

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Петров Константин Николаевич

Аспирант кафедры электрохимии, Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии разработки и внедрения химических источников тока нового поколения для электрического транспорта. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию физико-химических процессов, протекающих в твердотельных (Solid-State), натрий-ионных (Na-Ion) и литий-серных (Li-S) аккумуляторных системах. Исследуются механизмы ионного транспорта, динамика образования дендритов, а также электродные интерфейсы на границе раздела фаз. Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и экономическим ограничением классических литий-ионных батарей (NMC, LFP) по удельной энергоемкости, скорости зарядки и термической стабильности. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели переноса заряда, электрохимическая кинетика твердых электролитов (сульфидных, оксидных и полимерных), а также архитектурные подходы компоновки Cell-to-Pack (CTP) и Cell-to-Chassis (CTC). Доказывается высокая эффективность использования твердотельных электролитов и альтернативных катионов для радикального повышения запаса хода и безопасности электромобилей. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в промышленное производство химических источников тока и математические системы управления батареями (BMS).

Ключевые слова: электромобили, химические источники тока, твердотельные аккумуляторы, натрий-ионные батареи, литий-серные аккумуляторы, удельная энергоемкость, твердый электролит, дендриты, безопасность, Cell-to-Pack.

DEVELOPMENT OF NEW TYPES OF BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES

Petrov Konstantin Nikolaevich

Postgraduate Student of the Department of Electrochemistry, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for developing and implementing next-generation chemical power sources for electric transport. The author performs a deep theoretical decomposition of physicochemical processes occurring in solid-state, sodium-ion (Na-Ion), and lithium-sulfur (Li-S) battery systems. Ion transport mechanisms, dendrite formation dynamics, and solid-electrolyte interphase (SEI) stability are thoroughly examined. The relevance of the study is driven by the performance limits of conventional lithium-ion batteries (NMC, LFP) regarding energy density, fast charging capabilities, and thermal safety. Within the framework of the article, mathematical models of charge transfer, electrochemical kinetics of solid electrolytes (sulfide, oxide, and polymer types), and structural integration approaches such as Cell-to-Pack (CTP) and Cell-to-Chassis (CTC) are considered in detail. The high efficiency of employing solid electrolytes and alternative cation chemistries to increase driving range and operational safety is proved. The practical significance lies in the possibility of direct integration into battery manufacturing processes and Battery Management Systems (BMS).

Keywords: electric vehicles, chemical power sources, solid-state batteries, sodium-ion batteries, lithium-sulfur batteries, energy density, solid electrolyte, dendrites, safety, Cell-to-Pack.

Введение

Проблема создания и промышленного освоения высокоэффективных аккумуляторов нового поколения является одной из наиболее фундаментальных задач современной электрохимии и транспортного машиностроения, стоящей на стыке материаловедения, химической физики и инженерной термодинамики. Традиционные литий-ионные аккумуляторы с жидким органическим электролитом, несмотря на постоянную оптимизацию, практически достигли своего теоретического предела по удельной гравиметрической и объемной энергоемкости (250-300 Вт · ч/кг). Кроме того, риски термического разгона (Thermal Runaway), вызванные воспламенением жидких растворителей, и зависимость мировой промышленности от дефицитных металлов (кобальта, никеля, лития) создают системный барьер для полного перехода глобального автотранспорта на электрическую тягу.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки принципиально новых электрохимических платформ, способных обеспечить запас хода электромобиля свыше 800-1000 на одном заряде, время ультрабыстрой зарядки до 80% за 10-15\ минут и устойчивость к эксплуатации в широком температурном диапазоне (от -40°C до +60°C). Целью работы является комплексный теоретико-экспериментальный анализ новых электрохимических систем, включая твердотельные аккумуляторы, натрий-ионные накопители и литий-серные структуры, а также определение ключевых направлений оптимизации их межфазных границ. Для достижения поставленной цели автор решает задачи математического моделирования кинетики ионного транспорта, оценки механических напряжений в твердых электролитах и определения технологических условий для перехода от лабораторных ячеек к масштабному производству.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат исследования основан на междисциплинарном подходе, сочетающем методы квантово-химического моделирования (теория функционала плотности, DFT), электрохимическую импедансную спектроскопию (EIS), сканирующую электронную микроскопию (SEM) и методы нелинейного дифференциального исчисления для описания переноса массы и заряда. В качестве основного объекта исследования рассматриваются три перспективные группы батарей: твердотельные системы с металлическим литиевым анодом и сульфидными/оксидными электролитами; натрий-ионные системы на основе бессвинцовых бета-глиноземов и аналогов берлинской лазури; литий-серные ячейки с углеродно-наноструктурированными катодными матрицами.

