

УДК 351.777.6

JEL: O18, O32, Q38

DOI: <http://doi.org/10.25728/econbull.2021.4.6-ratner>

ДИНАМИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ К 2050 ГОДУ¹

Ратнер Светлана Валерьевна

Институт проблем управления РАН, Москва, Россия,

e-mail: lanarat@ipu.ru; SPIN-код: 7840-4282; <https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>

Ратнер Павел Дмитриевич

CyberHull, Москва, Россия

e-mail: ratner_p.d@gmail.com; SPIN-код: 2902-4701; ORCID ID – нет

Аннотация: Основным препятствием для массового перехода к электротранспорту сегодня является его высокая цена относительно дорожных транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания. Тем не менее дорожная карта декарбонизации мировой экономики предполагает кардинальное увеличение объемов производства и продаж легковых и грузовых электромобилей, а также электроавтобусов. В соответствии с основными положениями теории обучения в производстве, быстрый рост объемов производства электромобилей может способствовать снижению их стоимости. В данной работе анализируются динамика и перспективы дальнейшего развития электромобилей с точки зрения развития технологии производства аккумуляторов. Рассчитывается темп обучения в производстве аккумуляторов, анализируются перспективы появления на рынке новых технологических решений, а также перспективы утилизации использованных электромобильных аккумуляторов.

Ключевые слова: электромобили, аккумуляторы, декарбонизация, темп обучения

THE DYNAMICS AND PROSPECTS OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF ELECTRIC TRANSPORT UNDER CONDITIONS OF DECARBONIZATION BY 2050

Ratner Svetlana Valerievna

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

e-mail: lanarat@ipu.ru; SPIN code: 7840-4282; <https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 20-010-00589 «Разработка методологии и инструментария оценки эффективности вариантов государственной поддержки инновационных транспортных технологий в контексте новой климатической политики России»

Ratner Pavel Dmitrievich

CyberHull, Moscow, Russia

e-mail: ratner_p.d@gmail.com; SPIN-код: 2902-4701; ORCID ID – no

Abstract: The main obstacle to the mass transition to electric transport today is its high price relative to road vehicles with an internal combustion engine. Nevertheless, the roadmap for the decarbonization of the global economy suggests a dramatic increase in the production and sales of electric cars and trucks, as well as electric buses. In line with industrial learning theory, the rapid growth in production of electric vehicles can drive down costs. This paper analyzes the dynamics and prospects for the further development of electric vehicles from the point of view of the development of technology for the production of batteries. The learning rate in the production of batteries is calculated, the prospects for the emergence of new technological solutions on the market, as well as the prospects for the disposal of used electric vehicle batteries, are analyzed.

Keywords: electric vehicles, batteries, decarbonization, learning rate

Введение. Несмотря на то, что современные электрические транспортные средства по-прежнему уступают по экономическим показателям транспортным средствам с двигателем внутреннего сгорания, электромобильные технологии получают все большую поддержку со стороны правительств разных стран в свете новой политики декарбонизации мировой экономики. Отказ от использования углеводородных источников энергии и переход на электрическую энергию, произведенную с низкими уровнями выбросов CO₂, должно внести основной вклад в общее снижение выбросов CO₂ к 2050 году (около 20%). Спрос на электроэнергию должен увеличиться более чем в 2 раза, основной рост спроса произойдет в промышленности, которые оценивается в дополнительные 11 ТВт*час [1]. Наибольший вклад в увеличение спроса внесут металлургические предприятия, которые, как ожидается, электрифицируют свои низкотемпературные и среднетемпературные процессы производства металлов из вторичного сырья [1].

В транспортном секторе использование электричества должно увеличиться с 2% в 2020 году до 45% в 2050 году. Для этого уже к 2030 году доля электромобилей в новых продажах должна составить не менее 60% против 5% в среднем по миру в 2020 году. К 2050 году весь автомобильный парк должен быть электрифицирован, т.е. состоять из электромобилей и автомобилей на топливных элементах. В секторе грузового транспорта электрификация, скорее всего, будет происходить не столь быстро, так как пока что для этого существуют технологические барьеры. Тем не менее, к 2030 году около 25% всех новых грузовых автомобилей должно быть электрифицировано, а к 2050 году их доля должны достичь примерно две трети [1].

Такой бурный рост количества электромобилей приведет к росту спроса на аккумуляторы (более чем в 90 раз) и, как следствие к росту спроса на критические материалы. Например, спрос на литий должен вырасти к 2030 году в 30 раз по сравнению с уровнем 2020 года, а к 2050 году – в 100 раз [2]. Однако можно ожидать и положительных экономических последствий столь бурного роста производства: в соответствии с основными положениями теории обучения в производстве, быстрый рост объемов производства электромобилей может способствовать снижению их стоимости. Целью данной работы является анализ

динамики и перспектив дальнейшего развития электромобилей с точки зрения развития технологии производства аккумуляторов.

