

УДК 614.8.084:621.355.9  
DOI 10.48612/ntp/43m3-mzek-2ar3

## ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

**В. Е. ГОРСКИЙ, А. М. БАУСОВ, В. А. КОМЕЛЬКОВ, Д. В. СОРОКИН, А. С. МИТРОФАНОВ**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: aquablastt@yandex.ru, ambausov@yandex.ru, komelkov@rambler,  
element\_37@mail.ru, mitart1992@mail.ru

В статье проведен анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), являющихся ключевым элементом современной энергетики и транспорта. На основе анализа статистических данных выявлен экспоненциальный рост числа пожаров, связанных с ЛИА, с выделением наиболее уязвимых сегментов. Рассмотрены конструктивные особенности и электрохимические системы ЛИА, определяющие их энергетический потенциал и термическую стабильность. Подробно рассмотрен механизм теплового разгона, как каскада экзотермических реакций, инициируемого механическими, электрическими, термическими воздействиями или производственными дефектами. Проведен обзор международной и отечественной нормативно-правовой базы, выявлены существенные пробелы, особенно в области противопожарного регулирования жизненного цикла устройств с ЛИА. Сделан вывод о необходимости разработки комплексных инженерных и нормативных мер для минимизации рисков возникновения пожаров ЛИА.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, пожарная безопасность, тепловой разгон, статистика пожаров, электрохимическая система.

## FIRE HAZARD OF LITHIUM-ION BATTERIES

**V. E. GORSKY, A. M. BAUSOV, V. A. KOMELKOV, D. V. SOROKIN, A. S. MITROFANOV**

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education  
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation  
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: aquablastt@yandex.ru, ambausov@yandex.ru, komelkov@rambler,  
element\_37@mail.ru, mitart1992@mail.ru

The article presents an analysis of the fire hazard associated with lithium-ion batteries (LIBs), which are a key component in modern energy systems and transportation. Based on an analysis of statistical data, an exponential increase in the number of fires involving LIBs has been identified, highlighting the most vulnerable segments. The design features and electrochemical systems of LIBs that determine their energy potential and thermal stability are examined. The mechanism of thermal runaway, understood as a cascade of exothermic reactions initiated by mechanical, electrical, thermal abuse, or manufacturing defects, is discussed in detail. A review of the international and Russian regulatory framework is conducted, revealing significant gaps, particularly in the field of fire safety regulations governing the life cycle of devices containing LIBs. The conclusion underscores the necessity of developing comprehensive engineering and regulatory measures to minimize the risks of LIB-related fires.

**Keywords:** Lithium-ion battery, fire safety, thermal runaway, fire statistics, electrochemical system.

Литий-ионные аккумуляторы совершили технологическую революцию, став доминирующим источником энергии для мобильных устройств, электрического транспорта и систем хранения энергии, благодаря рекордной удельной энергоёмкости и высокому энергетическому КПД [1]. Однако обратной стороной их выдающихся характеристик является значительная

пожарная опасность, обусловленная свойствами применяемых электрохимических материалов. Высокий энергетический потенциал, запасённый в химически активной форме, при нарушении условий эксплуатации или наличии дефектов может высвобождаться неконтролируемо в форме самоускоряющегося экзотермического процесса – теплового разгона [2].

Увеличивающаяся повсеместная интеграция ЛИА в критически важные инфраструктуры обуславливает актуальность всестороннего анализа связанных с ними рисков.

Целью данной работы является систематизация знаний о проблемах пожарной опасности ЛИА на основе анализа статистики отказов, изучения конструктивных и электрохимических особенностей, механизмов возникновения опасных процессов и оценки адекватности нормативной базы для снижения пожарной опасности ЛИА.

Статистические данные подтверждают прямую корреляцию между ростом парка устройств с ЛИА и увеличением числа связанных с ними пожаров. Согласно отчетам ведущих международных организаций, ежегодный прирост таких инцидентов в глобальном масштабе составляет 20–25 % [3]. В Российской Федерации наблюдается аналогичная тенденция. Так в период 2018–2023 гг. количество бытовых пожаров в России, инициированных ЛИА, возросло более чем в 7 раз [4].

