

Экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор(2-метил-3-пентанон), для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей транспортных средств

Дмитрий Михайлович Якунов¹, Александра Анатольевна Серцова²✉, Сергей Валерьевич Красильников², Алексей Федорович Колбасов³, Олег Викторович Двоенко⁴

¹ Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», г. Москва, Россия

² ООО «МФА ТЕХ», г. Москва, Россия

³ ГУП «Московский метрополитен», г. Москва, Россия

⁴ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Растущий спрос на электрический транспорт требует новых методов и подходов для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Наличие в их составе легковоспламеняющихся растворителей электролита и нестабильных материалов катода и анода обуславливает их высокую пожарную опасность и склонность к тепловому разгону. На сегодняшний день для локализации возгорания ЛИА на начальной стадии применяются только пассивные системы защиты, а методы активного пожаротушения не используются. Разработка новых способов, позволяющих реализовать активное пожаротушение на начальной стадии пожара, является актуальной задачей.

Цели и задачи. Оценить эффективность использования функциональных материалов, содержащих микрокапсулированное газовое огнетушащее вещество (ГОТВ) перфтор(2-метил-3-пентанон) (микрокапсулы с ФК 5-1-12) для ликвидации возгорания ЛИА.

Материалы и методы. Использовали пожаротушащие листы, содержащие 50 мас. % микрокапсул с ФК 5-1-12. Объект испытаний: ЛИА типа NMC 30Ач, сборка 2 и 6 штук. Тепловой разгон и возгорание ЛИА инициировали внешним нагревом.

Результаты и их обсуждение. Проведена экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов для обеспечения пожарной безопасности сборок ЛИА. Установлено, что для сборки, состоящей из двух аккумуляторов, не было зафиксировано открытого горения, даже при использовании внешних источников зажигания. ГОТВ превентивно выделяется из материала и препятствует возгоранию, создавая внутри и снаружи сборки негорючую атмосферу. Для сборки, состоящей из шести ЛИА, защищенной функциональными материалами, также не наблюдалось открытого горения и значительного роста температуры во время проведения эксперимента. Отмечено замедление теплового разгона (с 15 с до 1,5 мин) без использования штатных систем охлаждения.

Выводы. Функциональные материалы, содержащие микрокапсулы с ФК 5-1-12, эффективно подавляют возгорание ЛИА. За счет превентивной эмиссии ГОТВ они не позволяют начаться открытому горению, значительно замедляют теплопередачу и скорость теплового разгона от аккумулятора к аккумулятору за счет отсутствия лучистого теплообмена и частичного отвода тепла.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор; пожаротушащие материалы; микрокапсулы; газовое огнетушащее вещество перфтор (этил-изопропилкетон); локализация возгорания; тепловой разгон; микрокапсулированное огнетушащее вещество; электротранспорт; электромобили; гибридные автомобили; гибриды; безопасность электротранспорта

Для цитирования: Якунов Д.М., Серцова А.А., Красильников С.В., Колбасов А.Ф., Двоенко О.В. Экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор(2-метил-3-пентанон), для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей транспортных средств // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 47–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.47-62

✉ Серцова Александра Анатольевна, e-mail: sertsowa.aa@mfatech.ru

Experimental evaluation of the efficiency of functional materials containing microencapsulated perfluoro(2-methyl-3-pentanone) to ensure fire safety of lithium-ion batteries of electrical vehicle

Dmitry M. Yakunov¹, Alexandra A. Sertsova²✉, Sergey V. Krasilnikov², Alexey F. Kolbasov³, Oleg V. Dvoenko⁴

¹ State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute of Automobiles and Motor Vehicles "NAMI", Moscow, Russian Federation

² LLC "MFA TECH", Moscow, Russian Federation

³ SUE "Moscow Metro", Moscow, Russian Federation

⁴ 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

Introduction. The increasing demand for electric vehicles requires new methods for fire protection of lithium-ion batteries (LIB). Flammable electrolyte solvents and unstable cathode and anode materials are the reason for their fire hazard and thermal runaway. Currently, only passive protection systems are used to suppress LIB fires at the initial stage. Methods of active fire extinguishing are not used. The development of new methods that allow the use of active fire extinguishing at the initial stage of a fire is a pressing task.

Aims and purposes. To evaluate the effectiveness of functional materials containing microencapsulated fire extinguishing agent perfluoro(2-methyl-3-pentanone) (microcapsules with FK 5-1-12) for LIB fire suppression.

To evaluate the effectiveness of functional materials containing microencapsulated gas extinguishing agent (GEA) perfluoro(2-methyl-3-pentanone) (microcapsules with FC 5-1-12) for LIA fire suppression.

Materials and methods. The fire of the LIB was suppressed using functional materials containing 50 wt. % microcapsules with FK 5-1-12. Assemblies of NMC cells (30Ah) in quantities 2 and 6 cells were selected for testing. Thermal runaway and ignition of the LIB were initiated by external heating.

Results and discussion. An experimental evaluation of the use of functional materials containing microcapsules with FK 5-1-12 to ensure fire safety of LIB was carried out. It was found that combustion was not detected for the 2 cells LIB assembly even when external ignition sources were used. The fire extinguishing agent was preventively released from the material and inhibited fire. There was a non-flammable atmosphere inside and outside the assembly. No combustion or significant temperature increase were also observed during the experiment for the 6 cells LIB assembly protected by fire-extinguishing sheets. A slowdown in thermal runaway (from 15 sec to 1.5 minutes) was noted without the use of standard cooling systems.

Conclusions. Functional material containing microcapsules with FK 5-1-12 suppress the combustion of LIB. They did not allow open fire, significantly slowed down heat transfer and the rate thermal runaway from cell to cell due to the absence of radiant heat exchange and partial heat removal.

Keywords: lithium-ion battery; fire extinguishing materials; microcapsules; clear agent perfluoro(2-methyl-3-pentanone); fire localization; thermal runaway; microencapsulated fire extinguishing agent; electric vehicle; hybrid vehicle; electric vehicle safety

For citation: Yakunov D.M., Sertsova A.A., Krasilnikov S.V., Kolbasov A.F., Dvoenko O.V. Experimental evaluation of the efficiency of functional materials containing microencapsulated perfluoro(2-methyl-3-pentanone) to ensure fire safety of lithium-ion batteries of electrical vehicle. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):47-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.47-62 (rus).

✉ Alexandra Anatolievna Sertsova, e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

Введение

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) зарекомендовали себя как надежные устройства хранения энергии с высокой энергоемкостью, долговечностью, отсутствием эффекта памяти и другими положительными характеристиками. Мировой рынок ЛИА вырастет с 0,7 ТВт в 2022-м до 4,7 ТВт к 2030 г. по прогнозу McKinsey&Company¹. Основным драйвером его раз-

вития станет электрический транспорт, который уже сегодня формирует более 85 % спроса и для которого ЛИА является практически безальтернативным вариантом [1]. Около 4,3 ТВт к 2030 г. будет приходиться именно на электрический транспорт: легковые электромобили, коммерческие автомобили, маневровые локомотивы, электробусы, карьерные самосвалы, средства индивидуальной мобильности и прочее. Доминирование ЛИА для электрического транспорта обусловлено тем, что технология их производства отработана, масштабирована, а производственные мощности уже введены в эксплуатацию, что приво-

¹ Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. URL: <https://www.globalbattery.org/media/publications/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular.pdf>



Рис. 1. Основные виды материалов, использующихся для защиты ЛИА и модулей²

Fig. 1. The main types of materials used to protect LIB and modules²

дит к снижению стоимости аккумуляторных батарей (АКБ) с 535 \$/кВтч в 2013 г. до 107 \$/кВтч в 2023-м (указана приведенная стоимость в ценах 2023 г.), а альтернативные технологии все еще находятся на достаточно низком уровне технологической готовности (НИРы, НИКОРы и прототипы) [2].

