

Инновационные технологии для повышения противопожарной надёжности АКБ и РЭА

Андрей Кашкаров

Тушение возгораний аккумуляторных батарей (АКБ), особенно литий-ионных, является актуальной проблемой из-за растущего распространения аккумуляторов в различных сферах жизни: от бытовой электроники до транспортных систем и систем хранения энергии. Системы пожаротушения литиевых АКБ развиваются параллельно с электромобилями. Тем не менее перспективы применения систем пожаротушения намного шире и охватывают полный спектр электронных устройств и АКБ разного назначения. В статье рассказывается об инновационной российской технологии, а также об известных и применяемых способах безопасной эксплуатации АКБ.

Причины возгораний литий-ионных АКБ

Обеспечение безопасной эксплуатации литиевых аккумуляторов – серьёзная проблема, над ней работают в разных странах мира. В частности, из открытых результатов исследований вызывают интерес анализы состояния аккумуляторов в случае перезаряда, короткого замыкания, механического повреждения и внешнего огневого воздействия. Особенностью является их весьма высокая пожароопасность и взрывоопасность. Самовоспламенение литий-ионных батарей – весьма распространённое явление. При этом тушение возгораний литиевых АКБ затруднено, а иногда и невозможно с использованием воды, водопенных или порошковых огнетушащих соста-

вов, поскольку очаг возгорания литий-ионных АКБ отличается очень высокой температурой.

Исследования проблемы постоянно проводятся как в международных компаниях, таких как FM Global, GWL, так и в России, к примеру, в корпорации «Росатом Химия», ОА «ТВЭЛ», компании «Элехим».

Особенности химических составов АКБ

Сегодня распространены литий-полимерный (Li-Pol); литий-никель-марганец-кобальт-оксидный (LiNiMnCoO₂, NMC); литий-титанатный (Li₄Ti₅O₁₂, LTO); литий-железо-фосфатный (LiFePO₄, LFP) типы аккумуляторов. Литий-ионные элементы состоят из катода (оксид лития-кобальта, литий-железо-фосфат или оксид

лития-марганца и литий-никель-марганец-кобальта в качестве положительных электродов) и анода (отрицательный электрод: пористый углерод), когда графит является наиболее часто используемым материалом.

Наибольшую пожарную опасность представляют Li-Pol- и NMC-аккумуляторы (рис. 1).

Параметры различных литий-ионных аккумуляторов приводят к выводу, что варианты исполнения LTO и LFP представляют наименьшую пожарную опасность.

На инфографике (рис. 2) показано распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов.

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

На рис. 3 показано распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (тип NMC).

Аккумуляторные батареи электромобилей способны запасать номинальную энергию 40–100 кВт/ч, при этом их масса составляет 300–600 кг. Суммарная масса лития в таких батареях составит приблизительно 3,2–8 кг. Остальная масса батареи –