Бытовая и офисная электроника (40–45 % случаев): для смартфонов, ноутбуков и особенно электронных сигарет характерны локальные, но интенсивные возгорания, часто происходящие в процессе зарядки. Ключевыми факторами риска являются: использование несертифицированных зарядных устройств, механические повреждения и нарушение температурного режима [5].

Средства индивидуальной мобильности (20–25 %): электросамокаты и гироскутеры демонстрируют наиболее резкий рост числа инцидентов. Пожары связаны с низким качеством сборки батарейных блоков, отсутствием эффективного контроля температуры в BMS (Battery Management System) и нарушениями правил эксплуатации [6].

Электромобили (15–20 %): несмотря на статистически меньшую вероятность пожара на одно транспортное средство по сравнению с автомобилями с ДВС, последствия характеризуются высокой скоростью развития, сложностью тушения и выбросом высокотоксичных газов (HF, CO) [7, 8].

Системы хранения энергии (10–15 %): инциденты, хотя и редки, приводят к максимальным материальным потерям из-за неэффективности традиционных систем пожаротушения против каскадного теплового разгона в массивах из тысяч ячеек [9].

Пожарная опасность ЛИА обусловлена их многоуровневой конструкцией и свойствами компонентов. Иерархия системы включает элемент (ячейку), модуль и батарейный блок, оснащенный системой управления BMS и термического контроля TMS (Thermal Management

System). BMS играет критическую роль в предотвращении опасных состояний, таких как перезаряд, переразряд и перегрев [10].

Литий-ионные аккумуляторы состоят из электродов (катода и анода), которые разделены сепаратором с электролитом. Электроды располагаются в герметичном корпусе, который может быть оснащен предохранительным клапаном, сбрасывающим внутреннее давление при аварийных режимах работы.

Литий-ионные аккумуляторы различаются по типу используемого катодного материала. Катод (положительный электрод) является источником ионов лития в литий-ионном аккумуляторе и во многом определяет его ключевые характеристики: напряжение, удельную энергоемкость, срок службы и стоимость. В процессе разряда ионы лития перемещаются из катода в анод, а при заряде – в обратном направлении. Помимо электрохимических характеристик, структурная и термическая стабильность катодного материала выступают критическими факторами безопасности ЛИА. Экзотермическое разложение катода при перегреве с выделением кислорода служит основным источником энергии, питающим тепловой разгон и последующее горение [11]. Таким образом, выбор и разработка катодного материала представляют собой поиск компромисса между высокой энергетической плотностью и минимальной склонностью к опасному термическому разложению.

Катодный материал выступает центральным звеном, определяющим не только энергопотенциал, но и пожарную опасность литий-ионного аккумулятора.

В зависимости от химического состава и устройства литий-ионные аккумуляторы разделяются на типы:

- литий-марганцевый аккумулятор (LMO);
- литий-кобальтовый аккумулятор (LCO);
- литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный аккумулятор (NCA);
- литий-никель-марганец-кобальт-оксидный аккумулятор (NMC);
- литий-железо-фосфат аккумулятор (LFP);
- литий-титанатный аккумулятор (LTO) и др.

Наиболее распространенный катодный материал в литий-ионных элементах – это кобальтит лития [12, 13]. Однако используются различные другие материалы, такие как литий-железо-фосфат, литий-марганцевая шпинель или смешанные оксиды металлов, которые включают кобальт, никель, алюминий и оксиды марганца, такие как никель-кобальт-алюминий и никель-марганец-кобальт.

Наибольший интерес для силовых установок транспортных средств в настоящее

время представляют LFP-аккумуляторы и аккумуляторы NMC.

Ключевое значение имеет электрохимическая система, в частности, материал катода:

LCO – высокая удельная энергия при низкой термической стабильности;

LFP – высокая термическая и химическая стабильность при меньшей энергоёмкости;

NMC, NCA – обеспечивают наибольшую энергоёмкость, но обладают повышенной склонностью к термическому разгону с выделением кислорода при нагреве [14].

Анод является важным компонентом ЛИА, принимающим ионы лития при заряде и отдающим их при разряде. От его способности к быстрой и обратимой интеркаляции/деинтеркаляции лития, стабильности и безопасности зависят общие характеристики батареи.

