

УДК 614.841.415

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

**Двоенко Олег Викторович, Кучмасов Даниил Андреевич,
Щербаков Николай Александрович, Захаров Анатолий Иванович**

ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России»,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена высоким темпам внедрения литий-ионных аккумуляторных батарей в бытовую сферу и транспортную инфраструктуру. Рост электротранспорта поддерживается в РФ на законодательном уровне. Рассмотрены и проанализированы основные виды источников хранения энергии с точки зрения пожарной опасности. Рассмотрены некоторые пожары электротранспорта, показывающие склонность литий-ионных аккумуляторов к самовозгоранию. Наибольшую опасность для жизни и здоровья людей при горении данных видов аккумуляторов представляют выделяющиеся в результате термического разложения и горения химические вещества. Сложность процесса горения литий-ионных аккумуляторных батарей заключается в распространении теплового разгона по принципу цепной реакции между ячейками внутри аккумулятора, аккумуляторного модуля. Проведенные испытания отдельных ячеек аккумулятора показали высокую скорость протекания реакции теплового разгона с последующим воспламенением. Кроме аварийных ситуаций данные аккумуляторы склонны к старению и образованию внутри ячеек дендритов. Особенности пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей затрудняют, вносят ограничения, требуют выполнения ряда правил по их транспортировке и хранению. На данный момент отсутствуют экономически эффективные средства и способы тушения пожаров литий-ионных аккумуляторов, которые, в свою очередь, сопровождаются угрозой поражения электрическим током.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, тепловой разгон, дендриты, электротранспорт, транспортировка аккумуляторов, фтористый водород

THE MAIN PROVISIONS ON THE FIRE HAZARD OF LITHIUM-ION BATTERIES

Oleg V. Dvoenko, Daniil A. Kuchmasov, Nikolay A. Shcherbakov, Anatoly I. Zakharov

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The article is devoted to the high rates of implementation of lithium-ion batteries in the household sphere and transport infrastructure. The growth of electric transport is supported in the Russian Federation at the legislative level. The main types of energy

storage sources are considered and analyzed from the point of view of fire hazard. Some fires of electric transport are considered, showing the tendency of lithium-ion batteries to spontaneous combustion. The greatest danger to life and health of people during combustion of these types of batteries is the chemicals released as a result of thermal decomposition and combustion. The complexity of the combustion process of lithium-ion batteries lies in the spread of thermal runaway according to the principle of a chain reaction between the cells inside the battery, battery module. The tests of individual battery cells showed a high rate of thermal runaway reaction followed by ignition. In addition to emergency situations, these batteries are prone to aging and the formation of dendrites inside the cells. The fire hazard features of lithium-ion batteries complicate, impose restrictions, and require compliance with a number of rules for their transportation and storage. At the moment, there are no cost-effective means and methods for extinguishing lithium-ion battery fires, which in turn are accompanied by the threat of electric shock.

Keywords: lithium-ion batteries, thermal runaway, dendrites, electric transport, transportation of batteries, hydrogen fluoride.

Введение

Освоение человеком электричества и теории электромагнетизма явилось основой для развития энергетической отрасли. Фундаментальные знания в данных областях позволили использовать возобновляемые источники энергии, которые занимают существенную роль в хранении, передаче и распределении электрического тока. Примером вышеизложенного могут послужить аккумуляторные батареи, ветряные турбины, тепло-гидроэлектростанции, солнечные батареи и др.

В результате научно-технического прогресса, развития электроники и применения ее повсеместно у общества появляется «зависимость» от источников энергии как от стационарных, так и мобильных (переносных). Приведенные факты дали значительный толчок для развития источников хранения энергии, которые с каждым годом совершенствуются, такие как аккумуляторная батарея.

Исторически аккумуляторная батарея является сравнительно новым изобретением, ее возникновение датируется концом XIX в., до этого момента подобных

устройств не существовало. Основная задача аккумуляторной батареи заключается в применении обратимой электрохимической реакции [1]. Другими словами, при подключении источника постоянного тока к контактам элемента, на его электродах начинается процесс накопления электрической энергии. При этом, когда к батарее подключается нагрузка, начинается ее использование.

Каждый раз, когда аккумулятор разряжается и затем восстанавливает свой заряд, происходит указанный выше процесс. Кроме того, литий-ионные аккумуляторы со временем теряют свою емкость, даже если они не использовались и не находились на хранении. Сам срок службы рассчитывается по количеству циклов полной разрядки и составляет в среднем от 3 000 до 1 000 полных циклов в зависимости от типа аккумулятора [2].

Аккумулятор считается пригодным для использования без вреда для устройства, если его емкость составляет 70–80 % от начальной. Если данный показатель меньше, то аккумулятор не рекомендуется использовать для дальнейшей эксплуатации, поскольку он не

сможет выдавать необходимую автономность устройству [3].