Несмотря на многочисленные преимущества и высокий спрос ЛИА не лишены недостатков, не последним из которых является безопасность. В результате неправильной эксплуатации, брака при производстве или другой нештатной ситуации в аккумуляторе может начаться тепловой разгон, являющийся причиной возгорания и взрыва [3–5]. При этом возгорание в одном элементе приводит к цепному воспламенению конечного устройства, что, в свою очередь, влечет невосполнимую потерю дорогостоящего оборудования. Высокая пожарная опасность и тепловой разгон в ЛИА в первую очередь обусловлены наличием в их составе легковоспламеняющихся компонентов: электролита и химически активных материалов анода и катода, которые выделяют большое количество кислорода и водорода при разложении [6].

Проблема теплового разгона ЛИА в транспортных средствах актуальна [7] и, несмотря на множество имеющихся решений, минимизирующих возгорание и каскадирование ЛИА [8], не имеет единого решения. Современные аккумуляторы оснащены проницаемой мембраной-сепаратором, клапанами сброса давления, устройствами прерывания тока и иной защитой [9, 10]. Модули укомп-

лектуются контроллерами, защищающими от перегрузки, перезаряда и короткого замыкания. На уровне АКБ используются системы принудительного охлаждения (TMS) воздушного или жидкостного типа [11, 12], а также на основе материалов с фазовым переходом (PCM) [13, 14] контроллеры управления батареями (BMS) [15].

Кроме того, для защиты ЛИА активно используются теплоизоляционные, огнезащитные и противопожарные материалы, среди которых наиболее востребованы аэрогели, слюда, интумесцентные покрытия, силиконовые листы, графитовые пленки, негорючие пеноматериалы (рис. 1). Их использование в составе комплексной защиты замедляет теплообмен: передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору, от модуля к модулю или от модуля к конечному устройству, снижает скорость теплового разгона, что, в свою очередь, снижает вероятность и количество пожаров [16].

Все перечисленные методы и подходы обеспечивают пассивную защиту, а методы активного пожаротушения на практике используются редко и исключительно на высшем уровне архитектуры АКБ. При этом если теплового разгона и возгорания избежать не удастся, например в случае внутреннего короткого замыкания ЛИА [17], необходимо принять все меры для локализации пожара на уровне одного или нескольких аккумуляторов и не допустить распространения тепла и открытого горения на соседние модули и оборудование в целом.

На сегодняшний день для тушения ЛИА систематически испытаны и описаны порядка 20 огне-тушащих веществ на водной, газовой и порошковой основе, однако не выработано единое решение,

² IDTechEx reports Fire Protection Materials for Electric Vehicle Batteries 2023–2033. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/fire-protection-materials-for-electric-vehicle-batteries-2023-2033/897>

а эффективность того или иного средства в большой степени зависит от типа ЛИА (форм-фактор, электролитическая схема, емкость и прочее), конструкции АКБ, области применения, способа подачи огнетушащего вещества и других факторов [18, 19].

В ряде работ была показана эффективность использования газовых огнетушащих веществ (ГОТВ), таких как гептафторпропан (HFC-227ea) [20], перфтор (2-метил-3-пентанон) [21], 2-бромтрифторпропен (2-ВТР) [22], для локализации возгорания ЛИА на ранней стадии. Механизм действия перечисленных выше веществ основан на химическом ингибировании реакций горения за счет связывания свободных радикалов О, Н и ОН [23], а эффективность при тушении ЛИА превосходит CO_2 , огнетушащий порошок АВС и другие вещества [21].

Из всех перечисленных газовых огнетушащих веществ наиболее активно для тушения ЛИА изучается перфтор(2-метил-3-пентанон) (ФК-5-1-12). Это связано с тем, что кроме эффективного подавления пламени на химическом уровне он способен поглощать тепло за счет фазового перехода из жидкого в газообразное состояние с эндотермическим тепловым эффектом 111 Дж/г. В работе [24] была показана эффективность перфтор(2-метил-3-пентанона) по подавлению возгорания сборки из 12 аккумуляторов 18650 типа LCO (2.6 Ач, 3.7 В, SOC = 100 %). Тепловой разгон одного ЛИА в составе сборки вызывали методом электронагрева. При концентрации огнетушащего вещества, равной 15,2 об. %, происходило подавление возгорания и предотвращение теплового разгона в сборке. Ниже указанного значения наблюдалось подавление возгорания и снижение скорости распространения теплового разгона, однако полностью предотвратить передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору не удалось. В работе [25] тепловой разгон модуля, состоящего из 7 аккумуляторов типа LFP (призматический ЛИА, 271 Ач, SOC = 100 %), также удалось предотвратить с помощью перфтор(2-метил-3-пентанона), в других экспериментах на сборке из 28 аккумуляторов типа LFP (призматический ЛИА, 24 Ач) [26] и сборке двух NMC (призматический ЛИА, 117 Ач) [27] не удалось его остановить полностью, но отмечено значительное снижение скорости его распространения. В работах [22, 28] показана эффективность перфтор(2-метил-3-пентанона) для локализации возгорания единичных аккумуляторов типа NMC (призматический и пакетный ЛИА) емкостью от 30 до 50 Ач. Во всех перечисленных работах отмечено, что перфтор(2-метил-3-пентанона) эффективно подавляет открытое горение, также наблюдалось быстрое подавление пламени в интервалах времени от 2 до 30 с и отсутствие повторного возгорания.

Следует отметить, что в описанных выше работах проведены либо модельные эксперименты, при

которых подача огнетушащего вещества производилась из сосуда непосредственно в очаг возгорания — сборку аккумуляторов, либо инъекция огнетушащего вещества непосредственно в рабочий модуль или АКБ. Именно в последнем случае используемые огнетушащие вещества показывали наибольшую эффективность и быстро подавляли возгорание. В работе показано [29], что применение перфтор (2-метил-3-пентанона) для тушения ЛИА в объемном заполнении менее эффективно и требует большого расхода огнетушащего вещества.

Однако организация быстрой подачи огнетушащего вещества в модуль или АКБ, которые расположены внутри оборудования (электромобиль или стационарный промышленный накопитель энергии), представляется сложной задачей, требующей установки дополнительного баллона с огнетушащим веществом, оснащенного системой трубопроводов, сенсоров открытого огня и теплового разгона, инжекторной системы и прочего дополнительного оборудования [30]. Предложенная схема эффективна (как было показано в исследованиях выше), однако требует регулярного технического обслуживания, дозаправки огнетушащего вещества, усложнения конструкции АКБ и конечного оборудования, увеличения массы накопителя энергии. Поэтому разработка новых методов и подходов хранения и доставки огнетушащих веществ, позволяющих реализовать активное пожаротушение на начальной стадии возгорания ЛИА, на уровне одного или нескольких аккумуляторов, в непосредственной близости к очагу возгорания без использования дополнительного инженерного оборудования является актуальной задачей.

В настоящей работе предложено использовать функциональные материалы, содержащие в своем составе газовое огнетушащее вещество (ГОТВ) — перфтор(2-метил-3-пентанон) для локализации возгорания ЛИА на ранней стадии. Такие материалы представляют собой полимерные композиты, состоящие из микрокапсул с огнетушащим веществом и термореактивного связующего. Согласно ГОСТ Р 56459–2015³ их относят к автономным устройствам пожаротушения с применением термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих огнетушащих веществ, предназначенных для тушения пожаров классов А и В (по ГОСТ 27331⁴) и электрооборудования под напряжением в объектах защиты малого объема без участия человека. В ряде исследований

³ ГОСТ Р 56459–2015. Устройства пожаротушения автономные с применением термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих огнетушащих веществ. Общие технические требования. Методы испытаний.