Исторически развитие ЛИА началось с замены металлического лития на материалы, интеркалирующие литий, что позволило резко повысить безопасность [15]. Современная эволюция анодов направлена на преодоление основного ограничения графита – относительно низкой теоретической удельной ёмкости и решение присущих ему проблем деградации. При этом любое изменение анодного материала напрямую влияет на стабильность пассивирующего анодного слоя, кинетику электродных процессов и, как следствие, на склонность элемента к тепловому разгону.

Отрицательный электрод литий-ионного элемента состоит из соединения с интеркалированным литием, покрывающим тонким слоем металл (в основном медную фольгу). Наиболее распространённым анодным материалом является какая-либо форма углерода, обычно графит в порошковой форме, в сочетании со связующим материалом. Свойства углерода может значительно варьироваться в зависимости от происхождения графита (естественный или синтетический), от чистоты и размера частиц, от распределения размера и формы частиц, кристаллической фазы углерода и т.д.

Материалы анодов, состоящие из кремния, германия и титаната также изготавливались и испытывались, но в настоящее время применяются редко.

Анод в литий-ионном аккумуляторе – это не просто пассивный накопитель лития, а динамичный и сложный компонент, от свойств которого напрямую зависят энергетическая плотность, срок службы и безопасность системы. Графит, благодаря сбалансированному набору свойств и стабильному пассивирующему анодному слою, остаётся безусловным лидером для большинства ЛИА, однако его ограниченная ёмкость стимулирует поиск альтернатив. Внедрение высокоёмкостных материалов, прежде всего кремния, требует

преодоления фундаментальных проблем, связанных с объёмным расширением и стабилизацией межфазной границы. Понимание процессов на аноде, особенно механизмов деградации пассивирующего анодного слоя и роста дендритов, имеет решающее значение для разработки как более энергоёмких, так и более безопасных аккумуляторов. Будущие разработки будут связаны с созданием сложных композитных и наноструктурированных анодов, интеллектуальных электролитных добавок для формирования стабильного пассивирующего анодного слоя и, возможно, с коммерциализацией анодов с совершенно новыми механизмами работы (например, на основе реакций замещения).

Пожарная опасность литий-ионных батарей заключается в том, что применяемые в их составе электролиты на органической основе являются легковоспламеняющимися. ЛИА могут подвергаться тепловому разгону, что приводит к значительному тепловыделению, взрывной разгерметизации внешней металлической оболочки аккумулятора и возникновению форса пламени, температура которого может превышать 1000 °C [16].

Электролит в литий-ионном аккумуляторе выполняет критическую функцию ионного проводника между катодом и анодом, обеспечивая перенос ионов лития в процессе заряда и разряда. В отличие от электродов, он не участвует в накоплении энергии, но его свойства напрямую определяют кинетику электрохимических процессов, рабочий температурный диапазон, срок службы и, что наиболее важно, безопасность элемента. Современные коммерческие ЛИА используют легковоспламеняющиеся жидкие органические электролиты, что создаёт фундаментальный парадокс: компонент, без которого работа батареи невозможна, одновременно является основным горючим материалом и источником экзотермических реакций при тепловом разгоне [17].

Электролит в литий-ионном аккумуляторе выступает в роли транспортной системы, обеспечивающей ионный перенос, и горючей нагрузки, определяющей тяжесть последствий при тепловом разгоне. Органические карбонатные системы, оптимизированные десятилетиями исследований, обеспечивают высокие электрохимические показатели, но их принципиальная воспламеняемость и термическая нестабильность представляют собой фундаментальное ограничение для повышения безопасности, особенно в ЛИА с высокой плотностью энергии. Переход к твердотельным электролитам является наиболее радикальным и перспективным решением, обещающим прорыв как в безопасности, так и в энергоёмкости. Однако технологические барьеры, связанные с интерфейсным сопротивлением и масштабированием

нием производства, пока сдерживают их коммерциализацию. В среднесрочной перспективе развитие будет идти по пути создания «умных» жидких электролитов – негорючих, саморегулирующихся и обеспечивающих формирование сверхстабильных межфазных слоев, что

позволит максимально раскрыть потенциал существующих и новых электродных материалов.