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

Рис. 1. Результаты испытаний различных типов литиевых АКБ

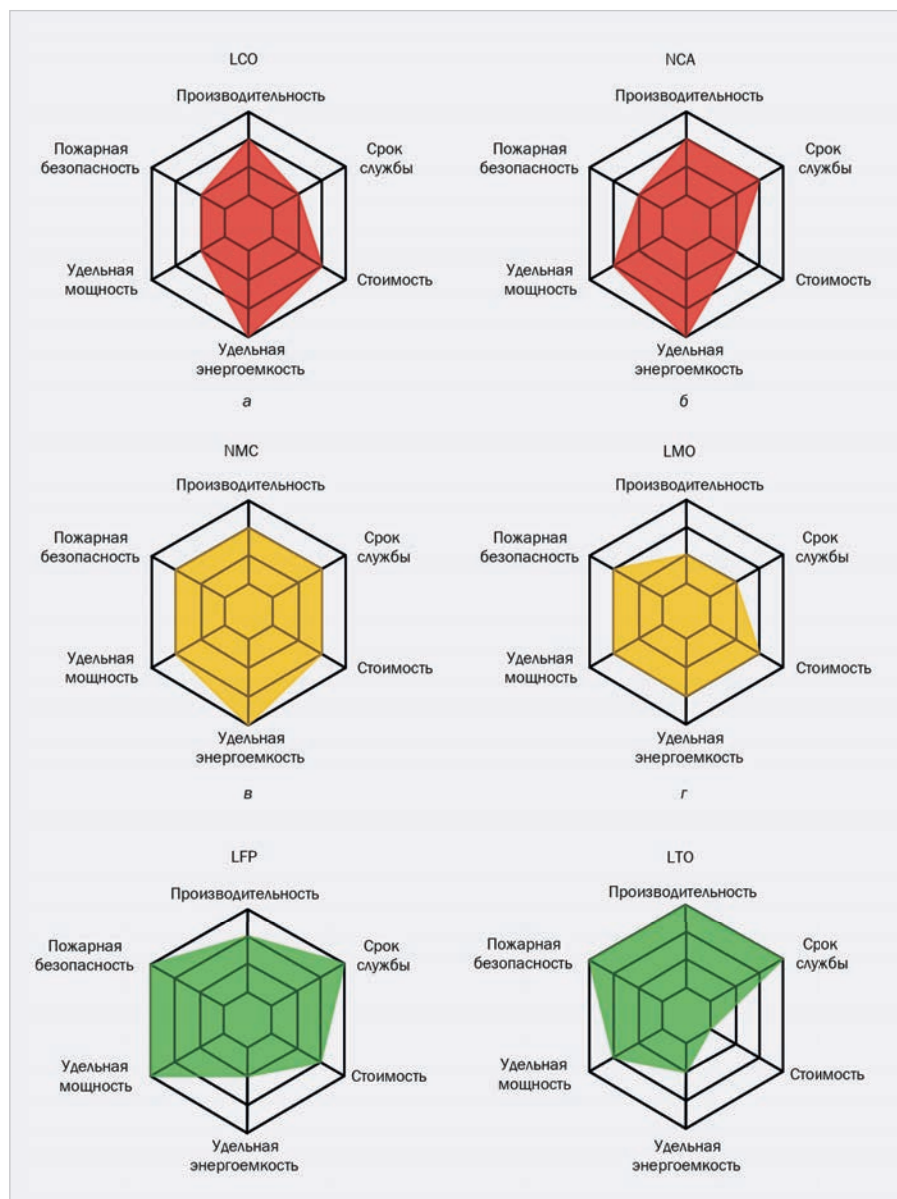


Рис. 2. Распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов: а – литий-кобальтовые; б – литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные; в – литий-никель-марганец-кобальт-оксидные; г – литий-марганцево-оксидные; д – литий-железо-фосфатные; е – литий-титанат-оксидные

это алюминий, графит, никель, медь, пластик и другие материалы.

В небольших АКБ суммарное содержание лития всех элементов не превышает 500 г, а номинальная энергия не более 6200 Вт/ч. Для небольших АКБ на 1 Вт/ч энергии приходится примерно 0,08 г лития.

Большинство литий-ионных батарей не имеет в своём составе пожароопасного металлического лития в чистом виде. Литий присутствует в виде солей (соединения, получаемые из карбоната лития) как часть электролита и катода (анода) аккумулятора. Растворы гексафторфосфата лития LiPF_6 используются в электролите аккумуляторной батареи, оксид лития-кобальта (LiCoO_2) или феррофос-

фат лития (LiFePO_4) – материал катода, а пентатитанат лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) – материал анода.

Механизм теплового разгона

Общий вид системы пожаротушения электромобилей разработки компании Rosenbauer показан на рис. 4. На рис. 5 представлен принцип подачи воды на тушение батареи.

Распыление воды считается доступным экономичным и экологически безопасным способом тушения аккумуляторов, обеспечивает высокую эффективность охлаждения, подавляя процесс саморазгона соседних ячеек в аккумуляторной сборке и даже их взрыв. Пожары с участием литий-ион-

ных аккумуляторов считают 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 повреждённых ячеек остановить полностью не удаётся.

В результате через некоторое время потушенный очаг вновь переходит в активную фазу горения. Однако тушение водой очага возгорания LFP аккумуляторов нежелательно, ибо 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 энергоёмкости батареи.

