

Научная статья

УДК 614.841.48; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-122-132

ТИПОЛОГИЯ ПРИЧИН, ПРИВОДЯЩИХ К ВОЗГОРАНИЮ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

✉ Астахина Юлия Анатольевна;

Королева Людмила Анатольевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ yulya_astahina@mail.ru

Аннотация. Представлен краткий обзор причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей. Определено, что возгорание аккумуляторов провоцируется чрезмерным механическим, электрическим, температурным воздействием, наличием производственных дефектов, старением и погружением в соленую воду. В рамках рассмотрения температурного режима эксплуатации указывается на малоизученный параметр – однородность структуры аккумулятора, влияющую на безопасность всего электромобиля. Представлена типологическая схема причин, инициирующих возгорание литий-ионного аккумулятора электромобиля.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, электромобиль, тепловой разгон, возгорание

Для цитирования: Астахина Ю.А., Королева Л.А. Типология причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 122–132. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-122-132.

Scientific article

TYPOLOGY OF CAUSES LEADING TO FIRE IN LITHIUM-ION BATTERIES OF ELECTRIC VEHICLES

✉ Astahina Yulia A.;

Koroleva Lyudmila A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ yulya_astahina@mail.ru

Abstract. A brief overview of the causes leading to ignition of lithium-ion batteries of electric vehicles is presented. It is determined that ignition of batteries is provoked by excessive mechanical, electrical, temperature effects, the presence of manufacturing defects, aging and immersion in salt water. In the context of the consideration of the operating temperature mode, a little-studied parameter is indicated – the homogeneity of the battery structure, which affects the safety of the entire electric vehicle. A typological diagram of the causes initiating ignition of a lithium-ion battery of an electric vehicle is graphically presented.

Keywords: lithium-ion battery, electric vehicle, thermal runaway, ignition

For citation: Astahina Yu.A., Koroleva L.A. Typology of causes leading to fire in lithium-ion batteries of electric vehicles // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 122–132. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-122-132.

Введение

В целях устойчивого энергоснабжения ученые ищут альтернативу традиционным источникам энергии [1]. Одним из возможных решений в автомобильной промышленности является переход к транспортным средствам, работающим на электричестве. Значим и тот факт, что эксплуатация электромобилей, работающих на литий-ионных аккумуляторах, призвана смягчить последствия экологических проблем. Также превосходство литий-ионных аккумуляторов среди других аккумуляторов обусловлено улучшением таких показателей, как удельная мощность, циклический ресурс, себестоимость, а также отсутствие эффекта памяти [2, 3].

Несмотря на очевидное превосходство и многообещающие перспективы развития, литий-ионные аккумуляторы являются пожароопасными энергетическими системами [4].

Австралийская компания EV FireSafe регулярно публикует обзоры подтвержденных фактов возгораний аккумуляторов электромобилей во всем мире. По опубликованным данным, с 2010 г. по июнь 2024 г. было зарегистрировано 511 случаев возгораний пассажирских электромобилей, однако этот показатель не является исчерпывающим по причине того, что вся статистика строится на подсчете тех пожаров, которые были освещены в средствах массовой информации¹. Анализируя статистические данные, становится понятно, что причины возгорания электромобилей разнообразны. Пожар может быть спровоцирован как внешними факторами, так и внутренними процессами, протекающими в аккумуляторе.

Цель данной статьи заключается в систематизации причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей.

Аналитическая часть

1. Температурный режим эксплуатации.

Рассматривая эксплуатацию электромобилей с литий-ионными аккумуляторами на территории Российской Федерации, где на большей площади преобладает суровый климат с продолжительными зимами и коротким летом [5], необходимо учитывать их восприимчивость к изменению температур. Рекомендуемый диапазон рабочих температур литий-ионного аккумулятора обычно составляет от 15 °С до 40 °С [6], а эксплуатация аккумулятора при температуре ниже 0 °С или в интервале от +40 °С до +65 °С неблагоприятно влияет на его производительность [7].

При эксплуатации электромобилей в высокотемпературных условиях ускоряется протекание химических реакций внутри аккумулятора, сопровождаемых выделением избыточного тепла. Данный сценарий развития чаще встречается в странах с жарким климатом или во время экстремальных условий вождения (подъем или быстрое ускорение). С целью контроля температуры литий-ионного аккумулятора в электромобилях предусматриваются системы терморегулирования, но из-за существующих в них недостатках тепло не всегда способно эффективно рассеиваться [8]. При достижении верхней границы температурного диапазона начинаются реакции разложения с образованием легковоспламеняющихся газов, увеличивающих риск возгорания и взрыва.

