



**Валерий Гончаров,**  
директор Центра  
системного анализа  
и стратегических  
исследований НАН Беларуси



**Наталья Янкевич,**  
заведующая отделом Центра  
системного анализа и  
стратегических исследований  
НАН Беларуси

## Технологические аспекты электромобильности 4.1

Широкое распространение электротранспорта сегодня рассматривается как один из возможных подходов, позволяющих снизить объемы выбросов парниковых газов в атмосферу. Однако решение этой задачи требует не только выработки согласованной политики разных стран в этой области, но и значительных субсидий для реализации соответствующих мероприятий. Совершенствование технологий дает возможность полностью электрифицировать общественный транспорт, а также ускорить динамику микромобильности. Многие эксперты полагают, что к 2030 г. автобусы и двухколесные средства передвижения составят основную долю электротранспортного рынка. В связи с тем, что в настоящее время электромобильность выступает катализатором технологического прогресса, основные тенденции ее развития представляют значительный интерес для широкой научной общественности.

### Аккумуляторные батареи

При этом широкому внедрению электромобильности во многом препятствуют сравнительно низкие характеристики современных тяговых батарей: в частности, они могут обеспечивать максимальный запас хода не более 600 км (в идеальных условиях). Кроме того, время их зарядки не позволяет конкурировать с привычными АЗС, срок их службы ограничен, а емкость заметно снижается с течением времени.

Аккумуляторные батареи являются ключевой технологией в энергетике будущего. Они необходимы в том числе для сглаживания пиков энергии,

вырабатываемой ветряными станциями и солнечными батареями [1, 2]. Вместе с тем данная технология, помимо достоинств, не лишена недостатков. Кроме долгой зарядки, значительных габаритов и массы, аккумуляторные батареи подвержены возгоранию при перегреве (пожар практически невозможно потушить, пока идет химическая реакция), а при отрицательных температурах их емкость значительно снижается. Наиболее широкое распространение приобрели литий-ионные батареи, причем в настоящее время им не существует реальной альтернативы – как по мнению автопроизводителей,

так и компаний, выпускающих аккумуляторы. Все это, однако, не исключает широкого спектра проводимых исследований в области создания зарядных элементов совсем другого типа.

Следует отметить, что литий-ионные батареи становятся все дешевле (с 2010 г. стоимость 1 кВт·ч емкости снизилась более чем в 7 раз), и, по оценкам Bloomberg NEF (BNEF), падение цен продолжится. Однако в последние годы наблюдается замедление темпов снижения их стоимости. Более того, опубликованные в 2022 г. данные свидетельствуют о том, что средняя стоимость литий-ионных аккумуляторов выросла до 160 USD за кВт·ч (1-й квартал 2022 г.) по сравнению с 105 USD за кВт·ч в 2021 г. По мнению экспертов, причиной роста цены могли стать нарушения в цепочках поставок (в том числе их разрыв в связи с введением санкций против российских компаний). Впрочем, сложившийся дефицит может быть преодолен крупными инвестициями в добычу, переработку и производство батарей и их элементов, а также путем диверсификации источников сырья.

Вместе с тем удешевление традиционного элемента питания для электромобилей – тенденция, которая делает принципиально новые аккумуляторы не очень выгодными вследствие их высокой стоимости. И напротив, если уровень цен на литий-ионные батареи не падает, у создателей принципиально иных технологий для зарядки растут шансы вывести на рынок новые типы аккумуляторов.

На современном уровне развития науки и промышленности подобного прорыва пока не произошло, поэтому литий-ионная технология нашла широкое распространение, что связано со значительным увеличением расхода и добычи лития. Лидером такого производства по объему использования карбоната лития в аккумуляторах являются корпорации Panasonic (23% рынка), LG Chem, CATL, BYD и Samsung SDI (75% рынка суммарно). У литий-ионной технологии создания аккумуляторов сохраняется немалый потенциал, что подтверждается не только расширением университетских исследований в этой области, но и возникновением многочисленных стартапов, которые активно работают в области повышения эффективности таких батарей. Например, компания Ionic Materials Inc. (Массачусетс, США) разработала твердый полимер, который может заменить традиционный жидкий электролит в аккумуляторах (не только пожароопасный, но и токсичный). Кроме того, в качестве других преимуществ разрабатываемых батарей (так называемых твердотельных) можно упомянуть более высокую