Основные виды и пожарно-технические характеристики компонентов электролитов приведены в таблице [18].

**Таблица. Основные виды и пожарно-технические характеристики компонентов электролитов литий-ионных аккумуляторов**

Компонент электролита	Хим. формула	Темп. плавления, °С	Темп. кипения, °С	Темп. вспышки, °С	Темп. самовоспламенения, °С	Теплота сгорания, кДж/мл
Пропиленкарбонат (PC)	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	- 49	242	135	455	-20,1
Этиленкарбонат (EC)	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	36	248	145	465	-17,2
Диметилкарбонат (DMC)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	2	91	18	458	-15,9
Диэтилкарбонат (DEC)	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-43	126	25	445	-20,9
Этил метил карбонат (EMC)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	-14	107	25	440	-

Горючий жидкий электролит на основе органических карбонатов с низкой температурой вспышки (~16–18 °С) и полимерный сепаратор с низкой температурой плавления (~130–165 °С) являются дополнительными источниками уязвимости. Расплавление сепаратора приводит к внутреннему короткому замыканию – ключевому триггеру теплового разгона [19, 20].

Сепаратор является пассивным, но одним из наиболее важных компонентов литий-ионного аккумулятора, выполняющим одновременно механическую, электрохимическую и барьерную функции. Его надежность и стабильность напрямую определяют безопасность, производительность и срок службы батареи. Основная задача сепаратора – предотвратить физический контакт между катодом и анодом (и, как следствие, прямое электрическое короткое замыкание), обеспечивая при этом свободный перенос ионов лития через поры, заполненные электролитом [21]. Несостоятельность сепаратора при термических, механических или электрических воздействиях часто служит ключевым триггером каскада опасных процессов, ведущих к тепловому разгону и пожару [22].

Современные сепараторы для ЛИА представляют собой микропористые мембраны, изготавливаемые преимущественно из полиолефинов методом сухого или мокрого растяжения.

Ключевыми характеристиками сепаратора являются: толщина, пористость, размер пор, проницаемость, механическая прочность

на разрыв и, что критически важно, термическая стабильность (сопротивление усадке при нагреве) [23].

Полное расплавление сепаратора вызывает прямой контакт катода и анода, что приводит к мгновенному, мощному внутреннему короткому замыканию. Выделяющееся при этом тепло служит мощным источником нагрева, резко ускоряющим последующие стадии теплового разгона: разложение катода с выделением кислорода и воспламенение электролита [22, 24].

Таким образом, температура плавления сепаратора является одним из ключевых пороговых параметров в каскаде экзотермических реакций теплового разгона. Снижение этого порога, например, при механическом повреждении мембраны или локальном перегреве, существенно повышает вероятность необратимого развития аварии.

Сепаратор, будучи тонкой полимерной мембраной, играет критическую роль в обеспечении как нормальной работы, так и безопасности литий-ионного аккумулятора. Низкая термическая стабильность стандартных полиолефиновых сепараторов делает их слабым звеном, расплавление которого является ключевым фактором развития теплового разгона.

Тепловой разгон представляет собой необратимый самоускоряющийся процесс, инициируемый при превышении порога тепловыделения над возможностями теплоотвода. Каскад экзотермических реакций развивается в последовательности: разложение пассивирующего анодного слоя, реакция лития с электролитом, плавление сепаратора и внутреннее короткое

замыкание, разложение катода с выделением кислорода, разложение электролита и горение [14]. В батарейном блоке тепловой разгон одной ячейки может распространяться на соседние.

Основные причины и схема развития пожароопасной ситуации подробно изложены в работе [25].

