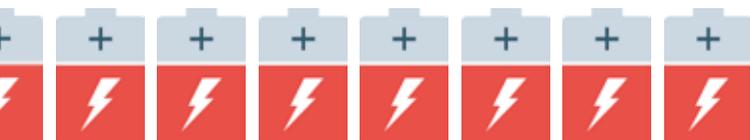


# НА ПУТИ К ПОСТ- ЛИТНИЕВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ



Активное использование возобновляемых источников энергии, электротранспорта, телекоммуникационных и мобильных устройств обеспечили бурное развитие систем накопления электроэнергии (СНЭ), в первую очередь аккумуляторных батарей. Они выступают ключевым компонентом новой энергетики и умных энергетических технологий, мировой рынок которых неуклонно расширяется: за последние 10 лет его объем вырос почти втрое и, по прогнозам аналитиков, к 2025 г. превысит 18 млрд долл. При переходе от углеводородной энергетики в сторону зеленой генерации разработки в этой области по праву рассматриваются как продукты нового технологического уклада. О том, какие подвижки в секторе хранения энергии имеются на счету белорусских ученых, мы попросили рассказать директора НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, члена-корреспондента Валерия ФЕДОСЮКА.





– Валерий Михайлович, какие технологии запасания электрической энергии сегодня в приоритете?

– Наиболее распространены 3 типа СНЭ: свинцово-кислотные, Li-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы. У каждого из них есть преимущества и недостатки. Два первых функционируют на принципе окислительно-восстановительных химических реакций, в третьем реализуется физический принцип накопления заряда. Наиболее динамично развивается производство свинцово-кислотных аккумуляторов, что обусловлено относительно простой и хорошо отработанной технологией их изготовления, а также небольшой стоимостью. По остальным параметрам, таким как запасаемая энергия, глубина разряда и энергоэффективность, данные системы не рассматрива-

ются как перспективные. Суперконденсаторы по сравнению с литиевыми аккумуляторами отличаются значительной мощностью (10 и 1 кВт/кг соответственно) и большим количеством циклов «заряд-разряд», но проигрывают последним по части удельной энергии и стабильности хранения заряда. Таким образом, Li-ионные системы являются лидерами по основным эксплуатационным характеристикам, несмотря на высокую стоимость технологии и ограниченность сырьевых ресурсов.

– Какие наработки в этом направлении есть в НППЦ по материаловедению?

– Из-за стремительного увеличения стоимости лития и ограничения продажи сырья монополистами в области выпуска аккумуля-

торных систем усилия ученых всего мира направлены на поиск более дешевых аналогов на основе распространенных ресурсов. Сотрудниками нашего Центра был разработан новый метод синтеза графеноподобного углерода, не имеющий аналогов и обеспечивающий высокую производительность и экологичность при низкой себестоимости. Как известно, графит – основной материал анода в Li-ионных аккумуляторах, имеет слоистую структуру с малым межслоевым расстоянием. Это и позволяет иону лития как самому легкому и малому (по размеру) из металлов проникать в межслоевое пространство анода и выступать «рабочим» ионом. Наша технология позволяет расщеплять слои графита и формировать графеноподобный углерод

с уникальными свойствами: высокой удельной поверхностью, низкой плотностью, хорошей электро- и теплопроводностью. Данный материал может использоваться как эффективный сорбент гидрофобных жидкостей, полимеруглеродных систем терморегулирования, увеличивать электропроводность и равномерность распределения заряда при добавлении в электродные массы, а также – что самое главное – применяться в суперконденсаторных системах в качестве токоємников и электродных материалов.

Несколько лет назад в НПЦ по материаловедению предложена натрий-ионная технология для накопления энергии. Натрий более распространен по сравнению с литием и значительно дешевле его, к тому же принцип работы Na- и Li-ионных аккумуляторов идентичен. Но при этом необходимо разработать абсолютно новые электродные материалы и электролит, поскольку классический графитовый анод, используемый для лития, не подходит для натрия, емкость которого на порядок ниже. Но теоретически графеноподобный углерод может значительно превзойти популярные аноды Li-ионной технологии.