Виды и характеристики основных литий-ионных аккумуляторов

В зависимости от выбранного типа электродов и типа электролита существует широкий спектр аккумуляторных батарей: от свинцовых до никелькадмиевых, литий-ионных и прочих, каждая из которых обладает уникальными характеристиками и конструктивными особенностями.

Литий-ионные аккумуляторные батареи стали самыми востребованными источниками хранения и накопления электрической энергии XXI в., благодаря своим выдающимся характеристикам: высокой плотности энергии, длительному сроку службы, быстрой зарядке и относительно низкой стоимости.

В свою очередь, литий-ионные аккумуляторы делятся на различные виды, в зависимости от использующих электродов (рис. 1).

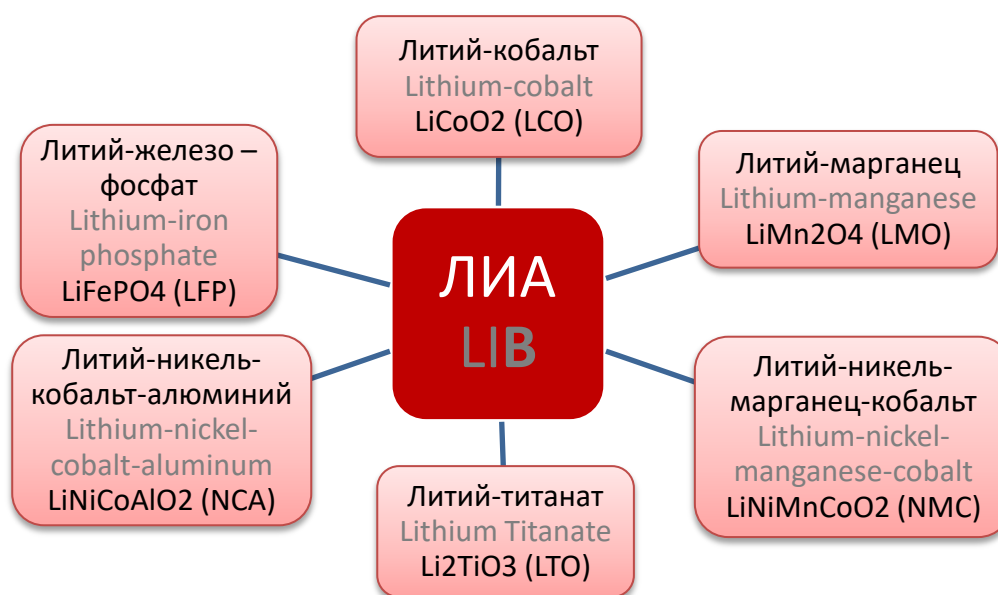


Рис. 1. Основные виды литиевых аккумуляторов

Fig. 1. The main types of lithium batteries

Каждый тип аккумуляторной батареи функционирует по одинаковому принципу и имеет стандартную структуру. Согласно пункту 3.6 стандарта ГОСТ Р МЭК 62660-1-2014 «Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств», литий-ионный аккумулятор определяется как устройство, в котором при зарядке ионы лития переходят от катода к аноду, а при разряде возвращаются обратно. В процессе производства источника питания положительный и отрицательный электроды

находятся в равновесии. Эти электроды помещены в специальное средство — электролит, который выполняет роль ионного канала благодаря своей способности к диссоциации.

Практичность литий-ионных аккумуляторов продолжает расти, в первую очередь это связано с повышением безопасности их использования. Также не остаются без внимания такие показатели, как: возможность использования данных аккумуляторов при различных температурах, себестоимость, увеличение энерго-

емкости и циклов перезаряда. Данные изменения являются результатами увеличения объема производства литий-ионных аккумуляторов. Каждая из пред-

ставленных на рис. 1 батарей обладает рядом характеристик, от которых зависит область их применения (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики основных видов литий-ионных аккумуляторных батарей

Table 1

Characteristics of the main types of lithium-ion batteries

Характеристики Characteristics	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	Li ₂ TiO ₃ (LTO)
Удельная энергоемкость Specific energy bone	150–200 Вт*ч/кг Wh/kg	100–150 Вт*ч/кг Wh/kg	90–120 Вт*ч/кг Wh/kg	200–260 Вт*ч/кг Wh/kg	150–220 Вт*ч/кг Wh/kg	70–80 Вт*ч/кг Wh/kg
Количество циклов заряд/разряд Number of charge/discharge cycles	500–1 000	500–1000	1000–2000	500–1000	1000–2000	3000–20000
Область применения Scope of application	Портативная электроника Portable electronics	Электроинструмент и электромобили Electro tools and electric vehicles	Стационарные системы хранения энергии и электромобили Stationary energy storage systems and electric vehicles	Высокопроизводительные электромобили, такие как Tesla. high-performance electric vehicles such as Tesla	Электромобили и стационарные системы хранения энергии. Electric vehicles and stationary energy storage systems	Специальные транспортные средства и промышленные приложения Special vehicles and industrial applications
Недостатки Flaws	Сравнительно короткий срок службы и высокая стоимость	Сравнительно низкая удельная емкость Relatively low specific	Низкая удельная емкость по сравнению с LCO Low specific ca-	Более высокая стоимость и низкая безопасность по сравнению	Трудности в обеспечении стабильных поставок компонентов Difficulties in	Низкая удельная емкость и высокая стоимость Low specific capacity

