

УДК 614.841.41

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКСИЧНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОЖАРЕ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМ-ФАКТОРА 18650

Терентьев Дмитрий Иванович, Кокшаров Александр Викторович, Сатюков Роман Сергеевич  
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Аннотация.** Литий-ионные аккумуляторы представляют собой сложносоставную горючую нагрузку, пожаровзрывоопасные свойства которой в полной мере не изучены. Это обстоятельство подталкивает к изучению особенностей горения различных видов литий-ионных аккумуляторов. В дальнейшем, в случае накопления достаточного количества подробной информации о пожаровзрывоопасных свойствах данной горючей нагрузки, появится возможность учесть присутствие литий-ионных аккумуляторов на объектах защиты при оценке пожарных рисков. В статье рассмотрена специфика образования токсичной газовой среды, а также освещены особенности горения кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторов форм-фактора 18650 при наличии внешнего источника нагрева. По результатам проведенных экспериментов выполнены оценки средних величин удельной скорости выгорания, коэффициентов выделения углекислого и угарного газов, потребления кислорода при сгорании кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов форм-фактора 18650. Показано, что возгорание литий-ионных аккумуляторных элементов сопровождается не только горением струи выделяющихся горючих газов и материалов, но и выбросами частей конструкции и пылевых остатков электродных масс, содержащих значительные количества токсичных оксидов лития, кобальта, алюминия. В результате общая токсичность газовой среды на пожаре при горении литий-ионных аккумуляторов значительно увеличивается.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, самовоспламенение, математическая модель пожара, оценка пожарных рисков

**Для цитирования:** Терентьев Д. И., Кокшаров А. В., Сатюков Р. С. Особенности формирования токсичной газовой среды в помещении при пожаре кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных батарей, составленных из элементов форм-фактора 18650 // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 24–32.

## FEATURES OF THE FORMATION OF THE TOXIC GAS ENVIRONMENT IN A ROOM DURING A FIRE IN COBALT-CONTAINING LITHIUM-ION BATTERIES COMPOSED OF 18650 FORM FACTOR CELLS

**Abstract.** Lithium-ion batteries are a complex combustible load, the fire and explosive properties of which have not been fully studied. This fact encourages us to study the combustion characteristics of various types of lithium-ion batteries. In the future, if enough detailed information is accumulated on the fire and explosion properties of this combustible load, it will be possible to take into account the presence of lithium-ion batteries at protected facilities when assessing fire risks. In this paper, the specifics of the formation of the toxic gas environment are considered, the features of the combustion of cobalt-containing lithium-ion batteries of the 18650 form factor in the presence of an external heating source are also highlighted. Based on the results of the experiments, estimates of carbon dioxide and carbon monoxide gases, oxygen consumption during combustion of cobalt-containing lithium-ion battery cells of the 18650 form factor were made. It is shown that the ignition of lithium-ion battery cells is accompanied not only by the combustion of a stream of emitted flammable gases and materials, but also by emissions of parts of the structure and dust residues of electrode masses containing significant amounts of toxic oxides of lithium, cobalt, and aluminum. As a result, the overall toxicity of the gas environment during a fire when lithium-ion batteries are burning increases significantly.

**Keywords:** fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, flammable load properties, spontaneous combustion, mathematical model of fire, fire risk assessment

**For Citation:** Terentiev D. I., Koksharov A. V., Satukov R. S. Features of the formation of the toxic gas environment in a room during a fire in cobalt-containing lithium-ion batteries composed of 18650 form factor cells // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 24–32.

### **Экспериментальное определение пожароопасных свойств кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов форм-фактора 18650 при внешнем нагревании**

С целью определения пожароопасных свойств кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторов было проведено несколько экспериментов, в ходе которых аккумуляторные элементы форм-фактора 18650 подвергались внешнему нагреву выше 300 °С.

Экспериментальная установка представляла собой комплекс, включающий плиту нагревательную УН-4550.ULAB, держатель

аккумуляторного элемента, емкость из нержавеющей стали (50 л) для сбора продуктов сгорания, газоанализатор многокомпонентный переносной АГМ-510 и установку измерения температуры с набором термопар.

В ходе каждого эксперимента одиночный полностью заряженный литий-ионный аккумуляторный элемент 18650 (Samsung ICR 30A) помещался в установленный на нагревательную плиту держатель, выходное отверстие которого было направлено в приемное окно емкости для сбора продуктов горения. Для выполнения измерений концентраций газовых продуктов сгорания в емкости имелись отверстия для

щупа газоанализатора и устройства перемешивания газовой среды.

