

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 93-98
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):93-98

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98>

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3

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

Представлены статистические данные, отражающие состояние парка электромобилей в России. Проведено обобщение основных характеристик аккумуляторных блоков наиболее популярных моделей электромобилей в стране. Выполнен анализ существующих мер по обеспечению безопасной эксплуатации тяговых аккумуляторных батарей, снижающих опасность их механического повреждения и теплового разгона. Рассмотрены результаты отдельных зарубежных публикаций по моделированию горения и натурным огневыми испытаниям электромобилей в помещениях и открытых пространствах. Даны рекомендации по разработке необходимых мероприятий по организации тушения пожаров с участием электромобилей.

Ключевые слова: гибридный автомобиль; тепловой поток; эвакуация; мощность; терморегуляция; защита; руководство пользователя; короткое замыкание

Для цитирования: Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 93–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98

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

Modern extinguishing methods for lithium-ion batteries. Part 3

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

Statistical data reflecting the state of the electric vehicle fleet in Russia are presented. The main characteristics of the battery packs of the most popular models of electric cars in the country are summarized. An analysis of existing measures to ensure safe operation of traction batteries, reducing the risk of their mechanical damage and thermal runaway is performed. The results of some foreign publications on combustion modelling and full-scale fire tests of electric vehicles in rooms and open spaces are reviewed. Recommendations for the development of necessary measures to organize fire-fighting with the participation of electric cars are given.

Keywords: hybrid car; heat flow; evacuation; power; thermoregulation; protection; user manual; short circuit

For citation: Kharlamenkov A.S. Modern extinguishing methods for lithium-ion batteries. Part 3. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):93-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98 (rus.).

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



ВОПРОС

В рубрике «Вопрос–ответ» журналов № 1 и 2 за 2023 г. [1, 2] был проведен анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов (далее ЛИА) различного типа, возможные варианты тушения как отдельных ячеек, так и аккумуляторных модулей в составе систем накопления (хранения) электрической энергии. По результатам анализа было установлено, что основной причиной возникновения пожаров с участием ЛИА является механическое поврежде-

ние или наличие производственных дефектов отдельных ячеек аккумуляторной сборки, которые способствуют запуску пожароопасного процесса — теплового разгона (ТР). Помимо этого, ТР наблюдается в процессе подзарядки и активной разрядке ЛИА, в результате чего температура ячеек значительно возрастает, что также может привести к повреждению сепаратора ячейки и возникновению внутреннего короткого замыкания.

Обнаружение ТР на начальной стадии является одной из основных задач по предотвращению развития

пожара с участием ЛИА. Для этой цели существует множество решений с применением внутренней и внешней систем защиты и мониторинга состояния ЛИА, снижающих последствия ТР как отдельных ячеек, так и аккумуляторных сборок (данные технические решения были рассмотрены в предыдущих статьях). Все меры, направленные на снижение последствий ТР ЛИА, можно разделить на превентивные и конструктивные, а при возникновении пожара — меры по его эффективному тушению [3]. Превентивные меры подразумевают разработку новых составов электролита с использованием различных добавок (антипиренов), снижающих пожарную опасность ЛИА. Конструктивные меры включают в себя применение предохранительных клапанов (разрывных мембран), терморезисторов (PTC), устройств прерывания тока (CID), электронной защиты в виде балансиров, плат PCB и BMS и т.д.

Наибольшие трудности возникают с тушением ЛИА, особенно в составе нескольких модулей, характерных для систем накопления электрической энергии, тяговых аккумуляторов электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей (PHEV).

Существует ли общепринятый порядок действий по тушению электромобилей, насколько опасны пожары с их участием и какие меры предпринимают производители для снижения риска воспламенения модулей и блоков с ЛИА?