	кобальта Relatively short service life and high cost of cobalt	ic capacity	capacity compared to LCO	с LFP Higher cost and less safety than LFP	ensuring stable supplies of components	and high cost
--	-------------------------------------------------------------------	-------------	--------------------------	-----------------------------------------------	----------------------------------------	---------------

Учитывая эти характеристики каждая из батарей нашла свое широкое применение, начиная от использования в современных мобильных устройствах и гаджетах заканчивая транспортным сегментом.

Технология использования накопленной энергии в ЛИА стремительно обгоняет многие традиционные системы преобразования энергии для движения транспортных средств. Хранение значительного количества электрической энергии в ограниченном пространстве способствует высокому проценту внедрения их в электротранспорт, начиная от электроса-

мокатов и заканчивая общественным, представленным электробусами.

Согласно анализу статистики, с каждым годом растет число автотранспортных средств с электросиловыми тяговыми установками. Так, за 2023 г. парк автотранспортных средств, использующих электротягу, в России, по сравнению с 2022 г., вырос на 19 278 единиц, что составляет 48 %. Этот показатель включает учет автотранспорта индивидуального пользования, которые официально зарегистрированы в ГИБДД (рис. 2) [5].

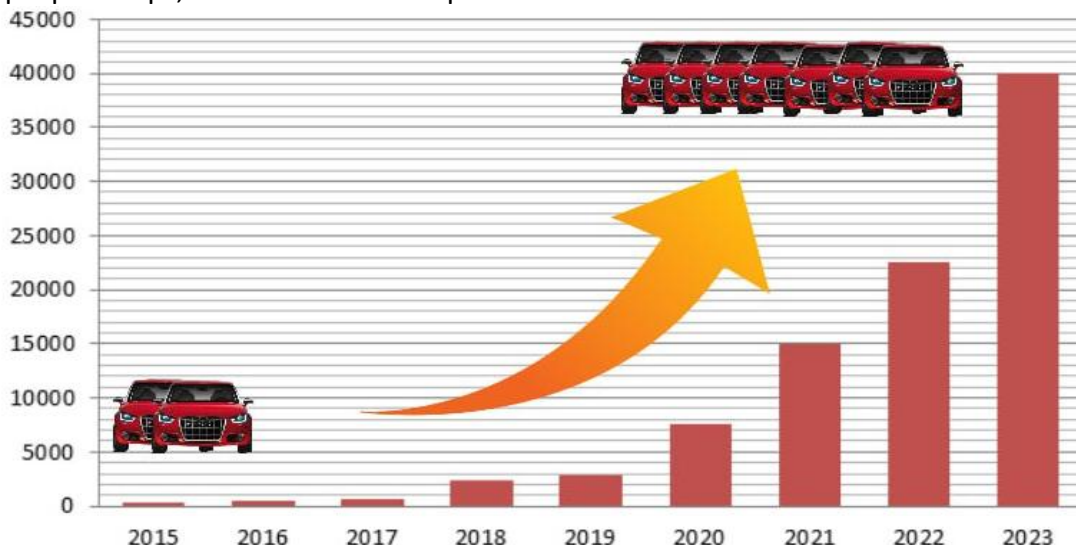


Рис. 2. Количество легковых электромобилей в России на конец 2023 года

Fig. 2. The number of passenger electric vehicles in Russia at the end of 2023

Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов

Компания EV FireSafe из Австралии следит за случаями возгорания батарей в электромобилях по всему миру. С 2010 по 2023 г. в их базе данных было зафиксировано 393 инцидента. При

этом на дорогах курсирует около 30 млн электромобилей [6].

При этом в Австралии за 13 лет произошло всего 4 случая горения электромобилей. Один из них был поджогом, а остальные произошли в закрытых помещениях, где начались пожары, не связанные с автомобилями [6].

На первый взгляд данный факт говорит о безопасности электромобилей по сравнению с автомобилями, оснащенными двигателями внутреннего сгорания.

Но стоит учесть, что данные пожары произошли в достаточно «свежих» автомобилях, в которых аккумуляторная батарея не исчерпала свой срок службы (рис. 3).