В настоящее время многочисленные исследования направлены на изучение влияния низких температур на литий-ионные аккумуляторы, но такой значимый параметр, как однородность, является малоизученным в данной области [9]. Однородность считается определяющей характеристикой, важной не только для требуемой производительности, но и для безопасности литий-ионного аккумулятора. Поддержание высокой производительности

¹ Как устроена батарея электромобиля // Сетевое издание Авто.ру. 2023. 25 апр. URL: <https://auto.ru/mag/article/kak-ustroena-batareya-elektromobilya/> (дата обращения: 21.04.2025)

и предотвращение температурных угроз напрямую зависят от однородности как отдельных элементов аккумулятора, так и всего аккумуляторного блока [9].

Коллективом зарубежных ученых проводилось исследование по изучению влияния низкотемпературных условий на работу литий-ионного аккумулятора [9]. Было проведено две серии экспериментов, где в качестве образцов использовались цилиндрические аккумуляторы Samsung 18650 на экспериментальной установке (рис. 1). Экспериментальная установка представляет собой климатическую камеру, интервал контролируемых температур от 0 °С до 70 °С. Первая серия экспериментов проводилась при низких и нормальных температурах (0 °С и 20 °С), вторая серия – при 0 °С с использованием коммерческого изоляционного материала, изготовленного из резины, пластика и хлопка.

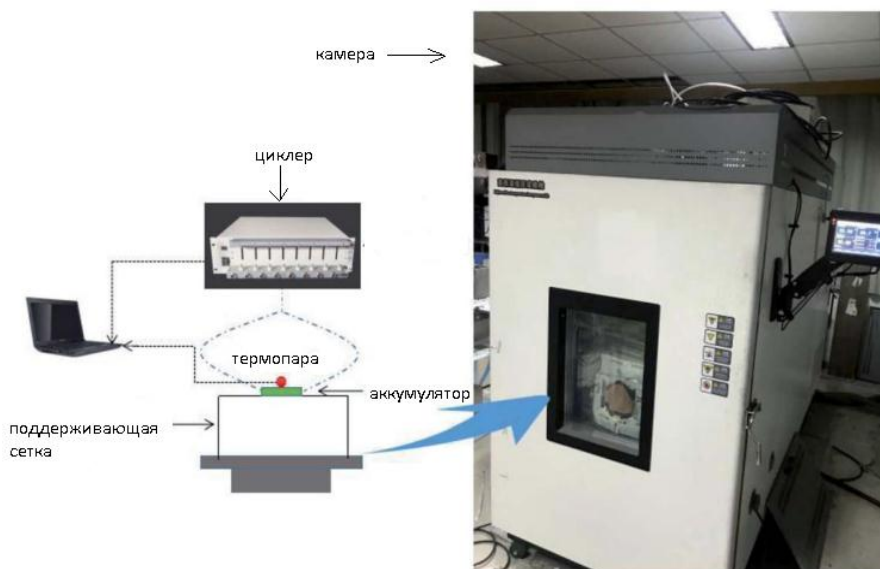


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования влияния температурных условий на работу литий-ионного аккумулятора [9]

В ходе исследования измерялись и анализировались ключевые показатели работы литий-ионной батареи: напряжение, емкость, температура поверхности. Учеными были получены следующие результаты: низкая температура увеличивает продолжительность цикла литий-ионного аккумулятора. При внешней низкой температуре регистрируется высокий рост внутренней температуры, связанный с повышенным внутренним сопротивлением. Также возрастает разница температур внутри одного аккумулятора при низкотемпературных условиях. При низкой температуре ускоряется процесс старения аккумулятора.

По результатам второй серии экспериментов было установлено, что изоляционный материал существенно влияет на нагрев аккумулятора, делая эффективнее цикл разрядки и замедляя скорость разрядки аккумулятора. При этом наиболее оптимальной оказалась толщина изоляционного слоя, равная 10 мм (в сравнении с 5 мм и 15 мм).