Исходная масса литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 составляла 46,4–47,2 г. Примерный исходный массовый состав исследованных аккумуляторных элементов 18650 ICR приведен в [1].

Эксперименты показали, что для принудительного воспламенения аккумуляторного элемента 18650 с помощью внешнего нагрева в экспериментальной установке требовалось 15–18 мин, при этом наружная температура его корпуса достигала 250 °С. Собственно возгорание представляло со-

бой резкий выброс искро-газовой пламенной струи, которое длилось примерно 1–2 с, после чего наблюдалось остаточное пламенное горение из отверстия предохранительного клапана аккумуляторного элемента в течение еще примерно 6 с.

Выяснилось, что при выходе искро-газовой струи происходит энергичный «отстрел» стального намоточного стержня (сердечника) с прикрепленными к нему частями ленты медного электрода и электродных масс (рис. 1) через отверстие предохранительного клапана в корпусе аккумуляторного элемента.



Рис. 1. Внешний вид сердечника после «отстрела» из воспламенившегося аккумуляторного элемента 18650

Fig. 1. The appearance of the core after "shooting" from the ignited 18650 battery cell

Описываемый «отстрел» оказывается достаточно энергичным, чтобы вызывать сдвиг держателя аккумуляторного элемента массой 150 г по поверхности нагревательной плиты на 10–12 см в сторону, противоположную направлению вылета искро-газовой струи. Такой эффект отдачи наблюдался в случае установки аккумуляторного элемента в держатель в горизонтальном направлении.

Выброшенные при отстреле сердечника частицы углерода, оксидов металлов, кусков медной и мелких чешуек обгоревшей алюминиевой фольги образуют пылевой остаток, который в ходе проведения эксперимента оседал в емкости для сбора газообразных продуктов горения.

Остатки алюминиевого электрода после сгорания представляют собой мелкие хрупкие чешуйки незначительной массы, кроме

одного случая, когда в емкости для сбора газов был найден тонкий слиток звездчатой формы массой 0,8 г размером 20 × 20 мм (рис. 2).

В другом случае сердечник застрял в предохранительном клапане аккумуляторного элемента, так что при выходе газовой струи вылет обрывков электродных лент и других частей конструкции не наблюдался.

Средняя масса твердых остатков аккумуляторного элемента 18650 (корпус вместе

с собранными намоточным стержнем, частями медного электрода и пылевидными остатками электродных масс) составила 35 г. Средняя масса «выстреливаемого» пылевого остатка составила 8 г.

Таким образом, данная горючая нагрузка характеризуется большой долей негорючих компонентов. Активно сгорающая часть составляет не более 25 % от исходной массы аккумуляторного элемента.



Рис. 2. Слиток алюминия, образовавшийся при воспламенении одного из аккумуляторных элементов 18650

Fig. 2. An aluminum ingot formed when one of the 18650 battery cells ignited

Результаты проведенного газоанализа позволили оценить средние величины коэффициентов выделения CO, CO<sub>2</sub> и потребления кислорода при сгорании данного вида горючей нагрузки. Полученные численные значения приведены в таблице.

Как видно из данных таблицы, величина расчетной удельной скорости газификации (выгорания) горючей нагрузки оказалась очень высокой в сравнении с показателями других типовых горючих нагрузок. Это объясняется тем фактом, что при горении литий-ионных аккумуляторов присутствует

скрытая фаза пиролиза компонентов, в результате чего накапливается внутреннее давление и достигаются условия для последующего скоростного выделения и воспламенения горючих материалов.

Помимо угарного и углекислого газов, а также возможных несгоревших паров электролитов и других продуктов взаимодействия [2–9], дополнительный вклад в токсичность газовой среды на пожарах с участием литий-ионных аккумуляторных элементов вносят аэрозоли оксидов лития, алюминия и кобальта, формирующие пылевое облако в области

**Таблица**  
**Средние величины коэффициентов выделения CO и CO<sub>2</sub>, потребления O<sub>2</sub> и скорости выгорания литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 Samsung ICR 30A**

Table  
 Average values of CO and CO<sub>2</sub> emission coefficients, O<sub>2</sub> consumption burn-out rate of 18650 Samsung ICR 30A lithium-ion battery cells