Как видно из схемы (рис. 1) дефекты производства и внешние механические повреж-

дения, а также образование дендритов (ионы лития, осаждаемые на аноде и образующие древовидные структуры) приводят к внутреннему короткому замыканию. В результате перезаряда или внешнего нагрева происходит тепловой разгон аккумулятора. Процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов схематично представлен на (рис. 2). [25]



Рис.1. Схема возможных причин возгорания литий-ионных аккумуляторов

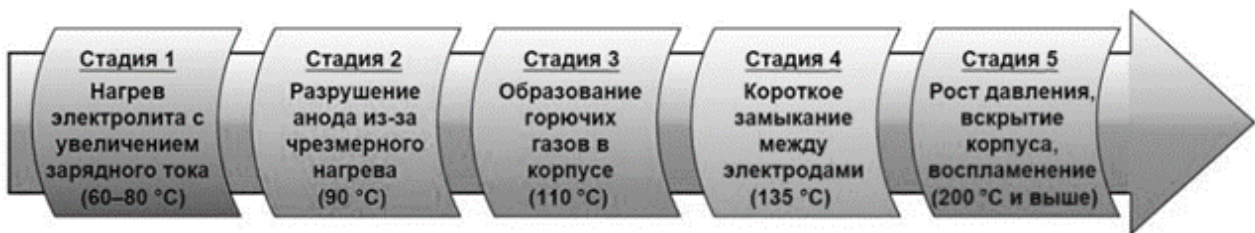


Рис. 2. Процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов

Ряд исследований [26, 27], основанных на измерениях тепловой стабильности катодных материалов с электролитом в условиях полного напряжения заряда показал, что катодные материалы начинают вступать в экзотермическую реакцию с электролитом при температурах от 130 до 250 °С. Однако анод начинает реагировать экзотермически при более низких температурах, кроме этого, существует большая вероятность возникновения короткого замыкания в элементе из-за его строения и внутренних производственных дефектов.

Наиболее легковоспламеняющимся компонентом литий-ионного элемента является электролит на основе углеводородов. При этом даже полностью разряженные литий-ионные элементы содержат ощутимую химическую энергию, которая может высвободиться в результате сгорания электролита [10]. Разгерметизация литий-ионных элементов высвобождает легковоспламеняющиеся пары и приводит к высвобождению легковоспламеняющегося электролита, что увеличивает общее тепловыделение пожара. Другие горючие компоненты литий-ионного элемента включают

полимерный сепаратор, а также различные связующие вещества, используемые в электродах, и графит анода. Некоторые из этих компонентов разлагаются, если элемент подвергается термическому разгону, и из него выделяются легковоспламеняющиеся газы. Литий-ионные элементы не содержат металлического лития в каком-либо значительном количестве; в литий-ионных элементах ионы Li<sup>+</sup> функционируют просто как носители электрического заряда.

Высокая плотность энергии и чувствительность литий-ионных аккумуляторов к условиям эксплуатации делают невозможной их безопасную и эффективную работу без сложных систем контроля и управления. В отличие от отдельных ячеек, батарейный блок требует координации работы десятков или сотен элементов. Для этого служат две взаимосвязанные системы: BMS и TMS. BMS отвечает за электрохимическое состояние батареи, непрерывно отслеживая напряжение, ток и температуру, оценивая ключевые параметры состояния и предотвращая работу в опасных режимах [28]. TMS контролирует температуру, отводя избыточное тепло при работе и подогревая батарею при низких температурах окружающей среды [29]. Их совместная и скоординированная работа является краеугольным камнем обеспечения безопасности, особенно в контексте предотвращения самоускоряющегося процесса теплового разгона.

BMS представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий интеллектуальное управление батареями.

Оптимальный температурный диапазон для большинства ЛИА лежит в пределах 15–35 °С. Отклонения ведут к ускоренной деградации (выше 45 °С) или резкому падению мощности и риску повреждения литиевого покрытия (ниже 0 °С) [30]. TMS решает эту проблему.

Безопасность ЛИА обеспечивается именно взаимодействием BMS и TMS, формирующим многоуровневую систему защиты.

BMS и TMS трансформируют набор электрохимических ячеек в предсказуемую, безопасную и управляемую энергетическую систему. BMS обеспечивает интеллектуальный контроль и диагностику, в то время как TMS создает необходимые физические условия для стабильной работы. Их интеграция является обязательным условием для надежного применения ЛИА в ответственных областях, таких как электромобили и системы хранения энергии сетевого масштаба.