ОТВЕТ

Перспективы развития парка электромобилей в Российской Федерации

По состоянию на январь 2023 г. в России насчитывается более 20,7 тыс. электромобилей¹. С 2021 по 2023 гг. прирост составил 25,5 %, что составляет 4,2 тыс. машин. В январе-апреле 2023 г. было продано 2472 новых электромобиля, что в 2,5 раза больше, чем за аналогичный период 2022 г. При этом доля таких автомобилей не превышает 0,05 % от общего числа легковых автомобилей в стране.

Наибольшее количество электромобилей принадлежит маркам *Nissan*, *Tesla*, *Porsche*, *Audi*, *BMW* и *Mitsubishi*. На них приходится порядка 90 % всего электромобильного парка в нашей стране.

Процентное распределение электромобилей указанных фирм представлено на рис. 1.

По территориальному признаку наибольшее количество электромобилей находится в Центральном федеральном округе (5,8 тыс. шт.), на Дальнем Востоке (4,1 тыс. шт.), Сибири (3,8 тыс. шт.). На остальные федеральные округа, по отдельности, приходится менее 10 % (рис. 2).

Наибольшее скопление электромобилей приходится на крупные города, где есть соответствующая инфраструктура, обеспечивающая комфортное использование и возможность подзарядки данных автомобилей.

По статистике каждый третий владелец автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) готов перебраться на электромобиль. Также в начале марта 2023 г. в СМИ появилась информация о создании системы замены ДВС на электродвигатель, которая при массовом выпуске электродвигателей обойдется конечному пользователю от 650 тыс. до 1 млн руб. с учетом стоимости аккумуляторной батареи.

В конце апреля 2023 г. премьер-министр РФ утвердил 29 мер поддержки рынка электромобилей², которые включают в себя: реализацию программы субсидирования быстрых зарядных станций в 34 регионах страны; предоставление гражданам возможности применения медленных зарядных станций в подземных или наземных паркингах многоквартирных домов; размещение зарядных станций на АЗС; снижение стоимости полиса ОСАГО для владельцев электромобилей, эксплуатируемых в каршеринге и такси; увеличение финансовой поддержки программ стимулирования спроса на электромобили и др. Реализация указанных мер будет способствовать росту потребительского спроса на электромобили, что приведет к увеличению количества эксплуатируемых литий-ионных

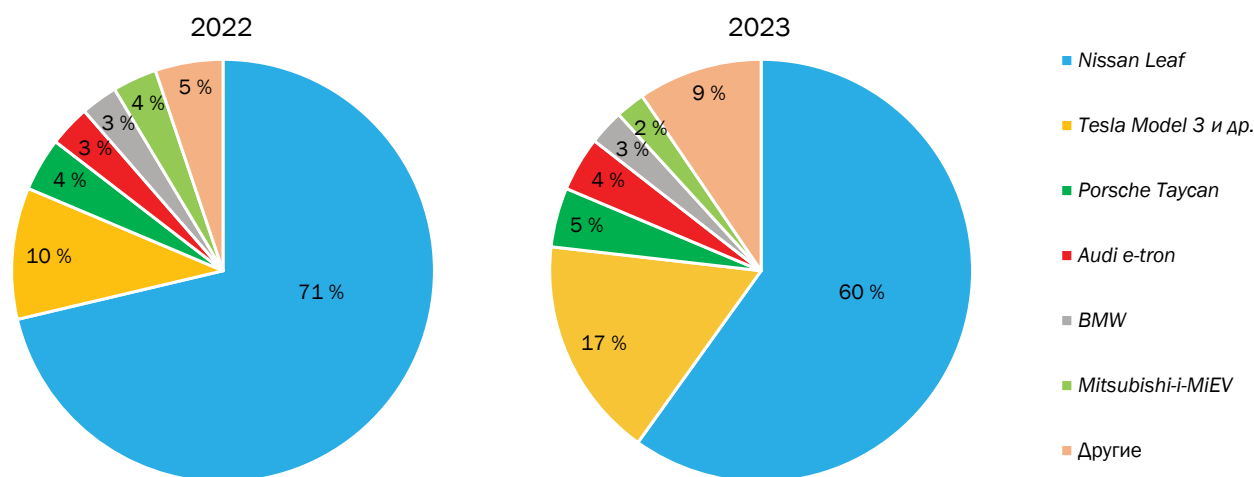


Рис. 1. Диаграммы распределения количества электромобилей в России за 2022 и 2023 гг.

