быть возвращён в производство. Металлургические процессы, напротив, сохраняют значение для смешанных потоков, материалов с неизвестной историей и случаев, когда требуется надёжное

извлечение металлов. Рациональная стратегия предполагает сочетание маршрутов и их адаптацию к конкретному входящему потоку.

Перспективность прямой регенерации подтверждается отдельными демонстрациями, но не должна переоцениваться. В одном из масштабируемых процессов регенерированный активный катодный материал обеспечил восстановление электрохимических характеристик на уровне 100% при выходе продукта 91%; демонстрация проводилась на материале из отработанных аккумуляторов электромобилей в масштабе 100 г на партию [25]. Эти показатели свидетельствуют о технологической возможности подхода, но ещё не характеризуют его экономику и устойчивость при промышленной переработке неоднородных потоков.

Итоговая матрица выбора может быть сформулирована следующим образом:

Логика выбора технологического маршрута

Условие исходного потока	Предпочтительное направление	Главный ожидаемый результат	Критическое ограничение
Смешанный и неоднородный поток	Пирометаллургия или комбинированный маршрут	Надёжное концентрирование металлов	Энергозатраты и ограниченное сохранение функциональных материалов
Сортированная фракция с ценными металлами	Гидрометаллургия	Селективное извлечение и получение очищенных соединений	Реагенты, растворы и необходимость очистки
Известный химический состав и сохранённая структура катода	Прямая регенерация	Восстановление функционального материала	Требования к разделению, связующему и электролиту
Поток с низкой ценностью отдельных компонентов	Комбинированный маршрут с поддержкой регулирования	Снижение остаточных отходов и обеспечение обращения со всеми типами батарей	Недостаточная экономическая привлекательность

Ограничения, пробелы и перспективы развития

Современная переработка литий-ионных аккумуляторов остаётся технологически неоднородной и недостаточно зрелой для создания одной надёжной процедуры, применимой ко всем химическим составам и конструкциям. Различия между активными и неактивными материалами, форм-факторами и системами соединения затрудняют стандартизацию операций. Даже достижение уровня извлечения 95% отдельных металлов, предусмотренного европейскими требованиями, представляет сложность для ряда современных батарей [28][8].

Наиболее заметный пробел касается лития и компонентов, не относящихся к наиболее дорогим металлам. Во многих проектах преимущественно извлекаются никель, кобальт, марганец и ограниченное количество лития, тогда как фосфат железа из литий-железо-фосфатных батарей может теряться. Присутствие LFP-батарей в общем потоке способно снижать рентабельность переработки, поскольку традиционная экономика извлечения

ценных металлов для них менее благоприятна [14]. Поэтому развитие селективного выщелачивания, прямой регенерации и технологий работы с низкоценными химическими составами имеет не только техническое, но и системное значение.

Промышленное внедрение прямой переработки ограничивают эффективное разделение компонентов, удаление связующего и извлечение электролита. Эти задачи особенно важны потому, что загрязнение чёрной массы или изменение поверхности частиц может ухудшать повторное литирование и снижать качество восстановленного катода. Даже при сохранении функциональных материалов процесс требует строгого контроля исходной химии и среды восстановления; для различных составов рассматриваются твёрдофазные, водные, эвтектические и ионно-жидкостные среды [17][18].

Недостаточно изучены и процессы переработки анодов, сепараторов, электролитов и полимерных компонентов. Перенос внимания с катодных металлов на полный состав батареи необходим для повышения полноты материального цикла. Продукты гидролиза LiPF_6 могут преобразовываться в полезные соединения, что потенциально снижает загрязнение и зависимость от первичных материалов, однако такие решения требуют дальнейшей проверки по безопасности, стоимости и масштабируемости [29]. Будущее изменение состава электродов с более высокой энергоёмкостью также потребует адаптации перерабатывающих процессов [15].

Разнообразие аккумуляторов будущих поколений усилит значение предварительной сортировки и цифровой информации о составе батареи. Надёжное разделение по типам до начала переработки позволит выбирать соответствующий маршрут и предотвращать смешение несовместимых материалов. Для замкнутого цикла необходим обмен данными о составе исходного сырья и истории обработки промежуточных продуктов, поскольку отсутствие такой информации затрудняет оптимизацию последующих операций [19][28].

Экономика переработки также формирует специфический пробел. Для недорогих батарей стоимость извлечённых материалов может быть недостаточной для покрытия расходов на сбор, транспортировку и переработку. В таких случаях замкнутый цикл не обеспечивается рыночными стимулами самостоятельно, и возрастает значение нормативных требований, ответственности производителей и координации между государством, пользователями, производителями и переработчиками [28][11]. Следовательно, технологическая модернизация должна сопровождаться развитием инфраструктуры и правил обращения с отходами.