Бурное распространение литий-ионных технологий во всех сферах жизни опередило формирование адекватной и целостной нормативно-правовой системы, обеспечивающей их пожарную безопасность. Нормативная экосистема развивается по «догоняющему» сценарию, реагируя на уже произошедшие инциденты, а не проактивно формируя рамки для новых рисков [31]. Это приводит к существованию значительных пробелов, особенно в регулировании этапов эксплуатации, хранения и утилизации, где происходит большинство пожаров. Актуальность системного анализа нормативной базы обусловлена необходимостью трансформации разрозненных, часто добровольных стандартов в связную систему обязательных противопожарных требований, способных минимизировать растущие риски.

Нормативно-правовое поле в области пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторов характеризуется значительным отставанием от темпов технологического внедрения. На международном уровне сформирован базис в виде стандартов на компоненты (IEC 62133), промышленные батареи (IEC 62619), правила перевозки (UN 38.3) и стандарты для электромобилей (ECE R100, строгий китайский GB 38031) [32].

В Российской Федерации и ЕАЭС регулирование фрагментировано. Технические регламенты (ТР ТС 004/2011, 018/2011) носят общий характер. Происходит гармонизация национальных стандартов (ГОСТ) с требованиями МЭК, однако их добровольный статус снижает эффективность<sup>1</sup>. Выявлен критический нормативный пробел – отсутствие специализированных противопожарных требований в сводах правил, регламентирующих:

- проектирование и оборудование зарядной инфраструктуры;
- условия хранения и складирования устройств с ЛИА;
- порядок эксплуатации, диагностики, ремонта и утилизации аккумуляторов.

Неразвитость инфраструктуры для безопасной утилизации ЛИА, отнесенных к опасным отходам, создает дополнительные риски [33].

Только переход от фрагментарного регулирования компонентов к целостной системе управления рисками на протяжении всего жизненного цикла позволит сдерживать негативный тренд роста числа пожаров, связанных с литий-ионными технологиями.

<sup>1</sup> Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неподкисленные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи

литиевые для портативного применения: ГОСТ IEC 62133-2022. Введ. 2023-06-01.

### Выводы

Выполненный анализ литературных данных позволил сформировать системное представление о природе и масштабе пожарной опасности, присущей литий-ионным аккумуляторам (ЛИА). Эмпирические данные однозначно свидетельствуют о трансформации данного риска из теоретического в актуальный и статистически значимый, с ежегодным ростом числа инцидентов на 20-25 %. Наиболее уязвимыми сегментами, формирующими основной массив происшествий, являются средства индивидуальной мобильности и бытовая электроника, что обусловлено массовостью их применения, не всегда удовлетворительным качеством сборки и частыми нарушениями условий эксплуатации.

Установлено, что пожарная опасность заложена в физико-химических свойствах ключевых компонентов ЛИА. Фундаментальный компромисс между высокой удельной энергоемкостью и термической стабильностью наиболее ярко проявляется в катодных материалах: высокоэнергетические никель-богатые составы (NMC, NCA) обладают выраженной склонностью к экзотермическому разложению с выделением кислорода, в то время как фосфат лития-железа (LFP) демонстрирует исключительную термическую стабильность, задавая новый стандарт безопасности. Горючий жидкий электролит на основе органических карбонатов и полиолефиновый сепаратор с низкой температурой плавления выступают критически важными элементами уязвимости, определяющими сценарий развития аварии.

Тепловой разгон идентифицирован как необратимый самоускоряющийся процесс, развивающийся по каскадному сценарию от разложения пассивирующего слоя на аноде и реакции интеркалированного лития до расплавления сепаратора, внутреннего короткого замыкания и термического разложения катода. Именно

последовательность этих экзотермических стадий обуславливает высокую скорость развития и разрушительные последствия пожара в ЛИА.

Анализ нормативно-правовой базы выявил ее существенное отставание от темпов технологического внедрения ЛИА. Существующая система регулирования фрагментирована и фокусируется преимущественно на безопасности компонента (ячейки, батареи) на этапах производства и транспортировки, в то время как ключевые риски реализуются на этапах эксплуатации. Отсутствие комплексных, обязательных к исполнению противопожарных требований, регламентирующих полный жизненный цикл устройств с ЛИА, является системным пробелом, требующим устранения.

Таким образом, для эффективного обеспечения пожарной безопасности ЛИА необходим переход к комплексному подходу, включающему:

1. Разработку и внедрение предиктивных математических моделей теплового разгона для различных электрохимических систем.

2. Интенсификацию исследований в области инженерных решений пассивной и активной пожарной защиты батарейных блоков, включая эффективные средства тушения.

3. Ужесточение нормативного поля, в частности, разработку специализированных сводов правил (СП) для различных сегментов применения ЛИА.

4. Формирование эффективной системы сбора, транспортировки и глубокой переработки отслуживших ЛИА как элемента противопожарной и экологической безопасности.

Только синергия научных исследований, технологических инноваций и совершенствования нормативного регулирования позволит обеспечить безопасную интеграцию литий-ионных технологий в экономику и повседневную жизнь.

### Список литературы

1. Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology. ACS Central Science, 2017, vol. 3, issue 10, pp 1063–1069.

2. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang [et al.] Journal of Power Sources, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

3. National Fire Protection Association (NFPA). Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. Quincy, 2023.

4. Пожары и пожарная безопасность в Российской Федерации: стат. сб. МЧС России за 2019–2023 гг. М.: ВНИИПО, 2023.

5. Experimental study on the thermal runaway and fire behaviors of large-format lithium ion

batteries under overcharging / M. Chen [et al.]. Applied Energy, 2021, vol. 281, Art. 116035.

6. Guidelines for Safety of E-scooter Batteries. Recharge, 2022.

7. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires / F. Larsson [et al.]. Scientific Reports, 2020, vol. 10, issue 1, Art. 21318.

8. A comparative study of early fire detection algorithms for electric vehicle battery packs / P. Sun [et al.]. Fire Safety Journal, 2022, vol. 130, Art. 103579.

9. Fire Safety for Grid-Scale Lithium-ion Battery Energy Storage Systems: white paper. NEC Corporation, 2021.

10. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu

[et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

11. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

12. Pillot C. Present and Future Market Situation For Batteries. *Proceedings, Batteries 2009*, September 30 – October 2, 2009, French Riviera. 2009.

13. Pillot C. Main Trends for Rechargeable Battery Market 2009–2020. *Proceedings, Batteries 2010*, September 29 – October 1, 2010, French Riviera. 2010.

14. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.

15. Yoshino A. The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, vol. 51, issue 24, pp. 5798–5800.

16. Мокряк А. В., Мокряк А. Ю., Мельник А. А. Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 4 (130). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>

17. Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 4303–4417.

18. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment / C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White [et al.]. *Exponent Failure Analysis Associates, Inc*, 2011, pp. 15.

19. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

20. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

21. Arora P., Zhang Z. Battery separators. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 419–4462.

22. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.

23. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

24. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

25. Харламенков А. С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31, № 3. С. 96–102.

26. Jiang J., Dahn J. Electrochemical cell. *Electrochemistry Communications*, 2003, vol. 6, issue 1, pp. 39–43.

27. Reaction behavior of LiFePO<sub>4</sub> as a cathode material for rechargeable lithium batteries / M. Takahashi, S. Tobishima, K. Takei [et al.]. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 148, issue 3–4, pp. 283–298.

28. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu, X. Han, J. Li [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

29. Pesaran A. A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, issue 2, pp. 377–382.

30. Influence of cell design on temperatures and temperature gradients in lithium-ion cells: an in operando study / T. Waldmann, G. Bisle, B. I. Hogg [et al.]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, vol. 162, issue 6, pp. A921–A927.

31. A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies / A. Barai [et al.]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, vol. 73, pp. 95–131.

32. Electric vehicles traction battery safety requirements: China Standard GB 38031-2020. Beijing, 2020.

33. Харламенков А. С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32, № 1. С. 89–96.

## References

1. Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology. *ACS Central Science*, 2017, vol. 3, issue 10, pp 1063–1069.

2. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang [et al.] *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

3. National Fire Protection Association (NFPA). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Quincy, 2023.

4. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v Rossiyskoy Federatsii: stat. sb. MChS Rossii za 2019–2023 gg. [Fires and fire safety in the Russian Federation: statistical digest of the Ministry of Emergency Situations of Russia for 2019–2023]. Moscow: VNIPO, 2023.

5. Experimental study on the thermal runaway and fire behaviors of large-format lithium ion batteries under overcharging / M. Chen [et al.]. *Applied Energy*, 2021, vol. 281, Art. 116035.