¹ Информация аналитического агентства «Автостат». URL: <https://www.autostat.ru>

² Официальный сайт Правительства России. URL: <http://government.ru/news/48386>

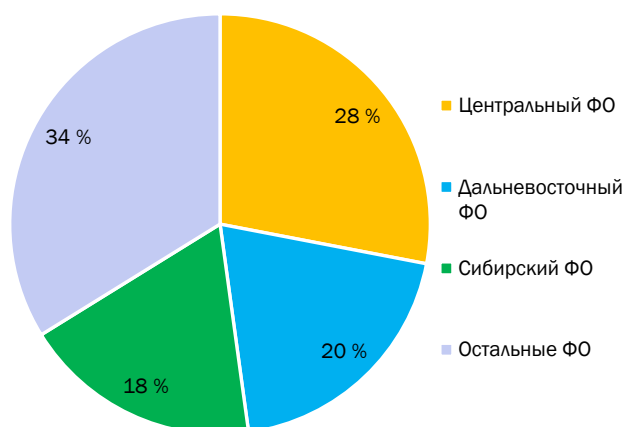


Рис. 2. Диаграмма распределения электромобилей по федеральным округам РФ в 2023 г.

батарей большой мощности и пожаров с их участием. Поэтому необходимо исследовать и внедрять в практику существующие технические разработки и организационные меры по предупреждению и тушению пожаров ЛИА.

Конструктивная защита батарейных блоков электромобилей

Для цели выбора эффективных способов тушения пожаров ЛИА необходимо выполнить оценку основных характеристик аккумуляторов самых распространенных в РФ моделей электромобилей (таблица).

Из таблицы видно, что NMC — наиболее распространенный тип аккумуляторов большинства моделей электромобилей, эксплуатируемых в России. Указанный тип ЛИА (наряду с NCA и LMO) обладает высокой степенью пожарной опасности, характеризующейся выбросом газа и воспламенением ячеек при их неисправности (перезаряд, короткое замыкание, механическое повреждение корпуса) [1].

Для снижения угрозы воспламенения блока ЛИА производители электромобилей предусматривают различные технические решения (пассивная защита — конструктив-

Характеристики тяговых аккумуляторов электромобилей

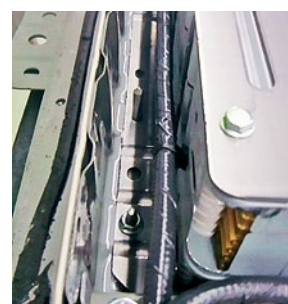
Название модели	Номинальное напряжение, В	Энергия, кВтч	Масса батареи, кг	Плотность энергии, Втч/кг	Форма ячейки в батарейном модуле	Химический состав ячейки
<i>Nissan Leaf</i> (2010)	360	24	225	110	Пакет-ячейка	LMO + LNO
<i>Nissan Leaf</i> (2017)	350	40	303	132	Пакет-ячейка	NMC
<i>Tesla Model S и X</i>	400	40–100	530	254	Цилиндрическая (тип 18 650)	NCA и NMC
<i>Tesla Model 3 и Y</i>	400	75–100	441	До 260	Цилиндрическая (тип 2170)	NMC и LFP*
<i>Porsche Taycan</i>	520–835	79,2–93,4	464–540	До 260	Пакет-ячейка	NMC**

* LFP батареи устанавливаются только в самых последних моделях электромобилей.