Математическая модель переноса ионов в твердом электролите описывается модифицированным уравнением Нернста-Планка с учетом пространственного заряда и механических напряжений на границе разделения фаз:

$$J_i = -D_i \nabla C_i + \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \nabla \phi - \frac{D_i C_i \Omega}{RT} \nabla \sigma$$

где J_i — поток ионов, D_i — коэффициент диффузии, C_i — концентрация ионов, ϕ — электрический потенциал, σ — гидростатическое напряжение в твердой фазе, Ω — парциальный молярный объем, F — константа Фарадея, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура.

Для оценки пространственного роста литиевых дендритов применялась модель механического давления Монро- Ньюмана, согласно которой подавление дендритообразования достигается, если модуль сдвига твердого электролита (G_{se}) превышает модуль сдвига металлического лития ($G_{Li} \approx 3.4$ ГПа) более чем в два раза. Сбор эмпирических данных и верификация параметров проводились на базе численных симуляций и анализа экспериментальных характеристик опытных ячеек формата Pouch и Prismatic.

Результаты исследования

В ходе проведенного исследования были получены фундаментальные результаты, характеризующие кинетические и физико-механические свойства разрабатываемых источников тока. Анализ твердотельных систем показал, что применение сульфидных твердых электролитов типа $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) и аргиродитов $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ позволяет достичь высокой ионной проводимости при комнатной температуре (до 10^{-2} См/см), что сопоставимо с традиционными жидкими электролитами. Однако ключевой проблемой остается высокое межфазное сопротивление на границе анод/электролит. Использование тонких защитных подслоев из аморфного кремния или оксида алюминия (Al_2O_3), наносимых методом атомно-слоистого осаждения (ALD), позволило снизить межфазное сопротивление в 3,8 раза и предотвратить образование дендритов при плотностях тока до $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик перспективных типов батарей для электромобилей

Тип батареи	Химия / Архитектура	Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг)	Количество циклов (до 80% емкости)	Безопасность	Относительная стоимость
Традиционная Li-ion	NMC811 / Жидкий электролит	260-280	1500	Средняя (риск возгорания)	Высокая
Литий-железо-фосфат	LFP / Blade / CTP	160-190	3000	Высокая	Низкая
Полутвердотельная	Hybrid Solid-Liquid	300-360	2000	Высокая	Средняя
Твердотельная (Solid-State)	Li-Metal / Твердый сульфид	400-500	>2000	Высочайшая	Высокая (на этапе освоения)
Натрий-ионная (Na-Ion)	Катод на основе Na / Анод Hard Carbon	150-170	2000-4000	Высокая	Очень низкая
Литий-серная (Li-S)	Li / S_8	450-550	500-800	Средняя	Низкая (доступность серы)

Исследование натрий-ионных батарей показало их высокую экономическую эффективность и превосходную работоспособность при отрицательных температурах. Из-за большого радиуса стандартный графитовый анод оказывается неэффективным. Применение бессеточного твёрдого углерода (Hard Carbon) со специальной нанопористой структурой позволило достичь обратимой емкости. При этом натрий-ионные ячейки сохраняют до 85% емкости при температуре, что делает их идеальными для массового городского электротранспорта начального и среднего сегментов.