⁴ ГОСТ 27331–87 (СТ СЭВ 5637–86). Пожарная техника. Классификация пожаров.

[31–33] была показана эффективность использования микрокапсул с перфтор(2-метил-3-пентанона) для локализации возгорания ЛИА.

Материалы и методы

В работе исследовали эффективность функциональных материалов, содержащих ГОТВ перфтор(2-метил-3-пентанон) ФК-5-1-12, для локализации возгорания сборок литий-ионных аккумуляторов на начальной стадии возгорания.

В качестве объекта испытаний были выбраны литий-ионные аккумуляторы со следующими характеристиками: форм-фактор — пакетный ЛИА, материал катода — литий-никель-марганец-кобальт-оксид (NMC), емкость — 30Ач, номинальное напряжение 3,6–3,7 В. Аккумуляторы испытывали в составе сборки из 2 и 6 штук. Данный тип ЛИА был выбран по двум причинам. Первая — их востребованность (более 50 %) для применения в составе аккумуляторных батарей электрического транспорта. Вторая — высокая пожарная опасность, обусловленная высокой емкостью, активным материалом катода и горючим растворителем электролита.

Для защиты сборок ЛИА использовали функциональные материалы, содержащие 50 мас. % огнетушащего вещества (далее — пожаротушащие листы), более подробные технические характеристики которых приведены в табл. 1. Количество пожаротушащих листов подбиралось индивидуально в зависимости от количества аккумуляторов в сборке.

В работе испытания проводили в соответствии с разработанной программой и методикой, в основе которой лежит методология испытаний по ГОСТ Р МЭК 62619–2023⁵. Согласно методике, тепловой разгон инициировали резистивным нагревом с использованием патронных трубчатых электронагревателей (далее — ТЭН). Нагревательные элементы размещались между двумя ЛИА, в результате чего происходил тепловой разгон двух (контактирующих с ТЭН) элементов одновременно. Внутри блока ЛИА или в непосредственной близости с ним размещали термопары для измерения температуры в зоне теплового разгона. Дополнительно измеряли температуру сборки в ходе эксперимента бесконтактным методом при помощи пирометра. Эксперименты проводили на открытой площадке при температуре воздуха 7 ± 2 °С.

Для сравнения и оценки эффективности пожаротушащих материалов проводили холостые эксперименты, в которых блок из 2 или 6 аккумуляторов подвергали тепловому разгону без использования

⁵ ГОСТ Р МЭК 62619–2023. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей промышленных применений.

Таблица 1. Свойства пожаротушащих листов
Table 1. Properties of fire extinguishing sheets

Параметр Parameter	Значение Value	Комментарий Note
Основа/матрица Base/matrix	Силиконовое связующее, гибкое исполнение Silicone adhesive, flexible	—
Размер микрокапсул с огнетушащим веществом, мкм Size of microcapsules with fire extinguishing agent, mkm	150–300	По данным изображений со сканирующего электронного микроскопа Based on scanning electron microscope images
Количество микрокапсул, мас. % Amount of microcapsules, mas. %	50 ± 2	Испытания в муфельной печи Muffle furnace tests
Диэлектрическая прочность, кВ/мм Dielectric strength, kV/mm	25	Технические параметры силиконового связующего TDS for silicone resin
Утечка огнетушащего вещества при 60 °С, % Leakage of fire extinguishing agent at 60 °C, %	$0,1 \pm 0,05$	Испытания в камере в течение 30 дней 30 day chamber testing
Температура срабатывания, °С Response temperature, °C	140 ± 3	Термический анализ Thermogravimetric analysis
Температура эксплуатации, °С (от/до) Operating temperature, °C (from/to)	–40/+90	Испытания в климатической камере Climatic chamber tests

пожаротушащих материалов. Оценивали время появления открытого пламени, скорость теплового разгона, температуру ЛИА после окончания эксперимента и другие параметры.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент № 1

На первом этапе испытали сборку ЛИА, состоящую из 2 элементов. Оценку ее температуры в процессе эксперимента проводили только бесконтактным методом в силу сложности расположения датчиков температуры непосредственно внутри



a



b

Рис. 2. Сборка, состоящая из двух ЛИА, обернутая пожаротушащим листом: *a* — вид прямо; *b* — вид сбоку
Fig. 2. Assembly of 2-cell LIB, wrapped in fire-extinguishing sheet: *a* — straight ahead view; *b* — side view

сборки. Для проведения эксперимента сборку ЛИА обернули пожаротушащими листами, как показано на рис. 2, *a* и 2, *b*, и установили на испытательный стенд. Масса пожаротушащего листа, используемого в испытании, составила 450 г, геометрические размеры $450 \times 250 \times 3$ мм, содержание действующего вещества перфтор(2-метил-3-пентанона) составило 225 ± 9 г.

Продолжительность эксперимента (эксперимент 1.2) составила 10 мин при условии, что разгерметизация элементов началась только через 5 мин после начала нагрева и была идентифицирована по характерному звуку и интенсивному дымообразованию. При этом на протяжении всего эксперимента не было зафиксировано открытого горения. Более того, на 6-й (факел № 1) и 7-й минуте эксперимента проводили дополнительное внесение внешних источников зажигания с целью поджига газообразных веществ, выделяющихся при тепловом разгоне аккумуляторов. Это не привело к возгоранию, что, вероятно, объясняется высокой концентрацией ГОТВ, выделившегося из пожаротушащего листа, достаточной для придания газовой смеси негорючести.

После окончания эксперимента сборку открыли, установили, что оба ЛИА подвергались тепловому разгону, пожаротушащий лист взвесили для оценки степени срабатывания материала. Его остаточная масса составила 250 г, следовательно, в результате проведения эксперимента произошло высвобождение около 80 мас. % огнетушащего вещества. Эмиссия ГОТВ происходила с внутренней части пластины, внешние слои остались без изменения (рис. 3, *a*), о чем свидетельствует характерное изменение окраски в более светлые тона. По данным пирометри-

ческих измерений температура сборки на момент окончания эксперимента не превышала 150°C .

В «холостом» эксперименте (эксперимент 1.1) со сборкой ЛИА, незащищенной пожаротушащими листами, открытое пламя появилось через 18 с после старта, а выгорание элементов произошло за 90 с, инициирование возгорания внешним источником (факелом) не потребовалось. Подробная информация по экспериментам 1.1 и 1.2 приведена в табл. 2.

Из полученных данных был сделан вывод, что для защиты сборки двух аккумуляторов, подвергшихся принудительному тепловому разгону в результате внешнего нагрева, достаточно 250 г пожаротушащего материала при толщине 3 мм для ингибирования реакций горения и полного подавления пламенного горения. Огнетушащее вещество, выделяющееся из пожаротушащего листа, создает внутри и вокруг сборки ЛИА негорючую атмосферу, поэтому возгорания и открытого пламенного горения не происходит даже при внесении внешнего источника зажигания. На основании данных пирометрических измерений отмечено значительное снижение температуры элементов (с 450 до 150°C) при защите их пожаротушащими материалами. Косвенно, по внешнему виду ЛИА (рис. 3, *a*), можно сделать вывод, что температура внутри сборки не превышала $150\text{--}200^\circ\text{C}$, поскольку даже монтажные элементы, выполненные из низкотемпературных материалов, остались неповрежденными, а внешние слои листов пожаротушащего материала (с температурой срабатывания не менее 150°C) после окончания эксперимента — неизменными (рис. 3, *b*).