Прогнозирование стоимости аккумулятора на основе теории обучения в производстве. Стоимость аккумуляторов для электромобилей в последние годы заметно упала с более чем 1100 долларов США за киловатт-час в 2010 году до средневзвешенного показателя 156 долларов США за киловатт-час (кВт*ч) в 2019 году. Рыночная цена аккумуляторов имеет очень широкий диапазон значений, так как самые низкие цены, как правило доступны только при размещении больших заказов на достаточно мощные аккумуляторы для автомобилей с большим запасом хода. Значительно более высокие цены, чем в среднем, наблюдаются у производителей аккумуляторов небольшими партиями, либо у производителей небольших аккумуляторных блоков, предназначенных для подключаемых к сети гибридных транспортных средств (PHEV) [2].

Учитывая исторические данные о динамике роста рынка электромобилей (<https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>) и используя основные положения теории кривых обучения, можно определить темп обучения в технологии и производства аккумуляторов для электромобилей.

Воспользуемся для расчета темпов обучения в производстве аккумуляторов известной формулой:

$$C(Q) = C_1(1 - \lambda)^{\log_2 Q}, \quad (1)$$

где

C_1 – исходные удельные издержки (затраты на производство единицы продукции);

$C(Q)$ - удельные издержки в конце анализируемого периода;

Q – кумулятивный (суммарный за весь период) объем производства (если оценивается эффект обучения в производстве learning-by-doing) или кумулятивные инвестиции в НИОКР (если оценивается эффект обучения в исследованиях learning-by-searching);

λ - оцениваемый темп обучения в производстве/НИОКР.

Наши расчеты показывают, что темп обучения в производстве аккумуляторов в период 2010-2019 гг. и, как следствие, темп обучения в производстве электромобилей (так как аккумулятор определяется основную компоненту стоимости электромобиля) равен 8,4%

Прогнозирование технической эффективности аккумуляторов. Средняя мощность аккумуляторной батареи для пассажирских электромобилей (включая BEV и PHEV) продолжает расти и на сегодняшний день составляет 44 кВт*ч, по сравнению с 37 кВт*ч в 2018 году. Мощность аккумуляторов для BEV в большинстве стран находятся в диапазоне 50-70 кВт*ч. Это увеличение вызвано двумя тенденциями: 1) модели BEV с увеличенным запасом хода становятся более доступными и пользуются все большим спросом; 2) доля BEV по сравнению с PHEV растет. В странах Азии электромобили BEV, как правило, имеют менее мощные аккумуляторные блоки, нежели в странах Северной Америки и Европы. Рассчитывая темп обучения в производстве аккумуляторов по параметрам технической эффективности получаем значение всего лишь 1%. Возможно, такой результат объясняется тем, что средней энергетической плотностью аккумуляторных блоков, как правило отслеживается по рыночной доле аккумуляторов с катодами различного химического состава. Наиболее распространенным химическим составом катода, используемым в электромобилях, является никель-марганец-

кобальт (NMC). Плотность энергии ячеек с катодами из NMC увеличивается с увеличением содержания никеля. Элементы, в которых используются катоды из фосфата лития-железа (LFP) (в основном используемые в КНР или для тяжелой техники), имеют более низкую плотность энергии, чем элементы NMC. Учитывая вышесказанное, можно полагать, что энергетическая плотность автомобильных батарей также продолжает расти. По оценкам МЭА, в 2019 году 16% электромобилей использовали батареи типа NMC 6222 или выше по сравнению с 7% в 2018 году. При этом доля LFP снизилась с 9,1% в 2018 году до 4,6% в 2019 году [2].

Современные аккумуляторы высокой плотности могут иметь удельную энергию в диапазоне 240-300 Вт*ч/кг, что соответствует плотности модуля (пакета) на уровне 130-200 Вт*ч/кг, однако такие высокие показатели пока достижимы лишь в лабораторных условиях.

Хотя литий-ионная технология за последнее десятилетие добилась огромного прогресса с точки зрения роста энергетической плотности батареи, ее стоимости и срока службы, на сегодняшнем уровне развития технологии все еще остаются существенные возможности для улучшения всех трех ключевых компонент: катодов, анодов и электролитов. Кроме того, последние разработки компаний Contemporary Amperex Technology Co. Limited's (CATL) и Build Your Dreams (BYD) в области дизайна батареи и управления температурным режимом показали, что существует большой потенциал повышения энергетической плотности батарей за счет изменения их структуры, а именно - отказа от промежуточных пакетов. Такая модификация структуры может привести к снижению стоимости и увеличению энергетической плотности на 20% [2].