Рис. 3. Самовозгорание электрокара Tesla Model S

Fig. 3. Spontaneous combustion of a Tesla Model S electric car

Тушение пожаров на электротранспорте по сравнению с пожарами на автомобилях с двигателями внутреннего сгорания имеет ряд отличительных особенностей, которое следует учитывать пожарно-спасательным подразделениям при проведении аварийно-спасательных работ, связанных с тушением и ликвидацией данных пожаров.

Следует отметить, что случаев возгорания электросамокатов по сравнению с

электромобилями гораздо больше, при этом часто данные возгорания происходят во время зарядки или хранения в жилых помещениях, в следствии чего наносится крупный косвенный материальный ущерб (рис. 4). По данным EV FireSafe, в первой половине 2023 г. в мире произошло более 500 возгораний самокатов и велосипедов. У электромобилей за этот период – 44 инцидента [6].



Рис. 4. Возгорание электросамокатов в жилых помещениях

Fig. 4. Ignition of electric scooters in residential premises

Основная причина отличий в надежности аккумуляторов электротранспорта, такого как электросамокаты и электровелосипеды, кроется в низком качестве изготовления и проектирования их батарей. Влияние также оказывает применение зарядных устройств без сертификации и низкого качества.

В сфере электромобилей используются схожие технологии для изготовления батарей, однако здесь конструкция более усовершенствована. Охлаждающие системы обеспечивают контроль температуры аккумуляторов, что повышает их безопасность и эффективность в процессе ежедневного использования и зарядки. Однако даже существующим системам не всегда удается справиться или оповестить своевременно о неисправности, возникшей в литий-ионной аккумуляторной батарее.

Если говорить о причинах возникновения пожаров литий-ионных аккумуляторных батарей, то основная причина связана с тем, что батареи обладают высокой энергетической емкостью, которая хра-

нится в герметичном малом объеме. При механическом повреждении оболочки или неправильном использовании аккумуляторной батареи, модуля или ячейки происходит внутреннее короткое замыкание электродов, которое, в свою очередь, запускает цепную реакцию между ячейками, так называемый тепловой разгон или термический разгон.

Условия неправильной эксплуатации встречаются, когда безопасное рабочее окно не соблюдается (рис. 5). При превышении предельных значений напряжения или температуры батареи внутри батареи могут запуститься определенные химические реакции [7]. Данные реакции способствуют тому, что внутри аккумуляторного модуля выделяется большое количество тепла и продуктов термического разложения электролита (горючего газа), которые не могут самостоятельно разбавиться с воздухом до безопасных концентраций из-за компактной и герметичной конструкции батареи, что, в свою очередь, может привести к воспламенению или взрыву.

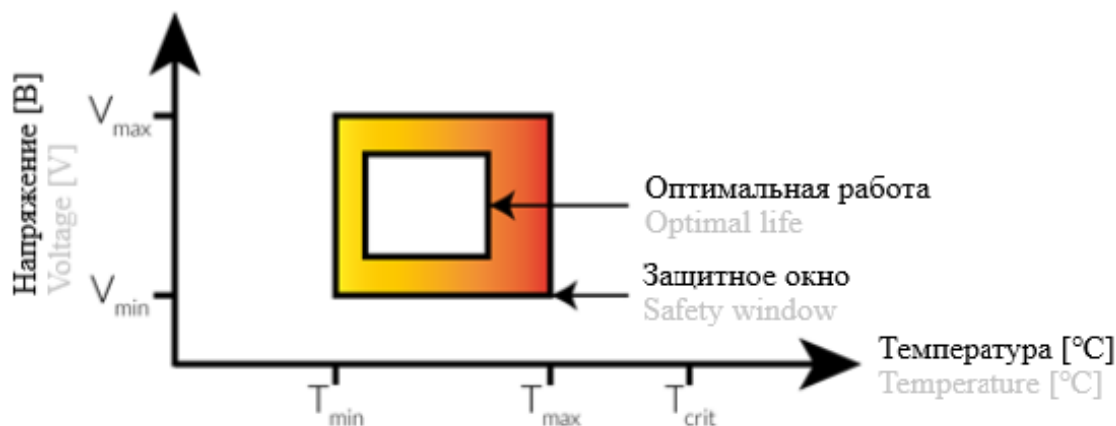


Рис. 5. Иллюстрация ограниченного окна работы ячейки ЛИА

Fig. 5. Illustration of the limited window of operation for a LIB cell

Необходимо иметь в виду: во избежание ухудшения качества и заложенных заводом изготовителем характеристик литий-ионных аккумуляторных батарей, следует выполнять все требования, касающиеся технологии производства. Осо-

бый контроль на этапе производства служит гарантией эффективного протекания физико-химических процессов [8].

Кроме выше указанных причин возгорания литий-ионных аккумуляторных батарей следует отметить, что при экс-

плутации на стенках сепаратора внутри ячейки возможно образование «пробоев». Причиной могут послужить окислительно-восстановительные реакции, протекающие внутри них без остановки, и, соответственно, образование дендритов [9].