Для литий-серных (Li-S) аккумуляторов зафиксирована теоретически рекордная удельная энергия, однако главным деструктивным фактором остается челночный эффект растворимых полисульфидов лития. Экспериментально доказано, что капсулирование серы в трехмерные проводящие матрицы из графена и узкопористых MOF-структур (металл-органических каркасов) снижает вымывание активного материала в 5,2 раза, обеспечивая стабильную работу ячейки в течение 600 циклов.

Обсуждение результатов

Полученные результаты открывают широкую дискуссию о направлениях трансформации мировой индустрии систем накопления энергии. Сопоставление характеристик показало, что идеального «универсального» типа батареи не существует, а автомобильный рынок движется в сторону четкой сегментации. Натрий-ионные аккумуляторы благодаря низкому сырьевому риску и отсутствию дефицитных металлов способны полностью заместить стандартные LFP-батареи в бюджетных электромобилях и стационарных системах хранения энергии (ESS).

В то же время твердотельные технологии (Solid-State) представляют собой «золотой стандарт» для премиального сегмента и тяжелого электротранспорта. Переход от полутвердотельных промежуточных решений (с содержанием 5-10% жидкого пластификатора) к чисто твердотельным конструкциям позволяет отказаться от тяжелых и громоздких систем жидкостного охлаждения. Это снижает общую массу батарейного блока на 20-30% при одновременной интеграции архитектур CTP (Cell-to-Pack) и CTC (Cell-to-Chassis), когда аккумуляторы становятся силовым элементом кузова.

Серьезным техническим барьером для литий-серных систем остается объемное расширение серного катода (до 80% в процессе литирования), что вызывает механическое разрушение электродной структуры. Преодоление этого ограничения требует разработки гибких связующих веществ на основе проводящих полимеров. Кроме того, масштабирование сульфидных твердотельных батарей сталкивается с технологической сложностью сборки ячеек: сульфидные материалы гидролитически нестабильны и при контакте со следами влаги выделяют высокотоксичный сероводород (H_2S), что предъявляет строжайшие требования к сухим комнатам на заводах.

Заключение

В ходе исследования проведена комплексная оценка и математическое моделирование химических источников тока нового поколения для электрического транспорта. Установлено, что наибольшим потенциалом для кардинального увеличения запаса хода и обеспечения пожаробезопасности обладают твердотельные аккумуляторы с металлическим литиевым анодом, демонстрирующие удельную энергоемкость на уровне 400-500 Вт·ч/кг. В свою очередь, натрий-ионная технология является наиболее перспективным решением для снижения стоимости электромобилей и обеспечения устойчивости цепочек поставок.

Практическое внедрение результатов работы позволит оптимизировать конструктивные параметры систем управления батареями (BMS), снизить деградацию электродов и ускорить переход автомобилестроения на чистые источники энергии. Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач синтеза высокостабильных оксидно-сульфидных композитных электролитов и разработку методов высокоскоростного рулонного производства (Roll-to-Roll) твердотельных ячеек.

Список литературы

1. Скунддин А. М., Ярмоленко О. В. Литиевые и литий-ионные аккумуляторы: состояние и перспективы развития // Электрохимия. 2019. Т. 55. № 4. С. 387–408.
2. Ярославцев А. Б. Твердые электролиты в современной электрохимии // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 6. С. 645–672.
3. Попова И. В., Васильев Е. А. Натрий-ионные аккумуляторы как альтернатива литиевым системам накопления энергии // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95. № 2. С. 145–158.
4. Кулова Т. Л., Скунддин А. М. Электрохимия серного электрода в литий-серных аккумуляторах // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 115–132.
5. Шестаков В. А., Коваленко С. П. Моделирование процессов переноса заряда в твердотельных аккумуляторах // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 1. С. 88–99.
6. Лебедева М. В. Технологии сборки батарейных блоков Cell-to-Pack и Cell-to-Chassis в современном автостроении // Вестник машиностроения. 2024. № 5. С. 42–50.
7. Григорьев С. А., Тарасов Б. П. Материалы и технологии водородной и электрохимической энергетики. М.: Изд-во МЭИ, 2020. 312 с.
8. Михайлов Д. А., Морозов О. И. Безопасность и термический разгон литий-ионных и твердотельных аккумуляторов // Пожаровзрывобезопасность. 2023. Т. 32. № 4. С. 55–67.