Сравнение показателей теплоотдачи батарей проводилось по следующим уравнениям:

$$Q_k = hA(T_b - T_v) \text{ (для батареи без изоляционного материала),}$$

$$Q_k = KA(T_b - T_v) \text{ (для батареи с изоляционным материалом),}$$

где h – коэффициент конвективной теплопередачи; K – теплопроводность изоляционного слоя; A – площадь поверхности батареи; T_b – температура батареи; T_v – температура воздуха.

Температурные условия играют важную роль в обеспечении эффективности, безопасности и долговечности литий-ионных аккумуляторов. Для оптимальной работы литий-ионных аккумуляторов необходимо следить за температурным режимом

и поддерживать его в пределах рекомендуемых значений. Эти меры способны не только повысить производительность аккумуляторов, но и увеличить срок их пожаробезопасной эксплуатации.

2. Механическое воздействие.

Чрезмерное механическое воздействие, реализуемое через столкновение, сжатие (или сдавливание) и прокол, также может привести к возгоранию литий-ионного аккумулятора [10, 11]. Столкновение чаще приводит к деформации и разрушению аккумуляторной батареи, сжатие влечет изменение формы литий-ионного аккумулятора под действием силы тяжести, прокол может привести к тому, что компоненты электромобиля проникнут сквозь защиту аккумулятора. Все эти последствия происходят, в основном, по причине дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [12]. Из-за внешних сил элементы аккумулятора претерпевают деформацию. Относительные смещения происходят в разных частях, что приводит к внутреннему короткому замыканию и последующему тепловому разгону.

Рассматривая вибрацию как результат механического воздействия, нельзя упускать тот факт, что она происходит даже при нормальных условиях эксплуатации транспортного средства. На данный момент опубликовано мало научных работ по оценке отрицательного влияния вибрации на электромобили. Однако результаты исследований команды ученых говорят о том, что элементы 18650 (цилиндрические литий-ионные элементы, которые с недавнего времени стали применяться компанией Tesla²) не прошли долгосрочные вибрационные испытания продолжительностью 186 дней [13]. По окончании испытаний на сепараторе были обнаружены следы подгорания, указывающие на внутренние короткие замыкания, вызванные данным механическим воздействием [13].

Неизбежные мелкие столкновения и крупные ДТП с участием электромобилей ведут к деформации литий-ионного аккумулятора, а целостность аккумуляторной системы имеет решающее значение для обеспечения его пожарной безопасности. В настоящее время перспективным направлением для оценки безопасности аккумулятора является создание реалистичных протоколов тестирования, рассматривающих в совокупности влияние температуры, вибрации и других механических воздействий.

3. Электрическое воздействие.

Литий-ионный аккумулятор электромобиля может подвергаться электрическому воздействию в виде внешнего короткого замыкания, внутреннего короткого замыкания, перезаряда и переразряда.

Внутреннее короткое замыкание сопровождается выделением тепла в случае непосредственного контакта катода и анода внутри ячейки. Оно вызывается внутренними дефектами, перезарядом, переразрядом, термическими и механическими воздействиями [14, 15].

Внешнее короткое замыкание чаще происходит по причине столкновения, попадания воды в аккумулятор или отказа соединений [16]. Когда происходит внешнее короткое замыкание, накопленная энергия аккумулятора высвобождается в виде тепловой энергии за короткий промежуток времени, вызывая испарение и утечку электролита из-за деформации корпуса ячейки [16].

Перезаряд происходит, когда зарядный ток принудительно проходит после того, как аккумулятор достиг своего верхнего напряжения или пределов состояния заряда из-за неисправности зарядного устройства или неточного определения состояний аккумулятора в системе его управления [16, 17].

Сильное разбухание батареи обычно можно наблюдать во время процесса перезаряда по причине накопления газа от побочных реакций [18]. Разрыв батареи происходит, когда внутреннее давление превышает свой предел, приводя к деформации структуры батареи и возможному внутреннему короткому замыканию. Активные химические материалы катода и анода вступают в контакт с воздухом после разрыва корпуса, запуская экзотермические реакции и возгорание горючего газа [18–20].

² Как устроена батарея электромобиля // Сетевое издание Авто.ру. 25 апр. 2023. URL: <https://auto.ru/mag/article/kak-ustroena-batareya-elektromobilya/> (дата обращения: 21.04.2025)

По данной причине в 2021 г. компания Hyundai опубликовала новость об отзыве более 82 тыс. электрокроссоверов Кона из-за проблем с аккумуляторами. 15 зарегистрированных случаев возгораний стали причиной принятия такого решения, они произошли в Южной Корее (11 случаев), Канаде (2 случая), Финляндии (1 случай), Австрии (1 случай). Эксперты компании советовали владельцам данных электромобилей не заряжать аккумулятор свыше 90 %, пока не будет произведена его замена, для избегания перегрева и возгорания электромобиля³.

