

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ пожарной опасности различных типов литий-ионных аккумуляторов. Представлены варианты реализации пассивного тушения (охлаждения) поврежденных ячеек и способов создания невоспламеняемых составов электролита. Выполнено обобщение возможных технических решений по снижению вероятности распространения пожара на соседние ячейки в пределах отдельной упаковки. Рассмотрены возможные пути предотвращения и снижения последствий воспламенения аккумуляторных батарей с использованием различных огнетушащих веществ. Дано описание основных особенностей применения и принципов действия современных способов тушения литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова: теплопроводность; изоляция; микрокапсулирование; пена; порошок; вода; емкость; удельная энергоемкость; удельная мощность; электроды; горение; взрыв; температура

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

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The fire hazard of various types of lithium-ion batteries was analyzed. Options for implementing passive extinguishing (cooling) of damaged cells and methods of creating non-flammable electrolyte compounds were presented. The author summarized possible engineering solutions, aimed at reducing the likelihood of fire spread to neighbouring cells within a separate pack. The author also considered ways of preventing and mitigating battery ignition consequences using various fire extinguishing substances, described the main features of application and operating principles underlying advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries.

Keywords: thermal conductivity; insulation; micro-capsulation; foam; powder; water; capacity; specific energy; specific power; electrodes; burning; explosion; temperature

For citation: Kharlamenkov A.S. Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzrybo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):89-96 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС

В рубрике «Вопрос–ответ» журналов № 4 и 5 за 2022 г. [1, 2] были представлены варианты реализации внутренних и внешних систем защиты от аварийных режимов работы как единичных элементов питания (ячеек), так и аккумуляторных сборок.

Обе системы позволяют обеспечить снижение риска возникновения пожара (взрыва) по причине неисправности литиевых аккумуляторных батарей, но не способны полностью устранить их пожаро-

взрывоопасность. В случае воспламенения отдельных ячеек аккумуляторной сборки присутствует угроза распространения горения на соседние элементы. Поэтому применение современных технических средств тушения и ограничения развития пожара, относящихся к системе противопожарной защиты, позволяет минимизировать последствия аварийного режима работы аккумуляторов и снизить ущерб от их воспламенения.

Какие же способы тушения литиевых аккумуляторов применяют на сегодняшний день?

Таблица 1. Результаты испытаний различных типов литиевых аккумуляторов

Вид испытаний	Тип аккумулятора			
	Li-Pol	NMC	LTO	LFP
	Результаты испытания			
Перезаряд/Внешнее короткое замыкание	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вскрытие предохранительного клапана с выбросом электролита без воспламенения	Вздутие корпуса со вскрытием предохранительного клапана без воспламенения
Сквозное механическое повреждение корпуса	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Выброс электролита без воспламенения	Вздутие корпуса с выбросом дыма, внутреннее тление
Вывод	Высокая пожароопасность	Высокая пожароопасность	Низкая пожароопасность	Средняя пожароопасность

ОТВЕТ

По состоянию на 2022 г. наибольшее распространение получили следующие типы аккумуляторов: литий-полимерный (Li-Pol); литий-никель-марганец-кобальт-оксидный (LiNiMnCoO₂, NMC); литий-титанатный (Li₄Ti₅O₁₂, LTO); литий-железо-фосфатный (LiFePO₄, LFP). Многие иностранные организации (FM Global, GWL и др.), занимающиеся вопросами обеспечения безопасной эксплуатации литиевых аккумуляторов, проводили ряд испытаний по анализу состояния аккумуляторов в случае перезаряда, короткого замыкания, механического повреждения и внешнего огневого воздействия. По результатам было установлено, что наибольшую пожарную опасность представляют Li-Pol и NMC аккумуляторы (табл. 1).

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний, представленных в табл. 1, проводились на аккумуляторах, не имеющих систем защиты в виде внешних BMS плат. Условия испытаний выходили за пределы требований ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ и ГОСТ Р МЭК 62281–2020² и рассматривались для случаев нарушения нормального технологического процесса хранения, транспортировки и эксплуатации.

Для снижения пожарной опасности существующих литий-ионных аккумуляторов ведется постоянный поиск более безопасных конструкций и составов электролита. Для аккумуляторов, выполненных в призматическом корпусе, в качестве внешнего покрытия используют эластомеры [3]. При вздутии аккумулятора они способ-

ны значительно расширяться без потери целостности корпуса, кроме места размещения предохранительного клапана. Тем самым обеспечивается исключение взрыва и разрушения корпуса аккумулятора с последующим открытым горением.