В то же время долговечность ячеек NMC продолжает увеличиваться. Лабораторные испытания показывают, что цикл и календарный срок службы новых конструкций ячеек может быть до десяти раз выше, чем у современных технологий, что в конечном итоге позволит использовать их как в целях балансировки нагрузки в электросетях, так и для электромобилей.

Таким образом, рассчитанные по историческим данным темпы обучения в производстве можно использовать для прогнозирования стоимости и технической эффективности электромобильных аккумуляторов в перспективе. Однако развитие новых технологий указывает на то, что эта перспектива является краткосрочной.

Новое поколение литий-ионных аккумуляторов, которое должно выйти на рынок в ближайшие пять-десять лет, вероятно, будет иметь более низкое содержание никеля за счет использования никель-кобальт-оксида алюминия (NCA) с содержанием никеля менее 10 или никель марганец кобальта 811. Что касается состава анода, можно допустить рост содержания кремния за счет использования улучшенных связующих веществ и электролитов. Такие инновации должны обеспечить плотность энергии на уровне ячейки до 325 Вт*ч /кг. Если сочетать эти разработки сочетаются с улучшенной структурой, то плотность на уровне модуля (пакета) может достичь 275 Вт*ч/кг. Эти значения приближаются к верхним пределам производительности литий-ионной технологии, любое дальнейшее существенное улучшение потребует кардинальной смены базового технологического принципа.

В то же время, с практической точки зрения далеко не все типы электромобилей обязательно должны иметь аккумуляторы с максимально возможной энергетической плотностью. Это касается городских автобусов или

городских транспортных средств доставки, где ограничения по объему и весу аккумулятора менее строгие. Кроме того, использование аккумуляторов не самых современных моделей вполне оправдано в случае необходимости снижения закупочных цен на электромобили на тех рынках, где доступность транспортного средства более важна, чем его способность преодолевать большие расстояния без подзарядки. Для таких случаев вполне подходят аккумуляторы с катодами LFP в силу хорошей доступности исходных материалов, отсутствия необходимости использования кобальта и достаточно длительного срока службы. В качестве подтверждения возможности развития рынка в этом направлении можно привести недавнее объявление Tesla о сотрудничестве с CATL для работы на китайском рынке и внедрении катодов LFP в технологию производства аккумуляторов [2].

В период до 2030 года литий-ионные аккумуляторы, как ожидается, будут доминировать на мировом рынке электромобилей по трем причинам. Во-первых, эта технология хорошо зарекомендовала себя, а это означает, что в настоящее время имеется значительный опыт ее крупномасштабного освоения и четкое понимание ее характеристик. Во-вторых, к настоящему моменту были сделаны очень большие инвестиции в производство литий-ионных аккумуляторов и цепочки поставок, что представляет собой препятствие для перехода на альтернативные технологии. В-третьих, альтернативные технологии все еще находятся в диапазоне более низких уровней технологической готовности (TRL); ни одна из них до сих пор не использовалась в реальных условиях в коммерческих транспортных средствах [2].

Кроме того, даже после того, как новая технология достигнет необходимого задержки, прежде чем она начнет завоевывать рынок. Необходимы обширные испытания в реальных условиях, развертывание новых производственных мощностей и т.д. Поэтому альтернативные химические компоненты, не требующие значительного технологического переоснащения существующих заводов, лучше подходят для гипотетической быстрой замены литий-ионных аккумуляторов.

Новые технологии аккумуляторов. После 2030 года возможен выход на рынок новых технологий для аккумуляторов, которые будут иметь более высокие технические характеристики. Среди передовых разработок наиболее многообещающим химическим компонентом на ближайшую перспективу является литий-металлический твердотельный аккумулятор. Эта технология была прототипирована различными компаниями и исследовательскими группами, но это пока что не введена в эксплуатацию. Исследователи Samsung разработали прототип с объемной плотностью более 900 ватт-часов на литр (Вт·ч/л) (что соответствует примерно 400 Вт·ч/кг), который способен удерживать 89% своего заряда после 1000 циклов. Технологический стартап Sion Power, утверждает, что их прототип имеет энергетическую плотность 420 Вт*ч / кг и может сохранять 75% своего заряда после 800 циклов [3].

