

СТУПЕНИ ЗАЩИТЫ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Корнилов Д. Ю.¹, Морозов А. Н.², Слепов С. Н.³, Абрамкин Р. В.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-3-70-79

Ключевые слова: малогабаритные источники тока, пожаробезопасность, аварийные ситуации, тепловой разгон, возгорание, взрыв, сепаратор, токоотводы, катодный материал, процесс горения.

Метод исследования: анализа и синтеза, позволяющий комплексно оценить перспективы внедрения новых способов защиты литий-ионных аккумуляторов.

Цель исследования: изучение причин возгорания и взрыва литий-ионных аккумуляторов, а также новых способов их многоуровневой защиты, позволяющих обеспечить безопасную эксплуатацию.

Результат: в ходе исследования были изучены процессы, происходящие в литий-ионном аккумуляторе в процессе заряда и разряда. Проведен анализ причин пожаров и взрывов литий-ионных аккумуляторов на примере продукции народно-хозяйственного назначения. Установлено, что основной причиной является внутреннее короткое замыкание, возникающее вследствие разрыва сепаратора из-за роста дендритов при перезаряде. Определена важность и необходимость исследования вопроса безопасности аккумуляторов. Описана суть процесса возникновения теплового разгона, приводящего к возгоранию литий-ионного аккумулятора. Выработаны предложения, направленные на повышение безопасности эксплуатации литий-ионных аккумуляторов, заключающиеся в совершенствовании сепараторов, замене алюминиевой и медной фольги, применяемой в качестве токоотводов литий-ионных аккумуляторов на металлизированную медь или алюминием лавсановую пленку, а также использовании микрокапсул из низкоплавкого композитного полимера, внутри которых заключен огнетушащий агент.

Практическая ценность: комплексное использование предложенных способов защиты литий-ионных аккумуляторов позволяет существенно повысить безопасность их эксплуатации – минимизировать риск взрыва или пожара в случае возникновения теплового разгона.

Вклад авторов: Корнилов Д.Ю. – разработки в области увеличения безопасности литий-ионных аккумуляторов; Морозов А.Н.; Слепов С.Н. – причины возникновения нестабильностей и теплового разгона литий-ионного аккумулятора; Абрамкин Р.В. – состав и устройство литий-ионного аккумулятора, аварии и их последствия.

Введение

С каждым днем применение литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) становится все более повсеместным, от малогабаритных источников тока для портативных микроэлектронных устройств, до тяговых батарей для электротранспорта. Широкая область применения ЛИА определяется высокой энергоемкостью, длительным сроком службы, высокой надежностью и безопасностью при соблюдении требований эксплуатации. Однако, случаи, связанные с пожарами и взрывами ЛИА, часто происходят во всем мире, особенно с мобильными телефонами, ноутбуками, электромотоциклами и самолетами. Некоторые из них пред-

ставляли серьезную угрозу для жизни и здоровья людей и привели к многочисленным отзывам продукции производителями. В данной статье приводится описание некоторых аварийных ситуаций, а также современные достижения в направлении их предотвращения и защиты.

Состав и устройство литий-ионного аккумулятора

Выпускаемый современной промышленностью литий-ионный аккумулятор представляет собой герметично упакованные разнополярные электроды, разделенные между собой диэлектрическим сепаратором, пропитанным раствором электролита (рисунок 1).

¹Корнилов Денис Юрьевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора АО «АВЭКС», научный руководитель по направлению химических источников тока, г. Москва. E-mail: d.kornilov@avecs.ru

²Морозов Алексей Николаевич, начальник отдела ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: alexu.morozow@yandex.ru

³Слепов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: slepov69@mail.ru

⁴Абрамкин Роман Викторович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: avg62rus@rambler.ru

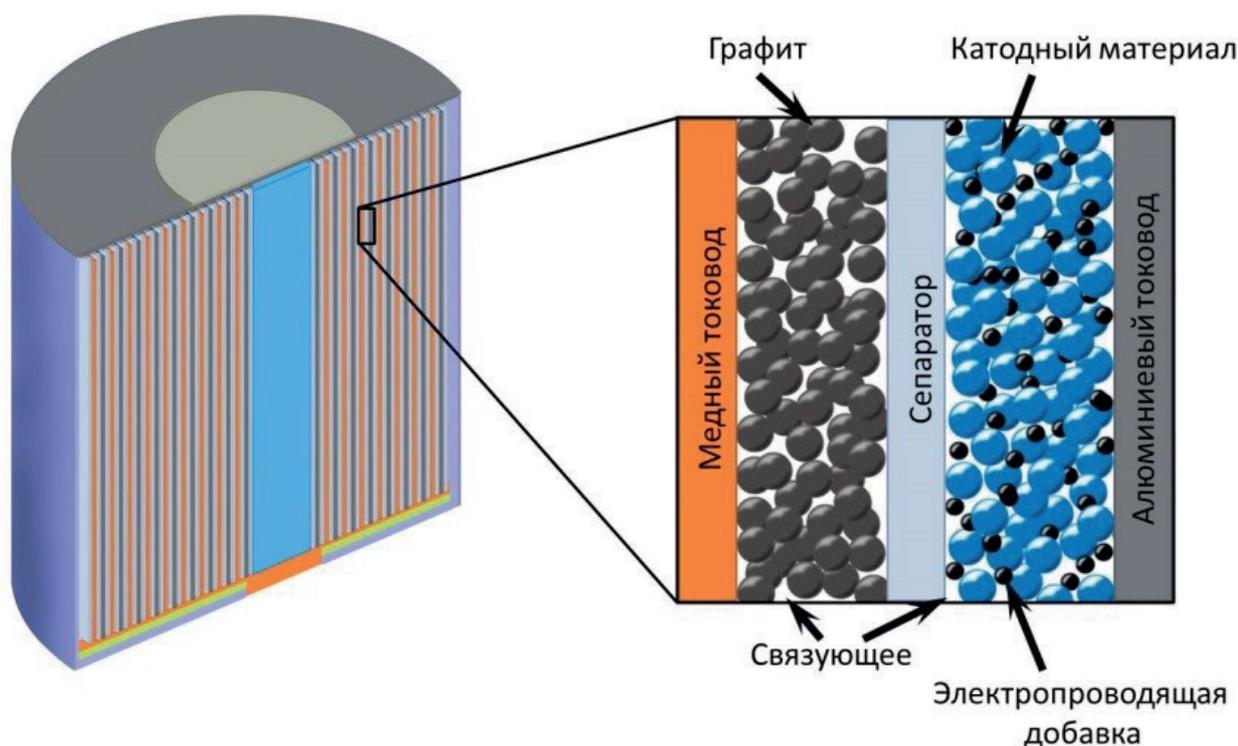


Рис.1. Конструкция литий-ионного аккумулятора

Положительный электрод – катод, представляет собой алюминиевую фольгу, выполняющую роль токоотвода, покрытую слоем электрод-активного материала, содержащего связующее, электропроводные добавки и катодный материал – литированные оксиды переходных металлов, которые можно классифицировать по типу кристаллической структуры:

1. Слоистая структура: LiCoO_2 , LiNiO_2 , $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2$, $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, $\text{LiAl}_{0,05}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,8}\text{O}_2$;
2. Структура шпинели: LiMn_2O_4 , LiV_2O_4 ;
3. Структура оливина: LiFePO_4 , LiMnPO_4 , LiCoPO_4 .

Применение таких металлов, как Co, Ni, Mn, Fe и V вызвано их способностью присоединять и отдавать электроны в окислительно-восстановительных реакциях.

Отрицательный электрод – анод, представляет собой медную фольгу выполняющую роль токоотвода, покрытую слоем электрод-активного материала, содержащего связующее, электропроводные добавки и анодный материал – графит. Кроме графита, в выпускаемых промышленностью ЛИА может применяться Li_2TiO_3 . Также в некоторых ЛИА могут содержаться кремнийсодержащие добавки, способные повысить

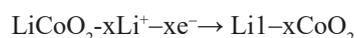
удельную энергоёмкость электрод-активного материала.

Электролит, представляет собой растворенную соль лития (LiPF_6 , LiBF_4 , LiClO_4 , LiAsF_6) в смеси апротонных диполярных растворителей.

Сепаратор, представляет собой достаточно прочную, пористую (40–50%) диэлектрическую пленку толщиной от 4 до 25 мкм в основном изготовленную из полиэтилена, полипропилена, или их сополимеров, способную выдерживать нагрев до 90°C в течение часа.

При внешней простоте устройства литий-ионного аккумулятора процесс его работы достаточно сложен. Итак, подключение ЛИА к блоку питания во время заряда (рисунок 2), вызывает смещение электрохимического потенциала между электродами, в результате чего происходит окисление катодного материала с высвобождением электронов, которые в свою очередь переходят по электрической цепи к аноду. В результате окисления и потери электрона, содержащийся в катодном материале литий переходит из атомарного состояния в ионное, который в свою очередь за счет диффузии и градиента потенциала в слое электролита перемещается к отрицательному электроду, где происходит внедрение (интеркаляция) иона лития в структуру графита вследствие перехода свободного электрона от графита

к литию. Уравнение реакции процесса происходящего с катодным материалом при заряде на примере LiCoO_2 может иметь следующий вид:



Уравнение реакции процесса происходящего с анодным материалом при заряде на примере графита может иметь следующий вид:

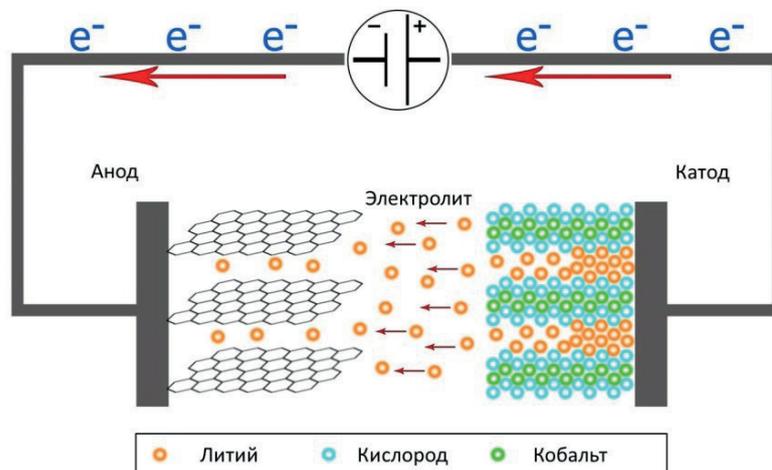
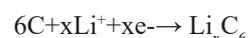


Рис.2. Процесс заряда литий-ионного аккумулятора

При разряде, а именно при подключении сопротивления (нагрузки) к электродам аккумулятора (рисунок 3), происходит процесс обратный заряду. За счет стремления электрохимической системы ЛИА к выравниванию разности потенциалов, от анода высвобождаются электроны формируя электрический ток во внешней цепи перемещаясь через сопротивление (нагрузку) к положительно заряженному электроду, при потере электрона происходит деинтеркаляция лития из структуры графита, при этом образовавшиеся ионы лития движутся через электролит к катоду, где происходит восстановление катодного материала за счет перехода электро-

на из внешней цепи и соответственно внедрение лития из электролита в его кристаллическую решетку.

В результате система приобретает нейтральное состояние. Уравнение реакции процесса происходящего с катодным материалом на примере LiCoO_2 при разряде может иметь следующий вид:



Уравнение реакции процесса происходящего с анодным материалом при разряде на примере графита может иметь следующий вид:

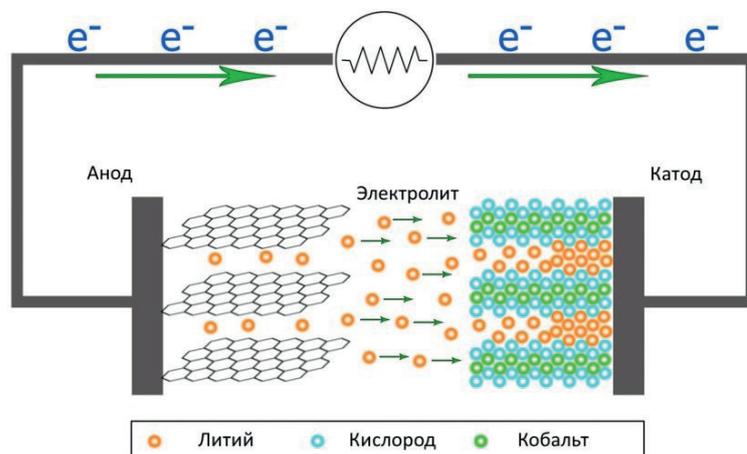


Рис.3. Процесс разряда литий-ионного аккумулятора

Аварии и последствия

С момента коммерциализации ЛИА в 1991 году компанией Sony, их энергоемкость постоянно увеличивалась. Современные литий-ионные аккумуляторы могут достигать 250–300 Вт·ч/кг. Однако при неправильной эксплуатации ЛИА, их химическая энергия может высвободиться в виде пожара или взрыва. Несчастные случаи, связанные с пожарами и взрывами ЛИА, часто происходят во всем мире, особенно с мобильными телефонами, ноутбуками, электромобилями и транспортными средствами. Некоторые из них представляли серьезную угрозу для жизни и здоровья людей и привели к многочисленным отзывам продукции производителями.

Например, 16 января 2013 года эксплуатация всех самолетов Boeing 787 Dreamliner была приостановлена на неопределенный срок из-за неисправности литий-ионной аккумуляторной батареи, обеспечивающей резервное питание на борту (рисунок 4) [1]. События предшествующие остановке эксплуатации самолетов произошли с разницей в 10 дней в январе 2013 года. Так 7 января 2013 года в аэропорту Логана (США) произошло возгорание аккумуляторной батареи в припаркованном самолете. Механик заметил сбой в подаче электроэнергии во вспомогательной силовой установке, за которым последовало пламя и дым, исходящие из клемм вспомогательного аккумуляторной батареи. Первые усилия по реагированию были затруднены из-за оплавленной быстросъемной ручки, но возгорание батареи удалось потушить. 16 янва-

ря 2013 года во время полета в самолете Boeing 787 Dreamliner, принадлежащем авиакомпании All Nippon Airways, в кабине пилотов сработал сигнал тревоги от батареи, пилотам пришлось совершить аварийную посадку в аэропорту Такамацу в Кагаве (Япония). После инцидентов с аккумуляторами, 18 января 2013 года Министерством транспорта Японии была представлена версия о том, что батарея работала при напряжении, превышающем рекомендации производителя. Однако в системе управления батареей была установлена защита на предельные значения рабочего напряжения, кроме того, была реализована пассивная балансировка аккумуляторов для предотвращения перезарядки путем выравнивания напряжения между аккумуляторами. 21 января 2013 года было начато совместное расследование в отношении производителя аккумуляторов GS Yuasa, однако проблем с контролем качества или производством обнаружено не было. По результатам рентгенографического анализа (рисунок 5) было установлено, что в одном из аккумуляторов произошел тепловой разгон (процесс, инициирование которого происходит при нагреве ЛИА в результате перезаряда, внешнего или внутреннего короткого замыкания, приводящего к протеканию экзотермических химических реакций с образованием горючих газообразных смесей с последующим возгоранием), который начался с внутреннего короткого замыкания. Однако причины, предшествующие короткому замыканию установлены не были.