** NMC батареи отличаются по количеству никеля и марганца в зависимости от марки и серии автомобиля.

ные меры). К ним можно отнести защиту от механического повреждения отдельных модулей и ячеек. Например, в модели *Nissan Leaf* между боковыми стенками корпуса аккумуляторного блока и модулями предусматриваются зазоры в 50 мм (рис. 3, а), называемые зоной смятия, позволяющие избежать повреждения модулей и ячеек в случае столкновения электромобиля. В нижней части также предусмотрены продольные и поперечные балки для повышения жесткости конструкции (рис. 3, б).

В *Tesla Model S* для снижения распространения ТР между соседними модулями предусмотрены небольшие перегородки (рис. 4, а). Кроме этого, для поддержания нормальной температуры аккумуляторной батареи встроено жидкостное охлаждение. Оно представляет собой охлажда-



а



б

Рис. 3. Пассивные (конструктивные) меры защиты аккумуляторных блоков в *Nissan Leaf*: а — защита модулей с помощью бокового зазора; б — защита модулей с помощью усиления жесткости нижней крышки блока

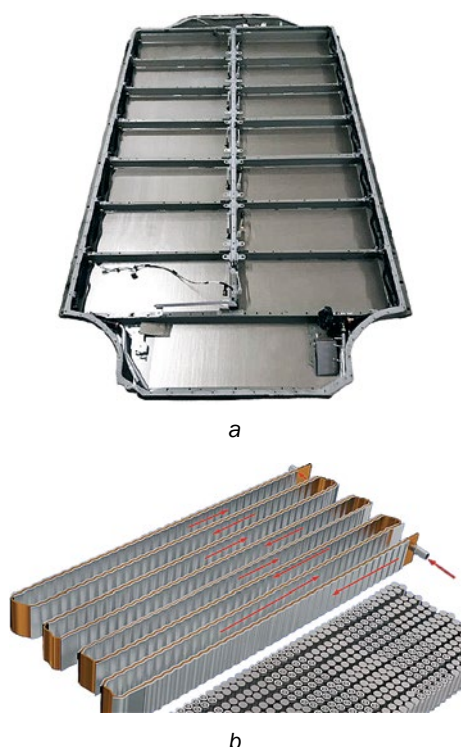


Рис. 4. Пассивные (конструктивные) меры защиты аккумуляторных блоков в *Tesla Model S*: *a* — защита модулей с помощью перегородок; *b* — охлаждающая трубка системы терморегуляции отдельных модулей

ющую трубку (запатентованная волнистая конструкция) с водно-гликолевым раствором, покрытую изоляционным материалом, проложенную внутри модуля между ячейками (рис. 4, *b*).

Представленные выше конструктивные меры защиты снижают вероятность повреждения модулей аккумуляторного блока, но полностью не могут исключить возникновение ТР в отдельных ячейках модуля.

Меры по тушению пожаров в руководствах пользователей электромобилей

Анализируя инструкции по тушению пожара отдельных производителей электромобилей, можно обнаружить, что некоторые компании рекомендуют на первоначальных этапах тушения выполнять резку или отключение проводников системы питания аккумуляторного блока от остальной электропроводки электромобиля. Обычно такое отключение может быть выполнено с помощью отсоединения специального выключателя, расположенного в салоне транспортного средства, реже — под капотом или в багажнике. Производители *Mitsubishi* и *Proterra* предлагают заливать горящий электромобиль водой с подачей ее в область размещения аккумуляторного блока, который у большинства моделей расположен в нижней части кузова под водительским и пассажирскими сиденьями. *Subaru* и *Toyota* рекомендуют не заливать аккумулятор водой, а дать ему полностью сгореть. *Hyundai* и *Proterra* для мониторинга состояния поврежденного

аккумуляторного блока при пожаре рекомендуют дополнительно пользоваться тепловизором³.