Переразряд аккумулятора легче происходит при низких температурах [21]. Он приводит к серьезному снижению емкости, ухудшает циклические характеристики при последующих нормальных условиях эксплуатации. Также непрерывные циклы чрезмерной разрядки аккумулятора ускоряют его деградацию, которая проявляется в нарастающем снижении емкости и увеличении внутреннего сопротивления [21].

Литий-ионные аккумуляторы, несмотря на широкое распространение, очень чувствительны к непредусмотренным электрическим воздействиям. Они могут вызвать перегрев, вздутие, повреждение литий-ионного аккумулятора, сократить срок службы, а также привести к возгоранию, взрыву и выделению токсичных газов. Крайне важно соблюдать безопасные уровни разрядки и зарядки, а также использовать зарядные устройства, предназначенные именно для определенной модели аккумулятора и соответствующие его характеристикам.

4. Контакт литий-ионного аккумулятора электромобиля с соленой водой.

При возникновении чрезвычайных ситуаций, таких как ураганы или наводнения, электромобили могут быть погружены в воду (рис. 2). После нескольких часов или дней погружения в морскую воду производительность аккумулятора электромобиля может быть изменена, а также возможен запуск теплового разгона [22]. Каждый такой случай требует экспертного осмотра с целью выявления опасных повреждений аккумулятора.



Рис. 2. Затопление электромобилей во время урагана «Йен»
(<https://ctif.org/ru/news/elektromobili-zagorayutsya-posle-pogruzheniya-v-solenuyu-vodu-vo-vremya-uragana-yen>)

Коллективом ученых во главе с Ч. Тао было проведено экспериментальное исследование поведения литий-ионных аккумуляторов при горении после разной продолжительности погружения в соленую воду и с разной степенью заряда [22]. На основе опубликованных данных можно констатировать следующее: предохранительный клапан

³ Hyundai Motor отзывает 82 тысячи электрокаров из-за риска возгорания // Рамблер – главные новости России и мира. 24 февр. 2021. URL: <https://auto.rambler.ru/navigator/45883589-hyundai-motor-otzyvaet-82-tysyachi-elektrokarov-iz-za-riska-vozgoraniya/> (дата обращения 21.04.2025)

может повреждаться соленой водой после длительного нахождения в водной среде. В пределах определенного диапазона времени погружения такой показатель, как время зажигания, уменьшается с увеличением времени погружения. За пределами временного диапазона время зажигания медленно увеличивается с увеличением времени погружения. Время сгорания тоже сначала увеличивается с увеличением времени погружения, а затем остается постоянным, если время погружения больше 3 ч. Аналогично меняется параметр скорости тепловыделения.

Многие ученые работают над поиском эффективных способов герметизации аккумуляторных блоков электромобилей, также рассматривается возможность применения антикоррозионных материалов для клемм аккумуляторов и нанесение водонепроницаемых покрытий на открытые клеммы внутри блока.

5. Старение аккумуляторной системы.

Достаточно высокий процент неисправностей литий-ионных аккумуляторов случается и в тот период, когда отсутствуют очевидные чрезмерные воздействия. Причиной таких аварий в основном является старение аккумуляторной системы в совокупности с возросшей несогласованностью отдельных ячеек [16].

Процесс старения литий-ионного аккумулятора подразумевает старение ячеек и модулей [23]. Сам механизм старения включает утолщение SEI (Solid Electrolyte Interphase, межфазный слой твердого электролита), рост литиевых дендритов и изменение внутренней структуры электрода.

Прогрессирующее утолщение SEI происходит при высоких температурах, зарядке или разрядке аккумулятора при высоком токе, сопровождающихся наличием отложений побочных продуктов реакции. Такое утолщение SEI приводит к снижению емкости батареи, а, следовательно, к снижению срока эксплуатации аккумулятора.