Таблица 2. Результаты испытаний сборки, состоящей из 2 аккумуляторов
Table 2. Test results of 2-cell assembly LIB

Параметр Parameter	Эксперимент 1.1 Test 1.1	Эксперимент 1.2 Test 1.2
Степень заряда ЛИА, % State of charge of LIB, %	~ 60	~ 60
Время появления открытого пламени, с Open flame appearance time, s	18	Нет открытого пламени No open flame
Возгорание при достижении максимального значения температуры теплового разгона Ignition upon reaching the maximum thermal runaway temperature	Открытое реактивное горение Open jet fire	Отсутствует Absent
Внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания (факел № 1) External ignition by external ignition source (torch No. 1)	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
Повторное внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания (факел № 2) Re-initiation of combustion by external ignition source (torch No. 2)	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
Температура после окончания эксперимента, °С Temperature after the end of the experiment, °C	~450	~150
Степень срабатывания листа пожаротушащего материала после испытаний, % The degree of response of the fire extinguishing material sheet after testing, %	–	80



a



b

Рис. 3. Внешний вид пожаротушащих пластин после проведения эксперимента № 1: *a* — после разборки на части; *b* — в сборке

Fig. 3. External appearance of fire extinguishing sheets after experiment No. 1: *a* — after disassembly into parts; *b* — in assembly

Эксперимент № 2

На втором этапе работы испытали блок ЛИА, состоящий из шести элементов. Для данного эксперимента (эксперимент 2.2) были подготовлены пожаротушащие листы размером $180 \times 100 \times 2,1$ мм (масса 50 г) в количестве 8 штук, которыми прокладывался каждый аккумулятор, как показано на рис. 4, *a*. В отличие от эксперимента 1 сборку не оборачивали листами, а располагали в модельном металлическом шкафу с габаритными размерами $395 \times 310 \times 220$ мм и внутренним объемом, равным

26 л, для воссоздания эффекта теплового разгона в негерметичном объеме без системы охлаждения и интенсивного теплообмена. В шкаф дополнительно установили 4 листа, выполненных из пожаротушащего материала, как показано на рис. 4, *b* (вдоль стенок шкафа). Суммарное количество материала составило 900 г, а количество огнетушащего вещества — 450 ± 10 г. Нагревательный элемент устанавливали в центр сборки между внутренними аккумуляторами № 3 и 4 (рис. 5). «Холостой» эксперимент (эксперимент 2.1) с шестью ЛИА, незащищенными пожаротушащими листами,

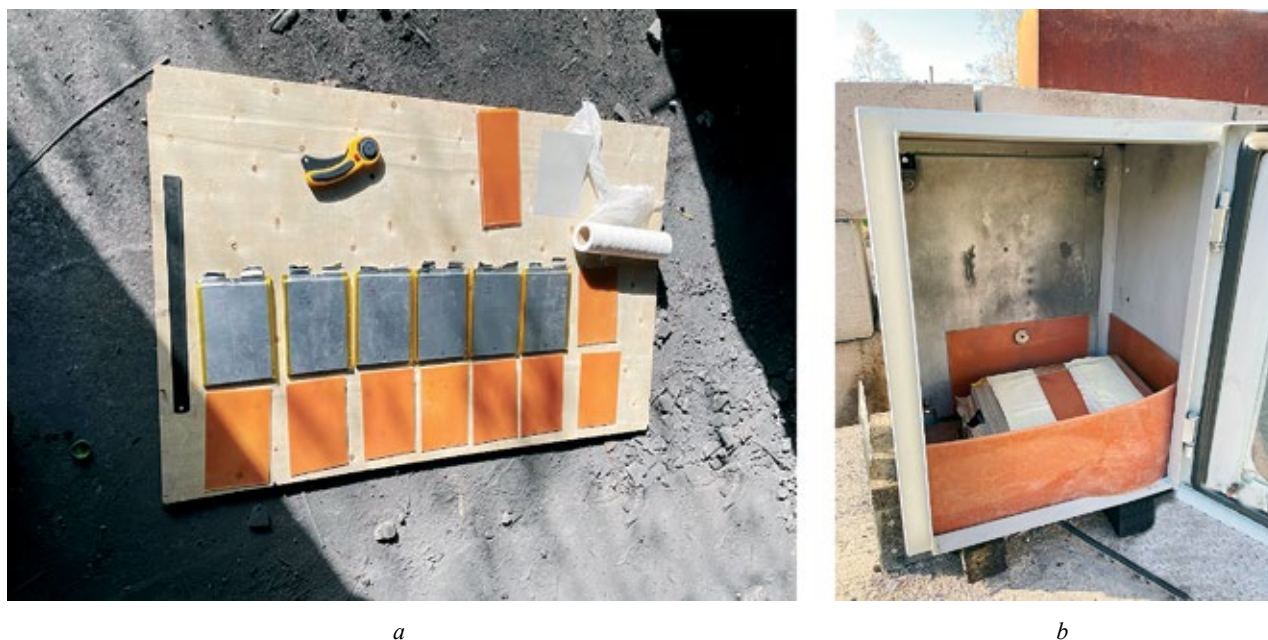


Рис. 4. Подготовка сборки ЛИА к испытанию № 2: *a* — расположение пожаротушащих листов вдоль шкафа; *b* — расположение пожаротушащих листов внутри модельного шкафа
Fig. 4. Preparing the LIB assembly for test No. 2: *a* — arrangement of fire extinguishing sheets along the model cabinet; *b* — arrangement of fire extinguishing sheets inside the model cabinet

проводили на открытой площадке (рис. 6, *a*). Подробная информация по экспериментам 2.1 и 2.2 приведена в табл. 3.

В табл. 3 приведены результаты испытаний сборок ЛИА, состоящих из 6 элементов, которые были проведены без и с использованием пожаротушащих листов.

Разгерметизация элементов № 3 и 4 в результате теплового разгона (нумерация в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5) произошла через 1:05 мин после начала эксперимента (подачи напряжения на патронный ТЭН) и не сопровождалась открытым горением. После снижения интенсивности дымообразования наблюдалось снижение температуры внутри модельного шкафа (рис. 7). Разгерметизация аккумулятора № 2 и 5 наступила через 3:45 и 5:55 мин от начала эксперимента соответственно, открытого горения также не зафиксировано. Для сравнения, разгерметизация пары ЛИА № 2 и 5 в ходе «холодого» эксперимента со сборкой, не защищенной пожаротушащими листами, наступает через 15 с вследствие быстрой передачи тепла преимущественно лучистым нагревом из-за наличия открытого горения (рис. 6, *a* и 6, *b*).

ГОТВ, эмиссия которого происходит из пожаротушащих листов, создает негорючую атмосферу в зоне эксперимента, препятствует образованию открытого горения, замедляет передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору за счет изменения механизма теплопередачи в сторону конвективного и контактного теплообмена.