Безопасность литиевых аккумуляторов является серьезной проблемой, поскольку при определенных условиях они могут перегреться, загореться или даже взорваться. Возникновение неисправностей может быть вызвано различными факторами: повреждение в результате аварии, производственный дефект, нарушение правил обслуживания и пожарной безопасности.

Перегрев может произойти по разным причинам, в том числе из-за работы аккумулятора при неподходящей температуре; из-за повреждения аккумулятора в результате прокалывания, разбивания или падения; из-за чрезмерной зарядки или разряда аккумулятора быстро или слишком сильно; или производственный дефект [10], [11].

В то время как при возгорании литиевой батареи выделяется значительное количество тепла, дым от пожара представляет высокую опасность и при некоторых обстоятельствах может представлять более серьезную угрозу, чем тепло, особенно для людей, находящихся в замкнутых пространствах, таких как помещения зданий [12].

Список возможных химических веществ, выделяемых при пожаре, может быть обширным. Некоторые примеры включают фосфорилфторид, фтористый водород, метилкарбонат, диэтилкарбонат, этиленкарбонат, монооксид углерода и карбонилсульфид [13], [14].

Для примера, при достаточной концентрации в воздухе и воздействии на него фтористый водород является очень агрессивным и токсичным газом, вызывающим серьезные повреждения дыхательной системы: оксиды фосфора сильно

раздражают глаза, нос, горло и легкие. В дополнение, когда концентрация азидов в атмосфере достаточно высока, его воспламеняемость может привести к гемолизу, почечной дисфункции и в крайних случаях к летальному исходу. То же самое касается монооксида углерода, который, будучи бесцветным и без запаха, становится токсичным при повышенной концентрации в воздухе, который может вызвать головную боль, тошноту, головокружение и смерть [15].

Особую опасность также составляет и перевозка литий-ионных аккумуляторов, поскольку их начали относить к опасным грузам. На фоне этого многие авиакомпании вносят ограничения по объему и энергоемкости транспортируемых аккумуляторов. Основанием для этого является нормативный правовой акт [16].

Рассмотренная в статье [17] пожарная опасность литиевых батарей, а именно склонность к самовозгоранию, подтверждается реальными фактами пожаров с их участием при транспортировке. В результате аварий был нанесен серьезный урон экологии и понесен крупный материальный ущерб. Данные факты подтверждают целесообразность повышенного контроля безопасности и ряда ограничений при транспортировке данных источников хранения энергии.

Согласно требованиям транспортировки в багаже или ручной кладью литий-ионных аккумуляторных батарей, необходимо соблюдать ограничения по энергоемкости и в случае, если это возможно, извлечь из устройства и защитить от внешних воздействий специальными чехлами или поместить в транспортировочные кейсы. Однако даже выполнение этих требований не всегда позволяет транспортировать аккумуляторы с высокой емкостью.

Для транспортировки литиевых батарей самолетом необходимо знать емкость аккумулятора в размерности:

Вт·ч/Wh. Это необходимо для того, чтобы сравнить с допустимыми значениями. Часто на этикетках аккумуляторов отсутствует информация о мощности Вт·ч. Однако для расчета этой важной характеристики достаточно произвести простую математическую операцию: перемножить показатель напряжения аккумулятора в Вт на его емкость, выраженную в Ач. Эти показатели могут быть указаны в документации, на корпусе или на сайте производителя устройства, аккумулятора.

Для примера, возьмем повербанк емкость 20 000 мАч с напряжением в 6 Вт и проведем для него расчет:

– для начала переведем мАч в Ач:

$$20000 \text{ мАч} = 20 \text{ Ач}$$

– из этого получаем:

$$20 * 6 = 120 \text{ Вт} * \text{ч.}$$

Согласно [16], лимит устанавливается в 100 Вт*ч, отсюда следует, что данный аккумулятор взять с собой не удастся.

В случае возгорания литиевых аккумуляторов происходит их воспламенение при экстремально высоких температурах, что может продолжаться несколько дней и приводить к значительным материальным и экологическим убыткам. Нередко они возобновляют горение, даже когда пожар уже, кажется, ликвидирован. Горящие аккумуляторы также могут выделять в течение многих часов высокотоксичные газы и химические вещества, которые легко воспламеняются при наличии источника возгорания поблизости.

Пожар литий-ионных аккумуляторов сопровождается выделением высоких температур на всех этапах горения. В дополнение, данные пожары могут гореть несколько дней и наносить значительные материальные и экологические ущербы. В результате протекания цепной реакции теплового разгона имеются риски повторного возгорания ликвидированного пожара. Аккумуляторы, которые подвержены перегреву в течение продолжительного времени, могут также выделять опасные

газы и химические соединения, которые легко воспламеняются при наличии источника зажигания поблизости.

