

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 6. С. 67–76
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(6):67-76

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW AND ANALYTICAL ARTICLE

УДК 514.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76>

Международный опыт обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей

Юрий Николаевич Шебеко ✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено обоснование необходимости анализа международного опыта обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей (ЛИБ). Актуальность статьи обусловлена большим количеством инцидентов с пожарами и взрывами на объектах различного назначения, где применяются ЛИБ. Целью работы является аналитический обзор исследований в области всевозможных аспектов пожарной безопасности использования ЛИБ в различных странах мира.

Анализ имевших место аварий и пожаров с участием литий-ионных батарей. Проанализированы имевшие место в мировой практике эксплуатации ЛИБ аварии с пожарами и взрывами. Выявлены три группы условий возникновения упомянутых инцидентов: перегрев или воздействие внешнего пламени, излишний заряд или короткое замыкание, механическое разрушительное воздействие.

Условия возникновения и развития аварий ЛИБ. Описаны основные явления, реализующиеся при авариях ЛИБ. При аварии происходит неконтролируемый нагрев содержимого батареи с образованием большого количества горючих газов, зажигание которых приводит к сгоранию образовавшейся газовой смеси, в том числе и в режиме взрыва. В составе этих газов зарегистрированы водород, метан, этилен, пропан и более тяжелые углеводороды. На вероятность возникновения аварии в значительной степени влияет уровень заряда батареи — чем он выше, тем более вероятна авария и больше ее последствия.

Методы ликвидации аварий и пожаров литий-ионных батарей. Отмечена важная роль аварийной вентиляции в предотвращении образования взрывоопасных газовой смеси. Тушение пожаров ЛИБ существенно осложняется тем обстоятельством, что самоускоряющиеся химические реакции внутри аварийной батареи могут протекать без доступа воздуха. Поэтому применение газовых средств пожаротушения может привести к повторным воспламенениям после ликвидации первоначального очага пламени, если не произвести необходимое охлаждение горячей батареи. В силу этого наиболее подходящим средством пожаротушения является вода.

Выводы. На основании проведенного анализа сделан вывод, что аварии и пожары ЛИБ обусловлены протеканием самоускоряющихся реакций в электролите батареи. При этом, помимо выделения тепла, образуется большое количество горючих газов. Отмечено, что в качестве средства пожаротушения рекомендуется применение воды.

Ключевые слова: самоускоряющиеся реакции; горючие газы; уровень заряда батареи; аварийная вентиляция; средства пожаротушения

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 67–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

International experience in ensuring fire safety using lithium-ion batteries

Yury N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The necessity of analyzing international experience in ensuring fire safety in the use of lithium-ion batteries (LIB) was substantiated. The relevance of the paper is due to the large number of incidents involving fires and explosions at various facilities where LIB are used. The aim of the work is to provide an analytical review of research in the field of all possible aspects of fire safety in the use of LIB in different countries around the world.

Analysis of LIB accidents with fires and explosions. The accidents with fires and explosions taking place at LIB applications were analyzed. The three types of conditions leading to the LIB accidents were revealed: overheating or flame action; overcharge or short circuit; mechanical destruction.

Conditions of an initiation and evolution of LIB accidents. Main phenomena taking place at the LIB accidents were described. A thermal runaway with heating and decomposition of the electrolyte with a generation of high quantities of flammable gases occurs. An ignition of these gases may cause an explosion with the following fire. These gases can include hydrogen, carbon monoxide, methane, ethylene, propane and other hydrocarbons. A state of charge (SOC) of a battery influences strongly the consequences of the accident – the higher is SOC the more probable is the accident and the heavier are its consequences.

Methods for elimination of LIB accidents and fires. It was mentioned that an extinguishing of LIB fires is complicated by the circumstance that self-accelerating runaway reactions inside batteries proceed without a presence of oxygen. Therefore an application of gaseous, powder and aerosol fire extinguishing agents can lead to secondary ignitions after a liquidation of a flame if the necessary cooling of the battery is not made. A conclusion is made that water is more suitable and reliable agent for a fire extinguishing of LIB.

Conclusions. Based on the analysis, it was concluded that accidents and fires involving LIBs are caused by self-accelerating reactions in the battery electrolyte. In addition to heat release, this process generates a large amount of combustible gases. It was noted that water is recommended as a fire extinguishing agent.

Keywords: self-accelerating reactions; flammable gases; state of charge; accidental ventilation; fire extinguishing agents

For citation: Shebeko Yu.N. International experience in ensuring fire safety using lithium-ion batteries. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):67-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76 (rus).

✉ Yury Nicolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Введение

В последние годы во многих странах мира существенно расширяется производство и использование литий-ионных батарей (ЛИБ). ЛИБ имеют ряд преимуществ по сравнению с другими видами батарей: высокая объемная плотность запасенной энергии, постоянство напряжения в процессе использования, большой срок эксплуатации, хорошие характеристики при работе в условиях низких температур. Эти батареи широко применяются в транспортной отрасли (в том числе в авиации) и других отраслях, где требуется использование источников тока с большим требуемым временем работы в режиме разряда. Однако их применение при несоблюдении требований безопасности может приводить к их воспламенению или взрывам. При этом тушение ЛИБ затруднено тем обстоятельством, что происходящие внутри батареи химические реакции саморазогрева при аварии не требуют присутствия кислорода воздуха. Проблема обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей исследуется как российскими (см., например, работы [1–5]), так и зарубежными учеными. Настоящая работа посвящена анализу работ в направлении решения указанной проблемы, выполненных зарубежными исследователями.