Стоит отметить, что шкаф, используемый для проведения эксперимента № 2, являлся негерметичным и имел перфорацию на нижней стенке, что обеспечивало приток воздуха и не приводило к снижению концентрации кислорода в зоне теплового разгона. Более того, в результате теплового разгона аккумуляторов во внутренний объем выделялось большое количество горючих газообразных веществ, являющихся продуктами разложения компонентов электролита, среди которых CH_4 , H_2 , C_2H_4 [34], а также CO и CO_2 при полном окислении [35, 36], согласно следующим превращениям:

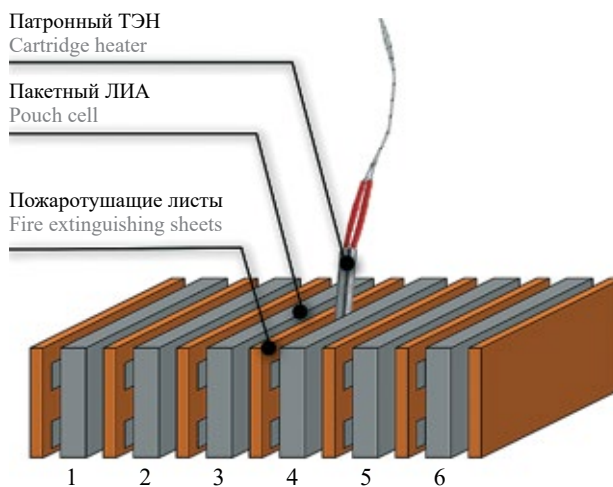
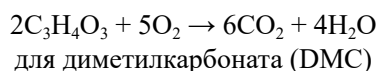


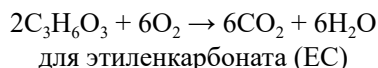
Рис. 5. Схема расположения нагревательного элемента, ЛИА и пожаротушащих листов для эксперимента № 2 (эксперимент 2.2)
Fig. 5. Layout of the heating element, LIB and fire extinguishing sheets for experiment No. 2 (test 2.2)

Таблица 3. Результаты испытаний аккумуляторного блока, состоящего из 6 элементов
Table 3. Test results of a battery assembly consisting of 6 elements

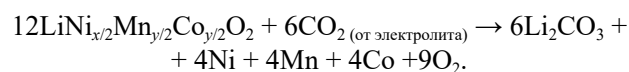
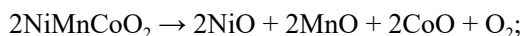
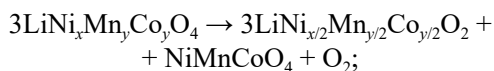
Номер элементов Element number	Параметр Parameter	Эксперимент 2.1 Test 2.1	Эксперимент 2.2 Test 2.2
1	Степень заряда ЛИА, % State of charge of LIB, %	~60	~60
2	Время появления открытого пламени, с Open flame appearance time, s	16	Нет открытого пламени No open flame
3	Возгорание при достижении максимального значения температуры теплового разгона Ignition upon reaching the maximum thermal runaway temperature	Открытое реактивное горение Open jet fire	Отсутствует Absent
4	Скорость распространения теплового разгона, с Velocity of thermal runaway propagation, s	5	160
5	Внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания External ignition by external ignition source	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
6	Степень срабатывания листа пожаротушащего материала после испытаний, % The degree of response of the fire extinguishing material sheet after testing, %	–	100



или



и кислорода от разложения материала катода типа NMC по реакции [37]:



Данными уравнениями проиллюстрирована только небольшая часть реакций, в результате которых образуется кислород и горючие вещества внутри ЛИА.

Перфтор(2-метил-3-пентанон), эмиссия которого происходит из пожаротушащих листов, создавал внутри модельного шкафа негорючую атмосферу, в результате чего не наблюдалось открытого горения, и приводил к снижению температуры за счет эндотермических процессов. Однако такого эффекта от ГОТВ в сравнении с мощным тепловыделением от аккумуляторов оказалось недостаточно для полного предотвращения распространения теплового разгона от аккумулятора к аккумулятору. По этой причине все 6 ЛИА подверглись тепловому разгону последовательно и были разгерметизированы. Кроме того, негерметичность камеры и мощный воздушный поток системы



a



b

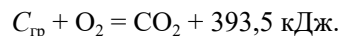
Рис. 6. Сборка, состоящая из двух ЛИА: *a* — без пожаротушащих листов на испытательном стенде; *b* — в момент возгорания
Fig. 6. Assembly of 2-cell LIB: *a* — without fire extinguishing sheets on a test bench; *b* — at the moment of ignition

удаления продуктов термодеструкции могли привести к частичному удалению огнетушащего вещества из камеры, и, соответственно, снижению его концентрации ниже порогового огнетушащего значения и повышению концентрации кислорода.

Стоит отметить, что результаты, полученные в ходе эксперимента № 2, согласуются с результатами, которые были получены в работах [26, 27], где перфтор(2-метил-3-пентанона) использовался в чистом виде. Авторы отмечают, что при срабатывании противопожарной системы происходит поглощение тепла, но этого эффекта недостаточно для остановки распространения теплового разгона.

В ходе всего эксперимента температура внутри модельного шкафа не превышала 220 °С и не было зафиксировано открытого горения. По окончании эксперимента, по истечении 10 мин при открытии модельного шкафа было зафиксировано резкое повышение температуры вплоть до 600 °С (рис. 7). Данный факт объясняется тем, что в закрытом объеме при концентрации ГОТВ выше 5–7 % (огнетушащая концентрация) в аккумуляторах, находящихся при высокой температуре, протекают реакции пиролиза (термическое разложение в недостатке кислорода, без открытого горения). Открытие дверцы модельного шкафа привело к утечке ГОТВ из зоны теплового разгона, резкому снижению его концентрации в объеме ниже порогового значения и к появлению беспрепятственного доступа кислорода (баланс огнетушащего вещества/кислорода и горючих веществ был нарушен), что, в свою очередь, привело к изменению механизма в сторону термоокислительной деструкции компонентов ЛИА, в частности твердых материалов аккумулятора, например, гра-

фита из материала покрытия анода, протекающих с значительным экзотермическим эффектом в соответствии с уравнением реакции:



К моменту открытия дверцы ящика большая часть пожаротушащих листов уже сработала, эмиссия ГОТВ прекратилась и выделившегося количества перфтор(2-метил-3-пентанона), находящегося в газовой среде экспериментального ящика, оказалось недостаточным для поддержания концентрации выше порогового значения в 5–7 %, необходимого для ингибирования реакций, протекающих с участием кислорода, и снижения температуры. Изображения элементов после эксперимента приведены на рис. 8, на основании которых можно сделать вывод, что в них прошли более глубокие процессы термического разложения, по сравнению с экспериментом № 1.2.

Таким образом, по окончании эксперимента было произведено принудительное снижение концентрации ГОТВ ниже огнетушащего значения в момент, когда самоподдерживающиеся экзотермические реакции внутри ЛИА еще не были завершены. В дальнейшем необходимо избегать удаления огнетушащего вещества из защищаемого объема до окончания экзотермических реакций внутри ЛИА и производить вскрытие сборки только после снижения температуры до нормального значения.

Результаты эксперимента № 2.2 показали, что в дальнейшем при исследовании влияния функциональных материалов, содержащих огнетушащие вещества, на динамику распространения теплового разгона необходимо проводить эксперименты

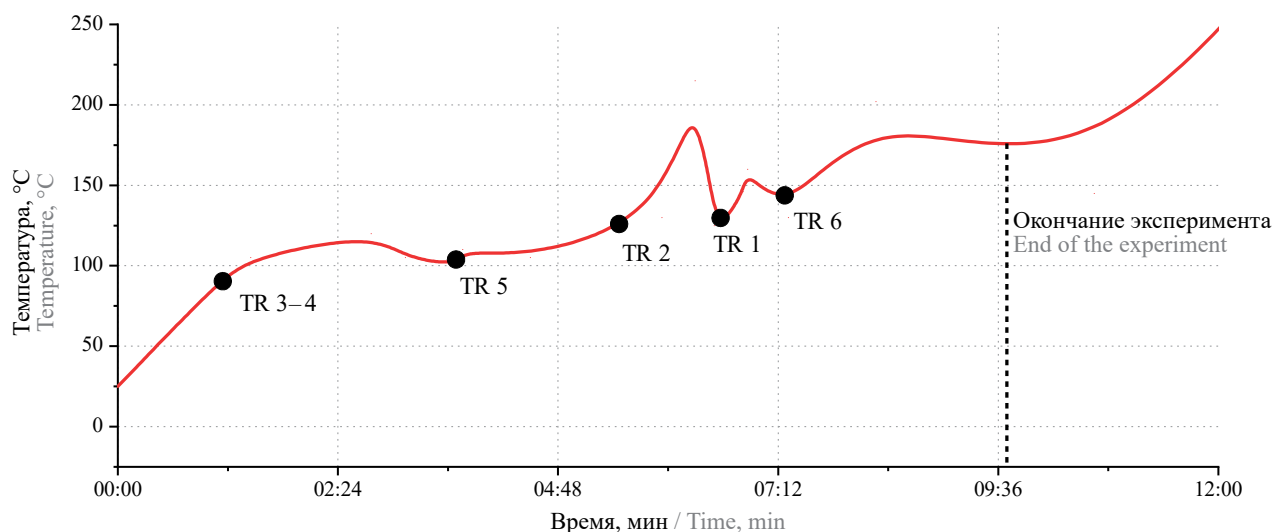


Рис. 7. Зависимость температуры от времени внутри модельного шкафа при проведении эксперимента со сборкой из 6 аккумуляторов, защищенной пожаротушащими листами