Перспективное направление состоит в переходе от отдельных операций к адаптивным интегрированным процессам. Такие схемы должны объединять механическую подготовку, селективное извлечение, прямую регенерацию, обработку электролитов и контроль качества продуктов. Их сравнение следует проводить по многокритериальной модели, включающей выход, качество, энергопотребление, экологический эффект, безопасность, стоимость и масштабируемость. Анализ жизненного цикла и анализ стоимости жизненного цикла должны применяться совместно, поскольку экологически предпочтительный процесс не всегда является экономически жизнеспособным, а низкая стоимость не гарантирует полноты материального цикла [23][27].

Таким образом, наиболее обоснованный исследовательский пробел заключается не в отсутствии отдельных технологий, а в недостаточной интеграции технологических, конструктивных, экономических и нормативных решений. Хорошо изучены базовые металлургические маршруты и отдельные механизмы прямой регенерации; условно поддерживаются преимущества комбинированных и адаптивных схем; спорным остаётся вопрос их сравнительной эффективности при различных химических составах и сценариях энергообеспечения. Недостаточно исследованы полное восстановление лития и неактивных компонентов, масштабирование прямой переработки и согласование проектирования аккумуляторов с будущей переработкой.

Дальнейшее развитие должно включать повторное использование и перепрофилирова-

ние там, где это безопасно, прямую регенерацию пригодных электродных материалов, переработку анодов, сепараторов и электролитов, повышение безопасности демонтажа и создание согласованных цепочек сбора и сортировки. Такой переход требует совместных действий государства, производителей, пользователей и переработчиков, поскольку замкнутый материальный цикл не может быть создан одной технологической операцией [22][2].

Заключение

Переработка аккумуляторов представляет собой не единый процесс, а совокупность технологических цепочек, выбор которых определяется химическим составом, конструкцией батареи, качеством исходного потока и требованиями к конечному продукту. Пирометаллургия сохраняет промышленную надёжность, гидрометаллургия обеспечивает селективное извлечение и очистку, а механическая обработка формирует необходимую основу для большинства комбинированных схем. Биометаллургия и ионометаллургия расширяют поле перспективных решений, но пока не имеют сопоставимой промышленной зрелости.

Прямая регенерация катодных материалов наиболее явно связывает переработку с замкнутым производственным циклом, поскольку сохраняет функциональные частицы и потенциально уменьшает число стадий, энергозатраты и выбросы. Однако её применение требует сортировки, контроля химического состава, эффективного удаления связующих и электролитов, а также подтверждения стабильности при промышленном масштабе. Поэтому она не отменяет традиционные маршруты, а дополняет их в составе адаптивной системы.

Наиболее устойчивый вывод обзора состоит в том, что эффективность переработки нельзя сводить к высокому выходу отдельных металлов. Полноценная циркулярность предполагает восстановление широкого спектра компонентов, получение продуктов, пригодных для повторного производства, снижение экологического воздействия и безопасное обращение с остатками. Нынешний разрыв между извлечением ценных металлов и замыканием материального цикла образует центральную проблему отрасли.

Перспектива развития связана с переходом от металлоориентированной переработки к проектированию аккумуляторов и технологических цепочек как единой системы. Для этого необходимы адаптивные процессы, многокритериальная оценка устойчивости, расширение переработки лития, анодов, сепараторов и электролитов, цифровая информация о составе батарей и согласованные нормативные стимулы. Именно сочетание этих условий может превратить переработку из преимущественно операции извлечения отдельных ресурсов в основу полноценного замкнутого материального цикла.

Список литературы

1. Zhao Y., Pohl O., Bhatt A. I. et al. Обзор тенденций рынка аккумуляторных батарей, их повторного использования во второй жизни и переработки. *Sustainable Chemistry*. 2021. SCID: 54.1/6u84gzxh.
2. Dobó Z., Dinh T., Kulcsár T. Обзор переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Energy Reports*. 2023. SCID: 54.1/42pu3sr6.
3. Zheng X., Zhu Z., Lin X. et al. Мини-обзор переработки металлов из отработанных литий-ионных аккумуляторов. *Engineering*. 2018. SCID: 54.1/42gvcagt.
4. Mrozik W., Rajaeifar M. A., Heidrich O., Christensen P. A. Воздействие отработанных литий-ионных аккумуляторов на окружающую среду, источники и пути загрязнения. *Energy & Environmental Science*. 2021. SCID: 54.1/4s8ec22m.
5. Bae H., Kim Y. Технологии переработки лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов: обзор. *Materials Advances*. 2021. SCID: 54.1/9znh72sw.