Огнетушащие средства в виде сухих порошков, углекислого газа (CO_2) и хладагona (гептафторпропан или HFC-227) уменьшают последствия развития теплового разгона, но не препятствуют гарантированно повторному возгоранию. Сухие порошки для всех условий возгорания по классификации ABCE обладают менее выраженным охлаждающим эффектом, чем CO_2 и HFC-227, а использование пены действительно охлаждает и изолирует поверхность горения, хотя и не обеспечивает длительную защиту из-за разрушения внутренних элементов за счёт выброса струй горючего газа при выгорании ячейки литий-ионных АКБ.

В сравнении с этим более надёжный способ – применение микрокапсул для самозатухания возгорания литий-ионных аккумуляторов в период их теплового разгона.

Способ апробирован введением термочувствительных микрокапсул в электролит и полиэтиленовый сепаратор АКБ, уже содержащих огнетушащее вещество Novec 7300 (HFE-7300) в виде жидкости, окружённой внешним слоем полиметилметакрилата (ПММА). При высокой температуре, превышающей 120°C , ПММА разрушается и высвобождает жидкость, активно поглощающую тепло. Это позволяет в критической ситуации снизить температуру литий-ионной ячейки до 74% от стандартного значения. Система по функционалу получила название микрокапсулирования.

Другим эффективным способом тушения литий-ионных АКБ стало

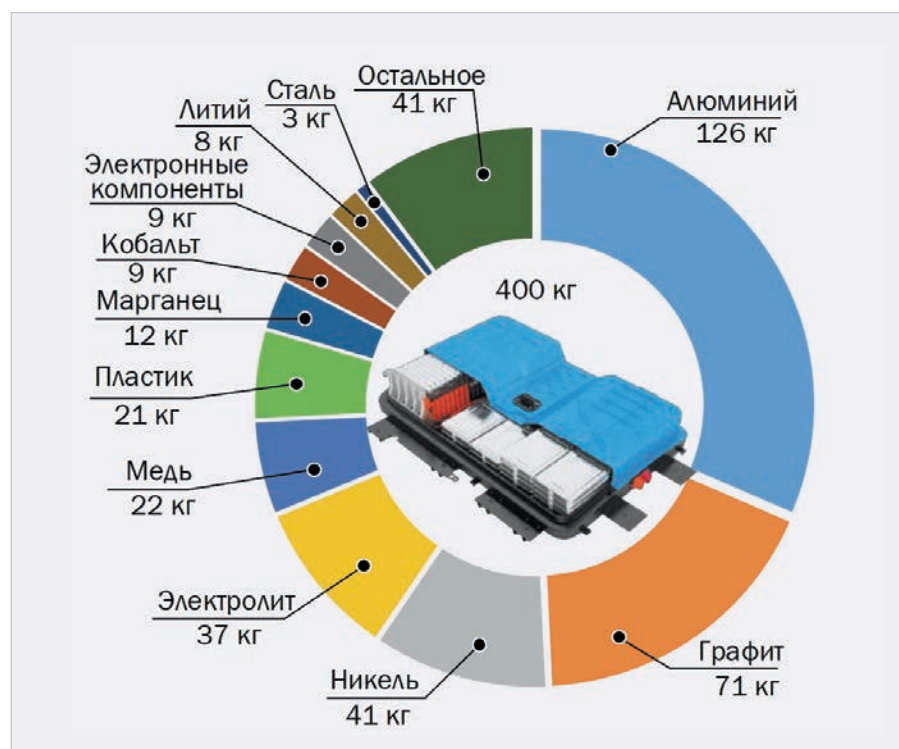


Рис. 3. Распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (NMC)

применение водной дисперсии вермикулита (AVD) в виде мелких частиц размером менее 0,18 мм. Состав дисперсии в пропорции 17% вермикулита и 83% очищенной воды. При распылении состава AVD на литий-ионную ячейку вода охлаждает зону горения, а вермикулит моментально высыхает, образуя плёнку, отделяющую доступ кислорода в очаг возгорания. На рис. 6 представлен самый простой способ применения противопожарного полотна для тушения автомобиля, а также проиллюстрирован разный характер температурного нагрева очага возгорания – автомобиля до и после применения противопожарного полотна.