Fig. 7. Dependence of temperature on time inside the model cabinet during the experiment with an assembly of 6 LIB protected by fire extinguishing sheets



a



b

Рис. 8. ЛИА после экспериментов: *a* — № 1; *b* — № 2
Fig. 8. LIB after test: *a* — No. 1; *b* — No. 2

со штатной системой охлаждения АКБ или системой теплоизоляционных прокладок, препятствующих конвективному и контактному теплообмену, поскольку решением задачи теплообмена по этим механизмам в проведенных экспериментах пренебрегли. Также необходимо тщательно прорабатывать архитектуру АКБ и расположения в нем пожаротушащих материалов относительно ЛИА, сохранять минимально необходимое расстояние между аккумуляторами для снижения конвективного теплообмена.

Важно отметить, что в соответствии с NFPA 2001⁶ нормированная продолжительность защиты методом затопления (объемное пожаротушение) с помощью перфтор(2-метил-3-пентанона) составляет 10 мин. Продолжительность теплового разгона АКБ сильно зависит от размера, емкости, степени заряда и прочих факторов и может достигать нескольких часов. Расхождение этих параметров может ограничивать использование пожаротушащих материалов для защиты АКБ. Однако, в отличие от объемного пожаротушения, при правильной компоновке пожаротушащих материалов в модуле или сборке они могут срабатывать послойно и значительно уве-

личивать продолжительность защиты, обеспечивать отсутствие открытого огня при тепловом разгоне, сместив направление химических реакций, протекающих при тепловом разгоне, в сторону пиролитического механизма, протекающего с меньшей скоростью и с меньшим экзотермическим эффектом.

Выводы

В работе проведены эксперименты по использованию функциональных материалов, содержащих ГОТВ перфтор(2-метил-3-пентанона) в микрокапсулированном виде для защиты сборок литий-ионных аккумуляторов. Установлено, что ГОТВ, выделяющееся из пожаротушащих листов при температуре ~130 °С, создает вокруг и внутри сборки ЛИА атмосферу, не поддерживающую горение, за счет чего их тепловой разгон и разгерметизация происходят без открытого огня. Пожаротушащие листы не просто локализуют возгорание, а за счет преентивной эмиссии ГОТВ в зону теплового разгона не позволяют начаться открытому горению за счет химического ингибирования цепных реакций горения. Также отмечено замедление теплопередачи от аккумулятора к аккумулятору за счет отсутствия лучистого теплообмена и значительное снижение скорости теплового разгона. Однако проведение

⁶ NFPA 2001 Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems. 2022. URL: <https://www.fire-police-ems.com/NFPA2001-2022.shtml>

эксперимента в описанной конфигурации (без штатных средств обеспечения теплообмена) замедлило, но не остановило тепловой разгон полностью. Дальнейшие эксперименты по оценке влияния пожаротушающих листов на скорость распространения теплового разгона в сборках ЛИА необходимо проводить со штатной системой теплообмена модуля.

Поскольку основным назначением пожаротушающих листов является локализация и предотвращение возгораний, а также учитывая механизм действия используемого ГОТВ, необходимо избегать удаления огнетушащего вещества из защищаемого объема до снижения температуры аккумуляторной батареи после теплового разгона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bajolle H., Lagadic M., Louvet N.* The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios // *Energy Research and Social Science*. 2022. No. 93. P. 102850. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102850. EDN MRAUUQ.
2. *Catenacci M., Verdolini E., Bosetti V., Fiorese G.* Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles // *Energy Policy*. 2013. No. 61. Pp. 403–413. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.078
3. *Spotnitz R., Franklin J.* Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells // *Journal of Power Sources*. 2003. No. 113 (1). Pp. 81–101. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3. EDN BCZJGB.
4. *Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N.* Causes and mechanism of thermal runaway in lithium-ion batteries, contradictions in the generally accepted mechanism // *Journal of Energy Storage*. 2024. No. 86. P. 111372. DOI: 10.1016/j.est.2024.111372. EDN ZWGUHD.
5. *Серцова А.А., Красильников С.В.* Разработка функциональных пожаротушающих материалов для защиты литий-ионных аккумуляторов // *Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXV Междунар. науч.-практ. конф.* М., 2023. С. 561–568. EDN BZEZYY.
6. *He D., Wang J., Peng Ya., Li B., Feng Ch., Shen L. et al.* Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement // *Sustainable Materials and Technologies*. 2024. No. 41. P. e01017. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01017. EDN JSLMEH.
7. *Kolbasov A.F., Endachev D.V., Olkhovskiy I.A., Dvoenko O.V.* Issues of operational and environmental safety in the aftermath of an accident of vehicles with high-voltage components // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021 International Symposium “Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021”. IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012093. EDN QIXNAJ.
8. *Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovskiy I.A.* The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021 International Symposium “Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021”. IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092. EDN JWTTXC.
9. *Ouyang D., Weng J., Wang Zh., Wang J., Chen M., Huang Q.A.* Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures // *Applied Sciences*. 2019. No. 9 (12). P. 483. DOI: 10.3390/app9122483. EDN VNYHQQ.
10. *Харламенков А.С.* Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2022. № 30 (4). С. 76–79. EDN KPOESB.
11. *Qin P., Sun J., Yang X., Wang Q.* Battery thermal management system based on the forced-air convection : a review // *eTransportation*. 2021. No. 7. P. 100097. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100097
12. *Wu W., Wang S., Wu Wei, Chen K., Hong S., Lai Y.* A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management // *Energy Conversion and Management*. 2019. No. 182. Pp. 262–281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051. EDN AHUJOD.
13. *Wang H., Guo Ya., Ren Y., Yeboah S., Wang J., Long F. et al.* Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery // *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 236. P. 121590. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121590. EDN LHASQV.
14. *Mahmud Md., Rahman K.S., Rokonzaman Md., Habib A.K.M.A., Islam Md R., Motakabber S.M.A. et al.* Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material : a review // *Results in Engineering*. 2023. No. 20. P. 101424. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101424. EDN MQETDN.
15. *Харламенков А.С.* Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2022. № 31 (5). С. 83–86. EDN LMPEPG.
16. *Серцова А.А., Красильников С.В.* Микрокапсулированные огнетушащие агенты и функциональные материалы на их основе для защиты литий-ионных аккумуляторов // *Огнезащита материалов и конструкций SPBPU FPM-2023 : сб. тезисов докладов I Междунар. науч.-практ. конф.* 2023. С. 153–155. EDN HWUHAC.