Пожарно-спасательные подразделения не имеют единого плана действий, методических указаний, а также соответствующего опыта в ликвидации пожаров электротранспорта. Каждое подразделение проводит действия по тушению, отталкиваясь от возможности своего пожарно-технического вооружения и профессионализма личного состава. Особую сложность представляет большое разнообразие конструктивных решений при производстве электротранспорта, которое заключается в различном расположении батарей, высоковольтных кабелей и затрудненном доступе к ним в широком сегменте автопроизводителей.

Это говорит о том, что ВВБ, установленная в электротранспорте, подвергает опасности поражения электрическим током не только водителя и пассажиров, но и лиц, участвующих в ликвидации аварий, связанных с данным типом транспорта.

В настоящее время электромобили потребляют до 650 Вт постоянного тока, в то время как другие транспортные средства работают при 12/24 Вт постоянного тока. Случайный контакт с напряжением выше 110 Вт постоянного тока может привести к летальному исходу [18].

Вода всегда была и остается основным огнетушащим веществом. На данный момент ее используют также и для тушения пожаров электротранспорта, но в большом количестве. В связи с этим в Нидерландах разработали контейнер для тушения пожаров электрокаров. Принцип действия следующий. На место аварии доставляют водонаполненный контейнер подходящего размера для поврежденного электромобиля. При помощи манипулятора электромобиль независимо от степени повреждения помещают в контейнер и оставляют в нем на сутки. За это время

вода в контейнере загрязняется и становится токсичной в результате попадания в нее химически опасных веществ. Это

приводит к тому, что воду приходится утилизировать, соблюдая экологические нормы [19].



Рис. 6. Тушение электромобиля в водонаполненном контейнере

Fig. 6. Extinguishing an electric car in a water-filled container

Заключение

При реагировании на ДТП и тушении пожаров на электротранспорте пожарно-спасательным подразделениям следует учитывать определенные особенности, влияющие на безопасность личного состава. Безопасное расстояние при этом также зависит от вида выполняемой операции и особенностей горения. Если высоковольтное оборудование отключено, то, как утверждают производители электрокаров, возможно проводить тушение обычными методами, учитывая тепловые потоки и размер пламени при выборе безопасного расстояния. Если электрооборудование не отключено, то выбор безопасного расстояния будет зависеть от типа применяемого огнетушащего вещества и особенностей его подачи.

Однако натурные испытания показали, что опасность также представляет угроза поражения электрическим током.

В связи с этим участникам тушения пожаров следует относиться к пожарам электротранспорта так же, как и к любым другим пожарам электроустановок, соблюдая все правила и рекомендации по тушению оборудования под напряжением.

Выброс опасных химических веществ при горении литий-ионных аккумуляторных батарей может значительно затруднить ликвидацию горения из-за склонности ко взрыву и самовозгоранию. Герметичность модуля аккумуляторной батареи электротранспорта и расположение его в нижней части автомобиля (в большинстве случаев). Таким образом, значительно затрудняется тушение пожара внутри батареи, поскольку ячейки аккумулятора, находящиеся внутри, способны гореть без доступа окислителя, т. к. кислород самостоятельно выделяется при их нагреве.

На основании изложенных данных в статье представляется возможность сде-

лать заключение о важности проведения дополнительных натурных испытаний по определению опасных факторов пожара при горении литий-ионных аккумулятор-

ных батарей, а также по выявлению наиболее эффективного средства и способа тушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зезюлинская А. В. Типы аккумуляторных батарей для электромобилей // Форум молодых ученых. 2019. № 6 (34). С. 500–504.
2. Как ухаживать за литий-ионными аккумуляторами / А. И. Забудский [и др.] // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : сборник III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 10 февраля 2022 года. Омск : Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2022. С. 234–240.
3. Тимонин И. Сравнение аккумуляторных батарей различного типа. ОАО «ВНИИР» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 2 (23). С. 78–80.
4. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 111–120.
5. Информационно-аналитический портал «Зелёная точка старта» : офиц. сайт. URL: <https://greenstartpoint.ru/tochnye-czifry-skolko-v-rossii-zaregistrovano-elektromobilej-na-nachalo-2024-goda> (дата обращения: 24.07.2024).
6. EV FireSafe Data : website. URL: <https://www.evfiresafe.com/> (date of application: 01.08.2024).
7. Larsson F. Lithium-ion Battery Safety: Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2017. С. 53-57.
8. Кудряшкин Д. А. Пожары и возгорания литий-ионных аккумуляторов: потенциальные причины, риски и методы предотвращения // Пожарная и аварийная безопасность : сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, Иваново, 23 ноября 2023 года. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 500–507.
9. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles / R. Bisschop et al. // RISE Fire Research. Sweden, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/336640117_Fire_Safety_of_LithiumIon_Batteries_in_Road_Vehicles (date of application: 05.12.2024).
10. Rao A. Lithium-ion battery fires are a growing publicsafety concern // Here's how to reduce the risk. The Conversation. 2023. URL: <https://theconversation.com/lithium-ion-battery-fires-are-a-growing-public-safety-concern-heres-how-to-reduce-the-risk-209359> (date of application: 05.12.2024).
11. Battery Energy Storage Hazards and Failure Modes [Электронный ресурс]: Национальная ассоциация противопожарной защиты (NFPA). – URL: <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2021/12/03/battery-energy-storage-hazards-and-failure-modes> (дата обращения: 05.12.2024).
12. Jo, Mi and Kim, Hoi and Kim, Boowook and Pleus, Richard and Faustman, Elaine and Yu, Il Je.//Exposure Assessment Study on Lithium-Ion Battery Fire in Explosion Test Room in Battery Testing Facility (2023). Safety and Health at Work. doi: 10.1016/j.shaw.2023.11.007. URL: https://www.researchgate.net/publication/376555317_Exposure_Assessment_Study_on_Lithium-Ion_Battery_Fire_in_Explosion_Test_Room_in_Battery_Testing_Facility (date of application: 05.12.2024).
13. Орлов, О. И. пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов / О. И. Орлов, В. А. Комельков, Д. В. Сорокин // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 4(49). – С. 177-189. – EDN DGRGQQ.
14. Nedjalkov A, Meyer J, Köhring M, Doering A, Angelmahr M, Dahle S, et al. Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution.// Batteries. - URL: https://www.researchgate.net/publication/297657770_Toxic_Gas_Emissions_from_Damaged_Lithium_Ion_Batteries-Analysis_and_Safety_Enhancement_Solution?_tp=eyJjb250ZXh0Ijpb7ImZpcnN0UGFnZSI6InNlYXJjaCIsInBhZ2UiOiJzZWYyY2giLCJwb3NpdGlvbil6InBhZ2VIZWFkZXlifX0 (date of application: 05.12.2024).
15. Lithium-Ion Battery Safety [Электронный ресурс]: Национальная ассоциация противопожарной защиты (NFPA). – URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/lithium-ion-batteries> (дата обращения: 05.12.2024).
16. Transport of Lithium Metal and Lithium Ion Batteries Revised for the 2020 Regulations [Электронный ресурс]: IATA. - URL: <https://www.iata.org/contentassets/05e6d8742b0047259bf3a700bc9d42b9/lithium-battery-guidance-document-2020.pdf> (date of application: 05.12.2024).

17. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
18. Никольский О. К. Халина Т. М., Куликова Л. В. Системы техногенной безопасности электроустановок до 1000 В. М. : Директ-Медиа, 2023. 324 с.
19. Венжик А. В., Мнускина Ю. В., Мнускин Ю. В. Возгорание электромобиля: проблемы при тушении // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 1 (8). С. 77–80.

REFERENCES

1. Zezulinskaya A. V. Types of batteries for electric vehicles // Forum of young scientists. 2019; 6 (34): 500–504 (rus).
2. Zabudskiy A. I., Kine T. A., Serdalin M. K., Bardola A. S. How to care for lithium-ion batteries // The role of research work of students in the development of the agro-industrial complex: Collection of the III All-Russian (national) scientific and practical conference. FSBEI HE Omsk SAU: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2022; 234–240 (rus).
3. Timonin I. Comparison of different types of storage batteries. JSC "VNIIR" // Electric power. Transmission and distribution. 2014; 2(23): 78–80 (rus).
4. Kulova T. L., Skundin A. M. Problems of development of lithium-ion batteries in the world and Russia // Electrochemical power engineering. 2023; 23(3): 111–120. DOI 10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120 (rus).
5. Information and analytical portal "Green Starting Point". URL:<https://greenstartpoint.ru/tochnye-czifry-skolko-v-rossii-zaregistrovano-elektromobilej-na-nachalo-2024-goda> (date of access: 24.07.2024) (rus).
6. EV FireSafe Data // EV FireSafe URL: <https://www.evfiresafe.com/> (accessed: 01.08.2024) (rus).
7. Larsson F. Lithium-ion Battery Safety: Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2017. 53-57.
8. Kudryashkin D. A. Fires and ignitions of lithium-ion batteries: potential causes, risks and methods of prevention // Fire and emergency safety: collection of materials of the XVIII International scientific and practical conference. Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters", 2023; 500–507 (rus).
9. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles [Electronic resource] / Roeland Bisschop, Ola Willstrand, Francine Amon, Max Rosengren // RISE Fire Research. Sweden, 2019. Access mode:https://www.researchgate.net/publication/336640117_Fire_Safety_of_Lithiumlon_Batteries_in_Road_Vehicles.)
10. Rao A., Lu B., Parekh M., Sabet M. Lithium-ion battery fires are a growing public safety concern. Here's how to reduce the risk. The Conversation. [cited in Sep27, 2023] Available from: <https://theconversation.com/lithium-ion-battery-fires-are-a-growing-public-safety-concern-heres-how-to-reduce-the-risk-209359>.
11. Battery Energy Storage Hazards and Failure Modes [Electronic resource]: the National Fire Protection Association (NFPA). – URL: <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2021/12/03/battery-energy-storage-hazards-and-failure-modes> (дата обращения: 05.12.2024).
12. Jo, Mi and Kim, Hoi and Kim, Woowook and Pleus, Richard and Faustman, Elaine and Yu, Il Je.//Exposure Assessment Study on Lithium-Ion Battery Fire in Explosion Test Room in Battery Testing Facility (2023). Safety and Health at Work. doi: 10.1016/j.shaw.2023.11.007. URL: https://www.researchgate.net/publication/376555317_Exposure_Assessment_Study_on_Lithium-Ion_Battery_Fire_in_Explosion_Test_Room_in_Battery_Testing_Facility (date of application: 05.12.2024).
13. Orlov, O. I. fire hazard of lithium-ion batteries / O. I. Orlov, V. A. Komelkov, D. V. Sorokin // Modern problems of civil protection. – 2023. – № 4(49). – Pp. 177-189. – EDN DGRGQQ.
14. Nedjalkov A, Meyer J, Köhring M, Doering A, Angelmahr M, Dahle S, et al. Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution.// Batteries. - URL: https://www.researchgate.net/publication/297657770_Toxic_Gas_Emissions_from_Damaged_Lithium_Ion_Batteries-Analysis_and_Safety_Enhancement_Solution?_tp=eyJjb250ZWh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InNlYXJjaCIsInBhZ2UiOiJzZWZyY2giLCJwb3NpdGlvbil6InBhZ2VIZWFKZlIifX0 (date of application: 05.12.2024).
15. NFPA, [Internet] Lithium-ion battery safety information and resources, [cited Jun 21, 2023] Available from: <https://www.nfpa.org/Public-Education/Fire-causes-and-risks/Lithium-Ion-Battery-Safety> accessed at 6/20/2023.

16. Transport of Lithium Metal and Lithium Ion Batteries Revised for the 2020 Regulations [Electronic resource]: IATA. - URL: <https://www.iata.org/contentassets/05e6d8742b0047259bf3a700bc9d42b9/lithium-battery-guidance-document-2020.pdf> (date of application: 05.12.2024).

17. Terentyev D. I., Tishkina I. V., Kurochkin A. R., Satyukov R. S. Preliminary study of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries // Technosphere safety. 2024; № 3(44): 25–34 (rus).

18. Nikolsky O. K., Khalina T. M., Kulikova L. V., Nikolsky O. K. Systems of technogenic safety of electrical installations up to 1000 V. Moscow: OOO Direct-Media, 2023; 324 (rus).

19. Venzhik A. V., Mnuskina Yu. V., Mnuskina Yu. V. Electric vehicle fire: fire extinguishing problems // Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. 2021; 1 (8): 77–80 (rus).

Информация об авторах

Двоенко Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника УНК, начальник кафедры пожарной техники (в составе УНК ПиАСТ) ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 772016; ORCID: 0000-0002-0436-4974; e-mail: O.Dvoenko@academygps.ru

Кучмасов Даниил Андреевич, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 1234635; SPIN: 1368-7946; e-mail: daniilkuchmasov@yandex.ru

Щербаков Николай Александрович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 1142294; SPIN: 9274-4971; e-mail: snikolais@bk.ru

Захаров Анатолий Иванович, старший преподаватель кафедры пожарной техники (в составе УНК ПиАСТ) ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 1021604; SPIN: 1432-2824;

Information about the authors

Oleg V. Dvoenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy chief of the scientific-research complex - chief of the department of fire and emergency rescue appliances (as part of the SRC of fire and emergency rescue appliances) of the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; Author ID: 772016; In ORCID: 0000-0002-0436-4974; email: O.Dvoenko@academygps.ru

Daniil A. Kuchmasov, post graduate student of State Fire Academy of the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; Author ID: 1234635; SPIN: 1368-7946; e-mail: daniilkuchmasov@yandex.ru

Shcherbakov N. Alexandrovich, post graduate student of the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; Author ID: 1142294; SPIN: 9274-4971; e-mail: snikolais@bk.ru

Zakharov A. Ivanovich, Senior Lecturer, Department of Fire Engineering (as part of the SRC of fire and emergency rescue appliances) of the the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation;

e-mail: A.Zaharov@academygps.ru

Author ID: 1021604; SPIN: 1432-2824;

e-mail: A.Zaharov@academygps.ru