Научное сообщество ведет активный поиск различных наименее пожароопасных составов электролита. Общая стратегия разработки невоспламеняемых растворов заключается в использовании компонентов электролита, замедляющих горение, или полной замене пожароопасных растворителей на основе карбонатов, таких как диметилкарбонат, диэтилкарбонат, этиленкарбонат, пропиленкарбонат. Известно, что замена растворителей на серо-, фтор-, фосфоросодержащие снижает воспламеняемость компонентов электролита [4]. Последние исследования в этой области [5, 6] позволили получить полимерный электролит в жидком состоянии, состоящий из гидрофильных солей лития (LiFSI) и растворителей на основе диметоксизтана (DME) и полисилоксана (силикона). Такой состав позволяет предотвращать испарение электролита при высоких температурах (100 °C) и исключить его воспламенение.

Немаловажное значение имеет и формат упаковки аккумуляторных батарей при их хранении и транспортировке. Было проведено исследование различных вариантов упаковки аккумуляторов цилиндрической формы³. В качестве перегородок-разделителей между соседними ячейками применяли: гофрированный картон; картон, обработанный вспучивающейся краской; алюминиевые пластинки; плоский мешочек с водой, укладываемый поверх всех ячеек с картонными перегородками. Результаты испытаний показали высокую эффективность алюминиевых пластин и мешочка с водой по снижению передачи тепла от неисправной ячейки к соседним. Применение алюминиевых пластин в качестве перегородок является достаточно дорогостоящим решением для выполнения упаковки в отличие

¹ ГОСТ Р МЭК 62619–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Аккумуляторные и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей для промышленных применений : введен в действие 01.09.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

² ГОСТ Р МЭК 62281–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Первичные и вторичные литиевые элементы и батареи. Безопасность при транспортировании. Требования и методы испытаний : введен в действие 01.03.2021. М. : Стандартинформ, 2020.

³ DOT/FAA/TC-15/38. Passive protection of lithium battery shipments. Final Report // U.S. Department of Transportation. 2016. 34 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.14208.35841