Существующие методы тушения и их эффективность

Для устранения имеющихся пробелов в нормативной литературе интересен опыт других стран по тушению очагов возгорания литий-ионных аккумуляторов. Во многих странах Европы, Северной Америки и в КНР проблема тушения литий-ионных пожаров обозначена остро. В разных странах применяют как свои стандарты, так и технические регламенты по требованиям пожарной безопасности и правила противопожарного режима. В стандартах, как правило, дано разграничение между большими и небольшими аккумуляторными сборками.

Горение элементов литий-ионных аккумуляторов рассматривают как возгорание «смешанных» классов: А (горение твёрдых веществ), В (горение жидких веществ); С (горение газообразных веществ); Е (пожары электрооборудования, находящегося под напряжением).

Разные разработанные ранее способы тушения возгораний имеют специфические особенности и выбираются в зависимости от типа и количества литий-ионных аккумуляторов, условий эксплуатации, хранения и транспортировки. Для тушения литий-ионных аккумуляторов используют воду, водную дисперсию вермикулита (AVD), химические и сухие порошки (аэрозоли), углекислый газ (CO_2), аэрозоли, пены-хладоны, специализированные составы HFC-227, Novac 1230, F-500, специальное гелеобразное огнетушащее вещество SB 1500 Plus производства России, применяемое в автоматических и ручных системах пожаротушения низкого и высокого давления, а также огнетушащие микрокапсулы.

Выбор типа и количества огнетушащего вещества зависит от размеров аккумуляторных сборок и их типов, особенностей хранения, транспортировки и области применения.

Среди приведённых в пример устройств применяют модули порошкового пожаротушения (МПП), «самосрабатывающие» автономные устройства в виде дисков и шарообразной формы с огнетушащим порошком, пожарные гранаты, порошковые огнетушители, противопожарные ампулы, срабатывающие без участия человека в виде стеклянных капсул (в том числе вбрасываемые).

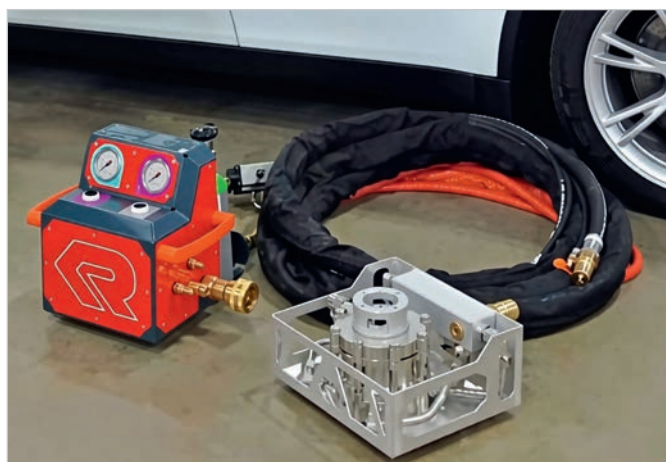


Рис. 4. Общий вид системы пожаротушения электромобилей разработки компании Rosenbauer



Рис. 5. Принцип подачи воды на тушение батареи

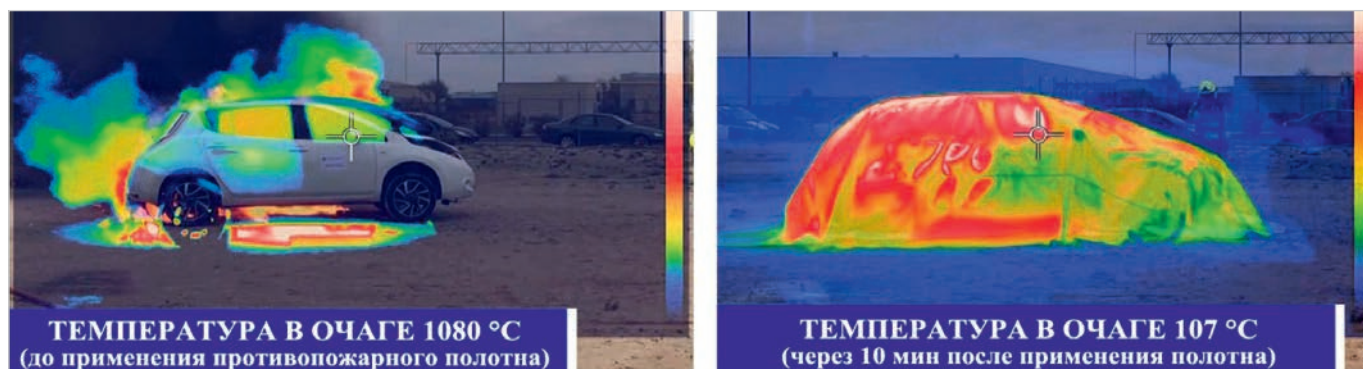


Рис. 6. Пример применения противопожарного полотна для тушения электромобиля

мые). Они же позиционируются как автономные огнетушители с жидким составом в стеклянных цилиндрах. На рис. 7 представлен вид автономной ампулы BASTET объёмом 600 мл. Устройство применяют для ликвидации очагов возгорания и пожаров классов АВСЕ согласно классификации, раскрытой выше.

При возникновении возгорания в зоне расположения АКБ температура среды повышается, внутри ампулы с жидкостью происходит химическая реакция. Когда температура достигает 95°C, ампула лопается и выпускает огнетушащее вещество непосредственно в место возгорания. Часть вещества превращается в газ и работает комплексно: охлаждает зону горения и одновременно уменьшает концентрацию кислорода. На обработанной поверхности формируется тонкая плёнка, предотвращающая повторное воспламенение. Ампулы могут применять как отдельно для каждого АКБ, так и в модуле-сборке для пожарной безопасности нескольких АКБ (рис. 8).

Автоматические системы защиты

Среди устройств автоматического пожаротушения выделяют специальные средства.

Специальный огнетушащий состав LiSafe для тушения литийсодержащих аккумуляторов – готовый к применению раствор на основе растворов металлоорганических соединений.

Некоторые эксплуатационные характеристики:

- удельный вес (плотность) 1,1–1,3 г/см³;
- pH 3,5–6,5 (слабокислый);
- динамическая вязкость при температуре 20°C – не более 2,5 сПз (сантипуаз; 1 сПз = 1 мПа·с);
- при подаче состава в очаг горения осуществляет эффективное тушение

без кратковременной интенсификации горения и взрывов;

- жидкий состав сохраняет огнетушащие свойства при температуре окружающей среды от –10°C до +50°C не менее 5 лет;

- жидкость относится к IV классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76.

Система «пожарной безопасности» АКБ в электромобилях активируется при достижении критических температур и испарений в местах размещения аккумуляторных батарей (рис. 9).

Модуль порошкового пожаротушения HighProp SNG01-87A представлен на рис. 10.

Компактное и автономное устройство для локального пожаротушения обеспечивает круглосуточную защиту в необслуживаемых помещениях. Монтируется непосредственно над аккумуляторными модулями. Активация полностью автономного устройства (без подключения к электросети или системам управления) происходит термомеханическим способом с помощью встроенного спринклерного датчика при достижении заданной температуры. При нагреве свыше +68°C жидкость в стеклянном резервуаре расширяется, что приводит к разрушению её колбы. Открывается клапан, и огнетушащее вещество под действием собственного давления распыляется непосредственно на очаг возгорания в защищаемой зоне с минимальным ущербом для окружающего пространства. Это обеспечивает эффективное решение для точечной защиты РЭА.

Кроме обеспечения противопожарной безопасности модулей АКБ это средство применяется для защиты от возгорания в серверных шкафах с телекоммуникационным оборудованием, в закрытых распределительных электрических щитах, силовых шкафах, трансформаторных нишах.

Применение подобной технологии позволяет защитить оборудование и персонал в производственной сфере, станки с ЧПУ, промышленные электронные контроллеры, помещения с печами и жаровнями, в том числе при изготовлении продуктов питания, а также стеллажи с архивными документами в государственных, муниципальных, музейных учреждениях.



Рис. 7. Устройство пожаротушения BASTET



Рис. 8. Ампулы BASTET в сборке

Некоторые технические характеристики:

- вместимость (масса ОТВ) порошка АВС – 12 кг;
- защищаемая площадь 5–6 м²;
- время выброса 12–18 с;
- рабочая температура от –30°С до +60°С.

Российские разработки в области безопасных материалов и средств пожаротушения

Создание и производство новых катодных материалов является перспективным направлением развития технологий аккумуляторных батарей. Внедрение таких материалов способствует повышению эффективности и безопасности аккумуляторов на всех этапах их жизненного цикла: от получения сырья и производства до эксплуатации и утилизации отработавших батарей. Развитие данных технологий создаёт основу для разработки более безопасных и надёжных технических решений, обеспечивающих эффективную эксплуатацию радиоэлектронной аппаратуры в будущем.

Инновация связана с изменением материалов (элементов) литиевой АКБ при производстве, а именно с получением (синтезом) высоковольтного кобальтата лития – ключевого материала для производства литий-ионных аккумуляторов большой мощности.

Со времён производства литиевых АКБ основным материалом в большинстве аккумуляторов, предназначенных для коммерческого использования, применялся оксид лития-кобальта (LCO) и никель-марганец-кобальт (NMC), а также фосфаты переходных металлов, содержащие литий.

В сравнении с прежними недавно полученный модифицированный материал для положительного электрода (катода) сохраняет ключевые преимущества классического кобальтата лития: стабильность при длительном циклировании (многократном повторении процессов зарядки и разрядки), хорошую ионную проводимость, высокую объёмную удельную плотность энергии и высокие значения коэффициентов диффузии лития. Это приводит к повышению надёжности как АКБ, так и всех модулей РЭА.

По своим свойствам кобальтат лития характеризуется высокой плот-

ностью энергии, что позволяет увеличить продолжительность работы аккумуляторных батарей и повысить скорость их заряда. В отличие от ранее разработанных материалов, модифицированная кристаллическая структура и оптимизированный химический состав кобальтата лития обеспечивают повышение напряжения заряда аккумулятора. Это, в свою очередь, приводит к увеличению энергоёмкости элементов питания более чем на 15%.

Инновационная технология синтеза кобальтата лития, предназначенного для изготовления катодов высоковольтных литий-ионных аккумуляторов, расширяет возможности производства аккумуляторных батарей с высокой энергоёмкостью и мощностью. Такие аккумуляторы могут эффективно использоваться в электронных устройствах транспортного назначения, системах накопления электроэнергии, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии (ветровыми, солнечными, гидроэнергетическими и другими), а также в радиоэлектронной аппаратуре аэрокосмической отрасли, для которой ключевыми требованиями являются компактность, высокая производительность и длительное время автономной работы. Применение новой технологии позволяет увеличить срок службы аккумуляторных батарей без снижения их мощности и энергоёмкости.

В мае 2026 года в России разработали опытную технологию получения высоковольтного кобальтата лития, а также удалось получить полимерный электролит в жидком состоянии, состоящий из гидрофильных солей лития (LiFSI) и растворителей на основе диметоксиэтана (DME) и полисилоксана (силикона). Такой состав позволяет предотвращать испарение электролита при высоких температурах (+100°С) и исключить его воспламенение. Немаловажное значение имеет формат упаковки аккумуляторных батарей при их хранении и транспортировке.

Перспективы развития отрасли

Проблема тушения литийсодержащих аккумуляторных батарей различных типов и размеров – от портативных электронных устройств до



Рис. 9. Система на шасси электромобиля для локализации возгораний АКБ



Рис. 10. Модуль порошкового пожаротушения HighProp SNG01-87A

тяговых аккумуляторов электромобилей, электробусов, электросудов, а также широко распространённых электросамокатов и роботов-доставщиков – обуславливает необходимость разработки и внедрения новых технологий обеспечения пожарной безопасности.

Поскольку значительная часть катодных материалов для производства аккумуляторных батарей ранее импортировалась из КНР, создание собственного производства в России является важным шагом на пути к обеспечению технологического суверенитета. Внедрение новой технологии синтеза катодных материалов создаёт предпосылки для развития отечественной отрасли по производству материалов для аккумуляторных батарей. Одновременно разработка новых способов тушения литий-ионных аккумуляторов способствует совершенствованию первичных средств пожаротушения и автоматических систем противопожарной защиты, обеспечивая повышение безопасности их эксплуатации.