Анализ аварий и пожаров с участием литий-ионных батарей

Как отмечено выше, в аварийных условиях эксплуатации ЛИБ могут воспламениться. Согласно [6, 7], аварийные условия делятся на три группы:

1) перегрев (в том числе при воздействии внешнего источника);

2) излишний заряд или короткое замыкание;
3) механическое разрушительное внешнее воздействие.

При этом происходит неконтролируемый саморазогрев содержимого батареи с образованием большого количества горючих газов. Ключевыми с точки зрения последствий аварии являются процессы тепловыделения с образованием горючих газозвушных смесей, зажигание которых приводит к взрыву в помещении, где размещена батарея. По указанному сценарию протекала большая часть аварий, имевших место на практике. В работе [6] приведены краткие описания 13 наиболее характерных инцидентов с участием ЛИБ, имевших место на практике в период с 2011 по 2023 г. и сопровождавшихся пожарами и взрывами.

В работе [7] со ссылкой на документ¹ отмечены 75 инцидентов с ЛИБ, имевших место в период с 2021 по 2023 г., приведших к пожарам и взрывам. Описаны некоторые характерные аварии. В 2019 г. в штате Аризона (США) произошел инцидент с ЛИБ на одном из предприятий. Начался аварийный нагрев батареи, и через 3 часа после этого пожарные приступили к ликвидации инцидента. После открытия двери помещения с аккумуляторами произошел взрыв, приведший к поражению пожарных. Отмечена необходимость разработки обоснованных планов пожаротушения объектов с наличием ЛИБ, учитывающих особенности таких пожаров. Требуется также корректировка нормативных документов для данных объектов, предусматривающая устройство аварийной вентиляции с требуемой производительностью, а также оснащение помещений датчиками

¹ EPRI. Electric Power Research Institute. 2024. BESS Failure Event Database.

довзрывоопасных концентраций и легкообрасываемыми конструкциями.

Согласно работе [7], в 2019 г. в Норвегии на пароме с гибридным приводом (электроэнергия и дизельное топливо) в вечернее время произошел пожар в помещении с ЛИБ, который был потушен. На следующее утро пожарные открыли люк помещения для проветривания. При этом температура в помещении начала расти. Через 2 часа после этого в помещении произошел взрыв, вызвавший серьезные разрушения парома. Аналогичный инцидент имел место в Норвегии в 2021 г. в электропомещении парома с наличием ЛИБ. Пожарные с учетом уроков предыдущей аварии вначале подали в помещении азот и лишь затем стали проводить его вентилирование. Описан также инцидент, имевший место в двухквартирном доме, в котором в подвальном помещении имелись ЛИБ. Было обнаружено задымление, но прибывшие пожарные не обнаружили очага горения. После этого в помещении, где располагались ЛИБ, произошел взрыв.

В работе [8] отмечен рост в 5 раз в Ванкувере (Канада) с 2012 по 2022 г. инцидентов, сопровождающихся неконтролируемым нагревом ЛИБ. В работе [9] указано, что в период с 2006 по 2014 г. имело место множество случаев пожаров и взрывов мобильных телефонов, оснащенных ЛИБ. По этой причине в 2016 г. мобильные телефоны одной из компаний были отозваны с рынка. Обзор аварий с пожарами и взрывами электромобилей, вызванными неконтролируемыми самоускоряющимися реакциями в ЛИБ, дан в работе [10].

В работе [11] анализируется инцидент с пожаром и взрывом в здании аккумуляторной с наличием ЛИБ, произошедший 16.04.2021 г. в Пекине и приведший к человеческим жертвам и существенным экономическим потерям. Двое пожарных погибли, один ранен, ущерб составил более 16 млн юаней. В инцидент были вовлечены два кирпичных здания и соединяющий их подземный кабельный тоннель. В обоих зданиях размещались ЛИБ, причем перегрев батареи произошел в одном здании, а взрыв — в другом. Причиной перегрева стало короткое замыкание, при этом в результате самоускоряющихся реакций в ЛИБ в одном здании произошло образование дыма и горючих газов, которые по тоннелю распространились в другое здание. Путем произведенной реконструкции инцидента установлено, что в начальный период перегрева выделялись пары метилэтилкарбоната, а в последующей стадии образовывались горючие газы (водород, оксид углерода, метан, диоксид углерода, ацетилен). Установлено, что все 103 680 батарей в аварийном здании приняли участие в выделении горючих газов, поступивших по тоннелю в соседнее здание и вызвавших взрыв через примерно 8500 с после начала аварии.