№	Наименование величины Name of the property	Обозначение, единица измерения Designation, unit of measurement	Значение Value
1	Коэффициент выделения углекислого газа Carbon dioxide emission coefficient	LCO <sub>2</sub> [кг/кг] [kg/kg]	0,3 ± 0,03
2	Коэффициент выделения угарного газа Carbon monooxide emission coefficient	LCO [кг/кг] [kg/kg]	0,0019 ± 0,0002
3	Коэффициент потребления кислорода Oxygen consumption coefficient	LO <sub>2</sub> [кг/кг] [kg/kg]	0,23 ± 0,02
4	Удельная скорость выгорания Specific burnout rate	$\Psi_{\text{уд}}$ кг/м <sup>2</sup> ·с kg/m <sup>2</sup> ·s	3,0 ± 0,3

выхода искро-газовой струи. Оксиды лития и алюминия являются веществами, раздражающими слизистые, и способны вызвать одышку [4–6]. Оксид кобальта считается чрезвычайно опасным в случае длительного воздействия [7], а в условиях пожара оказывает раздражающее влияние на кожу и слизистые, способен нарушить дыхание.

#### **Предварительный анализ химического состава пылевого остатка, выделяющегося при сгорании кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов**

Пылевые остатки, собранные в камере для сбора газовых продуктов горения, при промывании водой показывают выраженную щелочную реакцию (pH ~ 9–10), что указывает на присутствие значительных количеств оксида лития.

При обработке части пылевого остатка серной кислотой с последующим фильтрованием образуется раствор с характерным

розово-лиловым окрашиванием, указывающим на присутствие значительных количеств соединений кобальта (II).

Определение количественного содержания соединений кобальта в пылевом остатке, выделяемом при сгорании аккумуляторного элемента Samsung ICR 30A, было выполнено с использованием спектрофотометра UNICO 1201. Предварительная калибровка прибора выполнялась с использованием растворов, приготовленных из шестиводного азотнокислого кобальта марки «Ч». Спектрофотометрический анализ пылевого остатка, собранного после проведения экспериментов из емкости для сбора газовых продуктов, показал, что из каждого сгоревшего элемента Samsung ICR 30A при прорыве газовой струи выделяется в среднем 3,3 г оксида кобальта.

Из полученной информации следует, что воспламенение аккумуляторных элементов 18650 приводит к выбросу приблизительно трети от исходного количества электродных

масс. При условии, что соотношение компонентов в пылевом остатке сохраняется примерно равным их содержанию в исходных электродных массах, следует ожидать, что пылевой остаток также содержит около 2,4 г углерода и 0,7 г оксида лития. Кроме того, в состав пылевого остатка входит около 1,5 г оксида алюминия. Значит, сгорание алюминиевого электрода следует считать неполным.

### Выводы

Воспламенению принудительно нагретого кобальтсодержащего литий-ионного аккумуляторного элемента форм-фактора 18650 (и ему подобных) предшествует скрытый период пиролиза компонентов, приводящий к накоплению внутреннего давления в корпусе элемента. Непосредственно горение представляет собой резкий (до 2 с) выброс искро-газовой пламенной струи через отверстие клапана, отчасти напоминающий выстрел некачественным патроном из стрелкового оружия. При этом сердечник, подпиремый давлением скопившихся газов, вырывает части защитного клапана и увлекает за собой обрывки обоих электродов, вместе с примерно третьей частью всех электродных масс. Прорыв клапана приводит к образованию пламенной струи горючих газов, частичному сгоранию фольги алюминиевого электрода и выбросу пылевидных электродных масс, содержащих (в случае использования элементов ICR) графит и оксиды лития, алюминия, кобальта.

Из каждого сгоревшего аккумуляторного элемента 18650 Samsung ICR 30A в момент образования искро-газовой струи спо-

собно выделяется в виде аэрозолей около 3,3 г оксида кобальта  $\text{CoO}$ , 0,7 г оксида лития  $\text{Li}_2\text{O}$ , 2,4 г углерода  $\text{C}_{\text{тв}}$  и 1,5 г оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В целом выгорание аккумуляторной батареи, составленной из элементов 18650 или им подобных, имеет выраженный порционный характер. Применительно к разработке положений модели горения можно отметить, что суммарная скорость выгорания батареи, составленной из подобных аккумуляторных элементов, будет также зависеть от скорости нагрева элементов, соседних с уже загоревшимся, что через некоторый интервал времени должно приводить к их воспламенению (выпуску очередных искро-газовых порций).

В данной работе были оценены средние величины коэффициентов выделения  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ , потребления  $\text{O}_2$  и удельной скорости выгорания литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 Samsung ICR 30A. Показано, что величина удельной скорости выгорания по крайней мере на порядок превышает аналогичный показатель многих типовых горючих нагрузок, что объясняется спецификой горения — формированием скоростной горячей газовой струи при воспламенении элементов аккумуляторной батареи.

Следует ожидать, что токсичность продуктов горения литий-ионных аккумуляторных элементов будет более высокой в сравнении со многими распространенными углеродсодержащими горючими нагрузками, поскольку дополнительно на пожаре в помещении присутствует угроза вдыхания горячей пыли с высоким содержанием токсичных оксидов металлов, оказывающих влияние на слизистые и функцию легких.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
2. Основные положения о пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // О. В. Двоенко [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 34–47.
3. Орлов О. И., Комельков В. А., Сорокин Д. В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (48). С. 177–188.
4. Подробнее о «Оксид лития» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny32o> (дата обращения: 25.05.2025).
5. Токсичность лития. Техника безопасности при работе с литием // ПЗПС : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny3Fi> (дата обращения: 25.05.2025).
6. Подробнее о «диАлюминий триоксид» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny3Ws> (дата обращения: 25.05.2025).
7. Подробнее о «Кобальт оксид» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://rpohv.ru/online/detail.html?id=561> (дата обращения: 25.05.2025).
8. Контроль качества литий-ионных аккумуляторов / Д. В. Бессонов [и др.] // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 68–74.
9. Изучение термической устойчивости Li-ионных батарей / Д. В. Бессонов [и др.] // Безопасность критичных инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур «Safety 2018» : сб. ст. / науч. ред. С. А. Тимашев. Екатеринбург, 2018. С. 102–104.

**REFERENCES**

1. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries / D. I. Terentyev et al. // Technosphere safety. 2024. № 3 (44). pp. 25–34.
2. Basic provisions on the fire hazard of lithium-ion batteries / O. V. Dvoenko et al. // Technosphere safety. 2024. № 4 (45). pp. 34–47.
3. Orlov O. I., Komelkov V. A., Sorokin D. V. Fire hazard of lithium-ion batteries // Modern problems of civil protection. 2023. № 4 (48). pp. 177–188.
4. Learn more about Lithium oxid // Federal Register of potentially dangerous chemical and biological substances / NIAC RPOKHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://clck.ru/3Ny32o> (date of application: 25.05.2025).
5. Lithium toxicity. Safety precautions when working with lithium. URL: <https://clck.ru/3Ny3Fi> (date of application: 25.05.2025).

6. Learn more about Dialuminium Trioxide // Federal Register of potentially dangerous chemical and biological substances / NIAC RPOKHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://clck.ru/3Ny3Ws> (date of application: 25.05.2025).

7. Learn more about Cobalt Oxide // Federal Register of potentially hazardous chemical and Biological Substances / NIAC RPOHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://rpohv.ru/online/detail.html?id=561> (date of application: 25.05.2025).

8. Quality control of lithium-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Bulletin of the National Library of Railways. 2021. № 1 (47). pp. 68–74.

9. Study of the thermal stability of Li-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Safety of critical infrastructures and territories. Problems of safety of construction critical infrastructures «Safety 2018» : collection of articles Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg, 2018. pp. 102–104.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Терентьев Дмитрий Иванович**, канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИО УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: [terentyevdi@uigps.ru](mailto:terentyevdi@uigps.ru)

**Кокшаров Александр Викторович**, канд. хим. наук, доцент, начальник кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 182341; Scopus Author ID: 16022538900; e-mail: [koksharovav@uigps.ru](mailto:koksharovav@uigps.ru)

**Сатюков Роман Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, начальник УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 793362; e-mail: [satyukovrs@uigps.ru](mailto:satyukovrs@uigps.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitriy I. Terentiev**, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor, Leading Researcher, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: [terentyevdi@uigps.ru](mailto:terentyevdi@uigps.ru)

**Alexandr V. Koksharov**, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 182341; Scopus Author ID: 16022538900; e-mail: [koksharovav@uigps.ru](mailto:koksharovav@uigps.ru)

**Roman S. Satukov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the educational and scientific complex, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 793362; e-mail: satyukovrs@uigps.ru

Поступила в редакцию 30.05.2025  
Одобрена после рецензирования 01.07.2025  
Принята к публикации 15.09.2025