6. Mossali E., Picone N., Gentilini L. et al. Литий-ионные батареи на пути к циркулярной экономике: обзор литературы о возможностях и проблемах технологий переработки. *Journal of Environmental Management*. 2020. SCID: 54.1/45ceueup.
7. Velázquez-Martínez O., Valio J., Santasalo-Aarnio A. et al. Критический обзор процессов переработки литий-ионных аккумуляторов с точки зрения циркулярной экономики. *Batteries*. 2019. SCID: 54.1/5kanvqpq.
8. Neumann J., Petraniková M., Meeus M. et al. Переработка литий-ионных аккумуляторов: современное состояние, циркулярная экономика и переработка следующего поколения. *Advanced Energy Materials*. 2022. SCID: 54.1/h2erqdep.
9. Thompson D. L., Hartley J. M., Lambert S. et al. Важность конструкции при переработке литий-ионных аккумуляторов: критический обзор. *Green Chemistry*. 2020. SCID: 54.1/k4q6veas.
10. Fichtner M., Edström K., Ayerbe E. et al. Перезаряжаемые аккумуляторы будущего — современное состояние с точки зрения BATTERY 2030+. *Advanced Energy Materials*. 2021. SCID: 54.1/c3d5dnpm.
11. 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.
12. Kaaya M. Современные технологии переработки литий-ионных аккумуляторов. *Circular Economy*. 2022. SCID: 54.1/yuuxm4mt.
13. Brückner L., Frank J., Elwert T. Промышленная переработка литий-ионных аккумуляторов — критический обзор металлургических технологических маршрутов. *Metals*. 2020. SCID: 54.1/gq7q58ww.
14. Larouche F., Tedjar F., Amouzegar K. et al. Прогресс и современное состояние гидрометаллургической и прямой переработки литий-ионных аккумуляторов и перспективы дальнейшего развития. *Materials*. 2020. SCID: 54.1/vvjg24dh.
15. Chagnes A., Pośpiech B. Краткий обзор гидрометаллургических технологий переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2013. SCID: 54.1/yrjb935g.
16. Ballantyne A. D., Hallett J. P., Riley D. J. et al. Переработка свинцово-кислотных аккумуляторов для двадцать первого века. *Royal Society Open Science*. 2018. SCID: 54.1/b9upjkve.
17. Xu P., Tan D. H. S., Jiao B. et al. Материаловедческий взгляд на прямую переработку литий-ионных аккумуляторов: принципы, проблемы и перспективы. *Advanced Functional Materials*. 2023. SCID: 54.1/remve9p7.
18. Wang J., Ma J., Zhuang Z. et al. К прямой регенерации отработавших литий-ионных аккумуляторов: метод переработки нового поколения. *Chemical Reviews*. 2024. SCID: 54.1/4c2rzywg.
19. Windisch S., Gerold E., Nigl T. et al. Цепочки переработки литий-ионных аккумуляторов: критический анализ современных проблем, возможностей и взаимозависимостей процессов. *Waste Management*. 2021. SCID: 54.1/3ksg8cya.
20. Ji H., Wang J., Ma J. et al. Основы, современное состояние и проблемы технологий прямой переработки литий-ионных аккумуляторов. *Chemical Society Reviews*. 2023. SCID: 54.1/z782g9zu.
21. Boyden A., Soo V. K., Doolan M. Воздействие переработки портативных литий-ионных аккумуляторов на окружающую среду. *Procedia CIRP*. 2016. SCID: 54.1/jbrbbyh.
22. Sommerville R., Zhu P., Rajaeifar M. A. et al. Качественная оценка процессов переработки литий-ионных аккумуляторов. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. SCID: 54.1/ep2t62ar.
23. Biswal B. K., Zhang B., Tran P. T. M. et al. Переработка отработавших литий-ионных аккумуляторов для устойчивого будущего: последние достижения. *Chemical Society Reviews*. 2024. SCID: 54.1/ut2cgdad.
24. Fan E., Li L., Wang Z. et al. Устойчивая технология переработки литий-ионных аккумуляторов и перспективных аккумуляторов: проблемы и будущие перспективы.

- Chemical Reviews*. 2020. SCID: 54.1/p6jpwszs.
25. Sloop S., Crandon L., Allen M. J. et al. Практическое исследование прямой переработки литий-ионных аккумуляторов, отозванных с рынка. *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. SCID: 54.1/uh9nary2.
 26. Gupta V., Yu X., Gao H. et al. Масштабируемая прямая переработка катодной чёрной массы отработавших литий-ионных аккумуляторов. *Advanced Energy Materials*. 2022. SCID: 54.1/sx9zc9dz.
 27. Bankole O. E., Gong C., Lei L. Технологии переработки аккумуляторов: переработка отработавших литий-ионных аккумуляторов с учётом воздействия на окружающую среду. *Journal of Environment and Ecology*. 2013. SCID: 54.1/25yr68vp.
 28. 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.
 29. Doose S., Mayer J., Michalowski P., Kwade A. Проблемы экологичной переработки аккумуляторов и замкнутых материальных циклов: взгляд на будущие поколения литиевых аккумуляторов. *Metals*. 2021. SCID: 54.1/7dhzr42d.