Таким образом, можно констатировать, что в существующих руководствах пользователя и инструкциях производителей электромобилей отсутствует полноценная информация о том, как долго следует подавать воду на тушение горячей батареи, с какого момента можно прекращать проливку потушенного аккумулятора (например, при каких пороговых значениях температуры) и т.д. Ни один из производителей не дает конкретных инструкций о порядке действий по сведению к минимуму опасностей, связанных с воспламенением аккумуляторного блока электромобиля, включая риск повторного возгорания батареи.

В связи с этим необходима разработка единообразных руководств с алгоритмом действий собственников и пожарных подразделений при нарушении работы аккумуляторного блока и развитии пожароопасной ситуации с указанием специфики тушения отдельно взятой модели электромобиля. Такое руководство должно включать: порядок действий по тушению аккумуляторной батареи; способы по снижению риска возникновения ТР и риска повторного возгорания ЛИА; порядок действий по контролю безопасного состояния поврежденного аккумуляторного блока в процессе эвакуации и хранения электромобиля. Руководство должно разрабатываться при совместном участии производителей электромобилей, представителей научно-исследовательских институтов и подразделений пожарной охраны.

Математическое моделирование и натурные огневые испытания электромобилей

Проведение натурных экспериментов по изучению горения электромобилей достаточно дорогостоящий способ получения полезных сведений, поэтому требуется разработка математической модели развития пожара и ТР ЛИА различных форм и размеров.

В одном из исследований [4] был выполнен сравнительный анализ особенностей развития пожара при горении электромобилей. С помощью программного обеспечения CFD Fire Dynamic Simulator авторы смоделировали процесс горения двух электромобилей с тяговыми батареями на 16,5 и 23,5 кВт·ч и автомобиля с бензиновым двигателем, расположенных на подземной парковке. По результатам моделирования было установлено, что процессы нарастания температуры и снижения видимости практически совпадают по времени. Это указывает на отсутствие значительных отличий в параметрах расчета времени эвакуации людей при горении электромобиля. Следует отметить, что исследования проводились для электромобилей с маломощными аккумуляторными батареями, поэтому для более современных моделей

³Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles // Safety Report NTSB/SR-20/01/ National Transportation Safety Board. Washington, DC. 2020. 69 p. URL: <https://www.nts.gov>.

с блоками ЛИА на 40–100 кВт·ч, результаты сравнительного анализа могут заметно отличаться.

В другом исследовании [5] по горению гибридного автомобиля в закрытом пространстве с батареей на 13 кВт·ч (объем бензобака на 60 л) было установлено, что величина теплового потока на расстоянии 1 м по горизонтали не превысила допустимых значений ($2,5 \text{ кВт/м}^2$ [6] — предельное значение для человеческой кожи⁴), в отличие от автомобилей с ДВС (ICEV), у которых эта величина в помещении объемом 3375 м^3 на расстоянии 1–1,5 м достигала 20 кВт/м^2 . В то же время при горении ICEV в более просторном помещении величина теплового потока на расстоянии 5,5 м по горизонтали не превысила $2,5 \text{ кВт/м}^2$ [7]. В результате было установлено, что существенных отличий в параметрах тепловых потоков и безопасных расстояний при горении гибридного автомобиля и ICEV нет. Следовательно, при изучении процесса эвакуации людей при пожаре с участием PHEV можно руководствоваться имеющимися исследованиями пожаров ICEV.

На открытых стоянках автомобилей отмечается заметное снижение тепловых потоков, которые в пределах 1 м по горизонтали и вертикали при горении PHEV типа внедорожник достигали $1,151 \text{ кВт/м}^2$ и $0,6 \text{ кВт/м}^2$ соответственно [8]. Воспламенение аккумуляторного блока произошло только после 50 мин с момента начала ТР из-за внешнего короткого замыкания. В течение этого времени из корпуса батареи периодически происходил выброс накопленных газов. Предохранительный клапан аккумуляторного блока сработал через 6,5 мин после начала эксперимента. На 55-й мин произошло воспламенение газов под днищем автомобиля, а на 64-й пламя уже охватило салон.