плотность энергии, возможность использования более мощных зарядных станций и увеличенный срок службы. Изготовление твердотельных элементов может обходиться на 40% дешевле нынешних за счет экономии на материалах и стоимости производства, оборудования и внедрения новых катодов с высокой плотностью энергии. Для такого снижения себестоимости необходимо наладить цепочку поставок ключевых материалов, которые сегодня вообще не задействованы в литий-ионных батареях. Технология твердотельных аккумуляторов, которая может увеличить запас хода электромобилей при сохранении тех же габаритов и массы батареи, осваивается Toyota (инвестировала в разработку почти 14 млрд долл.).

Лаборатория Sila Nanotechnologies (Калифорния, США) разработала порошок на основе кремния, способный повысить производительность литий-ионных батарей на 20%. Значительная часть технической информации не разглашается, однако известно, что в анодах использован кремний, который на атомном уровне способен удерживать больше лития, чем углерод в графитовых анодах, и, следовательно, может накапливать больше энергии. Технология привлекла 125 млн долл. инвестиций. Кроме того, Sila Nanotechnologies заключила договор с BMW для совместной разработки [3].

В настоящее время большинство электромобилей имеют автономный пробег, равный 400–500 км, причем даже у самых современных моделей Tesla Model S этот показатель не превышает 600 км (в реальности запас хода может быть существенно меньше). Однако специалисты, работающие в этой области, полагают, что как только этот показатель превысит величину 700–800 км, спрос на такие автомобили значительно возрастет. В связи с этим основной упор в проводимых исследованиях делается на повышение автономности автомобилей и сокращение времени их зарядки. Следует отметить, что в этом направлении ведутся многочисленные исследования. Так, компания Fisker разработала инновационные «суперконденсаторы» на основе графена, при укомплектовании которыми электромобиль сможет проезжать автономно до 800 км (в серийное производство такие аккумуляторы могут поступить только через несколько лет).

Компания Innolith из Швейцарии также планирует начать выпуск аккумуляторов нового поколения, использование которых позволит увеличить запас хода электромобилей до более чем 1000 км. Опытные образцы батарей, полученные специали-

стами Innolith, имеют плотность хранения 1 кВт·ч/кг, что в 4 раза больше, чем у батарей современных электромобилей. Разработанные батареи отличаются от существующих литий-ионных использованием новых материалов (некой солеподобной субстанции), благодаря которым специалистам удалось резко повысить их возможности по хранению энергии. Кроме того, новые аккумуляторы оказались менее пожароопасными и более долговечными (после 50 тыс. циклов перезарядки они сохранили на 50% больше остаточной емкости). В Innolith считают, что для внедрения технологии в серийное производство потребуется еще 3–5 лет. Эти работы могут стать основой для существенного прорыва в мире электромобилей.

Даже с учетом вышеприведенных исследований многие эксперты полагают, что в ближайшие годы никакой альтернативы литий-ионным технологиям, в которые вложены огромные инвестиции, не появится. Это подтверждает и отчет BNEF: производственные мощности для литий-ионных аккумуляторов увеличились почти втрое за прошедшие 5 лет, и, согласно прогнозам, еще через 5 лет они удвоятся.

В то же время улучшение основной технологии не отрицает появления и развития альтернативных. Например, разработаны так называемые проточные (flow) аккумуляторы, где энергия выделяется за счет реакций в двух резервуарах с жидким электролитом – у анода и катода. Самыми современными их представителями считаются батареи, которые хранят заряд в ионах ванадия, содержащихся в растворе на водной основе (так называемый тип VRB – Vanadium Redox Battery). Такие ионы стабильны и могут долго циркулировать через мембрану без нежелательных побочных явлений. Однако при этом остается проблема стоимости: ванадий – дорогой элемент, а удельная энергоемкость (количество запасаемой энергии на 1 л электролита) VRB остается на низком уровне. Эти батареи больше подходят для энергохранилищ при электростанциях, где их габариты не столь критичны, чем для использования в электромобилях. Стоимость их 1 кВт·ч почти в 4 раза выше, чем у литий-ионных батарей. Поэтому разработчикам проточных аккумуляторов трудно убедить инвесторов, а электромобили остаются главным катализатором радикального роста производства именно литий-ионных батарей: вложения в их совершенствование выглядят более перспективными с финансовой точки зрения.

В этом отношении очень важную роль играют меры по стимулированию рынка. Например, изменения в правилах субсидирования электромоби-

лей на внутреннем рынке могут побудить местных производителей этой продукции скорректировать практику закупок аккумуляторов, передав заказы совместным предприятиям с участием зарубежных компаний. В частности, министерство финансов Китая объявило о сокращении субсидий для некоторых категорий электромобилей (например, для моделей с большим пробегом на одной зарядке и аккумуляторов с высокой удельной энергией). Поэтому если ранее субсидии применялись только к электромобилям местного производства (это являлось причиной того, что китайские производители закупали почти исключительно китайские аккумуляторы), теперь в данном отношении рынок может претерпеть существенные изменения.

Samsung SDI и LG Chem заключили соглашение с китайскими партнерами, снизив стоимость нового производства на 15–20% по сравнению с аналогичным в Южной Корее или других странах (в расчете на 1 кВт·ч емкости средняя себестоимость аккумуляторов Panasonic составляет 111 долл., LG Chem – 148 долл., Samsung SDI – 150 долл., Amperex Technology (CATL) – более 150 долл.) [4]. Кроме того, исследователи из компании IBM создали батарею, более экологичную по сравнению с литий-ионными источниками, в которой не только заменены кобальт и никель в катоде, но и используется инновационный электролит. Новая комбинация материалов позволяет значительно уменьшить формирование литиевых дендритов – микроскопических шипов, разрастание которых приводит к контакту слоев аккумулятора между собой. При этом разработчики не раскрывают, какие именно материалы были применены вместо кобальта и никеля, но сообщают, что добывать их можно из морской воды вместо традиционного способа шахтной добычи. Отказ от кобальта, никеля и других тяжелых материалов позволяет сделать новый источник питания более дешевым. Кроме того, он сможет заряжаться до 80% за пять минут, располагая емкостью 800 Вт·ч/л, что в несколько раз выше существующих литий-ионных аналогов. Эффективность новой батареи достигает 90%, а ее мощность – до 10 тыс. Вт/л.

Согласно данным агентства BNEF, в 2020 г. впервые себестоимость блоков аккумуляторов для электрических транспортных средств (самых дешевых батарей, которые ставятся на автобусы в Китае) упала ниже 100 долл. за 1 кВт·ч емкости. При этом средневзвешенная по объему цена на аккумуляторы для китайских электробусов составила 105 долл. за 1 кВт·ч.

Для легковых электромобилей средняя стоимость батареи достигла в 2021 г. 126 долл. за 1 кВт·ч, из которых 100 приходится на элементы питания и 26 – на их сборку. Таким образом, цена батарейного блока в общей цене автомобиля снизилась до 21%.

Если рассмотреть все аккумуляторы для транспорта, включая электромобили, подзаряжаемые гибриды, мототехнику и т.д., то их средняя стоимость в 2020 г. была на уровне 137 долл. за 1 кВт·ч (для сравнения: в 2010 г. – 1100 долл. за 1 кВт·ч), то есть упала на 89%. По прогнозу BNEF, средняя цена батарей в мире при восстановлении логистических цепочек после 2023 г. может опуститься ниже отметки в 100 долл. Согласно статистике, в последние годы наметилась некоторая тенденция к замедлению данного процесса: в 2019–2020 гг. отмечалось снижение цен только на 13%. С другой стороны, такое же замедление отмечалось и в 2013–2014 гг. – при последующем резком падении рынка на 35%.

Именно дорогие батареи долгое время были главной причиной более высокой стоимости электромобилей по сравнению с машинами с двигателями внутреннего сгорания. Так, согласно оценкам 2020 г., себестоимость батареи на 100 киловатт-часов, заряда которой среднестатистическому электромобилю хватает примерно на 500 км пути, составляла 13 700 долл. К началу 2023 г., если верить прогнозу BNEF (в котором рассматриваются легковые электромобили, автобусы, коммерческие электромобили и стационарные хранилища), средние цены на аккумуляторы ожидалось около 101 долл. за 1 кВт·ч. Хотя в полной мере судить о том, насколько этот прогноз оправдался, можно будет спустя несколько месяцев, после обнародования аналитиками итоговой годовой статистики, предполагается, что именно на этой ценовой отметке у автопроизводителей должна появиться возможность изготавливать и продавать на некоторых рынках массовые электромобили по той же цене, что и сопоставимые машины с ДВС. Имеется в виду – при отсутствии субсидий, но фактические стратегии ценообразования будут варьироваться в зависимости от автопроизводителя и географии.

Снижение цен на электромобили в 2020 г. произошло благодаря увеличению размеров заказов, росту продаж электромобилей и внедрению новых конструкций корпусов для батарей. Новая химия катодов и падение производственных затрат приведут к уменьшению стоимости в ближайшей перспективе. Цены на катодные материалы упали с максимумов весной 2018 г. и в течение 2020 г. пере-

шли на более стабильный уровень. Но даже если цены на сырье вернутся к отметкам 2018 г., это лишь на 2 года задержит достижение рубежа в 100 долл. за 1 кВт·ч, но, скорее всего, не разрушит отрасль. Промышленность становится все более устойчивой к изменению затрат на сырье, а ведущие производители аккумуляторов инвестируют в выпуск катодов и в добычу непосредственно сырья. Их валовая прибыль в настоящее время не превышает 20%, а заводы работают с коэффициентом использования оборудования свыше 85%. Поддержание таких высоких коэффициентов является ключом к снижению цен на ячейки, из которых собираются элементы питания.

Предприятия заинтересованы в массовом производстве аккумуляторных батарей с более высокой плотностью энергии при использовании сплавов литий-никель-марганец-кобальт-оксид (NMC) и литий-никель-марганец-кобальт-алюминий-оксид (NMCA), которые применяются для изготовления катодов. Такие аккумуляторы стали массово выпускаться уже в 2021 г. Однако фосфат лития-железа LFP остается бюджетной альтернативой: он применяется в самых дешевых ячейках ценой 80 долл. за 1 кВт·ч.

Аналитики BNEF считают, что к 2030 г. стоимость аккумуляторов упадет до 58 долл. за 1 кВт·ч за счет новых технологических достижений, причем одной из перспективных технологий являются твердотельные батареи (с твердым электролитом). При этом специалисты Goldman Sachs выпустили доклад, согласно которому из-за массового перехода на выпуск электромобилей цены на батареи, наоборот, начнут снова расти – в среднем на 18% в год; что касается основных материалов для их производства (кобальт, никель и литий), то цены на них повышаются еще с начала 2021 г. По подсчетам аналитиков, если цены, например, на никель вернутся к своим рекордным значениям – на уровне около 50 тыс. долл. за тонну, то каждый электромобиль уже на стадии выпуска подорожает на 1200–1500 долл., что может серьезно замедлить рост потребительского спроса на электротранспорт [5].

Существуют и другие аспекты, которые связаны прежде всего с производством и переработкой аккумуляторов.

Несмотря на значительные исследования в этой области, сегодня не существует ни согласованных стандартов по проектированию литий-ионных батарей, ни единых схем их переработки, несмотря на высокую опасность этих процессов. Как правило,

хлорид лития получают в результате выпаривания из соляных озер с его последующей переработкой для производства энергоносителей. Вместе с тем этот технологический процесс требует большого количества воды (около 1,8 млн л на 1 т лития), что в долгосрочной перспективе влечет за собой экологическую катастрофу, связанную с возникновением ее значительного дефицита. Кроме того, при изготовлении аккумуляторных батарей широко используются кобальт, никель и графит, добыча которых не только вызывает загрязнение воды и почвы, но и влияет негативно на центральную нервную систему людей, работающих на заводах по производству литий-ионных аккумуляторов (их труд вдвое вреднее, чем при изготовлении других типов батарей). При этом наибольшую опасность для здоровья людей представляет процесс извлечения сульфата кобальта и солей лития.