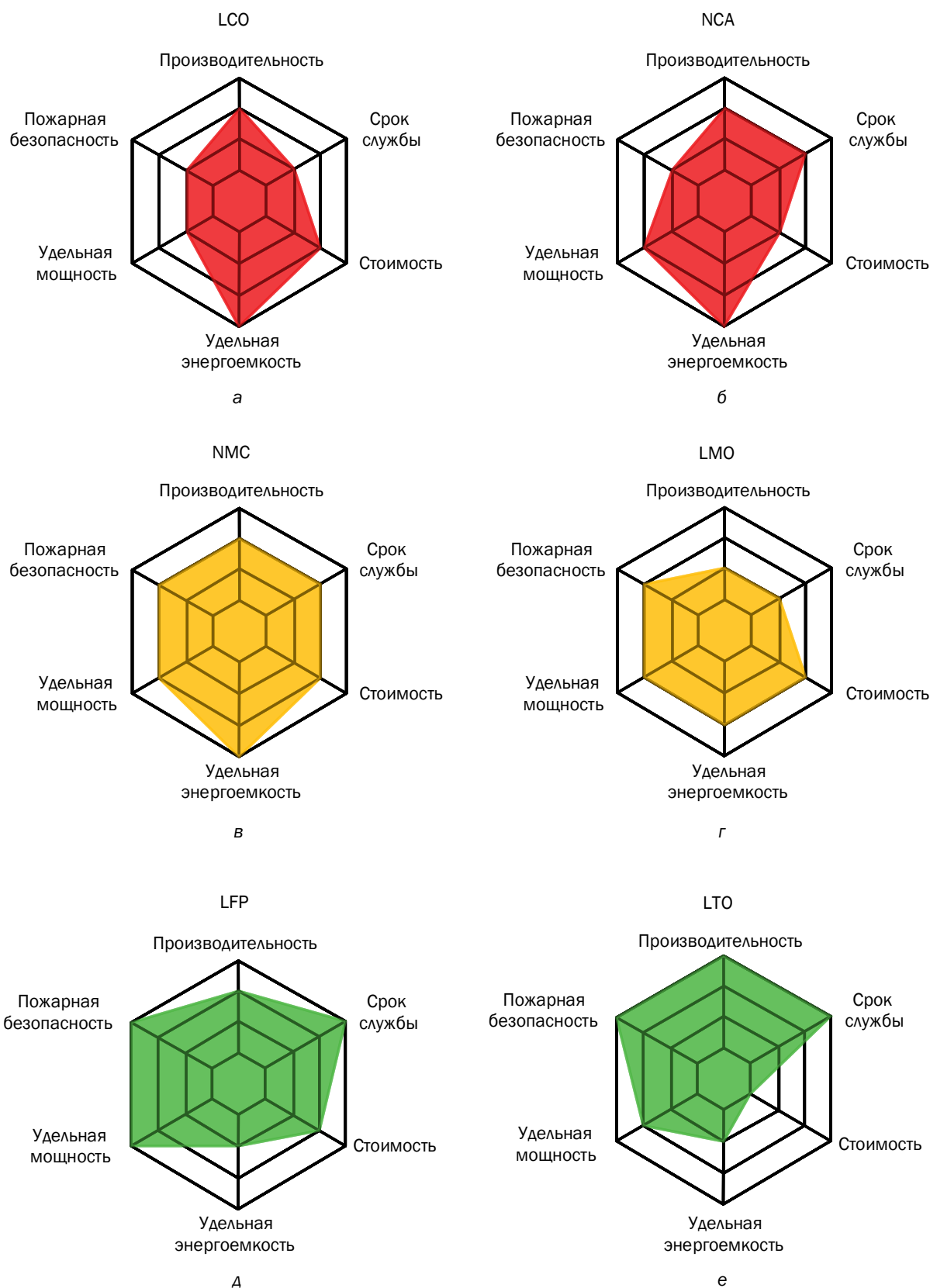


Рис. 1. Распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов: а — литий-кобальтовые; б — литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные; в — литий-никель-марганец-кобальт-оксидные; г — литий-марганцево-оксидные; д — литий-железо-фосфатные; е — литий-титанат-оксидные

от мешочка с водой, который можно рассматривать в качестве пассивного тушения (охлаждения) неисправной ячейки.

Обобщая все положительные и отрицательные параметры различных литий-ионных аккумуляторов (рис. 1), можно сделать вывод, что варианты исполнения LTO и LFP представляют наименьшую пожарную опасность.

В современных аккумуляторах количество «чистого» лития достаточно мало (2–3 % от общей массы ячейки) и составляет в среднем 0,08 г на 1 Вт·ч энергии или 80 г на 1 кВт·ч. Эту массу называют эквивалентным содержанием лития (LEC).

Представляется возможным оценить LEC (в граммах) для одной аккумуляторной ячейки по формуле:

$$m_{\text{LEC}} = 0,3 \cdot Q,$$

где 0,3 — коэффициент, г/(А·ч);

Q — номинальная емкость одной аккумуляторной ячейки, А·ч.

Тогда в единичном элементе питания емкостью 2600 мА·ч будет содержаться около 0,78 г лития. В случае рассмотрения аккумуляторной батареи, состоящей из 6 аналогичных элементов (ноутбук), масса лития составит 4,7 г. Указанная выше формула для оценки LEC была представлена в старой редакции ГОСТ Р МЭК 62281–2007, в новой редакции (ГОСТ Р МЭК 62281–2020) она отсутствует. В то же время в стандарте дано разграничение между большими и небольшими аккумуляторными сборками. В последних суммарное содержание лития всех элементов не должно превышать 500 г или номинальная энергия должна составлять не более 6200 Вт·ч. В таком случае для небольших аккумуляторных сборок на 1 Вт·ч энергии будет приходиться вышеупомянутые 0,08 г лития.

Аккумуляторные батареи электромобилей способны запасать номинальную энергию 40–100 кВт·ч, при этом их масса составляет 300–600 кг. Следовательно, суммарная масса лития в таких батареях составит приблизительно 3,2–8 кг. Остальная масса батареи — это алюминий, графит, никель, медь, пластик и другие материалы (рис. 2).