Был проведен эксперимент [9] по распространению горения между электромобилем (НМС ячейки с суммарной энергией 38,1 кВт·ч) и гибридным автомобилем (аккумуляторный блок на 13 кВт·ч и 50 л бензина), установленных на расстоянии 0,6 м параллельно

друг другу. В результате ТР ячейки одного из модулей электромобиля (процесс длился более 90 мин) последовало воспламенение выделяемых из батареи газов на 92-й мин. На 95-й мин зафиксировано резкое увеличение теплового потока (огонь перешел на соседний автомобиль (PHEV). К 98-й мин пламя охватило весь электромобиль, а на 111-й уже горел весь PHEV.

Представленные выше исследования указывают на длительность процесса ТР батарейного блока электромобиля и гибридного автомобиля в результате короткого замыкания, которое изначально приводит к периодическому выбросу накопившихся в блоке газов (до 1–1,5 ч без их воспламенения). Следует также указать на малый запас времени для эвакуации пассажиров из салона электромобиля (до 3 мин) после воспламенения батареи. Данная информация позволяет рассчитывать на заблаговременное обнаружение неисправности аккумуляторного блока и успешное тушение пожара на ранних стадиях. В случае ДТП и физического повреждения нескольких ячеек в модуле ТР и время до момента воспламенения блока может значительно сократиться.

Выводы

Отсутствие достаточных сведений о горении аккумуляторных блоков электромобилей требует дальнейших исследований и разработки концепции, которая должна включать в себя создание рабочих групп с участием производителей, научных институтов и подразделений пожарной охраны, которые позволят организовать проведение совместных работ по изучению пожаров на электромобилях и разработке эффективных способов их тушения [10]. Полученные результаты впоследствии должны быть включены в нормы и руководства по тушению пожаров. В указанных документах должны быть представлены сведения не только о порядке тушения пожара, но и о последующих действиях по эвакуации и хранению неисправного электромобиля.

В целях обучения боевых расчетов необходимо предусмотреть создание обучающих программ и полигонов по отработке действий по тушению пожаров с участием электромобилей. Исследование эффективных способов тушения пожаров с участием электромобилей будет представлено в следующем выпуске журнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 89–96. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1199>.
2. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 89–96. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1225>

⁴ В Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности предельное значение теплового потока на высоте 1,7 м от уровня пола на путях эвакуации принимается $1,4 \text{ кВт/м}^2$.

3. Смельков Г.И., Пехотилов В.А., Боков Г.В., Назаров А.А. Проблемы пожарной безопасности режима теплового разгона в литиевых аккумуляторных батареях // Пожарная безопасность. 2022. № 4 (109). С. 73–79. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.109.4.008
4. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 1. P. 11. DOI: 10.3390/en15010011
5. Okamoto K., Ichikawa T., Shimizu K., Honma M. Thermal effect on surrounding combustibles in minivan passenger car fires // Fire Mater. 2018. Vol. 42. Issue 6. Pp. 583–592. DOI: 10.1002/fam.2512
6. Purser D.A., McAllister J.L. Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer. 2016. Pp. 2308–2428. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_63
7. Hu Y., Zhou X., Cao J., Zhang L., Wu G., Yang L. Interpretation of fire safety distances of a minivan passenger car by burning behaviors analysis // Fire Technol. 2020. Vol. 56. Pp. 1527–1553. DOI: 10.1007/s10694-019-00938-1
8. Cui Y., Cong B., Liu J., Qiu M., Han X. Characteristics and hazards of plug-in hybrid electric vehicle fires caused by lithium-ion battery packs with thermal runaway // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.878035
9. Cui Y., Liu J., Cong B., Han X., Yin S. Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 166. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.psep.2022.08.055
10. 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. Vol. 867. Issue 1. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092

Материал поступил в редакцию 15.05.2023

Received May 15, 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