6. *Guidelines for Safety of E-scooter Batteries*. Recharge, 2022.

7. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires / F. Larsson [et al.]. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, issue 1, Art. 21318.

8. A comparative study of early fire detection algorithms for electric vehicle battery packs /

P. Sun [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2022, vol. 130, Art. 103579.

9. Fire Safety for Grid-Scale Lithium-ion Battery Energy Storage Systems: white paper. NEC Corporation, 2021.

10. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

11. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

12. Pillot C. Present and Future Market Situation For Batteries. Proceedings, Batteries 2009, September 30 – October 2, 2009, French Riviera. 2009.

13. Pillot C. Main Trends for Rechargeable Battery Market 2009–2020. Proceedings, Batteries 2010, September 29 – October 1, 2010, French Riviera. 2010.

14. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.

15. Yoshino A. The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, vol. 51, issue 24, pp. 5798–5800.

16. Mokryak A. V., Mokryak A. Yu., Melnik A. A. Analiz ostatkov lityi-ionnykh akkumulyatorov posle teplovogo razgona metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii [Analysis of lithium-ion battery residues after thermal runaway by scanning electron microscopy]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2023, vol. 4 (130). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>

17. Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 4303–4417.

18. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment / C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White [et al.]. Exponent Failure Analysis Associates, Inc, 2011, pp. 15.

19. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

20. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

21. Arora P., Zhang Z. Battery separators. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 419–4462.

22. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.

23. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

24. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

25. Kharlamenkov A. S. Pozharnaya opasnost' primeneniya lityi-ionnykh akkumulyatorov v Rossii [Fire hazard of using lithium-ion batteries in Russia]. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2022, vol. 31, issue 3, pp. 96–102.

26. Jiang J., Dahn J. Electrochemical cell. *Electrochemistry Communications*, 2003, vol. 6, issue 1, pp. 39–43.

27. Reaction behavior of LiFePO<sub>4</sub> as a cathode material for rechargeable lithium batteries / M. Takahashi, S. Tobishima, K. Takei [et al.]. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 148, issue 3–4, pp. 283–298.

28. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu, X. Han, J. Li [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

29. Pesaran A. A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, issue 2, pp. 377–382.

30. Influence of cell design on temperatures and temperature gradients in lithium-ion cells: an in operando study / T. Waldmann, G. Bisle, B. I. Hogg [et al.]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, vol. 162, issue 6, pp. A921–A927.

31. A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies / A. Barai [et al.]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, vol. 73, pp. 95–131.

32. Electric vehicles traction battery safety requirements: China Standard GB 38031-2020. Beijing, 2020.

33. Kharlamenkov A. S. Sovremennye sposoby tusheniya lityi-ionnykh akkumulyatorov. Chast' 1 [Modern methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1]. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2023, vol. 32, issue 1, pp. 89–96.

Горский Владимир Евгеньевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

Адъюнкт адъюнктуры

E-mail: aquablastt@yandex.ru

*Gorsky Vladimir Evgenievich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo  
Adjunct of post-graduate courses  
E-mail: aquablastt@yandex.ru

*Баусов Алексей Михайлович*

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
E-mail: ambausov@yandex.ru

*Bausov Aleksey Mikhailovich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo  
Doctor of technical sciences, professor, associate professor  
E-mail: ambausov@yandex.ru

*Комельков Вячеслав Алексеевич*

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры  
E-mail: komelkov@rambler

*Komelkov Vyacheslav Alekseevich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»  
Russian Federation, Ivanovo  
Candidate of technical sciences, associate professor, head of the department  
E-mail: komelkov@rambler

*Сорокин Дмитрий Вячеславович*

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
Кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры  
E-mail: element\_37@mail.ru

*Sorokin Dmitry Vyacheslavovich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo  
Candidate of technical sciences, deputy head of the department  
E-mail: element\_37@mail.ru

*Митрофанов Артур Сергеевич*

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры  
E-mail: mitart1992@mail.ru

*Mitrofanov Artur Sergeevich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo  
Candidate of technical sciences, senior lecturer  
E-mail: mitart1992@mail.ru