Перспективные направления переработки аккумуляторов. Разработка эффективных способов обращения с использованными электромобильными аккумуляторами имеет решающее значение для дальнейшего развития технологии, так как и существующие, и перспективные технологии производства аккумуляторов задействуют большое количество критически важных материалов с ограниченным количеством заменителей. Стратегию обращения с использованными электромобильными аккумуляторами часто рассматривают в рамках концепции иерархии отходов: сначала сокращение использования, затем

повторное использование, переработка, восстановление энергии, а только как последний этап - непосредственная утилизация. Также данная стратегия рассматривается в рамках хорошо известного в литературе каскадного подхода. Когда аккумуляторы снимаются с электромобиля, они должны быть повторно использованы (например, в качестве стационарных системы хранения энергии), а только после полной утраты потребительских свойств могут быть направлены на переработку. Аккумуляторы могут быть также отремонтированы и повторно использованы в другом электромобилей, например, не требующем большой мощности и длительного времени использования аккумулятора.

Таблица 1

Уровни готовности и свойства прототипов новых видов аккумуляторов*

Прототип / Свойства	Литий-металлический твердотельный аккумулятор	Литиево-серный аккумулятор	Аккумуляторы с ионами натрия	Аккумулятор литий-воздух
Стоимость	1	2	2	1
Срок эксплуатации	1	1	1	1
Гравиметрическая плотность	3	3	1	3
Объемная плотность	3	1	0	3
Доступность материалов	0	2	2	2
Уровень готовности технологии	5	4	3-4	1-2

*в сравнении с литий-ионными: 0 – хуже литий-ионных, 1 – сопоставимо с литий-ионными, 2 – лучше литий-ионных, 3 – гораздо лучше литий-ионных

Источник: составлено авторами на основе данных Energy Technology Perspectives 2020 <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

Однако несмотря на многообещающие преимущества повторного использования аккумуляторов в контексте общего сокращения затрат и расхода критических материалов на производство систем хранения энергии, существует и ряд нерешенных проблем, затрудняющих такое повторное использование. Во-первых, батареи электромобилей по своей конструкции не оптимизированы для выполнения функций стационарных аккумуляторов. Кроме того, перепрофилирование батареи задерживает ее попадание в цикл рециркуляции, предотвращает восстановление критических материалов и препятствует развитию отрасли по переработке отходов, которая для обеспечения своей рентабельности требует больших объемов отходов аккумуляторных батарей. Поэтому среди специалистов существуют серьезные разногласия по поводу того, применимы ли принципы иерархии обращения с отходами к случаю аккумуляторов для электромобилей.

Сегодня срок эксплуатации электромобильных батарей составляет 8-15 лет и, как правило, определяется тогда, когда аккумулятор из-за деградации способен удерживать только 80% от своего первоначального заряда. Скорость деградации

аккумулятора зависит от таких факторов как частота экспозиции экстремальным температурам и режим зарядки (насколько часто происходит полная разрядка батареи). Однако даже по достижении 80% порога аккумулятор может использоваться в случае, если владелец автомобиля совершает только короткие поездки.

В большинстве случаев ключевые компоненты аккумуляторных систем (например, модули) после вывода из эксплуатации остаются в рабочем состоянии. В частности, когда транспортное средство списано из-за столкновения или механического дефекта, модули и ячейки могут быть отремонтированы и повторно использованы в другом электромобиле. Tesla Motors и Nissan придерживаются такой стратегии ремонта и предлагают отремонтированные аккумуляторные батареи в качестве замены по гарантийным случаям и в подержанных автомобилях. Toyota также планирует повторно использовать аккумуляторы в качестве запасных частей (<https://global.toyota/en/newsroom/corporate/28478697.htm>). Списанные литий-ионные аккумуляторы, которые сохраняют 70-80% своей первоначальной емкости, могут быть повторно использованы в менее требовательных стационарных системах хранения энергии, обеспечивая сетевые услуги, такие как сокращение пикового напряжения и / или балансировка прерывистой работы некоторых возобновляемых источников энергии. Переоборудование батареи электромобиля в качестве стационарного накопителя, по оценкам, продлит ее срок службы на 5-15 лет, в зависимости от ее первоначального состояния и характеристик вторичного приложения [4-6]. Однако пока что надежных динамике технических характеристик такой системы недостаточно из-за относительной новизны применения этой технологии.

Необходимо отметить, что повторное использование батарей может стать экономически нецелесообразным, если снижение цен на новые аккумуляторы продолжится. Для использования в качестве стационарного хранилища энергии отработанные батареи должны пройти несколько довольно дорогостоящих и длительных процессов перепрофилирования. Первым шагом является демонтаж и тестирование уровня работоспособности модулей батарей. Затем модули (или блоки) должны быть полностью разряжены, переконфигурированы для удовлетворения энергетических потребностей их нового приложения, оборудованы системой управления батареями и охлаждением и повторно упакованы. Подсчитано, что стоимость перепрофилирования использованной автомобильной аккумуляторной батареи с помощью описанных шагов может составить 25-49 долларов США / кВт*ч, или примерно половину отпускной цены перепрофилированной аккумуляторной батареи [5]. Стоимость может быть снижена, если оборудование эксплуатируется с высокой производительностью и / или информация о состоянии аккумуляторных модулей легко доступна для организации, проводящей перепрофилирование.