Оценки показали, что масса выделившихся газов составила 52,7 кг, давление взрыва — 70 кПа, что вызвало разрушение здания. Характерный размер пламени при взрыве был около 15 м. По результатам расследования было предложено обратить внимание на обоснование генерального плана и объемно-планировочных решений объекта, установку газосигнализаторов, устройство аварийной вентиляции с требуемой производительностью, применение легкообрасываемых конструкций.

6 сентября 2025 г. в г. Тэджон (Южная Корея) около 20:15 в главном дата-центре Национальной службы информационных ресурсов при переноске аккумуляторов произошел пожар. Первоначально загорелась одна батарея, затем пламя быстро распространилось по всей батарейной зоне. В тушении пожара приняли участие более 200 пожарных. К утру 27 сентября основной очаг пожара был ликвидирован. Выгорело 384 батарейных модуля. К середине дня пожарные извлекли около трети из них — примерно 133 единицы. Каждый батарейный модуль поштучно охлаждали в емкостях с водой. Один из пожарных получил ожоги лица и рук. Основной ущерб нанесен системам поддержания микроклимата. Их остановка вынудила обесточить весь центр, отключив 647 систем — и те, что пострадали от пожара напрямую, и те, что физически остались целыми.

Закономерности возникновения и развития самоускоряющихся аварийных процессов в литий-ионных батареях

В работе [12] отмечены характерные причины и иницирующие события для взрывов ЛИБ:

- внешние: деформация батареи, излишний заряд, внешний нагрев;
- внутренние: примеси иных, кроме лития, металлов, нестабильность катода или анода, короткое замыкание внутри батареи.

Аварийный процесс в ЛИБ начинается с увеличения температуры какой-либо из ячеек батареи независимо от вида иницирующего события. Далее происходит разложение компонентов батареи в самоускоряющемся режиме с генерацией тепла и образованием горючих газов, которые при своем расширении выходят за пределы батареи, образуя взрывоопасные смеси с воздухом в объеме помещения. Проведены эксперименты, имитирующие газовые взрывы при размещении ЛИБ внутри камеры объемом 19,7 л, снабженной датчиками давления. В камере создавали горючие смеси H_2 , CH_4 , C_3H_8 , C_2H_4 с воздухом, типичные для случая аварийного газовыделения при саморазогреве ЛИБ. Определяли максимальное давление взрыва и максимальную скорость нарастания давления взрыва. Характерные

значения этих параметров составили 0,44–0,51 МПа и 2,3–8,4 МПа/с.

В работе [6] представлены результаты анализа механизмов возникновения инцидентов с ЛИБ и методов противопожарной защиты объектов с наличием таких батарей. Представлены данные по газовыделению и возникновению саморазогрева батарей различных типов. Основным горючим компонентом этих газов является водород, содержание которого составляет около 30 % (об.). Содержание диоксида углерода колеблется в промежутке от 22,9 до 53 % (об.) в зависимости от типа электролита. Концентрация оксида углерода может достигать 27,6 % (об.). Суммарная концентрация остальных компонентов, выделяющихся при саморазогреве батареи газов (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 и др.), составляет от 10 до 34 % (об.) в зависимости от типа батареи и степени ее заряда. При инициировании процесса нагрева ячейки в центре батареи ускоряющаяся реакция распространяется на другие ячейки.

Описан эксперимент по инициированию процесса саморазогрева ЛИБ, содержащей 14 400 ячеек при степени заряда 100 %. Саморазогрев инициировали двумя методами: внешним (пропановая горелка) и внутренним источником. Найдено, что в процессе саморазогрева температура внутри ячейки может достигать величины 1093 °С. Температура наружных ячеек существенно ниже и не может привести к зажиганию окружающих предметов, расположенных на расстоянии более 1,8 м от батареи. Отмечено, что безопасность применения ЛИБ может быть обеспечена соответствующей конструкцией батареи, соблюдением требуемых условий эксплуатации и использованием средств противопожарной защиты.

В работе [9] отмечено, что одной из причин аварий ЛИБ является разрушение тонкой оболочки (толщина порядка 30 мкм), разделяющей анод и катод, с коротким замыканием и дальнейшим саморазогревом батареи. При этом из-за разложения сольвента, используемого в качестве электролита, могут образовываться горючие газы. Для оценки устойчивости батареи к внешнему силовому воздействию Международный стандарт² регламентирует необходимость испытаний батареи по отношению к разрушающему воздействию. Предложен новый метод механического воздействия на ЛИБ с помощью углового элемента из пластика в форме ножа с углом 90°. Гидравлический пресс, осуществляющий воздействие, вмонтирован в камеру объемом 20 л. Скорость движения углового элемента состав-

² IEC 62133 “Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications”.

Основные результаты эксперимента
The main results of the experiment

Вид воздействия Type of impact	Количество опытов с зажиганием Number of ignition experiments	Количество опытов без зажигания Number of experiments without ignition
Медленное Slow	6	4
Быстрое Quick	3	7

ляет 5 мм/с (высокая) и 0,5 мм/с (низкая). Камера заполнялась метановоздушной смесью с концентрацией CH_4 6,5 % (об.). Для сравнения использовали воздействие не угловым, а плоским элементом. Фиксировали возникновение саморазогрева батареи при силовом воздействии. Основные результаты эксперимента приведены в таблице.

Работа [13] посвящена исследованию газовой выделению при перегреве ЛИБ. Найдено, что значительную часть образующихся продуктов составляют горючие газы. Со ссылкой на работу [14] указано, что нижний концентрационный предел распространения пламени выделяющихся газов составляет от 6,1 до 10,0 % (об.) в зависимости от типа батареи и уровня ее заряда (SOC — state of charge). Отмечено, что чем выше SOC, тем больше количество выделяющихся газов. В зависимости от типа батареи и SOC эти газы содержат такие компоненты, как H_2 , CO , O_2 , N_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 и более тяжелые углеводороды, а также HF. Проанализировано 29 экспериментов по изучению газовой выделению при перегреве ЛИБ емкостью от 1,1 до 50 А·ч при уровне заряда от 0 до 140 %. Выявлена зависимость НКПР выделяющихся газов от SOC для батарей различных типов. Найдено, что при увеличении SOC от 20 до 140 % величина НКПР снижается со значений 15–35 % (об.) до величин 5–10 % (об.) в зависимости от типа батареи. При этом величина минимальной взрывоопасной концентрации кислорода находится в диапазоне от 8 до 11 % (об.).

В работе [15] отмечено, что разработаны надежные ЛИБ, для которых частота аварий не превышает 1 на 10^6 батарей в год при условии их правильной эксплуатации. Отмечено, что среди проведенных ранее исследований сравнительно мало экспериментов по изучению саморазогрева батарей большой емкости. В связи с этим изучаются ЛИБ большой емкости (50 А·ч), состоящие из 5 ячеек емкостью 10 А·ч каждая. Измеряли такие параметры, как потеря массы, скорость тепловыделения HRR, температура в зависимости от SOC. Величину HRR вычисляли по скорости расходования кислорода в атмосфере испытательной камеры. Нагрев батареи производили с помощью радиационной панели мощностью 3 кВт, расстояние от которой до изучаемого объекта состав-

ляло 100 мм. Измеряли концентрации O_2 , CO , CO_2 в процессе нагрева батареи. Отмечены следующие стадии деградации батареи.

1. Расширение батареи за счет теплового воздействия и выделяющихся газов.
2. Приблизительно через 1500 с (в зависимости от SOC) появляется интенсивное струевое пламя газов, выделившихся в результате нагрева батареи.
3. Стационарное горение всех 5 ячеек батареи.
4. Возникает более интенсивное струевое пламя.
5. Через промежуток времени 2100–3200 с в зависимости от величины SOC происходит снижение интенсивности горения и гашение пламени.

Длина струевого пламени составляла 963, 519 и 549 мм для величины SOC 100, 50 и 0%. Полное время горения было равно 591, 629 и 1710 с для указанных выше значений SOC. Максимальная величина мощности тепловыделения (49 кВт) и максимальная температура пламени (1500, 1020 и 1091 °C для SOC 100, 50 и 0%) реализуются во второй стадии процесса. Найдено, что интенсивный само-разогрев батареи начинается при ее температуре 175–185 °C.

В работе [16] описаны испытания ЛИБ по оценке их пожарной опасности с целью изучения возможности их применения в авиации. Проведена оценка реакции батарей на пожар. Результаты экспериментов показали, что ЛИБ могут интенсивно реагировать на пламя. Ячейки батареи при нагреве раскрываются с распылением электролита и выделением горючих газов, что приводит к интенсификации пожара. Выполнены испытания трех видов батарей в камере объемом 1,8 м³. На батарею, состоящую из 8 ячеек при степени заряда 100%, воздействовали пламенем пропана. Регистрировали температуру газовой среды в 4 точках и производили видеосъемку. Изучали также воздействие на батарею короткого замыкания, а также факельного горения смеси C_2H_2/O_2 . Найдено, что при воздействии пламени на батарею, состоящую из 1,4 и 8 ячеек, происходило повышение их температуры до значений 21, 316 и 418 °C, при которых происходило разрушение ячеек с выбросом электролита. При коротком замыкании батареи в условиях SOC = 100% происходил лишь нагрев батареи без выброса электролита. Характерные температуры воспламенения батарей составили 166–275 °C.

В работе [7] выполнены эксперименты по изучению газовой выделению в камере объемом 80 л при самонагревании ЛИБ при различных уровнях заряда SOC. Найдено, что с увеличением SOC концентрации H_2 и CO растут, а концентрация CO_2 падает. Появление водорода обусловлено реакциями атомов Li со связующим, а CO и CO_2 — разложением электролита. Общее количество газов, выделяю-

щихся при самонагревании батареи, существенно (в несколько раз) увеличивается с ростом SOC. Консервативная оценка объема выделившихся газов дает величину 0,5 л на 1 Вт·ч емкости батареи.

Проанализирован в части опасного газовой выделение проект пассажирского паром на электрической тяге между Швецией и Данией. Требуемая емкость батареи для этого паром составляет 60 МВт·ч. Для данного паром существует проблема обеспечения взрывобезопасности в связи с возможностью выделения горючих газов, которую предлагается решать путем применения аварийной вентиляции. Производительность этой вентиляции должна быть определена, исходя из возможности выделения горючих газов за несколько секунд при самоускоряющейся реакции в батарее. Модуль батареи емкостью 10 кВт·ч может в результате аварии генерировать около 5000 л газа, что в отсутствие вентиляции приведет к образованию горючей газовой смеси в объеме 100 м³ (в расчетах принята величина НКПР 5% (об.)). В этом случае требуемая производительность аварийной вентиляции очень велика, поэтому необходимо оснастить соответствующие помещения легкобросаемыми конструкциями (ЛСК). Имеется и проблема сочетания вентиляции с установками газового пожаротушения, для эффективной работы которых необходимо отключение вентиляции. Тушение пламени вызовет возрастание риска взрыва, а наличие пламени вызовет возрастание риска взрыва в корпусе батареи. Оценка требуемой для предотвращения образования взрывоопасной газовой смеси дает величину 6–50 объемов в час.

Величина производительности вентиляции должна соответствовать случаям реализации 3 сценариев:

- нормальная работа — 6 объемов в час;
- при обнаружении нештатной ситуации производительность должна быть увеличена до уровня, обеспечивающего взрывобезопасность при инциденте с одной ячейкой батареи;
- при регистрации в помещении предельно допустимых концентраций горючих газов должна включаться аварийная вентиляция, производительность которой должна быть определена отдельно в каждом конкретном случае.

При подтверждении возникновения пожара вентиляция должна быть отключена, при этом измерение концентраций горючих газов должно продолжаться. Принятие решений по реагированию на аварию должно быть основано на данных по концентрации горючих газов, визуальном контроле с помощью видеонаблюдения и информации о текущих параметрах батарей.

Сообщается о разработке руководства по устройству и эксплуатации аккумуляторных систем на основе

ЛИБ, основные положения которого заключаются в следующем:

- расположение батарей не должно препятствовать эвакуации людей при аварии или пожаре;
- помещения с наличием батарей должны быть оборудованы принудительной вентиляцией с учетом возможности аварии в одной или нескольких ячейках. Эта вентиляция должна быть обособлена от других систем вентиляции здания;
- помещение должно быть оснащено легкообрабатываемыми конструкциями;
- пожарная охрана должна иметь возможность удаления горючих газов из помещения без открывания дверей;
- для определения стратегии реагирования следует учитывать сценарии как с пожаром, так и без него.

Работа [17] посвящена определению номенклатуры и количества горючих газов, выделяющихся при аварии ЛИБ. Отмечена одна из наиболее характерных аварий, заключающаяся в возникновении самоускоряющейся реакции с выделением горючих газов. Реакция, начавшаяся в одной ячейке, может в результате ненормативного нагрева перейти на другие ячейки батареи. Выделение газов изучалось в зависимости от скорости нагрева, которая может составлять до нескольких сотен градусов в минуту. Выполнены эксперименты, в которых ЛИБ размещались в сферической камере объемом 20 л, оснащенной нагревателем батареи в виде нихромовой проволоки и датчиками давления, температуры и концентраций газов. Скорость нагрева батареи варьировалась от 10 до 80 °С в минуту. Найдено, что основными компонентами выделяющихся газов являются водород (27,4–38,9%), диоксид углерода (5,8–11,7%), оксид углерода (1,3–2,9%), углеводороды (13,6–17,4%), кислородсодержащие органические вещества (21,1–26,4%).

В работе [18] изучены показатели пожарной опасности сбросных газов, выделяющихся при авариях ЛИБ. Отмечено, что указанные аварии происходят при сверхрасчетных тепловых (self-accelerating), электрических или механических нагрузках. В процессе аварии генерируется большое количество горючих газов (водород, метан, этилен, оксид углерода и др.). Утверждается со ссылкой на работу [19], что необходимо определение таких параметров, как критическая температура инициирования самоускоряющихся реакций, нормальная скорость горения образующихся газов и максимальное давление взрыва. Проведены эксперименты с батареями 5 типов. Показатели взрыва определяли в реакционном сосуде объемом 12 л, рассчитанном на давление до 10 МПа. Батарея заряжалась до уровня SOC = 100% и помещалась в реакционный сосуд. С помощью внешнего

нагрева инициировались самоускоряющиеся реакции в батарее. Определяли состав образующихся газов, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва и нормальную скорость горения. Выделяющиеся газы содержат водород (до 36%), этилен (до 15%), диоксид углерода (от 34 до 43%). Максимальное давление взрыва составило от 500 до 700 кПа, максимальная скорость нарастания давления взрыва до 41,8 МПа/с. Нормальная скорость горения не превышала 80 см/с.

Методы ликвидации пожаров и аварий литий-ионных батарей

В работе [6] отмечена необходимость раннего обнаружения аварий и пожаров ЛИБ, для чего предлагается использовать дымовые пожарные извещатели как наименее инерционные. Тушение пожаров осложняется тем обстоятельством, что самоускоряющиеся химические реакции внутри батареи не требуют присутствия кислорода. Для тушения может применяться вода, обеспечивающая охлаждение батареи. Однако продолжительность ее подачи должна быть не менее 6 мин для локализации процесса и не менее 20 мин для тушения пожара. Как отмечено выше, при описании аварии с пожаром ЛИБ в главном дата-центре Национальной службы информационных ресурсов Южной Кореи, каждую батарею поштучно охлаждали в емкостях с водой. Компоненты электролита ЛИБ содержат соединения фтора, которые при реакции с водой могут выделять фтористый водород, что необходимо принимать во внимание при тушении пожаров ЛИБ. Показано, что может быть эффективной тонкораспыленная вода со смачивателем. Тонкораспыленная вода, а также огнетушащие газы и порошки могут тушить открытое пламя, однако в силу продолжающихся при этом химических реакций не предотвращаются повторные воспламенения.

В работе [19] показано, что гептафторпропан C_3F_7H может успешно подавлять горение единичной или нескольких ячеек батареи за 6–25 с, но при этом не исключаются повторные воспламенения. Методом цилиндра определены минимальные огнетушащие концентрации азота, диоксида углерода и гептафторпропана по отношению к диффузионному горению образующихся при аварии газов. Эти концентрации составляют 35–42% (об.) для азота, 25–39% (об.) для диоксида углерода и около 9% (об.) для гептафторпропана в зависимости от типа батареи. Найдено, что гептафторпропан при своих малых концентрациях промотирует горение, увеличивая яркость и размеры пламени, однако при более высоких содержаниях этого агента происходит гашение пламени.

В работе [16] выполнены эксперименты по тушению пожаров ЛИБ с помощью агента Halon 1211 (CF_2ClBr). Изучалась батарея из 8 ячеек, полностью

заряженных (SOC = 100 %). Горение батареи инициировалось с помощью пламени этанола. В ряде опытов после тушения пламени наблюдались повторные воспламенения, в результате чего требовалась подача дополнительных количеств огнетушащего газа для гашения пламени.

В работе [20] рассмотрены результаты исследований по поиску агентов для тушения пожаров ЛИБ. Отмечены случаи применения на практике различных огнетушащих веществ для ликвидации пожаров ЛИБ (порошки, хладоны, вода), использование которых зачастую приводило к повторным воспламенениям. Сформулированы требования к огнетушащим агентам, предназначенным для тушения пожаров ЛИБ:

- высокая теплоемкость с точки зрения охлаждения батареи;
- низкая электропроводность;
- низкая вязкость с точки зрения проникновения огнетушащего вещества в поры горячей батареи;
- экологичность и доступность.

Рассмотрены различные огнетушащие вещества с точки зрения их применения для тушения ЛИБ. Среди огнетушащих газовых средств представлены как фторированные (HFC-227ea — C_3F_7H , Novac 1230 — $CF_3CF_2C(O)CF(CH_3)_2$), так и бромированные (Halon 1211 — CF_3Br , Halon 1211 — CF_2ClBr , Halon 2402 — $C_2F_4Br_2$) агенты, а также диоксид углерода. Halon 1211 используется в авиации, однако при его применении возможны повторные воспламенения. Кроме того, этот газ опасен с точки зрения воздействия на озоновый слой атмосферы. Такие газы, как CO_2 , HFC-227ea и NOVEC 1230, имеют низкий потенциал разрушения озонового слоя, низкую токсичность и химическую стабильность. Среди них CO_2 в силу своей низкой теплоемкости и высокой вероятности реализации повторных воспламенений не подходит для тушения пожаров ЛИБ. HFC-227ea при своем применении также может давать повторные воспламенения, кроме того, при тушении образуются большие количества HF. NOVEC 1230 при комнатной температуре является жидкостью (его температура кипения 49 °C) и может давать охлаждающий эффект, хотя и относительно небольшой из-за его низкой температуры кипения. Однако при содержании паров этого агента 2 % (об.) происходит промотирование горения. Кроме того, при его применении образуются токсичные продукты, а также возможно повторное воспламенение. Поэтому предлагается использовать смесь NOVEC 1230 с водой. Огнетушащие порошки могут быть эффективны для тушения пожара одной ячейки, но являются неэффективными для тушения батареи в целом. Газоаэрозольные средства хорошо тушат открытое пламя, но при их использовании вероятны повторные воспламенения.

Сделан вывод о наибольшей пригодности воды для тушения пожаров ЛИБ, однако необходимо учесть, что для ее применения необходимы высокие интенсивности и времена подачи. Для тонкораспыленной воды критическая интенсивность составляет 2 л/(м²·мин), ее эффективность может быть повышена за счет применения добавок смачивателей или пенообразователей (например, AFFF). Следует также учитывать возможность повторных воспламенений.

Выводы

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

1. Представлен анализ наиболее крупных из имевших место в эксплуатации литий-ионных батарей аварий с пожарами и взрывами, на основе которого выявлены закономерности их возникновения и развития. Выявлена важность таких параметров батареи, как ее геометрия, материалы электродов и электролита, условия ее эксплуатации для возникновения и развития аварии. Отмечено, что аварийные химические процессы в батарее могут протекать без доступа кислорода воздуха, что существенно затрудняет их локализацию и ликвидацию.

2. В случае нештатных условий эксплуатации литий-ионных батарей (перегрев, излишний заряд, короткое замыкание, разрушающее механическое воздействие) может происходить неконтролируемый самоускоряющийся нагрев батареи с образованием большого количества горючих газов (водород, метан, оксид углерода, этилен и др.). Зажигание образующейся газовой смеси в объеме помещения приводит к взрыву с разрушением строительных конструкций.

3. Проанализированы вопросы предотвращения и ликвидации аварий литий-ионных батарей. Отмечено, что последствия таких аварий во многом определяются уровнем заряда батареи к моменту возникновения инициирующего события. Выявлена необходимость устройства высокопроизводительной аварийной вентиляции (кратность до 50) в помещениях, где размещаются батареи, для предотвращения образования взрывоопасных смесей.

4. Для тушения пожаров литий-ионных батарей важным является не только ликвидация пламенного горения, но и предотвращение повторных воспламенений из-за того, что аварийные процессы в них могут протекать без доступа воздуха. В связи с этим наиболее подходящим средством является вода, которая в силу своей высокой теплоемкости может эффективно снижать температуру батареи с соответствующим прекращением указанных процессов. Газовые составы не являются эффективными, так как они не дают необходимого охлаждающего эффекта, и при их применении вероятны повторные

воспламенения. Это же относится к порошковым и газоаэрозольным средствам пожаротушения.

5. В силу отмеченных выше закономерностей протекания аварий литий-ионных батарей пред-

ставляется необходимой разработка соответствующих руководящих документов, регламентирующих действия оперативных пожарных подразделений по ликвидации таких аварий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Емельянов Р.А., Казаков А.В., Бухтояров Д.В., Хатунцева С.Ю. Развитие нормативной базы в области пожаротушения литий-ионных аккумуляторов // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2024. № 1 (114). С. 97–101. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2024.114.1.011. EDN FXBOWE.
2. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаро-взрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2022. № 31 (3). С.96–102. EDN DHUDNE.
3. Орлов О.И., Комельков В.А., Сорокин Д.В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–188. EDN DGRGQQ.
4. Терентьев Д.И., Тикина И.В., Курочкин А.Р., Сатюков Р.С. Предварительное исследование пожаро-опасных свойств литий-ионных аккумуляторов // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34. EDN EOLZGH.
5. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В., Иванов Д.В. Обзор огнетушащих средств при тушении литий-ионных батарей // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 33–35. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.30.61.006. EDN BHAFXJ.
6. Wang Q., Mao B., Sun J., Stolarov S.I. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies // Progress in Energy and Combustion Science. 2019. No. 73. Pp. 95–131. DOI: 10.1016/j.peccs.2019.03.002. EDN DRCHAH.
7. Willstrand O., Hynynen J., Karlsson A., Brandell D. Gas release from lithium ion batteries and mitigation of potential consequences : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy, 2024. Pp. 137–148. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
8. Daragan F.G., Spörhase S., Kianfar A., Limbacker B., Hahn A., Essmann S. Thermal runaway of lithium ion batteries in flameproof enclosures: Effect of internal surface and gas mixture : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy, 2024. Pp. 159–169. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
9. Dubanewicz T., DuCarme J.T. Further study of the intrinsic safety of internally shorted lithium and lithium-ion cells within methane-air // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. No. 32. Pp. 165–173. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.002
10. Sun P., Bisschop R., Niu H., Huang X. A review of battery fires in electric vehicles // Fire Technology. 2020. No. 56 (4). Pp. 1361–1410. DOI: 10.1007/s10694-020-00958-2. EDN CQOTOS.
11. Shen X., Hu Q., Zhang Q., Wang D., Yuan Sh., Jiang Ju. et al. An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study // Engineering Failure Analysis. 2023. No. 151. P. 107384. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107384. EDN RMTZRU.
12. Peschel I., Spörhase S., Kianfar A., Markus D., Essman S. Reproduction of the pressure load due to the thermal runaway of NMC cell in a flameproof enclosure by gas explosions : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy. Pp. 262–271. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
13. Li W., Rao Sh., Xiao Ya., Gao Zh., Wang H., Quyang M. Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway // IScience. 2021. No. 24 (5). P. 102401. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102401. EDN FDJTGH.
14. Baird A.R., Archibald E.J., Marr K.C., Ezekoye O.A. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas // Journal of Power Sources. 2020. No. 446. P. 227257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227257. EDN VRDCIE.
15. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test // Journal of Power Sources. 2015. No. 285. Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.035
16. Summer S.M. Flammability assessment of lithium-ion and lithium-ion polymer battery cells designed for aircraft power usage // DOT/FAA/AR-095/55. Air Traffic Organization NextGen and Operations Planning Office of Research and Technology Development. Washington. DC 20591. 2010. P. 22. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/09-55.pdf>
17. Almodavar C.A., Boeck L.R., Bouwens C.R.L. Effects of heating rate on thermal runaway of LFP lithium-ion batteries: Vent gas quantification and composition analysis : Proceedings of the 15th International Symposium

- on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy. Pp. 149–158. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
18. Wang Q., Shao G., Duan Q., Chen M., Li Y., Wu K. et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppression the lithium titanate battery fire // *Fire Technology*. 2016. No. 52 (2). Pp. 387–396. DOI: 10.1007/s10694-015-0531-9. EDN FEYEGZ.
 19. Wang H., Xu H., Zhang Z., Wang Q., Jin Ch., Wu Ch. et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway : a comparative study // *eTransportation*. 2022. No. 13. P. 1001990. DOI: 10.1016/etran.2022.100190. EDN JVXRYN.
 20. Yuan Sh., Chang Ch., Yan Sh., Zhou P., Qian X., Yuan M. et al. A review of fire extinguishing agent on suppression lithium-ion batteries fires // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. No. 62. Pp. 262–280. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.03.031

REFERENCES

1. Emelyanov R.A., Kazakov A.V., Bukhtoyarov D.V., Hatunzeva S.Yu. Elaboration of the regulatory framework in the field of extinguishing fires of lithium-ion batteries. *Fire Safety*. 2024; 1(114):97-101. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2024.114.1.011. EDN FXBOWE. (rus).
2. Kharlamenkov A.S. The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia. *Fire and Explosion Safety/Pozharovzryvobezopasnost'*. 2022; 31(3):96-102. EDN DHUDNE. (rus).
3. Orlov O.I., Komelkov V.A., Sorokin D.V. Fire hazard of lithium-ion cell. *Modern Problems of Civil Protection*. 2023; 4(49):177-188. EDN DGRGQQ. (rus).
4. Terentiev D.I., Tikina I.V., Kurochkin A.R., Satukov R.S. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries. *Technosphere Safety*. 2024; 3(44):25-34. EDN EOLZGH. (rus).
5. Melnik A.A., Eliseev Yu.N., Mokryak A.V., Ivanov D.V. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2021; 2(21):33-35. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.30.61.006. EDN BHAFXJ. (rus).
6. Wang Q., Mao B., Sun J., Stoliarov S.I. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019; 73:95-131. DOI: 10.1016/j.pecs.2019.03.002. EDN DRCHAH.
7. Willstrand O., Hynynen J., Karlsson A., Brandell D. Gas release from lithium ion batteries and mitigation of potential consequences : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 137-148. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
8. Daragan F.G., Sporhase S., Kianfar A., Limbacker B., Hahn A., Essmann S. Thermal runaway of lithium ion batteries in flameproof enclosures: Effect of internal surface and gas mixture : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 159-169. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
9. Dubanewicz T., DuCarme J.T. Further study of the intrinsic safety shorted lithium and lithium-ion cells within methane-air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014; 32:165-173. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.002
10. Sun P., Huang X., Bisschop R., Niu H. A review of battery fires in electric vehicles. *Fire Technology*. 2020; 56:1361-1410. DOI: 10.1007/s10694-020-00958-2. EDN CQOTOS.
11. Shen X., Hu Q., Zhang Q., Wang D., Yuan Sh., Jiang Ju. et al. An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study. *Engineering Failure Analysis*. 2023; 151:107384. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.,107384. EDN RMTZRU.
12. Peschel I., Sporhase S., Kianfar A., Markus D., Essman S. Reproduction of the pressure load due to the thermal runaway of NMC cell in a flameproof enclosure by gas explosions : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 262-271. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
13. Li W., Rao Sh., Xiao Ya., Gao Zh., Wang H., Quyang M. Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway. *IScience*. 2021; 24(5):102401. DOI: 10.1016/j.isei.2021.102401. EDN FDJTGH.
14. Baird A.R., Archibald E.J., Marr K.C., Ezekoye O.A. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas. *Journal of Power Sources*. 2020; 446:227257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227257. EDN VRDCIE.
15. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*. 2015; 285:80-89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.035
16. Summer S.M. Flammability assessment of lithium-ion and lithium-ion polymer battery cells designed for aircraft power usage. DOT/FAA/AR-095/55. *Air Traffic Organization NextGen and Operations Planning Office of Research and Technology Development*. Washington. DC 20591. 2010; 22. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/09-55.pdf>

17. Almodavar C.A., Boeck L.R., Bouwens C.R.L. Effects of heating rate on thermal runaway of LFP lithium-ion batteries: Vent gas quantification and composition analysis : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 149-158. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
18. Wang Q., Shao G., Duan Q., Chen M., Li Y., Wu K. et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppression the lithium titanate battery fire. *Fire Technology*. 2016; 52(2):387-396. DOI: 10.1007/s10694-015-0531-9. EDN FEYEGZ.
19. Wang H., Xu H., Zhang Z., Wang Q., Jin Ch., Wu Ch. et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway : a comparative study. *eTransportation*. 2022; 13:1001990. DOI: 10.1016/etran.2022.100190. EDN JVXRYN.
20. Yuan Sh., Chang Ch., Yan Sh., Zhou P., Qian X., Yuan M. et al. A review of fire extinguishing agent on suppression lithium-ion batteries fires. *Journal of Energy Chemistry*. 2021; 62:262-280. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.03.031

Поступила 25.11.2025, после доработки 25.11.2025;

принята к публикации 05.12.2025

Received November 25, 2025; Received in revised form November 25, 2025;

Accepted December 05, 2025

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Information about the author

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko1@mail.ru