Следует отметить, что большинство литий-ионных батарей не имеет в своем составе пожароопасного металлического лития в чистом виде. Литий присутствует в виде солей (соединения, получаемые из карбоната лития), являющихся частью электролита и катода (анода) аккумулятора. Например, растворы гексафторфосфата лития LiPF_6 используются в электролите аккумуляторной батареи, оксид лития-кобальта (LiCoO_2) или феррофосфат лития (LiFePO_4) — материал катода,

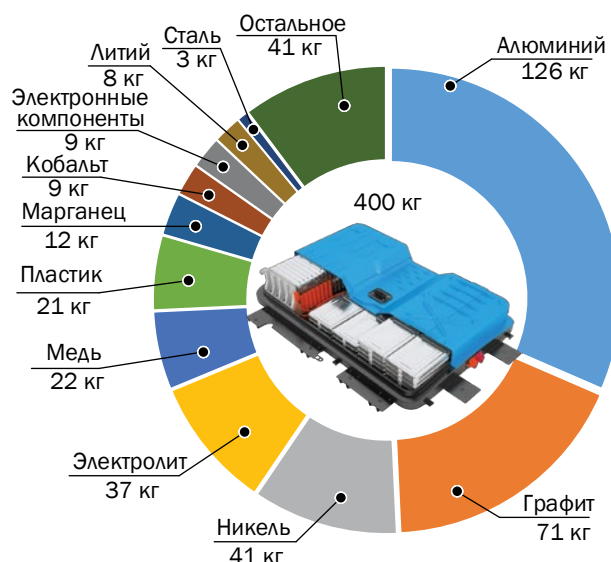


Рис. 2. Приблизительное распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (тип NMC)

а пентатитанат лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) — материал анода. По этой причине горение литий-ионных аккумуляторов не следует однозначно относить к классу пожаров D2 (горение щелочных металлов)^{4, 5}.

В Приложении А.1 к СП 9.13130.2009⁶ для тушения пожаров класса D признаны наиболее эффективными порошковые огнетушители. Также в п. 4.1.4 данного свода правил указано, что «для тушения пожаров класса D огнетушители должны быть заряжены специальным порошком, который рекомендован для тушения данного горючего вещества, и оснащены специальным успокоителем для снижения скорости и кинетической энергии порошковой струи. Параметры и количество огнетушителей определяют исходя из специфики обрабатываемых пожароопасных материалов, их дисперсности и возможной площади пожара». То есть выбор типа и количества специального порошка (объема огнетушителя) должен выполняться индивидуально для каждого конкретного случая, что не дает четкого понимания требований норм по тушению как металлического лития, так и литий-ионных аккумуляторов. Для тушения металлического лития, помимо специальных порошков, могут использоваться флюсы и графит с гидрофобизирующими добавками, а также аргон, позволяющий обеспечить вытеснение воздуха из очага горения [7].

⁴ Федеральный закон Российской Федерации «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в редакции от 14.07.2022) от 22.06.2008 № 123-ФЗ; принят Государственной Думой 04.06.2008.

⁵ ГОСТ 27331–87 (СТ СЭВ 5637-86). Пожарная техника. Классификация пожаров : введен в действие 01.01.1988. М. : Госстандарт СССР, 1988.

⁶ СП 9.13130.2009. Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации : введен в действие 01.05.2009. М. : МЧС России, 2009.

Таблица 2. Список средств пожаротушения, предлагаемых различными производителями литий-ионных аккумуляторов [11]

Компания	Страна	Дата	Форм-фактор аккумулятора	Химия	Вода	CO ₂	Пена	Химический / сухой порошок	Азот	Песок	Все способы тушения
Ideal	США	2010	Ячейка	LCO	–	+	+	+	–	–	–
Yuka energy	Китай	2011	Пакет	LCO	–	+	+	+	–	+	–
Samsung	Корея	2011	Ячейка	NMC	+	–	–	+	–	–	–
Advance Energy	США	2011	–	LCO	–	–	–	–	–	–	+
LG Chem	Корея	2013	Ячейка	NMC	–	–	–	–	–	–	+
Makita	США	2013	Пакет	NCO	+	–	+	+	–	–	–
Bren-Tronics	США	2013	Пакет	LCO	+	+	+	+	–	–	–
Leo Energy	Сингапур	2014	–	NMC	+	–	+	–	–	–	–
Panasonic	США	2015	–	NMC	+	+	+	+	–	–	–
SDPT	Китай	2016	–	LCO	+	+	–	–	–	–	–
IDX	Япония	2016	Пакет	LMO	+	+	+	+	+	–	–
Motorola	США	2017	Пакет	LCO	+	+	+	+	–	–	–
Enertech	Корея	2017	Пакет	NMC	+	–	–	+	–	+	–
Bipower	США	2017	Пакет	LCO	+	+	–	+	–	–	–
Всего					10	8	8	10	1	2	2

Кроме того, в ГОСТ Р 51057–2001⁷ и ГОСТ Р 51017⁸ отсутствует методика проведения огневых испытаний огнетушителей, предназначенных для тушения пожаров класса D, и не разработаны модельные очаги пожара данного класса. Это указывает на необходимость проведения дополнительных исследований и экспериментов в области разработки эффективных способов тушения пожаров литий-ионных аккумуляторов.