Кроме того, перепрофилирование осложняется тем, что химический состав и конструкция используемых ячеек меняются ежегодно и часто не имеет маркировки, а потому может быть неизвестен стороннему специалисту. Это делает процесс тестирования и повторной сборки сложнее, менее безопасным для персонала и более дорогим [7, 8]. Еще одной проблемой является транспортировка использованных батарей, которые по европейской классификации отходов относятся к опасным. Транспортировка опасных отходов является дорогой. Возможным выходом в данной ситуации может быть развитие методов повторного

использования батарей в рамках смежных бизнес-направлений самого производителя электромобилей. Как пример можно и привести предприятие 4R Energy Corporation, которое является «дочкой» Nissan, и инициативу Renault, называемую Advanced Battery Storage. Примеры повторного использования аккумуляторов электромобилей в качестве систем хранения энергии приведены в табл. 2

Таблица 2

Пилотные проекты по повторному использованию батарей от электромобилей

Инициаторы проекта	Функция	Описание проекта	Размер (мощность)
Университет Калифорнии, сетевая компания Davis Micro Grid; компания RePurpose Energy, Калифорнийская энергетическая комиссия, компания Nissan.	Сглаживание пиковой нагрузки	Система хранения энергии на базе бывшего в употреблении аккумулятора Nissan Leaf, которая заряжается от фотоэлектрических панелей и отдает энергию в сеть с 16:00 до 20:00.	287 кВт*час
Муниципалитет города Кемптен, компания Energy Local Storage Advanced System; Местная энергоснабжающая организация	Отбор избыточно генерируемой энергии от ВИЭ	Избыточная энергия, производимая с помощью фотоэлектрической панели, накапливается в перепрофилированной батарее Renault Kangoo, поступает в сеть когда спрос превышает предложение.	95 кВт*час
Муниципалитет города Лунен, компания Daimler Mobility House.	Регулирование частоты	В сотрудничестве с местным энергоснабжающим предприятием, 1 920 б/у модулей установлены на площадке бывшей угольной электростанции для балансировки поставок мощность в сеть.	9,8 Мвт*час
Телекоммуникационная компания China Tower, производитель электромобилей BYD; компании Guoxuan High Tech и YinLong New Energy	Обеспечение резервного питания телекоммуникационных вышек	China Tower планирует заменить свинцово-кислотные аккумуляторы на б/у аккумуляторы от электромобилей на 2 миллионах вышках	30 Квт*час на 1 вышку, всего около 54 ГВт*час

Источник: [2]

С точки зрения макроэкономики, рыночный потенциал перепрофилированных аккумуляторов будет зависеть от соотношения спрос/предложение. Согласно сценарию заявленных политик (Stated Policies Scenario), к 2030 году в мире будет выведено из эксплуатации около 100 гигаватт-часов (ГВт*ч) отработанных аккумуляторов электромобилей (что эквивалентно объему производства аккумуляторов для пассажирских электромобилей в 2019 году). Это составит 6,5% прогнозируемого спроса на батареи в этом году по данному сценарию. По прогнозу Sustainable Development Scenario оценки объемов отработанных батарей лишь немного выше и составляют 120 ГВт*ч, однако из-за более высокого прогнозируемого спроса они составят лишь 4,3% от общего требуемого объема аккумуляторов.

Пока что экономическая жизнеспособность и рыночные стимулы для переработки были ограничены из-за в целом низких цен на сырье и небольших объемов отработанных аккумуляторов для электромобилей. Однако, поскольку растущий рынок электромобилей оказывает дополнительное давление на производство первичных ресурсов, цены на сырье могут вырасти и также могут стать более волатильными.

Поэтому переработанные материалы должны в будущем стать более конкурентоспособными. Экономическая и стратегическая ценность основных материалов, таких как литий и кобальт, может стать движущей силой рециклинга в долгосрочной перспективе. Один из трех ученых, разработавших литий-ионные аккумуляторы и недавно получивших Нобелевскую премию по химии, Акира Ёшино, подчеркнул важность вторичной переработки в обеспечении растущего спроса на материалы [9].

Промышленно-освоенные на сегодня технологии переработки аккумуляторов можно классифицировать на механическую, пирометаллургическую и гидрометаллургическую обработку (табл. 3).