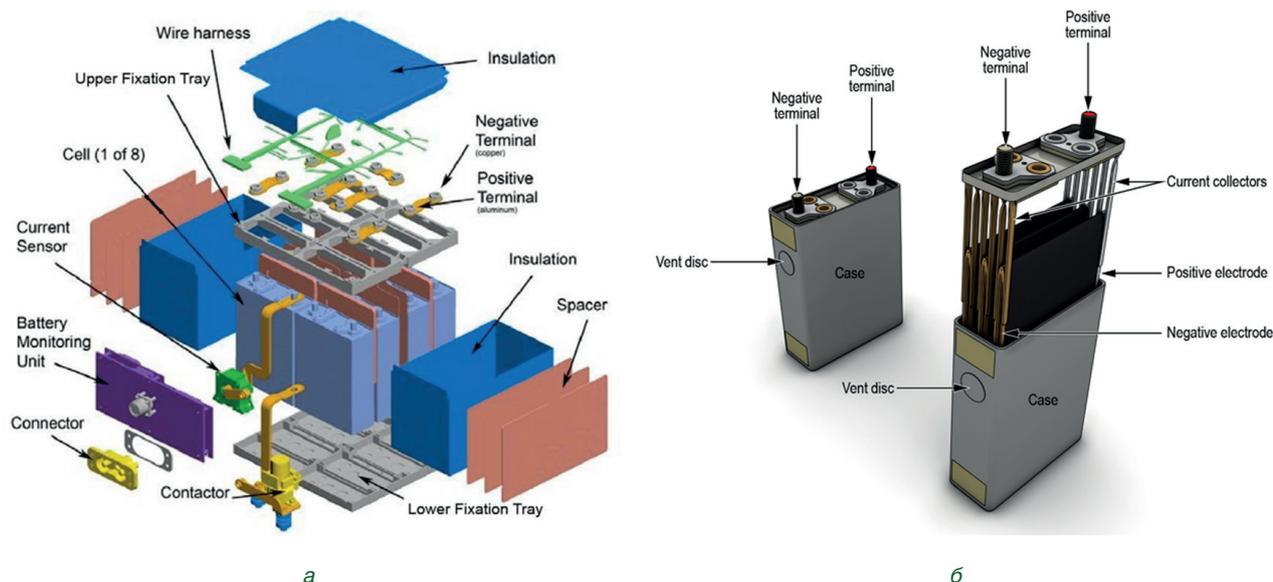


Рис.4. а) конструкция литий-ионной аккумуляторной батареи Boeing 787 Dreamliner; б) конструкция одного аккумулятора из состава аккумулятора батареи Boeing 787 Dreamliner

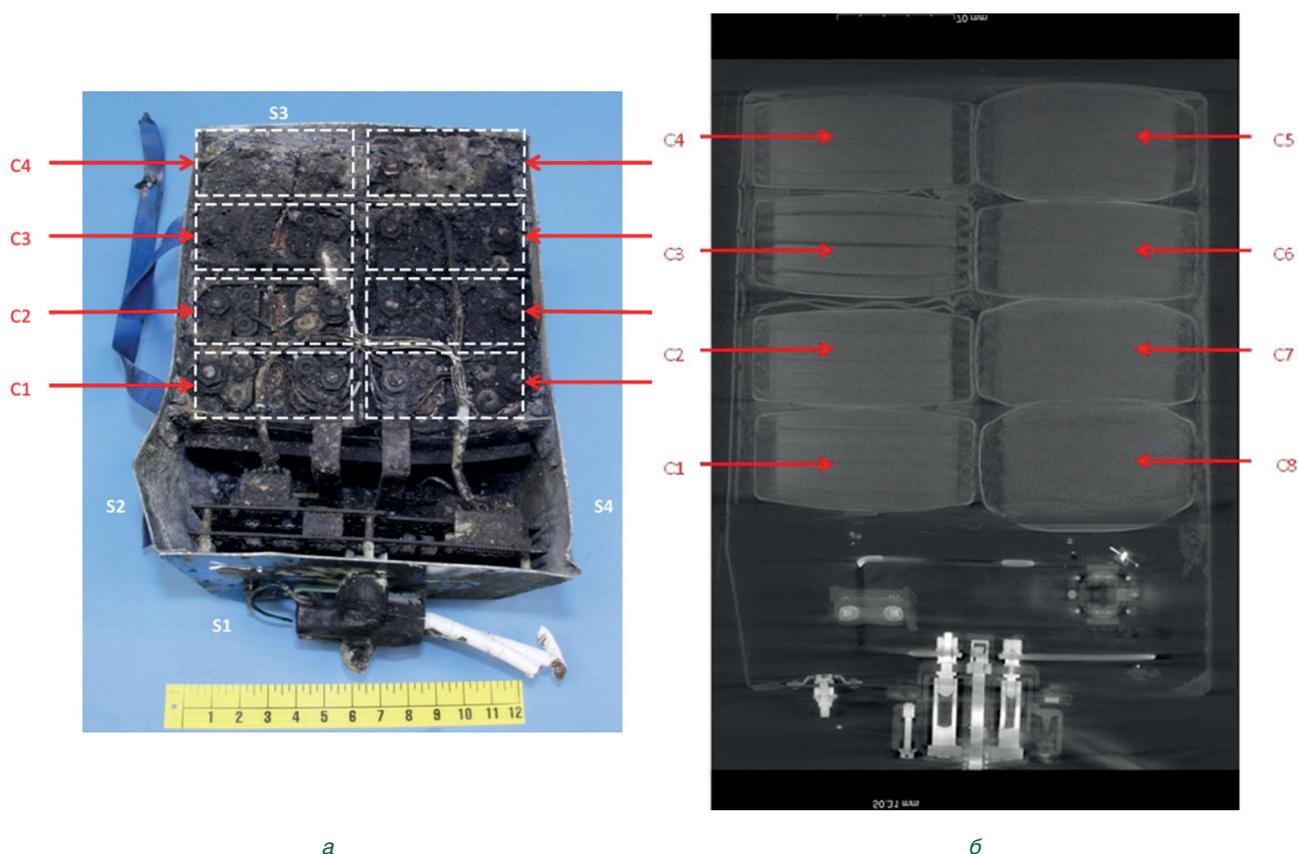


Рис. 5. а) Внешний вид литий-ионной аккумуляторной батареи Boeing 787 Dreamliner после аварии; б) Рентгенографическое изображение литий-ионной аккумуляторной батареи Boeing 787 Dreamliner после аварии

Следующий пример, связан с ведущей компанией по производству электроники в мире – Samsung Electronics. Так 2 сентября Samsung приостановила продажи Galaxy

Note 7 после того, как было обнаружено, что производственный дефект в аккумуляторах телефонов привел к пожарам и взрывам. Необходимо отметить, что на тот момент применяемый в Galaxy Note 7 литий-ионный аккумулятор обладал рекордными энергоемкостными характеристиками 250 Вт·ч/кг и 700 Вт·ч/л. После официального отзыва 12 сентября 2016 года версия Galaxy Note 7 была заменена на телефоны с использованием аккумуляторов от китайской компании Contemporary Ampere Technology (CATL), которая также поставляла аккумуляторы для смартфонов iPhone. Однако после того, как появились сообщения об инцидентах, в которых телефоны с замененными аккумуляторами также загорались, Samsung отозвала Galaxy Note 7 по всему миру 10 октября 2016 года, а днем позже окончательно прекратила производство этих устройств.

По результатам официального расследования Samsung с привлечением трех независимых отраслевых организаций, в котором приняло участие 700 исследователей и инженеров, провело анализ 200000 устройств Galaxy Note 7 и 30000 аккумуляторов, было выявлено несколько ключевых моментов, с которыми были связаны возгорания телефонов [2]:

1. Внутреннее короткое замыкание в правом верхнем углу аккумулятора в результате смещения электродов (рисунок 6);
2. Повторяющаяся деформация сепаратора в углах аккумулятора;
3. Отсутствие изоляционной ленты на токоотводе катода (рисунок 7);
4. Смещение электродов;
5. Неравномерный уровень заряда по площади электродов;
6. Низкая толщина сепаратора по сравнению с используемыми в предыдущих устройствах (рисунок 8).

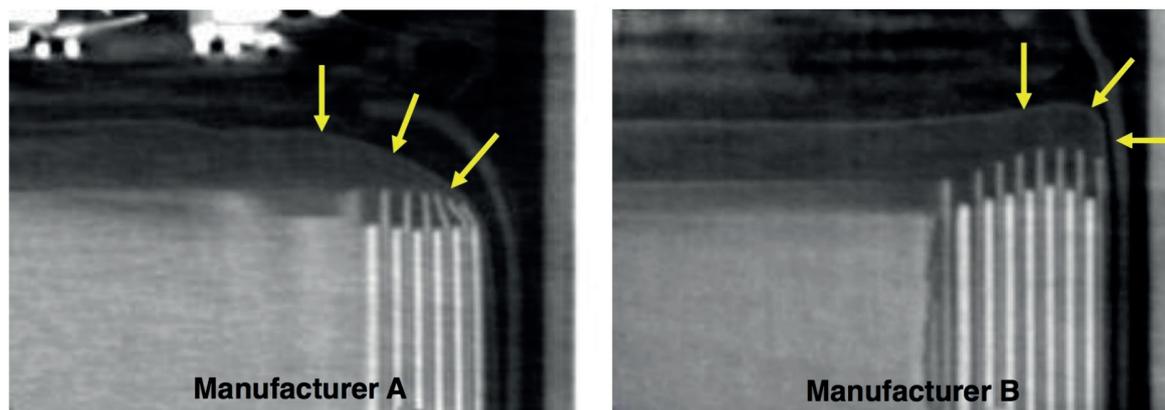


Рис.6. Смещение электродов в литий-ионном аккумуляторе Samsung Galaxy Note 7 [3]



Рис.7. Отсутствие изоляционной ленты на поверхности токоотвода катода в литий-ионном аккумуляторе Samsung Galaxy Note 7 [3]

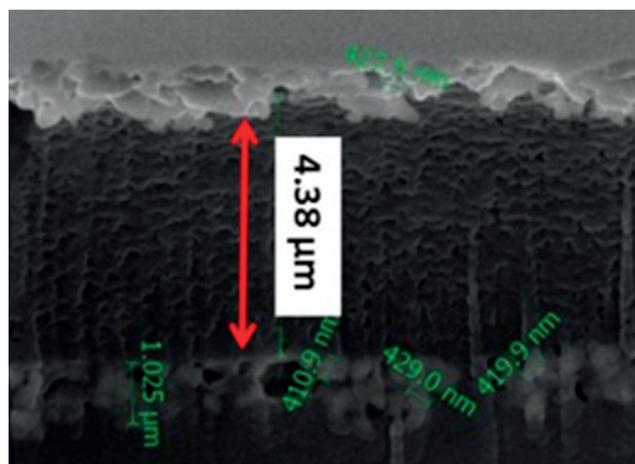


Рис.8. Микрофотография поперечного среза сепаратора литий-ионного аккумулятора Samsung Galaxy Note 7 [2]

Тепловой разгон

Представленные выше инциденты указывают о том, что безопасность является необходимым условием для аккумуляторов, и перед

будущим применением высокоэнергоемких ЛИА необходимо решить серьезные проблемы. Но, прежде

чем перейти к описанию механизмов защиты ЛИА, необходимо представить описание процессов, протекающих при тепловом разгоне.

Итак, тепловой разгон начинается от перегрева аккумулятора. Первоначальный перегрев может произойти в результате заряда аккумулятора сверх расчетного напряжения (перезаряд), воздействия чрезмерных температур, внешнего или внутреннего короткого замыкания. Внутреннее короткое замыкание является преобладающей причиной теплового разгона и относительно трудно поддается контролю. Внутреннее замыкание также может произойти в условиях разрушения источника тока, например, при проникновении внешних металлических обломков, или путем образования дендритов лития при зарядке с высокой плотностью тока, т. е. в условиях перезаряда или при низких температурах.

Далее при достижении некоторых пороговых температур (>90°C) происходит разложение твердого электролита (SEI – solid electrolyte

interphase) на границе раздела графит/электролит. Слой SEI в основном состоит из стабильных (таких как LiF и Li_2CO_3) и метастабильных (ROCO_2Li , $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$, и ROLi) компонентов, которые могут разлагаться, выделяя легковоспламеняющиеся газы и кислород. При разложении SEI температура повышается, и интеркалированный литий в аноде вступает в реакцию с органическими растворителями, выделяя легко воспламеняющиеся газы (этан, метан и другие), что еще больше повышает температуру. Когда температура превысит 120-130°C, полимерный сепаратор начинает оплавляться, что приводит к короткому замыканию в результате прямого контакта катода и анода. Затем при температуре от 150°C, начинается экзотермическое разложение катодного материала с образованием кислорода. Поскольку применяемые электролиты обладают высокой летучестью и по своей природе легко воспламеняются, в итоге начинается горение. Если взять в качестве примера широко используемый карбонатный электролит (смесь этиленкарбоната (EC) и диметилкарбоната (DMC) (1:1 по весу)), то он демонстрирует чрезвычайно низкую температуру вспышки

$25^\circ \pm 1^\circ\text{C}$. Выделяемый кислород и тепло обеспечивают необходимые условия для горения легковоспламеняющихся органических электролитов, тем самым вызывая опасность возгорания или взрыва.

Разработки в области увеличения безопасности литий-ионных аккумуляторов

Основываясь на понимании теплового разгона литий-ионного аккумулятора, изучается множество подходов с целью снижения угроз за счет рационального проектирования компонентов ЛИА. Методы обеспечения безопасности аккумулятора включают в себя внешние или внутренние механизмы защиты. Внешняя защита опирается на электронные устройства, такие как датчики температуры, предохранители, размыкатели и клапаны давления. Далее речь пойдет о внутренних механизмах защиты и современных достижениях.

Сепараторы являются ключевыми компонентами для обеспечения безопасности ЛИА, поскольку они предотвращают прямой электрический контакт между катодом и анодом, обеспечивая при этом ионный транспорт. Один из способов предотвращения теплового разгона в ЛИА заключается в том, чтобы перекрыть путь проводимости ионов лития через сепаратор. Для коммерческих ЛИА уже введены в эксплуатацию сепараторы с трехслойной структурой полипропилен (ПП)/полиэтилен (ПЭ)/полипропилен. Ког-

да внутренняя температура батареи поднимается выше критической температуры (~130°C), пористый слой полиэтилена частично плавится, закрывая поры пленки и предотвращая миграцию ионов в жидком электролите, в то время как слой полипропилена обеспечивает механическую поддержку для предотвращения внутреннего короткого замыкания [4]. Существуют также коммерческие версии сепараторов, в которых полипропиленовый слой заменен на покрытие из метасиликата алюминия. В работе [5] разработан трехслойный сепаратор для поглощения опасных дендритов Li и замедления их роста после проникновения в сепаратор. Слой наночастиц диоксида кремния, сгруппированный двумя слоями коммерческих полиолефиновых сепараторов (рисунок 9), может предотвращать проникновение опасных дендритов лития путем прямой реакции литирования диоксида кремния, тем самым эффективно повышая безопасность ЛИА.

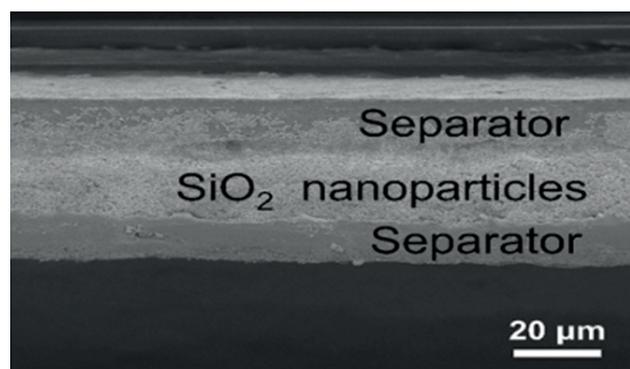


Рис.9. Микрофотография поперечного среза трехслойного сепаратора, предотвращающего проникновение дендритов лития

Еще одной разработкой в области увеличения безопасности литий-ионного аккумулятора является разработка ученых из Soteria Battery Innovation Group [6, 7], идея которых заключалась в замене алюминиевой и медной фольги применяемой в качестве токоотводов ЛИА на металлизированную медь или алюминий лавсановую пленку. Проведенные комплексные исследования совместно с NASA продемонстрировали, что при внутреннем коротком замыкании или при пробое ЛИА, происходил разогрев с оплавлением металлизированной лавсановой пленки, в результате чего прекращалась электронная проводимость, что в свою очередь предотвращало дальнейшее развитие теплового разгона (рисунок 10).



Рис.10. Литий-ионный аккумулятор с применением оплавляемых токоотводов после прокола

Вопрос безопасности катодных материалов изучен достаточно широко, и может быть ранжирован от наименее безопасных до наиболее безопасных в следующем порядке: LiNiO_2 , $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$, $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.2}\text{Ti}_{0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{O}_2$, LiCoO_2 , $\text{Li}_{1+x}\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$, $\text{Li}[\text{Ni}_{3/8}\text{Co}_{1/4}\text{Mn}_{3/8}]\text{O}_2$, LiFePO_4 [8-10] (Рисунок 11).

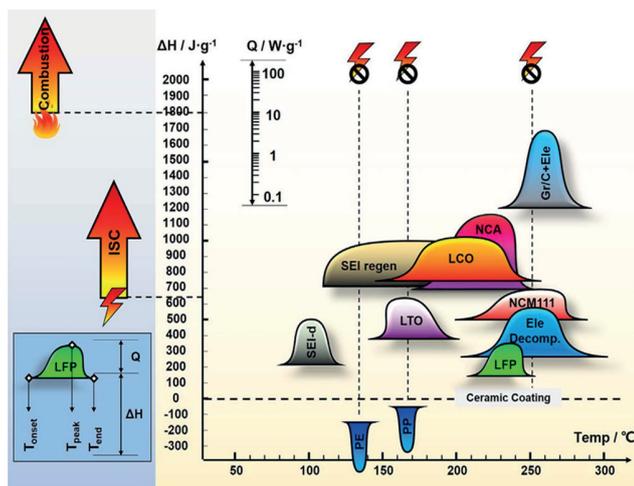


Рис.11. Зависимость температуры начала теплового разгона от количества теплоты для различных типов катодных материалов

Таким образом, для того чтобы создать литий-ионный аккумулятор с наибольшим уровнем безопасности, необходимо использовать катодный материал с максимальной температурой начала теплового разгона т. е. LiFePO_4 . Кроме того, для снижения риска развития теплового разгона ЛИА на начальном этапе, необходимо применять трехслойный оплавляемый сепаратор. Для случая развития температуры ЛИА свыше температуры плавления сепаратора, необходимо применять оплавляемые токоотводы. Однако, при всем наличии элементов внутренней защиты, не стоит исключать достижения процесса горения ЛИА. Так авторы работы [11] предложили использовать микрокапсулы из низкоплавкого композитного полимера, внутри которых заключен огнетушащий агент Novac1230 (рисунок 12). При достижении 120°C оболочка микрокапсул оплавляется с высвобождением огнетушащего агента. Полученные микрокапсулы могут быть нанесены на поверхность корпуса литий-ионного аккумулятора образуя огнетушащее покрытие. При испытаниях огнетушащих микрокапсул было продемонстрировано охлаждение ЛИА при тепловом разгоне с 800°C до 30°C за 10 секунд.

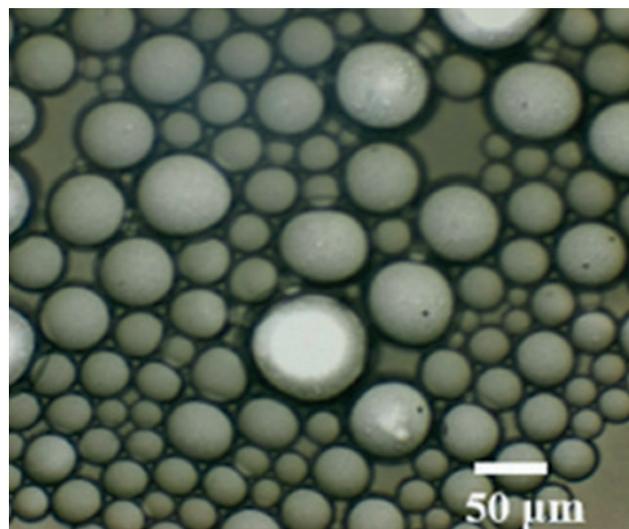


Рис.10. Литий-ионный аккумулятор с применением оплавляемых токоотводов после прокола

Выводы

Литий-ионные аккумуляторы являются неотъемлемой частью современной портативной электронной техники – от современных многофункциональных смартфонов до миниатюрных беспроводных наушников. Широкая область применения ЛИА определяется целым набором ха-

рактических, а именно: высокой удельной энергоемкостью, длительным циклическим ресурсом, вариативностью размеров и форм, высокой надежностью, а также безопасностью при соблюдении условий эксплуатации. Тем не менее, нарушение условий работы литий-ионного аккумулятора может привести к аварийной ситуации с возгоранием и взрывом. Поэтому в современные ЛИА включают различные элементы защиты, предотвращающие развитие аварийной ситуации на определенном этапе, образуя таким образом ступени защиты, к которым можно отнести:

- Тип катодного материала, позволяющего установить порог наступления теплового разгона;
- Состав и структура сепаратора, позволяющего установить диапазон температур, при

которых произойдет оплавление пористой структуры полимера, приводящего к снижению ионной проводимости;

- Оплавляемые токоотводы, представляющие собой металлизированную полимерную пленку, разрушающуюся при достижении определенной температуры, приводящей к снижению электронной проводимости или к разрыву цепи;
- Внешние огнетушащие покрытия.

Таким образом, комплексный подход, а именно правильная расстановка температурных диапазонов, при которых должна сработать каждая из ступеней внутренней защиты в ЛИА, позволит минимизировать или полностью исключить развитие аварийной ситуации.

Литература

1. Kolly J. M., Panagiotou J. The Investigation of a Lithium-Ion Battery Fire Onboard a Boeing 787 by the US National Transportation Safety Board // <https://telegra.ph/Boeing-787-pdf-03-25> (дата обращения 10 апреля 2025 г)
2. Loveridge M. J., Remy G., Kourra N., Genieser R., Barai A., Lain M. J., Guo Y., Amor-Segan M., Williams M. A., Amietszajew T. et al. Looking Deeper into the Galaxy (Note 7). Batteries 2018 <https://doi.org/10.3390/batteries4010003>
3. Ron Amadeo Two different production problems from two different suppliers killed the Note 7 Ars Technica 2017 <https://arstechnica.com/gadgets/2017/01/galaxy-note-7-investigation-blames-small-battery-cases-poor-welding/>
4. P. Arora, Z. J. Zhang, Battery separators. Chem. Rev. 104, 4419-4462 (2004).
5. Liu K., Zhuo D., Lee H.-W., Liu W., Lin D., Lu Y., Cui Y. Extending the life of lithium-based rechargeable batteries by reaction of lithium dendrites with a novel silica nanoparticle sandwiched separator. Advanced Materials, 29(4), 1603987. doi:10.1002/adma.201603987
6. Darcy E. et al. Metallized plastic current collectors //International Battery Safety Workshop (IBSW). – 2019. – №. JSC-E-DAA-TN69168
7. Darcy E. Investigating Polymer Current Collectors for Isolating Internal Shorts in High Energy Cells //Advanced Automotive Battery Conference. – 2024. WBS: 804911.02.05.3535.23
8. Jiang J., Dahn J. R. ARC studies of the thermal stability of three different cathode materials: LiCoO₂; Li[Ni_{0.1}Co_{0.8}Mn_{0.1}]O₂; and LiFePO₄, in LiPF₆ and LiBoB EC/DEC electrolytes. Electrochemistry Communications, 6(1), 39–43. DOI:10.1016/j.elecom.2003.10.011
9. Jung S., Jung H.-Y. Charge/discharge characteristics of Li-ion batteries with two-phase active materials: a comparative study of LiFePO₄ and LiCoO₂ cells. International Journal of Energy Research, 40(11), 1541–1555. doi:10.1002/er.3540
10. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials, 10, 246–267. doi:10.1016/j.ensm.2020.05.013
11. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Y., Zhao Y., Cheng S. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety. Materials Advances. DOI:10.1039/D1MA00343G

LITHIUM-ION BATTERY PROTECTION STAGES

Kornilov D.Y.¹, Morozov A.N.², Slepov S.N.³, Abramkin R.V.⁴

Keywords: small-sized power sources, fire safety, emergencies, thermal runaway, ignition, explosion, separator, current collectors, cathode material, combustion process.

Research method: analysis and synthesis, which allows a comprehensive assessment of the prospects for the introduction of new methods of protection of lithium-ion batteries.

The purpose of the study: to study the causes of fire and explosion of lithium-ion batteries, as well as new methods of their multi-level protection to ensure safe operation.

Result: In the course of the study, the processes occurring in a lithium-ion battery in the process of charging and discharging were studied. The analysis of the causes of fires and explosions of lithium-ion batteries was carried out on the example of products of national economic purpose. It was established that the main cause is an internal short circuit that occurs as a result of the rupture of the separator due to the growth of dendrites during overcharging. The essence of the process of thermal runaway, which leads to the ignition of a lithium-ion battery, is described. Proposals have been developed aimed at improving the safety of operation of lithium-ion batteries, consisting in the improvement of separators, the replacement of aluminum and copper foil used as current collectors of lithium-ion batteries with a lavsan film metallized with copper or aluminum, as well as the use of microcapsules made of low-melting composite polymer, inside which the extinguishing agent is contained.

Practical value: the comprehensive use of the proposed methods of protecting lithium-ion batteries can significantly increase the safety of their operation - minimize the risk of explosion or fire in the event of thermal runaway.

References

1. Kolly J. M., Panagiotou J. The Investigation of a Lithium-Ion Battery Fire Onboard a Boeing 787 by the US National Transportation Safety Board // <https://telegra.ph/Boeing-787-pdf-03-25> (дата обращения 10 апреля 2025 г)
2. Loveridge M. J., Remy G., Kourra N., Genieser R., Barai A., Lain M. J., Guo Y., Amor-Segan M., Williams M. A., Amietszajew T. et al. Looking Deeper into the Galaxy (Note 7). Batteries 2018 <https://doi.org/10.3390/batteries4010003>
3. Ron Amadeo Two different production problems from two different suppliers killed the Note 7 Ars Technica 2017 <https://arstechnica.com/gadgets/2017/01/galaxy-note-7-investigation-blames-small-battery-cases-poor-welding/>
4. P. Arora, Z. J. Zhang, Battery separators. Chem. Rev. 104, 4419-4462 (2004).
5. Liu K., Zhuo D., Lee H.-W., Liu W., Lin D., Lu Y., Cui Y. Extending the life of lithium-based rechargeable batteries by reaction of lithium dendrites with a novel silica nanoparticle sandwiched separator. Advanced Materials, 29(4), 1603987. doi:10.1002/adma.201603987
6. Darcy E. et al. Metallized plastic current collectors //International Battery Safety Workshop (IBSW). – 2019. – №. JSC-E-DAA-TN69168
7. Darcy E. Investigating Polymer Current Collectors for Isolating Internal Shorts in High Energy Cells //Advanced Automotive Battery Conference. – 2024. WBS: 804911.02.05.3535.23
8. Jiang J., Dahn J. R. ARC studies of the thermal stability of three different cathode materials: LiCoO₂; Li[Ni_{0.1}Co_{0.8}Mn_{0.1}]O₂; and LiFePO₄, in LiPF₆ and LiBoB EC/DEC electrolytes. Electrochemistry Communications, 6(1), 39–43. DOI:10.1016/j.elecom.2003.10.011
9. Jung S., Jung H.-Y. Charge/discharge characteristics of Li-ion batteries with two-phase active materials: a comparative study of LiFePO₄ and LiCoO₂ cells. International Journal of Energy Research, 40(11), 1541–1555. doi:10.1002/er.3540
10. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials, 10, 246–267. doi:10.1016/j.ensm.2020.05.013
11. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Y., Zhao Y., Cheng S. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety. Materials Advances. DOI:10.1039/D1MA00343G

¹Denis Yu., Dr.Sc., Deputy General Director of AVEK JSC, Scientific Supervisor for Chemical Power Sources, Moscow. E-mail: d.kornilov@avecs.ru

²Alexey N. Morozov, Head of the Department of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Region, Mytishchi. E-mail: alexy.morozov@yandex.ru

³Sergey N. Slepov, Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. E-mail: slepov69@mail.ru

⁴Roman V. Abramkin, Ph.D., Deputy Head of the Department of the Federal State Budgetary Institution "16th Central Research and Testing Institute" of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. E-mail: avg62rus@rambler.ru