17. Orendorff Ch.J., Roth E.P., Nagasubramanian G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells // *Journal of Power Sources*. 2011. No. 196 (15). Pp. 6554–6558. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.035
18. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire // *Fire Technology*. 2022. No. 60. Pp. 817–858. DOI: 10.1007/s10694-022-01278-3
19. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2023. № 32 (1). С. 89–96. EDN NDGMU.
20. Si Rong-jun, Liu De-qi, Xue Shao-qian. Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery // *Procedia Engineering*. 2018. No. 211. Pp. 629–634. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.057
21. Liu Y., Duan Q., Xu J., Chen H., Lu W., Wang Q. Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires // *RSC Advances*. 2018. No. 8 (73). Pp. 42223–42232. DOI: 10.1039/C8RA08908F
22. Wang H., Sun Q., Guo Ju., Xie S., He Yu., 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. No. 18 (2). P. 020901. DOI: 10.1115/1.4048368. EDN AHECZO.
23. Pagliaro J.L., Linteris G.T. Hydrocarbon flame inhibition by C₆F₁₂O (Novec 1230): Unstretched burning velocity measurements and predictions // *Fire Safety Journal*. 2017. No. 87. Pp. 10–17. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.11.002
24. Said A.O., Stolarov S.I. Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent // *Fire Safety Journal*. 2021. No. 121. P. 103296. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103296. EDN MPWPYZ.
25. Liang Ch., Jin K., Liu P., Wang Ch., Xu J., Li H. et al. The Efficiency of Perfluorohexanone on Suppressing Lithium-Ion Battery Fire and Its Device Development // *Fire Technology*. 2023. No. 59 (3). Pp. 1283–1301. DOI: 10.1007/s10694-023-01365-z. EDN CXOZBK.
26. Han Zh., Zhang X., Yu Yu., Du Zh., Hwang H.-Y., Liu L.L. et al. Experimental Investigation of Fire Extinguishing of a Full-Size Battery Box with FK-5-1-12 // *Fire Technology*. 2022. No. 59. Pp. 1269–1282. DOI: 10.1007/s10694-022-01273-8
27. Sun H., Zhang L., Duan Q., Wang Sh., Sun Sh., Sun J. et al. Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents // *Process Safety and Environmental Protection: Transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2022. No. 167. Pp. 299–307. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.016. EDN PWZJZG.
28. Wang Q., Li K., Wang Y., Chen H., Duan Q., Sun J. The Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing the Lithium Ion Battery Fire // *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2018. No. 15 (4). P. 041001. DOI: 10.1115/1.4039418
29. Zhang L., Ye F., Li Y., Chen M., Meng X., Xu J. et al. Experimental Study on the Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing Large-Scale Battery Module Fire // *Fire Technology*. 2022. No. 59. Pp. 1247–1267. DOI: 10.1007/s10694-022-01322-2
30. Lebkowski A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. No. 93 (1). Pp. 329–332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
31. Guo Y., Wang X., Gao J., He Zh., Yao S., Zhou X. et al. In situ extinguishing mechanism and performance of self-portable microcapsule fire extinguishing agent for lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2024. No. 93. P. 112393. DOI: 10.1016/j.est.2024.112393. EDN CYKPRS.
32. 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. No. 33 (5). Pp. 19–27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
33. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Ya., Zhao Y. et al. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety // *Materials Advances*. 2021. No. 2 (14). Pp. 4634–4642. DOI: 10.1039/d1ma00343g. EDN CYYING.
34. Yuan L., Dubaniewicz T., Zlochower I., Thomas R., Rayyan N. Experimental study on thermal runaway and vented gases of lithium-ion cells // *Process Safety and Environmental Protection: transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2020. No. 144. Pp. 186–192. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.028. EDN ZDEYFW.
35. Seo D.M., Chalasani D., Parimalam B.S., Kadam R., Nie M., Lucht B.L. Reduction Reactions of Carbonate Solvents for Lithium Ion Batteries // *ECS Electrochemistry Letters*. 2014. No. 3 (9). Pp. 91–93. DOI: 10.1149/2.0021409
36. Yoshida H., Fukunaga T., Hazama T., Terasaki M., Mizutani M., Yamachi M. Degradation mechanism of alkyl carbonate solvents used in lithium-ion cells during initial charging // *Journal of Power Sources*. 1997. No. 68 (2). Pp. 311–315. DOI: 10.1016/S0378-7753(97)02635-9. EDN AJDYDF.
37. Shurtz R.C. A Thermodynamic Reassessment of Lithium-Ion Battery Cathode Calorimetry // *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. No. 167 (14). P. 140544. DOI: 10.1149/1945-7111/abc7b4. EDN CQQTIJ.

REFERENCES

1. Bajolle H., Lagadic M., Louvet N. The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios. *Energy Research and Social Science*. 2022; 93:102850. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102850. EDN MRAUUQ.
2. Catenacci M., Verdolini E., Bosetti V., Fiorese G. Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy*. 2013; 61:403-413. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.078
3. Spotnitz R., Franklin J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*. 2003; 113(1):81-101. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3. EDN BCZJGB.
4. Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N. Causes and mechanism of thermal runaway in lithium-ion batteries, contradictions in the generally accepted mechanism. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86:111372. DOI: 10.1016/j.est.2024.111372. EDN ZWGUHD.
5. Sertsova A.A., Krasilnikov S.V. Functional fire extinguishing materials to protect lithium-ion batteries. Current issues of fire safety : *Proceeding of the XXXV International scientific and practical conference*. Moscow, 2023; 561-568. EDN BZEZYY. (rus.).
6. He D., Wang J., Peng Ya., Li B., Feng Ch., Shen L. et al. Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 41:e01017. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01017. EDN JSLMEH.
7. Kolbasov A.F., Endachev D.V., Olkhovsky I.A., Dvoenko O.V. Issues of operational and environmental safety in the aftermath of an accident of vehicles with high-voltage components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021"*. IOP Publishing Ltd, 2021; 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012093. EDN QIXNAJ.
8. Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovsky I.A. The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021"*. IOP Publishing Ltd, 2021; 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092. EDN JWTTXC.
9. Ouyang D., Weng J., Wang Zh., Wang J., Chen M., Huang Q.A. Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures. *Applied Sciences*. 2019; 9(12): 483. DOI: 10.3390/app9122483. EDN VNYHQQ.
10. Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2022; 30(4):76-79. EDN KPOESB. (rus).
11. Qin P., Sun J., Yang X., Wang Q. Battery thermal management system based on the forced-air convection : a review. *eTransportation*. 2021; 7:100097. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100097
12. Wu W., Wang S., Wu Wei, Chen K., Hong S., Lai Y. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*. 2019; 182:262-281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051. EDN AHUJOD.
13. Wang H., Guo Ya., Ren Y., Yeboah S., Wang J., Long F. et al. Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 236:121590. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121590. EDN LHASQV.
14. Mahmud Md., Rahman K.S., Rokonuzzaman Md., Habib A.K.M.A., Islam Md R., Motakabber S.M.A. et al. Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material : a review. *Results in Engineering*. 2023; 20:101424. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101424. EDN MQETDN.
15. Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2022; 31(5):83-86. EDN LMPEPG.
16. Sertsova A.A., Krasilnikov S.V. Microencapsulated fire extinguishing agents and functional materials based on them for the protection of lithium-ion batteries. *Fire Protection of Materials and Structures SPBPU FPM-2023 : Collection of abstracts of reports from the 1st international scientific and practical conference*. St. Petersburg, 2023; 153-155. EDN HWUHAC. (rus).
17. Orendorff Ch.J., Roth E.P., Nagasubramanian G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*. 2011; 196(15):6554-6558. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.035
18. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*. 2022; 60:817-858. DOI: 10.1007/s10694-022-01278-3
19. Kharlamenkov A.S. Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):89-96. EDN NDGMYU. (rus).
20. Si Rong-jun, Liu De-qi, Xue Shao-qian. Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery. *Procedia Engineering*. 2018; 211:629-634. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.057

21. Liu Y., Duan Q., Xu J., Chen H., Lu W., Wang Q. Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires. *RSC Advances*. 2018; 8(73):42223-42232. DOI: 10.1039/C8RA08908F
22. Wang H., Sun Q., Guo Ju., Xie S., He Yu., 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; 18(2):020901. DOI: 10.1115/1.4048368. EDN AHECZO.
23. Pagliaro J.L., Linteris G.T. Hydrocarbon flame inhibition by C₆F₁₂O (Novec 1230): Unstretched burning velocity measurements and predictions. *Fire Safety Journal*. 2017; 87:10-17. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.11.002
24. Said A.O., Stolarov S.I. Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent. *Fire Safety Journal*. 2021; 121:103296. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103296. EDN MPWPYZ.
25. Liang Ch., Jin K., Liu P., Wang Ch., Xu J., Li H. et al. The Efficiency of Perfluorohexanone on Suppressing Lithium-Ion Battery Fire and Its Device Development. *Fire Technology*. 2023; 59(3):1283-1301. DOI: 10.1007/s10694-023-01365-z. EDN CXOZBK.
26. Han Zh., Zhang X., Yu Yu., Du Zh., Hwang H.-Y., Liu L.L. et al. Experimental Investigation of Fire Extinguishing of a Full-Size Battery Box with FK-5-1-12. *Fire Technology*. 2022; 59:1269-1282. DOI: 10.1007/s10694-022-01273-8
27. Sun H., Zhang L., Duan Q., Wang Sh., Sun Sh., Sun J. et al. Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents. *Process Safety and Environmental Protection: Transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2022; 167:299-307. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.016. EDN PWZJZG.
28. Wang Q., Li K., Wang Y., Chen H., Duan Q., Sun J. The Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing the Lithium Ion Battery Fire. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2018; 15(4):041001. DOI: 10.1115/1.4039418
29. Zhang L., Ye F., Li Y., Chen M., Meng X., Xu J. et al. Experimental Study on the Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing Large-Scale Battery Module Fire. *Fire Technology*. 2022; 59:1247-1267. DOI: 10.1007/s10694-022-01322-2
30. Lebkowski A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017; 93(1):329-332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
31. Guo Y., Wang X., Gao J., He Zh., Yao S., Zhou X. et al. In situ extinguishing mechanism and performance of self-portable microcapsule fire extinguishing agent for lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. 2024; 93:112393. DOI: 10.1016/j.est.2024.112393. EDN CYKPRS.
32. 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; 33(5):19-27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
33. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Ya., Zhao Y. et al. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety. *Materials Advances*. 2021; 2(14):4634-4642. DOI: 10.1039/d1ma00343g. EDN CYYING.
34. Yuan L., Dubaniewicz T., Zlochower I., Thomas R., Rayyan N. Experimental study on thermal runaway and vented gases of lithium-ion cells. *Process Safety and Environmental Protection: transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2020; 144:186-192. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.028. EDN ZDEYFW.
35. Seo D.M., Chalasani D., Parimalam B.S., Kadam R., Nie M., Lucht B.L. Reduction Reactions of Carbonate Solvents for Lithium Ion Batteries. *ECS Electrochemistry Letters*. 2014; 3(9):91-93. DOI: 10.1149/2.0021409
36. Yoshida H., Fukunaga T., Hazama T., Terasaki M., Mizutani M., Yamachi M. Degradation mechanism of alkyl carbonate solvents used in lithium-ion cells during initial charging. *Journal of Power Sources*. 1997; 68(2):311-315. DOI: 10.1016/S0378-7753(97)02635-9. EDN AJDYDF.
37. Shurtz R.C. A Thermodynamic Reassessment of Lithium-Ion Battery Cathode Calorimetry. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020; 167(14):140544. DOI: 10.1149/1945-7111/abc7b4. EDN CQQTJJ.

Поступила 06.09.2024, после доработки 19.08.2025;

принята к публикации 20.08.2025

Received September 06, 2024; Received in revised form August 19, 2025;

Accepted August 20, 2025

Информация об авторах

ЯКУНОВ Дмитрий Михайлович, начальник сектора функционального тестирования накопителей энергии, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»», Россия, 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, 2; ORCID: 0009-0003-6230-3787; e-mail: dmitry.yakunov@nami.ru

СЕРЦОВА Александра Анатольевна, к.х.н., генеральный директор, ООО «МФА ТЕХ», Россия, 117105, г. Москва, ул. Нагатинская, 3А, стр. 5, оф. 428; ORCID: 0000-0001-8275-7944; ResearcherID: AAK-1619-2021; AuthorID: 35099465500; e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

КРАСИЛЬНИКОВ Сергей Валерьевич, технический директор, ООО «МФА ТЕХ», Россия, 117105, г. Москва, ул. Нагатинская, 3А, стр. 5, оф. 428; ORCID: 0009-0004-3276-4037; AuthorID: 53866562800; e-mail: krozenhover@gmail.com

КОЛБАСОВ Алексей Федорович, к.т.н., начальник отдела лабораторных испытаний и сертификации, Дирекция по развитию электротранспортных средств, ГУП «Московский метрополитен», Россия, 121351, г. Москва, ул. Ивана Франко, 14; ORCID: 0000-0001-5259-5059; e-mail: KolbasovAF1@transport.mos.ru

ДВОЕНКО Олег Викторович, к.т.н., доцент, начальник кафедры пожарной техники, 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; SPIN-код: 2013-9651; ORCID: 0000-0002-0436-4974; AuthorID: 57321841400; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Вклад авторов:

Якунов Д.М. — планирование исследований; подготовка экспериментов; написание научной статьи.

Серцова А.А. — анализ и обобщение данных литературы; подготовка и проведение экспериментов; написание научной статьи.

Красильников С.В. — подготовка экспериментов; анализ и систематизация экспериментальных данных; написание научной статьи.

Колбасов А.Ф. — организация и проведение испытаний; написание научной статьи.

Двоенко О.В. — развитие методологии; подготовка и проведение экспериментов; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitry M. YAKUNOV, Head of the Sector for Functional Testing of Energy Storage System, State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute of Automobiles and Motor Vehicles “NAMI”; Automotornaya St., 2, Moscow, 125438, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6230-3787; e-mail: dmitry.yakunov@nami.ru

Alexandra A. SERTSOVA, Cand. Sci. (Chem.), Chief Executive Officer, LLC “MFA TECH”, Nagatinskaya St., 3A, build. 5, office 428, Moscow, 117105, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8275-7944; ResearcherID: AAK-1619-2021; AuthorID: 35099465500; e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

Sergey V. KRASILNIKOV, Chief Technical Officer, LLC “MFA TECH”, Nagatinskaya St., 3A, build. 5, office 428, Moscow, 117105, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-3276-4037; AuthorID: 53866562800; e-mail: krozenhover@gmail.com

Alexey F. KOLBASOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory Testing and Certification Department Directorate for Development of Electric Vehicles, SUE “Moscow Metro”, Ivan Franko St., 14, Moscow, 121351, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5259-5059; AuthorID: 57198424244; e-mail: KolbasovAF1@transport.mos.ru

Oleg V. DVOENKO, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of the Fire Fighting Equipment, 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; SPIN-code: 2013-9651; ORCID: 0000-0002-0436-4974; AuthorID: 57321841400; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Contribution of the authors:

Yakunov D.M. — research planning; preparation of experiments; writing of a scientific article.

Sertsova A.A. — analysis and generalization of literature data; preparation and performing of experiments; writing of a scientific article.

Krasilnikov S.V. — preparation of experiments; analysis and systematization of experimental data; preparation and conduct of experiments; writing of a scientific article.

Kolbasov A.F. — organization and performing of experiments; writing of a scientific article.

Dvoenko O.V. — methodology development; organization and performing of experiments; final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.