Литиевые дендриты – это жесткие древовидные структуры, растущие по причине того, что ионы лития не могут восстановиться в слоистую структуру анода, осаждаясь на поверхности. Ускоряет рост дендритов быстрая зарядка при высоком SOC (State of Charge, состояние заряда, указывающее на текущий уровень заряда литий-ионного аккумулятора) или низкой температуре [16, 23, 24].

Разрушение частиц – процесс, характерный для активных материалов с высокой удельной емкостью. В частности, при низких температурах (ниже 0 °С) графит, используемый в качестве материала для литий-ионных анодов, становится хрупким, склонным к разрушению. Частицы графита сильнее разрушаются в аккумуляторах с высоким содержанием кремния при глубоком разряде и высоких токах. Производственные процессы могут привести к деформации и разрушению частиц графита еще до того, как начнется эксплуатация аккумулятора (в процессе каландрирования) [25].

В процессе производства всегда есть разница между ячейками аккумулятора, это значит, что такие ячейки обладают разными электрохимическими показателями [26]. К примеру, из-за различий во внутреннем сопротивлении через каждую ячейку будут протекать разные токи, что может привести к разным температурам. Такие несоответствия приводят к старению батареи, снижению емкости, увеличению внутреннего сопротивления, а также к перезарядкам аккумулятора [23].

6. Производственные дефекты.

Производственные дефекты также могут спровоцировать возгорание литий-ионного аккумулятора. Они могут проявляться в виде загрязняющих веществ в ячейке батареи, в низком контроле качества, неправильном выравнивании компонентов (разбалансировке) и нарушении изоляции.

По причине производственных дефектов по всему миру периодически осуществляется отзыв электромобилей для устранения неисправностей. К примеру, в 2021 г. третий раз компания General Motors отзывала 73 тыс. электромобилей Chevrolet Bolt по причине дефекта в аккумуляторе⁴. По мнению экспертов, дефект обусловлен одновременно двумя

⁴ General Motors отзывает более 73 тыс. электромобилей Chevrolet Bolt из-за риска возгорания. URL: <https://tass.ru/ekonomika/12184925> (дата обращения: 21.04.2025)

причинами: оторванным анодным контактом и неправильной формой сепаратора, нуждающейся в усовершенствовании.

В 2024 г. проводился отзыв электрических Mini Cooper, выпущенных в период с 2020 по 2022 г.⁵ В отзыве производитель указывал на производственный дефект герметизации корпуса высоковольтной батареи, который пропускал влагу в аккумуляторный отсек. Дефект мог стать причиной отключения аккумулятора во время движения, что привело бы к потере движущей силы или возгоранию в аккумуляторе.

В начале 2025 г. была опубликована новость об отзыве 33 тыс. электромобилей Mercedes EQA и EQB из-за проблем с аккумулятором, которые могут спровоцировать перегрев и привести к возгоранию транспортного средства⁶. Экспертами расследуются случаи возгораний, связанные с данными моделями, но уже сообщается, что перегрев может возникать в сочетании внешнего воздействия с производственными дефектами.

7. Систематизация причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей.

Литий-ионный аккумулятор является сложным производственным изделием, в котором могут возникать неисправности как на стадии проектирования и сборки, так и в процессе использования, приводящие к пожарам и взрывам.

Графически комплекс причин, провоцирующих возгорание литий-ионного аккумулятора, представлен на рис. 3.