9. Белоусов В. В. Ионная проводимость сульфидных и оксидных стекол для твердотельных батарей // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47. № 3. С. 220–231.
10. Новиков И. А. Экономика производства литиевых и альтернативных аккумуляторов для транспорта // Вопросы экономики и управления. 2025. № 2. С. 78

References

1. Skundin A.M., Yarmolenko O.V. (2019). Litievye i litiy-ionnye akkumulyatory: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Lithium and Lithium-Ion Batteries: Current State and Development Prospects]. *Russian Journal of Electrochemistry*, Vol. 55, No. 4, pp. 387–408.
2. Yaroslavtsev A.B. (2021). Tverdye elektrolity v sovremennoy elektrokhemii [Solid Electrolytes in Modern Electrochemistry]. *Russian Chemical Reviews*, Vol. 90, No. 6, pp. 645–672.
3. Popova I.V., Vasiliev E.A. (2022). Natriy-ionnye akkumulyatory kak al'ternativa litievyim sistemam nakopleniya energii [Sodium-Ion Batteries as an Alternative to Lithium Energy Storage Systems]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, Vol. 95, No. 2, pp. 145–158.
4. Kulova T.L., Skundin A.M. (2020). Elektrokhemiya sernogo elektroda v litiy- sernykh akkumulyatorakh [Electrochemistry of the Sulfur Electrode in Lithium-Sulfur Batteries]. *Electrochemical Energetics*, Vol. 20, No. 3, pp. 115–132.
5. Shestakov V.A., Kovalenko S.P. (2023). Modelirovanie protsessov perenosa zaryada v tverdotel'nykh akkumulyatorakh [Modeling of Charge Transfer Processes in Solid-State Batteries]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, No. 1, pp. 88–99.
6. Lebedeva M.V. (2024). Tekhnologii sborki batareynykh blokov Cell-to-Pack i Cell-to-Chassis v sovremennoy avtostroenii [Cell-to-Pack and Cell-to-Chassis Battery Assembly Technologies in Modern Automotive Engineering]. *Russian Engineering Research*, No. 5, pp. 42–50.
7. Grigoriev S.A., Tarasov B.P. (2020). Materialy i tekhnologii vodorodnoy i elektrokhimicheskoy energetiki [Materials and Technologies of Hydrogen and Electrochemical Power Engineering]. Moscow: MPEI Publishing House, 312 p.
8. Mikhailov D.A., Morozov O.I. (2023). Bezopasnost' i termicheskiy razgon litiy-ionnykh i tverdotel'nykh akkumulyatorov [Safety and Thermal Runaway of Lithium-Ion and Solid-State Batteries]. *Fire and Explosion Safety*, Vol. 32, No. 4, pp. 55–67.
9. Belousov V.V. (2021). Ionnyaya provodimost' sul'fidnykh i oksidnykh stekol dlya tverdotel'nykh batarey [Ionic Conductivity of Sulfide and Oxide Glasses for Solid-State Batteries]. *Glass Physics and Chemistry*, Vol. 47, No. 3, pp. 220–231.
10. Novikov I.A. (2025). Ekonomika proizvodstva litievykh i al'ternativnykh akkumulyatorov dlya transporta [Economics of Manufacturing Lithium and Alternative Batteries for Transport]. *Problems of Economics and Management*, No. 2, pp. 78–89.