Кроме того, значительные проблемы возникают при эксплуатации и переработке самих литий-ионных батарей: в частности, при их разрушении или повреждении выделяются ионы фтора, которые являются даже более токсичными для человеческого организма, чем свинец. Более того, при этом в атмосферу выбрасывается еще одно ядовитое вещество – СО. Этот газ оказывает значительное пагубное влияние на мышечные ткани и сосуды человека, снижает иммунитет, а также изменяет содержание белков плазмы. Помимо этого, такие биологические яды, как бензол, толуол, стирол и фториды водорода могут стать причиной возникновения аспирационных пневмоний, так как эти вещества вызывают клеточную мутагенность и, обладая острой токсичностью, приводят к разъеданию кожного покрова, а также дыхательных путей. Вследствие дегазации литий-ионных батарей и термической утечки выделяется опасная газовая смесь со взрывоопасными и канцерогенными компонентами, которые оказывают вредное воздействие не только на живой организм, но и на окружающую среду в целом, могут вызвать различные патологии в зародыше. Не следует также забывать, что извлечение лития и кобальта при переработке аккумуляторных батарей (известные технологические процессы достаточно сложны, вредны и энергоемки) наряду с другими проблемами может привести к загрязнению воды и истощению других экологических ресурсов.

По данным британской газеты The Guardian, сейчас в ЕС перерабатывается только около 5% всех литий-ионных батарей. Компания Umicore, лидер в сфере технологий циркулярных материалов с

обширным опытом в области материаловедения, химии и металлургии, вложила 25 млн евро в промышленный завод в Антверпене для организации переработки литий-ионных батарей. Кроме того, компания заключила сделки с Tesla и Toyota с целью извлечения кобальта и никеля. Значительные трудности возникают при восстановлении лития с помощью процессов плавки, так как он смешан с побочным продуктом. Umicore говорит, что они могут выделить литий из побочного продукта, но каждый дополнительный процесс увеличивает стоимость. В свою очередь, высокая стоимость переработки аккумуляторных батарей создает значительные сложности для строительства перерабатывающих заводов. Впрочем, ряд финансовых проблем, связанных с переработкой аккумуляторов, могут быть решены с помощью государственного субсидирования. Однако даже в этом случае отсутствие на данный момент единого стандарта по проектированию литий-ионных батарей и схемы их переработки вносит дополнительные негативные моменты, так как мешает созданию автоматизированного процесса утилизации.

С учетом того, что сама идея замены стандартных двигателей внутреннего сгорания на электрические имеет огромный потенциал для будущего, для ее полного раскрытия необходимо введение общих стандартов на стадии производства, использования и утилизации литий-ионных батарей [6]. К тому же необходимо стремиться к снижению затрат на аккумуляторы, и эта тенденция должна быть достаточно продолжительной, чтобы сократить разрыв в конкурентоспособности между электромобилями и традиционными машинами с ДВС. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Батареи подешевели на 89% за последнее десятилетие. Массовые электромобили уже близко // <https://habr.com/ru/company/dcmiran/news/t/534392/>.
2. Иванов С. Стоимость батарей для электромобилей упала ниже \$100 за кВт·ч // <https://yandex.by/turbo/insideevs.ru/s/news/460802/stoimost-batarej-dlya-elektromobilej-vpervye-upala-nizhe-100-za-kvtch/>.
3. Гагарин В. Батареи для электромобилей – революции не ждем // <https://auto.mail.ru/article/72831-batarei-dlya-elektromobilej-revoljutsii-ne-zhdem/>.
4. Китайские производители электромобилей могут перейти на японские и корейские аккумуляторы // <https://www.ixbt.com/news/2019/04/10/kitajskie-proizvoditeli-jelektromobilej-mogut-perejti-na-japonskie-i-korejskie-akkumuljatory-amp.html>.
5. Evelyn Cheng. Electric automakers must brace for rising battery materials costs, Goldman says // <https://www.cnbc.com/2021/03/24/goldman-electric-cars-face-rising-battery-lithium-nickel-cobalt-costs.html>.
6. Макаренко Н. Электромобиль: токсично и энергоемко. Сказка про экологию // <https://naukatehnika.com/elektromobil-toksichno-i-energoemko.html>.