*– То есть компетенций сотрудников НПЦ в области новых углеродных материалов вполне достаточно для получения постлитиевого накопителя энергии?*

– По этой тематике в рамках Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» мы выпол-

няем проект «Разработать компоненты натрий-графеновых аккумуляторов и создать на их основе прототип накопительного устройства». Его реализация проходит в период с 2022 по 2024 г. На первый год были запланированы патентный поиск, подготовка технического задания, организация участка для работы, изучение анодных материалов и подбор электролита. Для этого выделено 330 тыс. руб., значительная часть из которых потрачена на закупку реагентов и уникального лабораторного оборудования – перчаточного бокса, необходимого для формирования анодных/катодных материалов, сборки ячеек и проведения исследований. Все работы в нем проходят исключительно в высокочистой защитной атмосфере аргона с критически низкими концентрациями кислорода и воды, но, к сожалению, мизерная площадь – около 1 м<sup>2</sup> – не позволяет масштабировать процесс производства даже опытной партии ячеек для натурных испытаний хотя бы на малом электротранспорте – электросамокате.

На второй год реализации проекта предполагается исследовать катодные компоненты, отработать их синтез, подобрать электролит, определить оптимальные комбинации катод/анод/электролит, и только в 2024 г. будет разработан прототип накопителя и состоятся лабораторные испытания.

Уже на первом этапе получены хорошие результаты – созданы анодные материалы на основе графеноподобной матрицы и предложено инновационное решение

по исключению дендритообразования металлической фракции на аноде – использование жидкометаллических сплавов Na-K. Рост дендритов восстановленного металла на аноде – серьезная проблема, которая решена нашими учеными. Она является основной причиной преждевременного выхода из строя аккумуляторов с возможным возгоранием и часто встречается при применении технологичных сверхмощных быстрых зарядок и при эксплуатации в условиях низких температур. Получены экспериментальные образцы анодных материалов с жидкометаллическим Na-K наполнением. Также отмечу, что исполнение анодов из потенциалаобразующего металла – натрия позволяет приблизиться к теоретической, максимальной емкости по нему.

Несмотря на то, что состав работ на текущий год ГКНТ еще не утвержден, дополнительное соглашение с НАН Беларуси не подписано и финансирование работ не начато, мы осуществляем изыскания, запланированные на 2023 г., в полном соответствии с календарным планом. Более того, еще в 2022 г. на инициативных началах провели синтез и характеризацию катодных материалов, что позволило продемонстрировать собранный прототип аккумуляторной ячейки на выставке «Беларусь интеллектуальная».

*– О чем свидетельствуют предварительные результаты, полученные при их исследовании?*

– Наиболее перспективные соединения – аналоги берлин-

ской лазури и фосфат ванадия/натрия. Всего в работе сейчас более 20 составов. Раздельный анализ катодных и анодных процессов, который мы осуществили для экономии металлов и времени, указывает на перспективность предложенных подходов. Так, удельная емкость наших катодных материалов до 120 мАч/г соответствует известным аналогам для Li-ионных систем (80–220 мАч/г), а по анодной емкости отвечает лучшим Li-ионным характеристикам. Но не все так безоблачно в ходе реализации проекта. На данном этапе разработки наблюдается деградация емкости ячеек, что указывает на необходимость оптимизации процессов синтеза и подбора оптимального сочетания катод/анод/электролит. Задача нетривиальная и тяжело решаемая, но, надеюсь, она нам по плечу. Тем более что работы идут с определенным опережением. Уже создан ряд прототипов натрий-графенового аккумулятора в форм-факторе CR2032 – тип «таблетка» и в ламинированной фольге. Их напряжение 3,2–3,5 В, что полностью соответствует аналогам Li-ионных аккумуляторов. Конечно, представленные прототипы не оптимальны, и мы будем их совершенствовать, ведь на этих моделях шлифуются процессы сборки ячеек. Бесспорно, для успешного подбора оптимальных комбинаций требуется модернизация технологической и исследовательской базы, поскольку все наши начинания лимитированы размером перчаточного бокса.

– Для рассмотрения практической реализации разрабатываемой техно-

*гии требуется поэтапное масштабирование процесса. Есть ли возможность в нынешних условиях осуществить его в Центре?*

– Еще раз подчеркну, что выполняемый проект является мероприятием по научному обеспечению программы, а представленная технология – лабораторной, которая не претендует даже на опытную партию. Чтобы понять всю сложность технологического процесса изготовления СНЭ, необходимо ознакомиться со схемой уровня готовности технологии, или TRL, в области изготовления металл-ионных аккумуляторов, разработанной ведущими международными экспертами и опубликованной в январе 2023 г. в журнале Nature. Она включает в себя этапы от формулировки идеи до масштабного производства формата «гигафабрика». Аналитики отмечают, что максимальные риски возникают на этапе формирования идеи и демонстрации ее работоспособности, а финансовые затраты растут при увеличении уровня TRL. Наш текущий уровень соответствует TRL-3/TRL-4 и предполагает объемы финансирования, согласно отсылкам к мировой практике, от 1 до 10 млн долл., что обусловлено в первую очередь необходимостью технологического переоснащения. В рамках проекта нам приходится довольствоваться куда более скромной суммой. Кроме того, перед нами поставлена новая задача – изготовить опытную партию аккумуляторов и передать ее для испытания на малом электротранспорте, а это уровень TRL-5 с еще более серьезными финансовыми вложениями, по оценкам меж-

дународных экспертов, не менее 50–100 млн долл. При переходе от формата ячейки типа «таблетка» до батареи электросамоката и электромобиля необходимо увеличить объемы только катодного материала в 100 тыс. раз и в последующем – еще в 170. Это справедливо и для других компонентов батареи – анодных материалов и электролита.

При масштабировании требуется учитывать и неминуемые риски, технологические и технические проблемы, которые не могут быть обнаружены в ходе выполнения НИОКР. Иными словами, не все то, что было работоспособным на лабораторном уровне, может эффективно использоваться при производстве опытной партии. К примеру, ряд исследований демонстрировал значительный рост емкости и мощности Li-ионного аккумулятора при добавлении в анодный материал оксида кремния. Но при переходе от экспериментальных (лабораторных) к опытным образцам было отмечено разрушение анодного материала за счет существенного расширения кремния при интеркаливании ионов лития. И наоборот – использование не самого перспективного с точки зрения лабораторной технологии, но эффективно масштабируемого материала (железо-литий фосфат) приводило к значительному снижению стоимости аккумулятора. Таким образом, масштабирование – не менее сложная задача по сравнению с НИР.

На сегодняшний день в лабораторных условиях можно формировать в ограниченных объемах катодные и анодные материалы и отдельные небольшие ячейки. По сути, это

ремесленничество или кустарное производство «на коленках», что не позволяет выпустить опытную партию и провести испытания даже на малом электротранспорте.

– Исходя из анализа мирового опыта, какие факторы необходимы для создания конкурентоспособного производства аккумуляторов?

– В настоящее время в мире вложены миллиарды долларов в развитие Li-ионной технологии на уровне научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских разработок, не говоря уже о производственных мощностях. Сотни научных лабораторий, оснащенных по последнему слову техники, проводят разработки в области оптимизации литиевых систем. Конкурировать с ними нет никакого резона – ни с точки зрения финансовой составляющей, ни технологической оснащенности, ни кадрового потенциала. Однако если базироваться на своих компетенциях в области новых углеродных материалов, вполне возможно создать отечественный Na-графеновый аккумулятор. Но и тут требуется сопоставление уровня задачи, технологического обеспечения и объемов финансирования. Так, компании из КНР на этапе формирования прототипа и перехода к опытной партии Na-ионной батареи получали более 14 млн долл. в первом раунде финансирования. Как показывает практика, ключевым условием снижения стоимости итогового продукта является четкая дифференциация работы, узкая специализация на конкретном задании.

Принято выделять 6 основных задач при производстве и эксплуатации аккумуляторных батарей: добыча, транспортировка, переработка сырья; синтез катодных и анодных материалов, электролита; формирование анода/катода, сепаратора, электролита, корпусов, токоъемников и т.п.; корпусирование ячеек и набор аккумуляторных батарей из них; интеграционная задача, связанная с разработкой систем управления батареей, аналитикой применения, продажами и т.п.; переработка аккумуляторов – утилизация отработанных ячеек с минимальным вредом для экологии и извлечением полезных компонентов. В Беларуси имеются компетенции во всех 6 направлениях, но с экономической точки зрения наиболее перспективно развитие интеграционной задачи – формирование батарей из исходных ячеек и разработка систем управления батареей.

В среднем стоимость строительства производства – 100–150 млн долл. на 1 ГВт×ч/год (данные справедливы для условий строительства в КНР, и требуется учитывать, что санкционное давление и современная геополитическая обстановка могут приводить к удорожанию). Но даже огромные финансовые вливания не являются гарантией успеха. Тому пример – обанкротившиеся производства «Лиотех» (РФ) и «БритишВольт» (Великобритания). Хотя в нашей стране нет предприятий, изготавливающих металл-ионные ячейки, но есть компании, осуществляющие сборку аккумуляторов из готовых ячеек для заданных применений и разрабатывающие собственные системы управления батареями.

– Следовательно, в одиночку отечественным разработчикам справиться с такой затратной задачей практически невозможно. Какие шаги могут облегчить ее решение?

– Для создания накопителей энергии необходимо привлечь исследовательский и производственный потенциал Союзного государства. Механизмом сотрудничества на первом этапе предлагаемого комплекса мер могут являться научно-технические программы Союзного государства (сейчас активно разрабатывается концепция программы «Союзный накопитель»), целевые и специализированные проекты «Росатома» и ООО «Рэнера», кооперация с крупными научными центрами с уникальной инфраструктурой типа Объединенного института ядерных исследований и Курчатовского института.

На первом этапе предлагается установить партнерские связи с ведущими научными центрами, обладающими необходимыми компетенциями в данной области, определить специализацию каждого из них и сформировать дорожную карту на основе реализации совместных НИР – НИОКТР. На втором этапе необходимо наладить взаимодействие с крупным промышленным партнером, к примеру с ГК «Росатом», его подразделением «Рэнера» на базе производства в Московском регионе, а также с заводом в Калининградской области, где в 2025 г. планируется ввести в эксплуатацию гигафабрику по изготовлению ячеек на 4 ГВт×ч/год. Сумма инвестиций – более 640 млн долл. В рамках сотруд-

ничества предстоит решить конкретные задачи по оптимизации Li-ионной технологии и внедрению в практику постлитиевых технологий. На третьем этапе предполагается изготовление накопителей энергии из выпущенных на гигафабрике ячеек. Напомню, что аккумуляторные батареи – это не только производство ячеек, но и сборка на их основе батарей и систем управления ими, что составляет около 40% от стоимости готового продукта. Это как раз те компетенции, которыми обладают белорусские организации, – реализация сборочной и интеграционной задач.

На сегодняшний день уже установлены прочные контакты с такими научными лидерами из стран ЕАЭС в области накопителей энергии, как химический факультет МГУ – флагман в области разработки катодных материалов; «Сколтех», выпускающий их опытные партии объемом до 1,5 тыс. т в год; Тамбовский государственный университет, известный как лидер в синтезе углеродных материалов для анодных применений; Институт аккумуляторов Назарбаевского университета в Казахстане, разрабатывающий электролиты и сепараторные материалы. Требуется также активизация и отечественных организаций химической специализации.

*– Валерий Михайлович, предположу, что для создания устройств накопления электроэнергии и реализации комплексных решений с их использованием необходим пул квалифицированных кадров. На развитие каких компетенций необходимо ориентироваться прежде всего?*

– Конечно, кадровый вопрос и отсутствие инженерных и инжиниринговых навыков в этой предметной области – отдельный вопрос и чрезвычайно острая проблема. По оценкам специалистов, для гигафабрики, которую строит ООО «Рэнера» в Калининградской области, требуется не менее 200 профильных специалистов в области физико-химических технологий накопителей энергии. К сожалению, как показывает практика, их катастрофически не хватает. К примеру, в международной конференции по проблемам накопителей энергии, которая проводилась в 2021 г. на химическом факультете МГУ, участвовало только 230 специалистов такого уровня компетенций. Поэтому при формировании производства аккумуляторных ячеек в первую очередь требуется решать вопрос подготовки соответствующих кадров, ориентированных на работу в сфере СНЭ. Данная отрасль является высокотехнологичной, и для ее обслуживания просто выпускников химических вузов недостаточно – требуется разработка специализированных курсов на базе химических факультетов и электрохимических кафедр БГУ, БГТУ, БГУИР. В свою очередь, НПЦ по материаловедению может стать хабом по подготовке таких работников.

*– Если резюмировать нашу беседу, какой наиболее оптимальный сценарий с точки зрения опережающего принципа развития вам предстоит реализовать?*

– На-графеновая технология, над которой работают сотрудники Центра по материалове-

дению, является наиболее перспективным постлитиевым решением. Проект по созданию таких аккумуляторов идет в полном соответствии с календарным планом, а по некоторым направлениям – с опережением графика. Постановка новой задачи – выпуска опытной партии и ее эксплуатационных испытаний – требует кардинального пересмотра текущего проекта с выделением значительных объемов финансирования на техническое оснащение и организацию опытного участка. Надеюсь, что эти средства будут выделены. При этом следует серьезно оценить экономическую целесообразность и риски при конкуренции с крупными производителями из КНР и впоследствии из РФ. На наш взгляд, наиболее правильным решением станет комплекс мер межотраслевого характера и встраивание в цепочку на базе мощного индустриального партнера в области производства ячеек, например российского, а также развитие сборки аккумуляторных батарей и систем их управления под задачи отечественной промышленности. То есть нам надо занять свою нишу в соответствии с нашими компетенциями. ■

Ирина ЕМЕЛЬЯНОВИЧ