Для устранения имеющихся пробелов в нормативной литературе имеет смысл изучить опыт других стран по тушению литий-ионных аккумуляторов. Во многих странах Европы, Северной Америки и в Китае проблема тушения литий-ионных пожаров стоит достаточно остро. Исследования [8] показывают, что горение литий-ионных аккумуляторов нужно рассматривать как пожары «смешанных» классов: А (горение твердых веществ), В (горение жидких веществ); С (горение газообразных веществ); Е (пожары электрооборудования, находящегося под напряжением). Похожая информация содержится и в Приложениях № 1 и 2 Правил противопо-

жарного режима РФ (ППР)⁹. Правилами допускается использовать иные первичные средства пожаротушения (в том числе и другие типы огнетушителей), обеспечивающие тушение соответствующего класса пожара.

Тушение литий-ионных аккумуляторов может осуществляться различными огнетушащими средствами, к которым относятся: сухие порошки; огнетушащие средства на водной основе (в том числе вода); углекислый газ; аэрозоли; химические пены [8, 9]. Выбор типа и количества огнетушащего вещества будет во многом зависеть от размеров аккумуляторных сборок, типов ячеек, особенностей хранения и области их применения.

Пожары с участием литий-ионных аккумуляторов считаются достаточно сложными ввиду повторных возгораний батарей. Это связано с тем, что стандартные способы тушения позволяют снизить температуру в месте горения и временно приостановить химическую реакцию с выделением тепла, но процесс тления во внутреннем корпусе поврежденных ячеек остановить полностью не удастся. В результате через некоторое время потушенный, казалось бы, очаг вновь переходит в активную фазу горения.

⁷ ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний : введен в действие 01.07.2002. М. : Госстандарт России, 2002.

⁸ ГОСТ Р 51017–2009. Техника пожарная. Огнетушители передвижные. Общие технические требования. Методы испытаний (с Поправкой) : введен в действие 01.05.2009. М. : Росстандарт, 2009.

⁹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 21.05.2021) : утв. постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479.

Для случаев горения небольших аккумуляторных сборок, состоящих из небольшого количества элементов (около 2–10 шт.), основной задачей по предотвращению развития пожара является изоляция горящей сборки от других близкорасположенных горючих материалов и последующий контроль полного выгорания батареи. Для этого можно использовать обычный песок или поваренную соль, а также огнеупорные покрывала на основе асбеста, кремнезема, базальта или стекловолокна. В качестве альтернативы обычному песку применяют стеклосодержащий наполнитель¹⁰ с размерами частиц от 0,04 до 2 мм. Применение стеклянных гранул более эффективно, чем обычный песок, за счет меньшего веса и большей заполняющей способности.

В некоторых случаях допускается полное погружение горящей батареи в воду при условии соблюдения мер электробезопасности. В Европе (Германия, Нидерланды) такой способ тушения практикуют при горении аккумулятора электромобиля, полностью погружая последний в емкость с водой [10]. Более подробный разбор способов тушения электромобилей будет рассмотрен в отдельной статье.

Для каждого типа аккумулятора выделяют наиболее эффективные способы тушения. Список наиболее подходящих огнетушащих веществ по данным различных производителей, согласно паспорту безопасности (MSDS) при хранении и транспортировке химической продукции, представлен в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, многие производители рекомендуют выполнять тушение возгораний крупных аккумуляторных сборок распыленной водой, химическими и сухими порошками, CO_2 и пеной.

Вода считается самым экономичным и экологически безопасным способом тушения. Распыление воды имеет самую высокую эффективность охлаждения и успешно подавляет развитие процесса саморазгона соседних ячеек в аккумуляторной сборке и их взрыв [12]. Для LFP аккумуляторов тушение водой нежелательно, так как в результате химической реакции гексафторфосфата лития LiPF_6 с водой выделяется токсичный газ (фтористый водород HF) в диапазоне от 20 до 200 мг/Вт·ч номинальной энергоемкости батареи [13, 14].