Механическая предварительная обработка аккумулятора в основном состоит из измельчения и сортировки пластиковых, жидких, обогащенных металлами и металлических элементов. После сортировки большая часть медных, алюминиевых и стальных частей восстанавливается. Оставшаяся порошкообразная масса содержит никель, кобальт, литий и марганец и может подвергаться повторному циклу переработки, который включает тепловую обработку, отделение катода от алюминиевой фольги коллектора с помощью химического растворителя, а затем восстановление катодных материалов с помощью гидрометаллургии (<https://northvolt.com/stories/RevoltTechnologies>).

В процессах пирометаллургической переработки используется высокотемпературная плавка (~1500 градусов Цельсия) для производства концентрированного сплава, содержащего кобальт, никель и медь. Затем эти металлы можно извлечь с помощью гидрометаллургического процесса. Литий и марганец в конечном итоге превращаются в шлак, который можно напрямую использовать в строительной отрасли или перерабатывать для получения лития [10].

Методы гидрометаллургической переработки включают выщелачивание, удаление примесей и сепарацию. За выщелачиванием может следовать экстракция растворителем и /или химическое осаждение для извлечения лития, никеля и кобальта (табл. 3).

Таблица 3

Мощности по переработки литий-ионных аккумуляторов

Компания	Уровень технологической готовности	Страна	Технология	Мощность (тонн)
Akkuser Oy	Коммерческий	Финляндия	Механическая	1000
Fortum	Коммерческий	Финляндия	Механическая, термическая и гидро	н/д
Umicore	Коммерческий	Бельгия	Гидро и пиро	7000
Lithion	Коммерческий	Канада	Механическая	2500
Li-cycle	Пилотный	Канада	Механическая	7500
Retriev Technologies	Пилотный	США	Механическая	4500
Accurec	Коммерческий	Германия	Механическая и термальная обработка	2500
Valdi	Коммерческий	Франция	Механическая и гидро	20000*
GEM High-Tech	Коммерческий	Китай	Механическая и гидро	10000
Brunp	Коммерческий	Китай	Механическая и гидро	25000-30000
JX Nippon Mining and Metals	Коммерческий	Япония	Пиро и гидро	5000
NorthVolt	Пилотный	Швеция	Механическая и гидро	н/д

Источник: [2]

В стадии разработки в настоящее время находятся технологии прямой переработки катода (Аргонская национальная лаборатория, США). Прямая переработка повторно синтезирует катодные материалы с помощью различных химических процессов, давая на выходе катодный порошок с аналогичными, если не идентичными новым нетронутым катодным материалам свойствами. Главной особенностью является то, что катодные материалы восстанавливаются в подходящем состоянии для использования в качестве непосредственного сырья при производстве батарей без разделения их на отдельные элементы материала. Преимущество восстановления пригодного для использования катодного материала состоит в том, что он менее энергозатратен, так как исключает необходимость повторного синтеза катодных материалов (лития, никеля, кобальта или марганца) в катодную смесь. После синтеза катод почти вдвое дороже, чем сумма составляющих его металлов [11]. Однако восстановленные катоды можно использовать только непосредственно для производства батарей того же типа, что является значительным ограничением, учитывая быстрое развитие технологий аккумулярования. Другие способы преобразования переработанных катодных материалов в более современные составы (например, использование NMC 111 в качестве сырья для производства NMC 622), пока все еще находится на стадии лабораторных исследований.

Переработка аккумуляторов, как и любой другой производственный процесс, оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Термическая и механическая переработка связаны с большими энергетическими затратами и, как следствие, со значительными выбросами CO₂. При термической обработке дополнительно возникает необходимость утилизации токсичных газов, которая также является энергоемким процессом. Гидрометаллургическая обработка является менее энергозатратной, но связана с использованием опасных химикатов. В то же время необходимо отметить, что существует большой потенциал снижения выбросов CO₂ при переработке за утилизации тепловой энергии, выделяемой при сгорании компонентов батареи (электролит, пластмассы и металлы), а также использования низкоуглеродных или безуглеродных источников энергии. Существующие на сегодняшний день оценки углеродного следа процесса переработки аккумуляторов сильно разнятся. Так, например, Ciez и Whitacre [11] считают, что только прямая переработка катода потенциально может снизить выбросы парниковых газов, определяемые по полному жизненному циклу. Напротив, расчеты [12] показали, что гидрометаллургическая переработка на основе измельчения снизит общий углеродный след батареи на 11,3 г CO₂-экв/км пройденного пути (примерно четверть общего воздействия), если предположить, что восстановленные металлы заменят первичной сырьем в другой отрасли (т.е. по жизненному циклу без обратной связи).

Помимо выбросов CO₂ процессы производства и переработки аккумуляторов оказывают и другие негативные эффекты на окружающую среду. Для литий-ионных аккумуляторов основные воздействия, не связанные с парниковыми газами, включают: выбросы оксида серы (SO_x), потеря биоразнообразия в результате переработки никеля, токсичность добычи кобальта для местных экосистем, использование земельных и водных ресурсов.

Учитывая большой разброс и неоднозначность оценок экологического следа процессов переработки, МЭА признает, что пока что обоснованием политик, стимулирующих переработку, может быть только достижение независимости от внешних поставщиков сырья, но никак не экологические мотивы.

С экономической точки зрения коммерчески-эффективные процессы рециркуляции в основном сосредоточены на регенерации кобальта и никеля в дополнение к более легко перерабатываемым элементам, таким как алюминий, медь и сталь. Извлечение литийсодержащих материалов также технологически возможно, но для того, чтобы привести их в пригодную для дальнейшего использования форму, необходима их дальнейшая обработка [10]. Чтобы замкнуть цикл и повторно использовать восстановленные материалы в новых катодах, качество восстановленных материалов должно быть существенно повышено.

В качестве альтернативы, восстановленные металлы могут быть использованы для производства различных продуктов с менее высокими требованиями к качеству материала. В настоящее время существует пробел в знаниях о методах восстановления и качестве повторно синтезированных катодных материалов, поскольку технология еще не реализована на коммерческой основе (<http://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf>).

Большинство исследований, оценивающих степень извлечения материалов при переработке, оценивают ее в диапазоне 80-100%, однако речь идет о лабораторных условиях.

Переработка материала является экономически целесообразной только в том случае, если ее стоимость ниже рыночной стоимости восстановленных материалов, а это означает, что экономическая целесообразность варьируется в зависимости от химического состава катода, при этом ключевым фактором является содержание кобальта. На практике литий пока что очень редко перерабатывается, так как цена на новый материал составляет всего около 8 долларов США за кг, по сравнению с 30 долларами США за кг кобальта (www.lme.com). Из-за высокой стоимости кобальта производители аккумуляторов предприняли усилия по сокращению содержания кобальта в катоде, благодаря чего появились аккумуляторы NMC 622, NCA и NMC 811 [13]. Таким образом производителям аккумуляторов удалось снизить стоимость катода, однако это также привело к снижению стоимости батареи по окончании ее срока службы. Пока что ключевой компромисс между более дешевым производством и возможностью переработки является ключевым: более дешевые материалы менее вредны для местной окружающей среды и менее энергоемки в производстве, но их использование в аккумуляторных элементах снижает вероятность того, что батареи будут переработаны после окончания срока эксплуатации [10, 14].

В будущем можно ожидать снижения стоимости процесса переработки за счет накапливания больших объемов б/у аккумуляторов и роста объемов переработки. Кроме того, стоимость переработки может быть дополнительно сокращена за счет повышения прозрачности конструкции батарей [15]. Конкретные сметы затрат на промышленную переработку не являются общедоступными. Если цены на сырьевые товары останутся относительно низкими, то переработка б/у аккумуляторов может быть стимулирована только за счет государственного регулирования, такого как введение принципа расширенной ответственности производителя или субсидий.

Аккумуляторы со вторым сроком службы могут создавать экологическую и экономическую ценность, особенно в сочетании с системами возобновляемой энергии. Однако перепрофилирование батареи в новом месте может также усложнить схемы сбора батареи и задержать извлечение критически важных материалов. Четкого ответа нет, поскольку нам еще многое предстоит узнать о затратах, преимуществах и эффективности обоих путей.

Выводы. Так как основной компонентой стоимости электромобиля, отличающей его от традиционного автомобиля, является аккумулятор, прогнозирование стоимости аккумулятора является важнейшим вопросом при прогнозировании динамики развития экономических параметров электромобиля. С позиции теории обучения в производстве (*learning-by-doing*) прогнозирование экономических и технических показателей эффективности электромобиля возможно на основе однокомпонентной кривой обучения. Для этого необходимо оценить темп обучения в производстве аккумуляторов по историческим данным. В соответствии с проведенными расчетами темп снижения стоимости аккумулятора (как основного показателя экономической эффективности) составляет 8,4%, а темп рост энергетической плотности (как основного показателя технической эффективности) составляет 1%. Эти оценки могут использоваться при прогнозировании стоимости электромобилей в условиях наращивания их производства в соответствии с планами по декарбонизации мировой экономики.