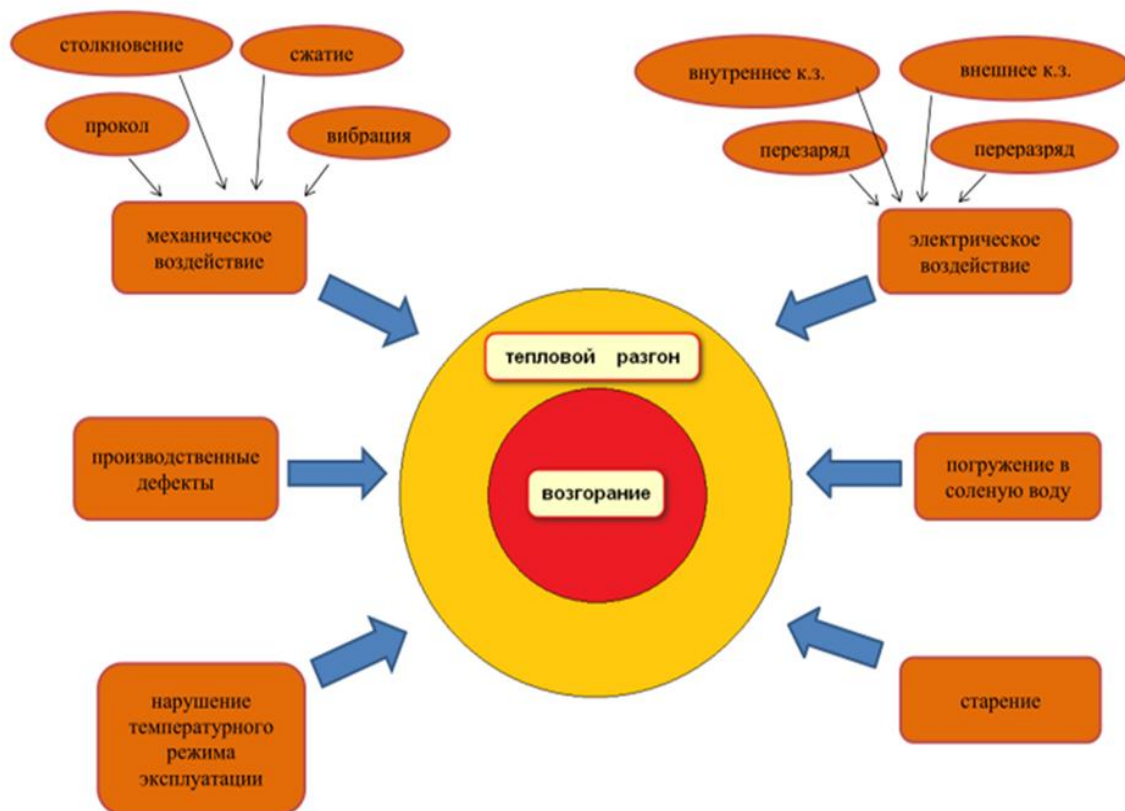


Рис. 3. Типологическая схема причин, инициирующих возгорание литий-ионного аккумулятора электромобиля

⁵ Малышев К. 140 тысяч электрических Mini отзывали из-за проблем с аккумуляторами. URL: <https://auto.ru/mag/article/140-tysyach-elektricheskikh-mini-otzyvayut-iz-za-problem-s-akkumulyatorom/> (дата обращения: 21.04.2025)

⁶ Ефименков Н. Mercedes EQA и EQB могут загореться: владельцам рекомендуют не заряжать батареи выше 80 %. URL: <https://www.32cars.ru/posts/id-8708-mercedes-eqa-i-eqb-mogut-zagoretsja-vladeltsam-rekomendujut-ne-zarjazhat-batarei-vyshe-80> (дата обращения: 21.04.2025).

Важно отметить и то, что возгорание может быть результатом сочетания нескольких причин, в связи с этим необходимо проводить анализ и детальное изучение всех факторов, спровоцировавших горение литий-ионного аккумулятора.

Заключение

В данной статье проанализированы основные причины, приводящие к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей: механическое и электрическое воздействие, нарушение температурного режима эксплуатации, производственные дефекты, погружение аккумулятора в соленую воду, старение, а также они представлены в виде типологической схемы.

В дальнейшем, для точной оценки риска возгорания литий-ионного аккумулятора электромобиля необходимо провести работу по ранжированию вышеперечисленных причин и оценить их влияние на развитие процесса горения.

В заключение можно отметить, что только комплексный подход, учитывающий все аспекты: от дизайна и сборки аккумулятора до условий эксплуатации и последовательности электрохимических процессов, позволит создать высокоэффективные и долговечные литий-ионные аккумуляторы, способные удовлетворить растущий мировой спрос.

Список источников

1. Атаев М.Г., Мухамметназаров А.С., Эсенов М.П. Переход к возобновляемым источникам энергии // CETERIS PARIBUS. 2024. № 10. С. 26–28.
2. Кулова Т.Л., Скундин А.М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России // Электрохимическая энергетика. 2023. № 3. С. 111–120. DOI: 10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120.
3. State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy: a review / Yu. Liu [et al.] // Protection and Control of Modern Power Systems. 2023. Т. 8. № 3. С. 1–17. DOI: 10.1186/s41601-023-00314-w.
4. Орлов О.И., Комельков В.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.
5. Марчук Н.А., Куленцан А.Л. Анализ особенностей состояния климата в России // Economics. 2020. № 4 (47). С. 11–16.
6. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles / X. Zhang [et al.] // Energy. 2022. Vol. 238. P. 121652. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121652.
7. Karimi G., Li X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles // International Journal of Energy Research. 2013. Vol. 37. № 1. P. 13–24. DOI: 10.1002/er.1956.
8. Experimental investigation of the flame retardant and form-stable composite phase change materials for a power battery thermal management system / J. Zhang [et al.] // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 480. P. 229116. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229116.
9. Influence of low temperature conditions on lithium-ion batteries and the application of an insulation material / D. Ouyang [et al.] // RSC advances. 2019. Vol. 9. № 16. P. 9053–9066. DOI: 10.1039/C9RA00490D.
10. Review of Lithium-Ion Battery Internal Changes Due to Mechanical Loading / M. Cortada-Torbellino [et al.] // Batteries. 2024. Vol. 10. № 7. P. 258. DOI: 10.3390/batteries10070258.
11. Questions and answers relating to lithium-ion battery safety issues / Huang W. [et al.] // Cell Reports Physical Science. 2021. Vol. 2. № 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.xcrp.2020.100285.
12. Канонин Ю.Н., Лыщик А.В. Пожарная опасность электромобилей // БРНИ. 2023. № 1. С. 38–51. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51.
13. Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells / M.J. Brand [et al.] // Journal of Power Sources. 2015. Vol. 288. P. 62–69. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.107.

14. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle / X. Han [et al.] // *ETransportation*. 2019. Vol. 1. P. 100005. DOI: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
15. Internal short circuit mechanisms, experimental approaches and detection methods of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review / G. Zhang [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 141. P. 110790. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110790.
16. Towards a safer lithium-ion batteries: A critical review on cause, characteristics, warning and disposal strategy for thermal runaway / Yu. Yang [et al.] // *Advances in Applied Energy*. 2023. Vol. 11. P. 100146. DOI: 10.1016/j.adapen.2023.100146.
17. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions / D. Ren [et al.] // *Applied Energy*. 2019. Vol. 250. P. 323–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.015.
18. An experimental study on the mechanical characteristics of Li-ion battery during overcharge-induced thermal runaway / P. Xu [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45. № 14. P. 19985–20000. DOI: 10.1002/er.7072.
19. Kalaikkanal K., Gobinath N., Mohan R. Influence of swelling on the safety aspects of electric vehicle batteries–Short Review // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2023. Vol. 1161. № 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/1161/1/012010.
20. Троценко А.А. Некоторые аспекты химизма самовозгорания и самовоспламенения // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016. № 1 (7). С. 284–288.
21. Influence of over-discharge on the lifetime and performance of LiFePO₄/graphite batteries / Yu. Zheng [et al.] // *RSC advances*. 2016. Vol. 6. № 36. P. 30474–30483. DOI: 10.1039/C6RA01677D.
22. An experimental investigation on the burning behaviors of lithium ion batteries after different immersion times / C. Tao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2020. T. 242. P. 118539. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118539.
23. Modeling degradation of lithium-ion batteries considering cell-to-cell variations / D. Galatro [et al.] // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 44. P. 103478. DOI: 10.1016/j.est.2021.103478.
24. Скундин А.М., Кулова Т.Л., Григорьева О.Ю. Литий-ионные аккумуляторы: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2022. 100 с.
25. Lithium ion battery degradation: what you need to know / J.S. Edge [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021. Vol. 23. № 14. P. 8200–8221. DOI: 10.1039/D1CP00359C.
26. Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules / B. Kenney [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 213. P. 391–401. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.065.

References

1. Ataev M.G., Muhammetnazarov A.S., Esenov M.P. Perekhod k vozobnovlyаемым istochnikam energii // *CETERIS PARIBUS*. 2024. № 10. S. 26–28.
2. Kulova T.L., Skundin A.M. Problemy razvitiya litij-ionnyh akkumulyatorov v mire i Rossii // *Elektrohimicheskaya energetika*. 2023. № 3. S. 111–120. DOI: 10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120.
3. State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy: a review / Yu. Liu [et al.] // *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2023. T. 8. № 3. S. 1–17. DOI: 10.1186/s41601-023-00314-w.
4. Orlov O.I., Komel'kov V.A. Pozharnaya opasnost' litij-ionnyh akkumulyatorov // *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2023. № 4 (49). S. 177–189.
5. Marchuk N.A., Kulencan A.L. Analiz osobennostej sostoyaniya klimata v Rossii // *Economics*. 2020. № 4 (47). S. 11–16.

6. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles / X. Zhang [et al.] // *Energy*. 2022. Vol. 238. P. 121652. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121652.
7. Karimi G., Li X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles // *International Journal of Energy Research*. 2013. Vol. 37. № 1. P. 13–24. DOI: 10.1002/er.1956.
8. Experimental investigation of the flame retardant and form-stable composite phase change materials for a power battery thermal management system / J. Zhang [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 480. P. 229116. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229116.
9. Influence of low temperature conditions on lithium-ion batteries and the application of an insulation material / D. Ouyang [et al.] // *RSC advances*. 2019. Vol. 9. № 16. P. 9053–9066. DOI: 10.1039/C9RA00490D.
10. Review of Lithium-Ion Battery Internal Changes Due to Mechanical Loading / M. Cortada-Torbellino [et al.] // *Batteries*. 2024. Vol. 10. № 7. P. 258. DOI: 10.3390/batteries10070258.
11. Questions and answers relating to lithium-ion battery safety issues / W. Huang [et al.] // *Cell Reports Physical Science*. 2021. Vol. 2. № 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.xcrp.2020.100285.
12. Kanonin Yu.N., Lyshchik A.V. Pozharnaya opasnost' elektromobilej // *BRNI*. 2023. № 1. P. 38–51. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51.
13. Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells / M.J. Brand [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2015. Vol. 288. P. 62–69. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.107.
14. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle / X. Han [et al.] // *ETransportation*. 2019. Vol. 1. P. 100005. DOI: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
15. Internal short circuit mechanisms, experimental approaches and detection methods of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review / G. Zhang [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 141. P. 110790. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110790.
16. Towards a safer lithium-ion batteries: A critical review on cause, characteristics, warning and disposal strategy for thermal runaway / Yu. Yang [et al.] // *Advances in Applied Energy*. 2023. Vol. 11. P. 100146. DOI: 10.1016/j.adapen.2023.100146.
17. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions / D. Ren [et al.] // *Applied Energy*. 2019. Vol. 250. P. 323–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.015.
18. An experimental study on the mechanical characteristics of Li-ion battery during overcharge-induced thermal runaway / P. Xu [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45. № 14. P. 19985–20000. DOI: 10.1002/er.7072.
19. Kalaikkanal K., Gobinath N., Mohan R. Influence of swelling on the safety aspects of electric vehicle batteries—Short Review // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2023. Vol. 1161. № 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/1161/1/012010.
20. Trocenko A.A. Nekotorye aspekty himizma samovozgoraniya i samovosplameneniya // *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij*. 2016. № 1 (7). P. 284–288.
21. Influence of over-discharge on the lifetime and performance of LiFePO₄/graphite batteries / Yu. Zheng [et al.] // *RSC advances*. 2016. Vol. 6. № 36. P. 30474–30483. DOI: 10.1039/C6RA01677D.
22. An experimental investigation on the burning behaviors of lithium ion batteries after different immersion times / C. Tao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 242. P. 118539. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118539.
23. Modeling degradation of lithium-ion batteries considering cell-to-cell variations / D. Galatro [et al.] // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 44. P. 103478. DOI: 10.1016/j.est.2021.103478.
24. Skundin A.M., Kulova T.L., Grigor'eva O.Yu. Litij-ionnye akkumulyatory: ucheb. posobie. M.: Izd-vo MEI, 2022. 100 s.
25. Lithium ion battery degradation: what you need to know / J.S. Edge [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021. Vol. 23. № 14. P. 8200–8221. DOI: 10.1039/D1CP00359C.

26. Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules / B. Kenney [et al.] // Journal of Power Sources. 2012. Vol. 213. P. 391–401. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.065.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 16.06.2025; одобрена после рецензирования: 08.09.2025; принята к публикации: 22.09.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 16.06.2025; approved after review: 08.09.2025; accepted for publication: 22.09.2025

Информация об авторах:

Астахина Юлия Анатольевна, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. 149), e-mail: yulya_astahina@mail.ru

Королева Людмила Анатольевна, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

Information about the authors:

Astakhina Yulia A., adjunct at the faculty of higher education training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: yulya_astahina@mail.ru

Koroleva Lyudmila A., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive engineering of the Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772