Огнетушащие средства в виде сухих порошков, углекислого газа (CO_2) и хладона (гептафторпропан или HFC-227) способны уменьшить последствия развития теплового разгона, но зачастую не способны полностью остановить повторное возгорание. Сухие порошки для классов пожара ABCE обладают менее выраженным охлаждающим эффектом, чем CO_2 и HFC-227.

Использование пены позволяет охладить и изолировать поверхность горения, но не позволяет обеспечить длительную защиту по причине ее разрушения за счет выброса горючего газа в виде струи при выгорании ячейки литий-ионного аккумулятора.

¹⁰ Сайт производителя стеклосодержащего наполнителя. URL: <https://poraver.com/extover/>

Важной задачей при тушении литий-ионных аккумуляторов является изолирование поврежденных ячеек и предотвращение передачи тепла к соседним неповрежденным ячейкам.

Среди наиболее перспективных разработок в области тушения литий-ионных аккумуляторов можно отметить варианты с применением хладона Novac 1230 — «сухая вода» ($\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$) в качестве огнетушащего вещества. Он обеспечивает эффективное поглощение тепла и охлаждения очага пожара, поэтому особенно эффективен на ранних стадиях пожара [12]. Так как Novac 1230 представляет собой диэлектрическую жидкость, то позволяет обеспечить работу электрических устройств даже при полном их погружении в вещество. На этом принципе может быть реализована безопасная система охлаждения литий-ионных аккумуляторов, которая может значительно снизить вероятность перегрева ячеек и выбросы опасных газов при воспламенении батареи. Хорошие результаты были получены при тушении NMC аккумуляторов путем распыления водяного тумана вместе с $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ [15]. Комбинированное применение позволило получить более эффективное охлаждение очага пожара по сравнению с применением водяного тумана без добавок.

В последнее время ведутся активные исследования и испытания хладона Novac 1230 в микрокапсулированном виде, например помещенного в оболочку из эпоксидной смолы [16]. Такая форма огнетушащего вещества может применяться в модульных системах хранения электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов. Novac 1230 успешно справляется с тушением пожаров LTO аккумуляторов [17].

Существует надежный способ применения микрокапсул для реализации технологии самозатухающих литий-ионных аккумуляторов в период их теплового разгона. Он основан на введении термочувствительных микрокапсул в электролиты и полиэтиленовый сепаратор литий-ионного аккумулятора, содержащих огнетушащее вещество Novac 7300 (HFE-7300) в виде жидкости, окруженной внешним слоем полиметилметакрилата (ПММА) [18]. При высокой температуре, превышающей 120 °C, ПММА разрушается и высвобождает жидкость, которая активно поглощает тепло. Данная система микрокапсулирования позволяет снизить температуру литий-ионной ячейки до 74 % от стандартного значения.

Механизм тушения на основе мицелярного инкапсулятора F-500 успешно применяется на практике для тушения горящего аккумулятора (в том числе типа LFP) путем распыления огнетушащего состава в очаг пожара [19]. F-500 содержит поверхностно-активное вещество, которое позволяет увеличить общее количество поглощаемого тепла при распылении воды за счет уменьшения размеров водяных капель. Увеличение поглощенного тепла может быть в 6–10 раз больше, чем у чистой воды. Кроме того, группа частиц (мицел) в F-500 позволяет создать изоляционный слой — «хи-

мический кокон» вокруг молекул углеводорода, выделяющегося при горении аккумулятора, что снижает его воспламеняемость.

Еще одним достаточно эффективным способом тушения литий-ионных аккумуляторов является применение водной дисперсии вермикулита (AVD), который представляет собой мелкие частицы размером менее 0,18 мм [20]. Пропорции составляют — 17 % вермикулит и 83 % вода. При распылении AVD на литий-ионную ячейку вода охлаждает зону горения, а вермикулит моментально высыхает, образуя пленку, которая отделяет доступ кислорода в очаг пожара.

Таким образом, для тушения литий-ионных аккумуляторов можно использовать воду, химические и сухие по-

рошки, хладоны HFC-227, Noves 1230 и др., огнетушащие микрокапсулы, состав F-500 и водную дисперсию вермикулита (AVD). Каждый способ тушения пожара имеет свои специфические особенности и должен выбираться в зависимости от типа и количества литий-ионных аккумуляторов, условий их эксплуатации, хранения и транспортировки.

Разнообразие способов тушения литий-ионных аккумуляторов позволяет разрабатывать практические рекомендации по оснащению объектов защиты различными первичными средствами тушения и системами пожаротушения на основе рассмотренных огнетушащих веществ. Данные рекомендации следует включать в действующие нормативные документы в области обеспечения пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1142>
2. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1152>
3. Malek S., Christophy M.C., Kole J.M. US Patent No. 8,808,895 B2. August 19, 2014.
4. Ярмоленко О.В., Юдина А.В., Игнатова А.А. Современное состояние и перспективы развития жидких электролитных систем для литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 155–195. DOI: 10.18500/1608-4039-2016-4-155-195 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29289314>
5. Gond R., van Ekeren W., Mogensen R., Naylor A.J., Younesi R. Non-flammable liquid electrolytes for safe batteries // Journal of The Royal Society of Chemistry. 2021. Vol. 8. Issue 11. Pp. 2913–2928. DOI: 10.1039/d1mh00748c
6. Huang Z., Lai J.-C., Kong X., Rajkovic I., Xiao X., Celik H. et al. A solvent-anchored non-flammable electrolyte // Matter. 2022. Vol. 12. Issue 2. Pp. 445–459. DOI: 10.1016/j.matt.2022.11.003
7. Захаров Л.Н. Техника безопасности в химических лабораториях : справ. 2-е изд., перераб. и доп. Л. ; Химия, 1991. 336 с.
8. Kong L., Li C., Jiang J., Pecht M.G. Li-Ion battery fire hazards and safety strategies // Energies. 2018. Vol. 11. Issue 9. P. 2191. DOI: 10.3390/en11092191
9. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В., Иванов Д.В. Обзор огнетушащих средств при тушении литий-ионных батарей // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 33–35. DOI: 10.34987/vestnik.sibrsa.2021.30.61.006
10. Lesiak P., Pietrzela D., Mortkaa P. Methods used to extinguish fires in electric vehicles // Safety & Fire Technology. 2021. Vol. 58. Issue 2. Pp. 38–57. DOI: 10.12845/sft.58.2.2021.3
11. Wilkens K., Johnsen B., Bhargava A., Dragsted A. Project BLUE BATTERY. Part II: Assessment of existing fire protection strategies and recommendation for future work // Fire and security. Danish Technological Institute (DBI). 2017. 37 p. URL: <https://brandogsikring.dk>
12. Zhao J., Xue F., Fu Y., Cheng Y., Yang H., Lu S. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents // iScience. 2021. Vol. 24. Issue 8. P. 102854. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102854
13. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A review of lithium-ion battery fire suppression // Energies. 2020. Vol. 13. Issue 19. P. 5117. DOI: 10.3390/en13195117
14. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Issue 1. P. 10018. DOI: 10.1038/s41598-017-09784-z
15. Liu Y., Duan Q., Xu J., Li H., Sun J., Wang Q. Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 28. P. 101185. DOI: 10.1016/j.est.2019.101185
16. Sertsova A., Krasilnikov S., Lee S.-S., Kim J.-S. The effect of epoxy resin on the properties of encapsulated fire extinguishing agent // Fire Science and Engineering. 2019. Vol. 33. Issue 5. Pp. 19–27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
17. Li Z., Fu Y., Liu A., Li X., Chen G., Qin P. An experimental study on fire suppression devices for power batteries of hybrid electric multiple units // Fire Technology. 2023. DOI: 10.1007/s10694-022-01351-x
18. Yim T., Park M.-S., Woo S.-G., Kwon H.-K., Yoo J.-K., Jung Y.S. et al. Self-extinguishing lithium ion batteries based on internally embedded fire-extinguishing microcapsules with temperature-responsiveness // Nano Letters. 2015. Vol. 15. Issue 8. Pp. 5059–5067. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01167

19. Yuan S., Chang C., Zhang J., Liu Y., Qian X. Experimental investigation of a micelle encapsulator F-500 on suppressing lithium ion phosphate batteries fire and rapid cooling // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 79. P. 104816. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104816
20. Wang H., Sun Q., Guo J., Xie S., He Y., Chen X. The efficiency of aqueous vermiculite dispersion fire extinguishing agent on suppressing three typical power batteries // Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage. 2021. Vol. 18. Issue 2. P. 020901. DOI: 10.1115/1.4048368

Материал поступил в редакцию 30.01.2023

Received January 30, 2023

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru