

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 4. С. 83–90
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(4):83-90

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90>

Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара при тепловом разгоне литий-ионных батарей

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Представлены сведения об особенностях теплового разгона литий-ионных батарей (ЛИБ) различных типов и связанных с ним опасных факторов пожара. Выполнено обобщение данных по составу газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разрушении компонентов ЛИБ с акцентом на повышенную токсичность угарного газа и фтороводорода. Проведен анализ экспериментальных концентраций данных веществ и их сопоставление с действующими нормативами (ПДК, IDLH, AEGL) с учетом объема помещений. Установлено, что даже одна ячейка ЛИБ может привести к превышению допустимых уровней СО и HF при недостаточной вентиляции. Даны рекомендации по включению специфических сценариев с участием ЛИБ в расчет пожарного риска и необходимости дополнительных исследований по моделированию их горения.

Ключевые слова: ячейка; модуль; газовыделение; моделирование пожара; предельно допустимая концентрация; помещение

Для цитирования: Харламенков А.С. Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара при тепловом разгоне литий-ионных батарей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 83–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90

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

Thermal runaway of lithium-ion batteries: analysis of toxic emissions and fire hazards

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The article addresses the Thermal runaway of various lithium-ion batteries (LIB) and related fire hazards. Information about the composition of gaseous products released during thermal destruction of LIB components was summarized with a focus on the extreme toxicity of carbon monoxide and hydrogen fluoride. Experimental concentrations of these substances were analyzed and matched against effective standards (Maximum Permissible Concentrations, IDLH, AEGL), taking into account the volume of premises. It is found that even one LIB cell can cause permissible levels of CO and HF to be exceeded if ventilation is insufficient. It is recommended to contribute specific scenarios, involving LIBs, to the fire risk analysis and conduct more research on combustion modeling.

Keywords: cell; module; gas release; fire modeling; maximum permissible concentration; premises

For citation: Kharlamenkov A.S. Thermal runaway of lithium-ion batteries: analysis of toxic emissions and fire hazards. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4): 83-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90 (rus).

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

ВОПРОС



Вопросы эффективного тушения и обеспечения безопасной эксплуатации литий-ионных батарей (ЛИБ) с каждым днем становятся все более актуальными. Глобальное внедрение ЛИБ в качестве малогабарит-

ных источников энергии требует от специалистов разработки новых организационных и технических мер по предупреждению и уменьшению последствий аварийной работы батарей на объектах защиты.

Значительное количество исследований пожарной опасности ЛИБ направлено на изучение процесса

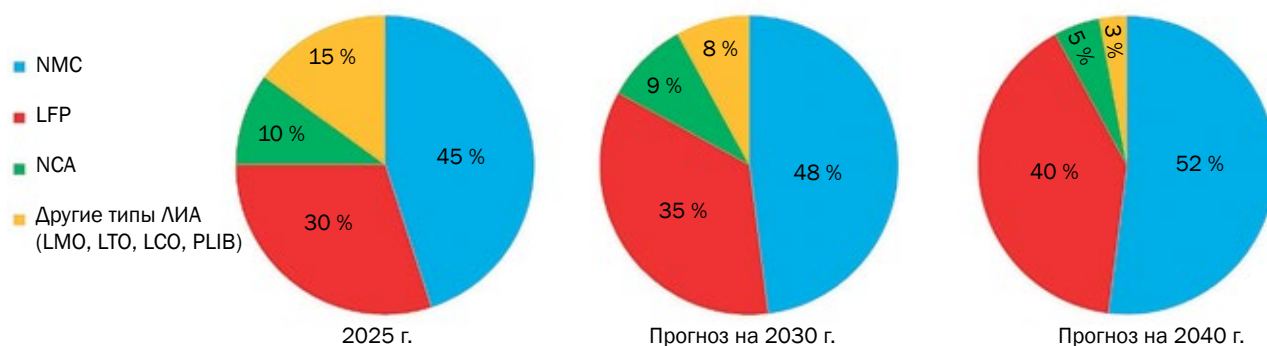


Рис. 1. Процентное распределение различных типов ЛИБ в мире

теплого разгона батарей различного химического состава. Основные типы ЛИБ: литий-кобальт-оксидные (LiCoO₂, LCO); литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (LiNiMnCoO₂, NMC); литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (LiNiCoAlO₂, NCA); литий-титанатные (Li₄Ti₅O₁₂, LTO); литий-железо-фосфатные (LiFePO₄, LFP).

В 2024 г. мировой спрос на ЛИБ вырос до 950 ГВтч, что на 25 % больше, чем в 2023 г. Кроме того, спрос на никель и кобальт также вырос на 30 и 15 % соответственно¹. Ожидается, что до 2030 г. сохранится высокий спрос на батареи типа NMC и их подвиды — NMC532, NMC622 и NMC811. В то же время значительно увеличивается производство и спрос на тип LFP как более пожаробезопасный [1, 2].

На рис. 1 представлено приблизительное процентное распределение основных типов ЛИБ, включая новые виды, находящиеся на стадии разработки (пост-литиевые батареи или PLIB).

Общая тенденция демонстрирует значительный рост спроса на ЛИБ, особенно в секторе электромобилей. Ведущие типы, такие как NMC и LFP, становятся все более популярными благодаря своим характеристикам и успешной практической эксплуатации. Прогнозы на будущее также предполагают масштабное увеличение рыночного объема и возможностей, что подчеркивает важность развития этого сектора в ответ на глобальные потребности в устойчивой энергетике.

В последние годы ведутся активные разработки и внедрение в эксплуатацию (помимо твердотельных ЛИБ) новых типов: литий-серные (Li-S); литий-воздушные/оксидные (Li-air, Li-O₂); натрий-ионные (Na-ion); кремний-углеродные (Si-C). Главным преимуществом Li-S и Li-O₂ батарей является их дешевизна, более высокая емкость и плотность энергии (400–600 Втч/кг) по сравнению с другими типами ЛИБ (до 260 Втч/кг) [3]. Однако на практике такие батареи имеют ограниченный срок службы, малое число циклов перезарядки из-за наличия паразитных химических реакций в процессе его работы, с которыми пытаются бороться путем поиска новых, более совершенных конструкций электродов и состава электролита [4, 5].

В отличие от лития, натрий является более экологичным, дешевым и доступным металлом, но по причине меньшей плотности энергии (75–160 Втч/кг) по сравнению с LFP типом (120–260 Втч/кг) применение натрий-ионных батарей (НИБ) будет ограничено. В основном НИБ планируется использовать в качестве источников энергии для городских транспортных средств (электросамокаты и велосипеды, каршеринг), а также систем накопления и хранения энергии. Важным преимуществом НИБ является их пожаробезопасность, наравне с батареями типа LFP, а также конечная стоимость НИБ, сопоставимая с ценой NMC батареи [6].

В последние годы наблюдается активное внедрение кремний-углеродных (Si-C) анодов в ЛИБ, особенно для мобильных устройств. Такие аккумуляторы схожи по конструкции с традиционными Li-ion/Li-Pol типами, но отличаются материалом отрицательного электрода. Вместо графита здесь используется кремний-углеродный композит — углерод (80–90 %) и кремний (10–20 %). Последний выполняет стабилизацию структуры анода, так как чистый кремний при зарядке может расширяться до 300 %, а с «каркасом» из углерода — только до 15–60 % [7, 8]. Испытания ячеек с Si-C анодами (CATL, BYD и др.) показали, что при тепловом разгоне они воспламеняются позднее, чем традиционные Li-ion/Li-Pol (42 против 28 с), а температура их горения ниже (680 против 820 °C). При этом начало возгорания у таких ячеек происходит при более высокой температуре (172 °C по сравнению со 148 °C у графитовых анодов). Эти данные свидетельствуют о более высокой термической стабильности Si-C систем, хотя параметры горения зависят от конкретной конструкции аккумулятора. Данные показатели дают возможность повышения пожарной безопасности мобильных устройств за счет применения в их конструкции Si-C анодов. Это решение полностью не исключает риск возгорания такой батареи, так как в ней применяется аналогичный электролит (обычно LiPF₆), который считается основным источником опасности [9].

Ведутся исследования по разработке новых типов самозатухающих сепараторов для ЛИБ типа LFP на основе полиимида (PIFAP), который представляет собой многослойную структуру из электросpunных (электропряденых) полиимидных волокон (PIF), покрытых композитным аэрогелем из полиимида и аммоний-полифосфата (APP) [10]. Комбинированный состав сепаратора обеспечивает значительное снижение

¹ Глобальный прогноз электромобилей (EV) на 2025 год // Официальный сайт Международного электротехнического агентства (IEA). URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (дата обращения: 22.06.2025).