В тоже время, проведенный нами анализ перспектив появления на рынке новых технологий производства аккумуляторов показал, что, начиная с 2030 года

возможен полный переход на ресурсосберегающие технологии, сокращающие потребность в литии, кобальте и других ценных металлах, и минералах. Поэтому полученные оценки темпов обучения могут использоваться только при прогнозировании в краткосрочной перспективе.

Еще одним важным вопросом технологического развития электромобилей уже в ближайшие годы станет разработка технологий переработки и повторного использования аккумуляторов для электромобилей. Существующие на сегодняшний день технологии переработки и повторного использования пока не удовлетворяют требованиям экономической целесообразности и экологической эффективности, а потому прогнозировать их динамику развития не представляется возможным.

Литература

1. Net Zero by 2050. A Road map for Global Energy Sector. IEA, 2021.
2. Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive. IEA, 2021.
3. Sion Power (2020), Sion Power Demonstrates Key Electric Vehicle (EV) Battery Performance Requirements in its Lithium-Metal Rechargeable Battery Cell Technology, Accessed March 2020, <https://sionpower.com/2020/sion-power-demonstrates-key-electricvehicle-ev-battery-performance-requirements-in-its-lithium-metal-rechargeablebattery-cell-technology/>
4. Jie Tong, S. et al. (2013), Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. APPLIED ENERGY, 104, 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.046>
5. Neubauer, J. et al. (2015), Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries, www.nrel.gov/publications
6. Hossain, E. et al. (2019), A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917859>
7. Engel, H., P. Hertzke and G. Siccardo (2019), Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage, www.mckinsey.com/industries/automotive-andassembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energystorage
8. Jiao, N., and S. Evans (2016), Secondary use of Electric Vehicle Batteries and Potential Impacts on Business Models. Journal of Industrial and Production Engineering, 33(5), 348–354. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172125>
9. Suga, M. (2019), “Nobel Prize Winner Says Battery Recycling Key to Meeting Electric Vehicle Demand”, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-10-10/nobel-prize-winningsays-battery-recycling-key-to-secure-supply>
10. Dunn, J. B. et al. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling’s role in its reduction. Energy & Environmental Science, 8(1), 158–168. <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>
11. Ciez, R. E. and J. F. Whitacre (2019), Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. Nature Sustainability, 2(2), 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>
12. Sanfélix, J. et al. (2015), Environmental performance of advanced hybrid energy storage systems for electric vehicle applications. Appl. Energy 2015, 137, 925–930.
13. Liu, C. et al. (2019), Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. Journal of Cleaner Production.
14. Harper, G. et al. (2019), Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

15. Gaines, L., K. Richa and J. Spangenberg (2018), Key issues for Li-ion battery recycling. *MRS Energy & Sustainability*, 5, 1–14. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.13>

References

1. Net Zero by 2050. A Road map for Global Energy Sector. IEA, 2021.
2. Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive. IEA, 2021.
3. Sion Power (2020), Sion Power Demonstrates Key Electric Vehicle (EV) Battery Performance Requirements in its Lithium-Metal Rechargeable Battery Cell Technology, Accessed March 2020, <https://sionpower.com/2020/sion-power-demonstrates-key-electricvehicle-ev-battery-performance-requirements-in-its-lithium-metal-rechargeablebattery-cell-technology/>
4. Jie Tong, S. et al. (2013), Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. *APPLIED ENERGY*, 104, 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.046>
5. Neubauer, J. et al. (2015), Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries, www.nrel.gov/publications
6. Hossain, E. et al. (2019), A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917859>
7. Engel, H., P. Hertzke and G. Siccardo (2019), Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage, www.mckinsey.com/industries/automotive-andassembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energystorage
8. Jiao, N., and S. Evans (2016), Secondary use of Electric Vehicle Batteries and Potential Impacts on Business Models. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 348–354. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172125>
9. Suga, M. (2019), “Nobel Prize Winner Says Battery Recycling Key to Meeting Electric Vehicle Demand”, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-10-10/nobel-prize-winnersays-battery-recycling-key-to-secure-supply>
10. Dunn, J. B. et al. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling’s role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158–168. <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>
11. Ciez, R. E. and J. F. Whitacre (2019), Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2(2), 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>
12. Sanf elix, J. et al. (2015), Environmental performance of advanced hybrid energy storage systems for electric vehicle applications. *Appl. Energy* 2015, 137, 925–930.
13. Liu, C. et al. (2019), Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*.
14. Harper, G. et al. (2019), Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
15. Gaines, L., K. Richa and J. Spangenberg (2018), Key issues for Li-ion battery recycling. *MRS Energy & Sustainability*, 5, 1–14. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.13>

Поступила в редакцию 8 ноября 2021 г.