тепловыделения из ячейки и подавление ее теплового разгона ЛИБ. В основном это происходит за счет структуры PIF, которая обладает высокой термической стабильностью и начинает разрушаться при температурах около 500 °С. Композитный гель APP обеспечивает более эффективное самозатухание сепаратора путем выделения при нагревании негорючих газообразных веществ (азота и воды) с образованием защитного слоя фосфатов, подавляющих горение и снижающих опасные выбросы фтороводорода (HF).

Большинство перечисленных выше нововведений в области разработки новых составов ЛИБ направлены на снижение их пожарной опасности за счет предотвращения или замедления теплового разгона при механических повреждениях, перенапряжении и перезаряде отдельных ячеек. При этом исследованиям по прогнозированию и определению значений параметров опасных факторов пожара (ОФП) с участием ЛИБ уделяется недостаточно внимания. В особенности это касается вопросов оценки опасности воздействия на человека токсичных продуктов горения в результате теплового разгона ЛИБ и его влияния на снижение концентрации кислорода и видимости на путях эвакуации.

Какие подходы к оценке значений параметров ОФП следует применять при анализе опасных сценариев пожара с участием ЛИБ?

ОТВЕТ

На процесс развития пожара и изменения параметров его опасных факторов в значительной степени влияет тип, а также массовая и компонентная структура отдельных ячеек ЛИБ. Стандартная ячейка состоит из следующих компонентов [11]:

- катод — это основной источник энергии, в котором используются материалы на основе литий-металлических оксидов (NMC, NCA и др.) или литий-железофосфата (LFP);
- анод, выполненный чаще всего из графита (иногда с добавлением не более 10 % кремния), который участвует в процессе интеркаляции (встраивания в свою слоистую структуру) ионов лития;
- электролит, представляющий собой раствор литиевых солей (LiPF_6) в органических карбонатах, таких как диметилкарбонат (DMC), этилкарбонат (EC) или диэтилкарбонат (DEC);

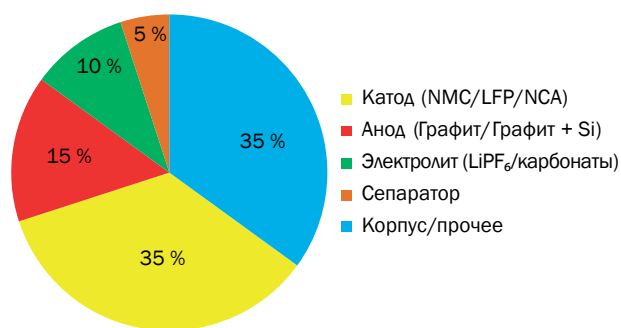


Рис. 2. Усредненное процентное распределение массовых долей отдельных компонентов ЛИБ

- сепаратор — это полимерные мембраны (например, полиэтилен или полипропилен), предотвращающие прямой контакт анода и катода, исключающий возникновение короткого замыкания;
- корпус, выполняющий роль защитной оболочки, обычно выполненный из металла (сталь, алюминий) с добавлением полимеров (обычно полиэтилентерефталат и полипропилен — около 15–25 % от массы всего корпуса).

Усредненные массовые доли отдельных компонентов для ЛИБ с различными типами катодов представлены на рис. 2. Процентное соотношение масс компонентов ЛИБ может незначительно отличаться в зависимости от типа ячеек (цилиндрическая, призматическая, пакет), а также от химического состава катода и электролита.

Тепловой разгон для большинства типов ЛИБ сопровождается запуском активных химических реакций, протекающих как в самом электролите, так и между ним и материалами катода и анода. Как отмечалось выше, основу химического состава электролита ЛИБ (около 85 %) составляют органические карбонаты, которые относятся к легковоспламеняющимся и горючим жидкостям (ЛВЖ и ГЖ), остальную массу составляют растворенные соли гексафторфосфата лития (LiPF_6). Катоды в литий-ионных батареях могут значительно различаться в зависимости от типа ЛИБ, что будет существенно влиять на качественный и количественный состав газообразных продуктов термического разложения, а также на концентрацию отдельных токсичных компонентов. В табл. 1 представлено

Таблица 1. Химический состав активных материалов катода ЛИБ

Тип катода	Масса активных материалов катода, %							
	Li	Ni	Mn	Co	Fe	P	Al	O
NMC111	7,2	20,2	18,9	20,3	-	-	-	33,4
NMC532		30,4	17,1	12,2	-	-	-	33,1
NMC622		36	11,1	11,9	-	-	-	33,8
NMC811		48	5,9	5,9	-	-	-	33
NCA	7,3	48,4	-	9,3	-	-	1,4	33,6
LCO	7,1	-	-	60,2	-	-	-	32,7
LFP	4,4	-	-	-	35,4	19,6	-	40,6

распределение массовых долей активных материалов катода различных типов ЛИБ.

Как видно из табл. 1, массовая доля лития в катодах на основе NMC, NCA и LCO составляет около 7,1–7,3 %, тогда как в LFP она значительно ниже (4,4 %). Это различие связано с тем, что в катодах LFP на один атом лития приходится четыре атома кислорода, в то время как в слоистых оксидах (NMC, NCA, LCO) аналогичное соотношение составляет 1:2.

Для всех типов катодов следует отметить высокое содержание кислорода (30–40 % массы), что имеет принципиальное значение для процессов термического разложения. Выделяющийся кислород, взаимодействуя с электролитом, способствует развитию горения с образованием различных газообразных продуктов. Катоды NMC811 и NCA с высоким содержанием никеля менее термически стабильны и при разложении выделяют больше кислорода, что усиливает реакции с электролитом и увеличивает риск возгорания (начало разложения при 170–195 °С с максимумом 450–850 °С [12–15]). LFP катоды благодаря своей кристаллической (оливиновой) структуре обладают более высокой термической стабильностью. Фосфатная группа (PO_4^{3-}) LFP катода удерживает кислород прочнее, что снижает интенсивность его выделения и, как следствие, уменьшает пожарную опасность (начало термического разложения при 190–200 °С с максимумом 240–400 °С [12–15]).

В табл. 2 представлено распределение массовых долей активных материалов анода различных ЛИБ.

Представленная таблица иллюстрирует преобладание графитовых анодов (около 95 % рынка) в современных литий-ионных батареях, что объясняется их высокой циклической стабильностью, приемлемой стоимостью и удельной емкостью.

Добавление кремния в анодные материалы повышает теоретическую емкость, но сопровождается существенным объемным расширением, что ускоряет деградацию структуры и снижает срок службы. С точки зрения термической безопасности, кремнийсодержащие аноды могут усугублять тепловой разгон. При высоких температурах кремний способствует разрушению SEI-слоя (твердая межфазная пленка на поверхности анода) и усиленному взаимодействию с электролитом, что увеличивает объем выделяемых горючих газов (включая

углеводороды). Альтернативой являются аноды на основе литий-титаната (LTO), обеспечивающие повышенную термостабильность за счет отсутствия SEI-слоя и незначительного объемного расширения, хотя и уступающие в энергетической плотности. Таким образом, выбор анодного материала представляет собой компромисс между энергетическими характеристиками и термической безопасностью ячейки ЛИБ.

Чистый кремний и металлический литий пока не используются в массовом производстве из-за проблем со стабильностью и безопасностью анодов при их циклической перезарядке, приводящей к значительному расширению кремния в процессе интеркаляции лития и образования дендритов, повреждающих сепаратор (в анодах с металлическим литием).

Исследования теплового разгона ЛИБ показали, что наибольшую пожарную опасность представляют элементы, находящиеся в полностью заряженном состоянии или в процессе подзарядки. С увеличением уровня заряда (SoC) возрастает вероятность и интенсивность химических реакций в случае теплового разгона, а также увеличение тепловыделения и объема газовых выбросов [16–18]. Для цилиндрических ячеек типоразмера 18650 с катодами на основе LCO, NMC и LFP при уровне заряда 50–100 % зарегистрированы две характерные фазы теплового разгона, сопровождающиеся вскрытием предохранительного клапана (этап 1) и разрушением корпуса ячейки (этап 2). Начало теплового разгона зафиксировано при температуре, превышающей температуру размягчения сепаратора (100–130 °С), а вскрытие клапана – в интервале 130–145 °С.

Далее, в зависимости от типа катода, развивается одна или две активные стадии термодеструкции. На первом этапе (при температуре около 170 °С) происходит первоначальный выброс горючих газов и пламени, сопровождаемый ускорением роста температуры ячейки. Второй, более активный этап, фиксируется при температурах 230–250 °С для LFP, 250–290 °С для NMC и 260–310 °С для LCO типов [16–18]. Этап характеризуется взрывоподобным горением или интенсивным факельным выбросом (за исключением LFP, где процесс развивается более стабильно), а также разрушением корпуса с выбросом металлической фольги токосъемников. В от-

Таблица 2. Химический состав активных материалов анода ЛИБ

Тип анода	Масса активных материалов анода, мас. %				
	Li	C	Si	Ti	O
Графит (C)	-	100	-	-	-
Кремний-графит (Si-C)	-	89–95	5–11	-	-
Чистый кремний (Si)	-	-	100	-	-
Литий-титанат (LTO)	6,1	-	-	52,1	41,8
Металлический литий	100	-	-	-	-

Таблица 3. Молярные доли газов при тепловом разгоне ЛИБ

Тип ЛИБ	Молярные доли газов, %													
	H ₂		CO ₂		CO		CH ₄		C ₂ H ₄		C ₂ H ₆		HF	
	Номер этапа теплового разгона													
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
LFP	25–35	30,9	20–25	53,0	Менее 5	4,8	–	4,1	–	6,8	–	0,3	Менее 0,1	0,3
NMC	25–30	30,8	15–20	41,2	10–15	13,0	–	6,8	–	8,2	–	–	0,5–1,0	1,2
LCO	20–30	30,0	15–25	25,0	10–20	27,6	–	8,6	–	7,7	–	1,2	0,5–1,5	2,0

дельных исследованиях разлет частиц металла электродов NMC ячейки достигал 6 м [19].

С точки зрения оценки ОФП, горение ЛИБ сопровождается выделением большого количества токсичных газов (CO, CO₂, HF, SO₂, NO₂, NO, HCl и H_xC_y) и мелкодисперсных частиц (PM – аэрозоли с размерами от 0,1–10 мкм) [20, 21]. Входящие в состав электролита ЛВЖ и ГЖ представляют основную пожарную опасность. При тепловом разгоне ЛИБ и разложении карбонатных растворителей (например, EC, DMC) происходит выделение углекислого (CO₂) и угарного (CO) газов, водорода (H₂) и углеводородов, таких как этилен (C₂H₄) и метан (CH₄) [20].

Кроме того, разложение LiPF₆ приводит к образованию плавиковой кислоты (HF) – высокотоксичного соединения, представляющего серьезную опасность для человека. Этот процесс особенно характерен для LFP типов ЛИБ ввиду их склонности к сохранению LiPF₆ в более стабильной форме до высоких температур (до 150 °C). При 150–270 °C происходит деструкция LiPF₆ с образованием HF и фторфосфорных соединений (PF₅, POF₃). Наличие высокой влажности (в том числе при тушении ЛИБ водой) способствует значительному увеличению количества HF [22, 23]. Соединения PF₅ и POF₃ в атмосфере также активно вступают в реакции с влагой (гидролизуются), превращаясь в HF и ортофосфорную кислоту (H₃PO₄), что способствует дополнительному накоплению HF и создает высокую токсикологическую опасность. При горении ЛИБ ортофосфорная кислота образуется в незначительных количествах и не представляет серьезной опасности для человека (обычно может вызывать небольшие раздражения слизистых оболочек и дыхательных путей).

В табл. 3 представлены молярные доли газов при тепловом разгоне ЛИБ на представленных выше этапах 1 и 2 [13, 22–24].

Анализ газовых выбросов, сопровождающих тепловой разгон различных типов ЛИБ, показывает устойчивую тенденцию к преобладанию H₂ и CO₂ среди выделяющихся газов. В частности, для всех типов катодов массовая доля H₂ составляет около 30 %, а CO₂ – 25–53 %, при этом у аккумуляторов с катодом типа LFP наблюдается наибольшая доля CO₂ и наименьшее количество CO, что свидетельствует о более полном окислении органических компонентов.

Концентрации CO₂ [13, 23, 24] могут достигать 20 000–120 000 ppm (36 000–216 000 мг/м³), что может превысить порог максимально разовой предельно допустимой концентрации CO₂ в воздухе рабочей зоны (ПДК_{м.р.}), который составляет 27 000 мг/м³ (по данным табл. 2.1 СанПин 1.2.3685–21²). Поэтому высокие концентрации CO₂ при горении ЛИБ представляют опасность, особенно в плохо проветриваемых помещениях малого объема. В Методике определения расчетных величин пожарного риска³ (далее Методика ОФП) тоже присутствует предельно допустимое значение CO₂ (110 000 мг/м³), которое также может быть превышено предельными концентрациями при горении ЛИБ.

Угарный газ составляет значительную долю (до 27,6 %) в выбросах батарей с катодами типа LCO и NMC, повышая токсикологический риск при локальных пожарах. Исследования [13, 23, 24] показали, что концентрации CO на различных этапах теплового разгона ЛИБ варьируются в диапазоне 1000–56 000 ppm (1145–64 120 мг/м³) и значительно превышают значение ПДК_{м.р.} = 20 мг/м³. Это подтверждает высокую токсичность CO в условиях пожара ЛИБ и указывает на необходимость принятия дополнительных мер защиты людей. В Методике ОФП³ предельно допустимая концентрация CO составляет 1160 мг/м³, которая тоже может быть достигнута при горении ячейки ЛИБ, особенно при одновременном выбросе газа из нескольких ячеек в составе модуля.

Углеводороды (метан, этилен и др.) присутствуют во всех типах ЛИБ, но в меньших количествах (до 8 %), формируясь за счет термического разложения растворителей и побочных органических соединений, и в основном представляют пожарную опасность из-за возможного образования горючих смесей и последующего их воспламенения (выделение H₂ также способствует этому).

Несмотря на сравнительно низкое содержание (0,3–2,0 %), HF представляет особую опасность и обладает высокой токсичностью даже при кратковременном воздействии

² Об утверждении санитарных правил и норм СанПин 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (с изм. на 30.12.2022).

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140.

Таблица 4. Экспериментальные и нормативные значения концентраций HF для ЛИБ

Показатель	Единицы измерения	CO ₂	CO	HF
Концентрация по экспериментальным данным	ppm	20 000–120 000	1000–56 000	20–200
	мг/м ³	36 000–216 000	1145–64 120	16,4–164
ПДК _{м.р} (СанПин 1.2.3685–21) ²	ppm	15 000	17,46	0,61
	мг/м ³	27 000	20	0,5
ПДК (Методика ОФП) ³	ppm	61 111	1012	–
	мг/м ³	110 000	1160	–
IDLH*	ppm	40 000	1200	30
	мг/м ³	72 000	1374	24,6
STEL**	ppm	30 000	200	3
	мг/м ³	54 000	229	2,46
AEGL-2***	ppm	–	420	95
	мг/м ³	–	481	77,7
AEGL-3***	ppm	–	1700	170
	мг/м ³	–	1948	139,1

* IDLH – Immediately Dangerous to Life or Health (NIOSH, США), концентрация, опасная при 30 мин воздействия.

** STEL – Short-Term Exposure Limit (ACGIH и OSHA, США) – это предельно допустимая концентрация вещества в воздухе рабочей зоны, при которой допускается кратковременное (не более 15 мин) воздействие на персонал.

*** AEGL-2/AEGL-3 – Acute Exposure Guideline Level, рассчитанные для 10 мин (EPA, США):

- AEGL-2: вызывает тяжелые, но не смертельные последствия, мешающие эвакуации;
- AEGL-3: вызывает необратимые последствия или смерть.

на человека. В ряде экспериментов [23–25] регистрировались концентрации HF от 2 до 200 ppm. Для единичной цилиндрической ячейки NMC 18650 максимальная концентрация HF достигала 66 ppm (≈ 54 мг/м³ при 25 °C и 1 атм). Это значение более чем в 100 раз превышает порог ПДК_{м.р} = 0,5 мг/м³ и в 2 раза уровень международного кратковременного порога немедленной опасности для жизни и здоровья (IDLH⁴), который составляет 30 ppm ($\approx 24,6$ мг/м³). Следует отметить, что при возгорании батарейной сборки, состоящей из нескольких литий-ионных ячеек в условиях ограниченного воздухообмена, фиксировались значения концентрации HF 76–100 ppm ($\approx 81,84$ мг/м³) [23–25], что указывает на возможное превышение порога жизнеугрожающего острого воздействия (AEGL-3⁵), который для HF составляет 170 ppm $\approx 139,1$ мг/м³.

⁴ Национальный институт охраны труда США (NIOSH). Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Values – Hydrogen Fluoride. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1994 (rev. 2013). URL: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664393.html> (дата обращения: 10.07.2025).

⁵ Агентство по охране окружающей среды США (EPA). Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. Vol. 5 (Hydrogen Fluoride). 2003. Washington, DC: National Research Council. URL: <https://www.epa.gov/aegl/hydrogen-fluoride-results-aegl-program> (дата обращения: 10.07.2025).

Обобщенные данные по предельно допустимым концентрациям CO₂, CO и HF для различных типов ЛИБ (NMC, LFP и LCO) представлены в табл. 4.

Следует отметить, что прямое сравнение полученных концентраций газов при горении ЛИБ с нормативными значениями ПДК является некорректным, так как экспериментальные значения характеризуют в большей степени опасность вблизи источника выброса газов, а не опасную концентрацию во всем объеме помещения. Поэтому для практических целей следует использовать значения массы выброшенного из горящей ячейки газа (в мг) и далее, при известном объеме помещения, определять среднеобъемную концентрацию газа, которую можно сопоставить с нормами ПДК. Например, исследование выбросов HF [23] указывает, что объем выброса HF может составлять 20–200 мг/Втч, что для одной ячейки емкостью 3500 мА/ч с номинальным напряжением 3,7 В (12,95 Втч) составит массу выбросов HF от 259 до 2590 мг. Тогда при известном объеме помещения (например, 27 м³ с размерами 3 × 3 × 3 м) концентрация HF может составить 9,6–96 мг/м³, что указывает на превышение большинства нормативных ПДК. Аналогичным образом можно оценить среднеобъемные концентрации и опасность выбросов CO и CO₂ для различных типов батарей.

Особенности термического разгона и опасность выделения CO₂, CO и HF актуальны не только для промышленных объектов с централизованными местами размещения ЛИБ (например, центры обработки данных, системы

накопления электрической энергии и т.д.), но и для иных объектов (жилые и общественные здания, больницы, торговые центры, магазины электроники, офисы и т.п.), где возможно наличие аккумуляторных сборок в составе устройств повседневного использования (источники бесперебойного питания, повербанки, аккумуляторный рабочий инструмент, электросамокаты и т.д.). Накопление газов в таких помещениях при загорании нескольких ячеек ЛИБ способно создать опасную обстановку уже на ранней стадии без видимого пламени.

В связи с этим при оценке ОФП при тепловом разгоне ЛИБ требуется:

- дополнительно учитывать сценарии с выделением HF при оценке времени наступления ОФП, так как пожары с участием ЛИБ имеют определенную специфику

по составу продуктов горения, отличных от стандартных (CO, CO₂, углеводороды);

- предусматривать газоаналитический контроль, проектирование аварийной вентиляции (при необходимости), а также применение противопожарных полотен и средств индивидуальной защиты органов дыхания при тушении пожаров и эвакуации людей;
- проводить дополнительные экспериментальные исследования и разработку моделей для количественной оценки накопления CO₂, CO и HF, а также методик, описывающих поведение батарейных сборок с разными типами и видами ячеек ЛИБ в условиях теплового разгона.

Комплексный подход к анализу и моделированию таких ситуаций позволит повысить пожарную безопасность на объектах с наличием ЛИБ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mossali E., Picone N., Gentilini L., Rodriguez O., Pérez J.M., Colledani M. Lithium-ion batteries towards circular economy : a literature review of opportunities and issues of recycling treatments // *Journal of Environmental Management*. 2020. No. 264. P. 110500. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110500
2. Itani K., De Bernardinis A. Review on New-Generation Batteries Technologies: Trends and Future Directions // *Energies*. 2023. No. 16 (22). P. 7530. DOI: 10.3390/en16227530. EDN QBBJWT.
3. Guo R., Yang Y., Huang X.L., Zhao Ch., Hu.B., Hou. F. et al. Recent Advances in Multifunctional Binders for High Sulfur Loading Lithium-Sulfur Batteries // *Advanced Functional Materials*. 2023. No. 34 (1). DOI: 10.1002/adfm.202307108.EDNHDDVON.
4. Lee B.-J., Zhao Ch., Yu J.-H., Kang T.-H., Park H.-Y. Kang. J. et al. Development of high-energy non-aqueous lithium-sulfur batteries via redox-active interlayer strategy // *Nature Communications*. 2022. No. 13 (4629). DOI: 10.1038/s41467-022-31943-8
5. Mahne N., Fontaine O., Thotiyil M.O., Wilkening M., Freunberger A.A. Mechanism and performance of lithium-oxygen batteries – a perspective // *Chemical Science*. 2017. No. 8 (10). Pp. 6716–6729. DOI: 10.1039/C7SC02519J
6. Ferraro M., Tumminia G. Techno-economics Analysis on Sodium-Ion Batteries: Overview and Prospective // *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition*. 2024. Pp. 259–266. DOI: 10.1007/978-3-031-48359-2_14
7. Andersen H.F., Foss C.E. L., Voje J., Tronstad R., Mokkelbost T., Vullum P.E. et al. Silicon-Carbon composite anodes from industrial battery grade silicon // *Scientific Reports*. 2019. No. 9 (14814). DOI: 10.1038/s41598-019-51324-4
8. Liu X., Zhu X., Pan D. Solutions for the problems of silicon-carbon anode materials for lithium-ion batteries // *Royal Society Open Science*. 2018. No. 5 (6). P. 172370. DOI: 10.1098/rsos.172370
9. Liu Y., Shao R., Jiang R., Song X., Jin Zh., Sun L. A review of existing and emerging binders for silicon anodic Li-ion batteries // *Nano Research*. 2023. No. 16 (5). Pp. 6736–6752. DOI: 10.1007/s12274-022-5281-7. EDN FBREOD.
10. Zhou K., Fang Y., Bao M., Fan W., Ren J., He P. et al. Self-Extinguishing Polyimide Sandwiched Separators for High-Safety and Fast Charging Lithium Metal Batteries // *Journal of Power Sources*. 2024. No. 610. P. 234734. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.234734. EDN FXLSHU.
11. Скундин А.М., Кулова Т.Л., Григорьева О.Ю. Литий-ионные аккумуляторы : учебное пособие. М. : Издательство МЭИ, 2022. 99 с.
12. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // *Journal of Energy Chemistry*. 2020. No. 59. Pp. 83–89. DOI: 10.1016/j.jchem.2020.10.017. EDN DVVEBL.
13. Golubkov A.W., Fuchs D., Wagner J., Wiltsche H., Stangl Ch., Fauler G. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes // *RSC Advances*. 2014. No. 4 (7). Pp. 3633–3642. DOI: 10.1039/C3RA45748F
14. Qi Ch., Wang H., Li M., Li Ch., Li Y., Shi Ch. et al. Research on the Thermal Runaway Behavior and Flammability Limits of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries // *Batteries*. 2025. No. 11 (1). P. 24. DOI: 10.3390/batteries11010024. EDN WXMKZO.

15. Yuan Y., Ma Q., Zhang X., Zhang F., Song X., Xin H. Influence of cathode materials on thermal characteristics of lithium-ion batteries // *Frontiers in Chemistry*. 2024. No. 12. P. 13248440. DOI: 10.3389/fchem.2024.1324840. EDN HBTTF0.
16. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle, S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry // *Energy & Environmental Science*. 2012. No. 5 (1). Pp. 5271–5280. DOI: 10.1039/C1EE02218K
17. Chen M., Zhou D., Chen X., Zhang W., Liu J. Yuen R. et al. Investigation on the thermal hazards of 18650 lithium ion batteries by fire calorimeter // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. No. 122. Pp. 755–763. DOI: 10.1007/s10973-015-4751-5
18. Mazzaro M., Russo P., Longobardo G., Di Bari C., Cancelliere P. Fire Behaviour of NMC Li-ion Battery Cells // *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Saint Petersburg, 2019. No. 2. Pp. 881–890. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-136
19. Мокряк А.В., Мокряк А.Ю., Мельник А.А. Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 4 (130). С. 1–9. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.63. EDN RHSTQD.
20. Claassen M., Bingham B., Chow J.C., Watson J.G., Wang Y., Wang X. Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions. Part 1: Chemical Composition of Fine Particles (PM_{2.5}) // *Batteries*. 2024. No. 10 (9). P. 301. DOI: 10.3390/batteries10090301. EDN AHMGFL.
21. Claassen M., Bingham B., Chow J.C., Watson J.G., Wang Y., Wang X. Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions. Part 2: Particle Size Distributions and Emission Factors // *Batteries*. 2024. No. 10 (10). P. 366. DOI: 10.3390/batteries10100366. EDN KLNQHV.
22. Han J.Y., Jung S. Thermal Stability and the Effect of Water on Hydrogen Fluoride Generation in Lithium-Ion Battery Electrolytes Containing LiPF₆ // *Batteries*. 2022. No. 8 (7). P. 61. DOI: 10.3390/batteries8070061. EDN ONJDBE.
23. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.-E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // *Scientific Reports*. 2017. No. 7 (1). Pp. 1–13. DOI: 10.1038/s41598-017-09784-z. EDN MCPGWD.
24. Teng Zh., Lv Ch. Detection toward early-stage Thermal runaway gases of Li-ion battery by semiconductor sensor // *Frontiers in Chemistry*. 2025. No. 13. DOI: 10.3389/fchem.2025.1586903
25. Tschirschwitz R., Bernardy Ch. Harmful effects of lithium-ion battery Thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules // *RSC Advances*. 2023. No. 13 (30). Pp. 20761–20779. DOI: 10.1039/d3ra02881j. EDN VXTQDC.

Материал поступил в редакцию 04.08.2025

Received August 04, 2025

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru