

УДК 614.841.41

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Терентьев Дмитрий Иванович, Сатюков Роман Сергеевич, Тикина Ирина Владимировна
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. На фоне продолжающегося активного распространения и расширения областей применения литий-ионных аккумуляторов в России и за рубежом продолжают фиксироваться случаи пожаров, вызванных их самовозгоранием. Для оценки пожарных рисков при хранении, эксплуатации или транспортировке данного вида горючей нагрузки на объектах защиты представляется целесообразным качественно и количественно оценить состав продуктов пиролиза химически активных компонентов литий-ионных аккумуляторов батареи. Задача определения состава газообразных продуктов пиролиза литий-ионных аккумуляторных батарей на момент, предшествующий их прорыву из корпуса батареи и воспламенению, может быть решена с применением методов термодинамического моделирования с использованием предельных принципов термодинамики. Информация о составе пиролизных газов позволит создать модель горения литий-ионных аккумуляторных батарей, представляющую данный процесс как горение струи горючих газов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, тепловой разгон, модель горения, оценка пожарных рисков

Для цитирования: Терентьев Д. И., Сатюков Р. С., Тикина И. В. Термодинамическое моделирование состава горючих газов, образующихся при пиролизе литий-ионных аккумуляторных элементов // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 34–45.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE COMPOSITION OF COMBUSTIBLE GASES FORMED DURING THE PYROLYSIS OF LITHIUM-ION BATTERY CELLS

Dmitriy I. Terentiev, Roman S. Satukov, Irina V. Tikina
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Against the background of the ongoing active spread and expansion of the areas of application of lithium-ion batteries in Russia and abroad, cases of fires caused by their spontaneous combustion continue to be recorded. In order to assess the fire risks associated with the storage, operation, or transportation of this type of combustible load at protected facilities, it is advisable to qualitatively and quantitatively assess the composition of the pyrolysis products of the chemically active components of lithium-ion battery packs. The task of determining the composition

of the gaseous products of the pyrolysis of lithium-ion batteries at the moment preceding their breakthrough from the battery case and ignition can be solved using thermodynamic modeling methods using the limiting principles of thermodynamics. Information about the composition of the pyrolysis gases will allow to create a model of combustion of lithium-ion batteries, representing this process as the combustion of a jet of combustible gases.

Keywords: fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, properties of combustible load, thermal acceleration, combustion model, assessment of fire risk

For citation: Terentiev D. I., Satukov R. S., Tikina I. V. Thermodynamic modeling of the composition of combustible gases formed during the pyrolysis of lithium-ion battery cells // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 34–45.

Общие представления о химических взаимодействиях компонентов кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов при развитии теплового разгона

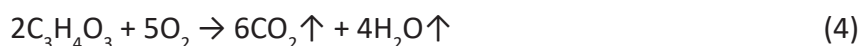
Считается, что выделение кислорода из электродной массы является решающим

фактором для старта теплового разгона. Применительно к кобальтсодержащим литий-ионным аккумуляторным элементам (ЛИАЭ), например, Samsung ICR форм-фактора 18650, источником появления кислорода внутри герметичного ЛИАЭ может быть распад электродной массы кобальтата лития LiCoO_2 ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$), предположительно, по схеме:



Выделение кислорода из оксидной электродной массы должно приводить к окислению органического электролита

(диметилкарбоната, диэтилкарбоната или этиленкарбоната), например, при полном окислении:



Эти реакции также являются экзотермическими.

С учетом того, что в аккумуляторном элементе, подверженном термическому разгону, полипропиленовый сепаратор, разделяющий электродные массы, с высокой вероятностью оказывается поврежденным (по крайней

мере, расплавленным), выглядит обоснованным предположение о распространении взаимодействий и на другие химически активные компоненты ЛИАЭ, в частности, восстановленные формы металлов (Li в углеродной электродной массе и Al). В этом случае дальнейший рост температуры внутри ЛИАЭ

должен приводить к увеличению количества межкомпонентных взаимодействий.

Следует отметить, что общая масса литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ), в том числе электромобилей, может достигать нескольких сотен килограммов, и они имеют составную структуру [1]. Такие батареи могут быть составлены из нескольких тысяч ЛИАЭ форм-фактора 18650, например, Тесла S может иметь батарею, составленную, в зависимости от модификации, из 5375 или 7104 ЛИАЭ. Установленные сборки аккумуляторных элементов представляют собой блоки, из которых собираются несколько модулей, образующих батарею, например, в последнем случае элементы соединены по схеме «6s74p». При такой составной компоновке пожар может начаться в каком-либо отдельном отсеке ЛИАБ, элементы которого по какой-либо причине перешли в критическое состояние. В этом случае уцелевшие отсеки ЛИАБ подвергнутся мощному внешнему нагреву от пожара, распространяющегося по электромобилю, что приведет к пиролизу (термическому разложению) компонентов основной массы сборок (блоков) аккумуляторных элементов и дальнейшему распространению горения [2].

Выглядит вполне обоснованным предположение о том, что пиролиз органических компонентов (электролит, сепаратор, пластиковые части предохранительного клапана) может приводить, помимо образования паров воды и углекислого газа по реакциям (2–4), также к образованию горючих газов — метана, угарного газа и молекулярного водорода [3, 4]. Образование и накопление этих газообразных продуктов неизбежно ведет к росту внутреннего давления, что в последующем провоцирует разгерметизацию элемента, ин-

тенсивный выброс и возгорание скоростной искро-газовой струи [5–8].

Очевидно, что для подробного описания высокотемпературного состояния системы «компоненты ЛИАЭ при пиролизе» на момент, предшествующий разгерметизации, из-за большого количества как предполагаемых участников, так и продуктов этих взаимодействий следует использовать специализированные расчетные методы.

Постановка компьютерного эксперимента

Оценка высокотемпературных взаимодействий между компонентами аварийного литий-ионного аккумуляторного элемента может быть выполнена с применением термодинамического моделирования. Этот метод позволяет качественно и количественно оценить равновесный состав продуктов высокотемпературного пиролиза герметичного ЛИАЭ исходя из предельных принципов термодинамики [9].

Для выполнения расчета равновесного высокотемпературного состава исследуемой системы был использован программный комплекс Terra. В состав данного программного комплекса входят расширенная база данных термодинамических свойств индивидуальных веществ (создана на основе базы «ИВТАНТЕРМО») и расчетный модуль, использующий критерий максимизации энтропии системы для численного поиска значений параметров ее равновесного состояния.

В таблице приведены количества компонентов кобальтсодержащего ЛИАЭ, предположительно способных взаимодействовать друг с другом при пиролизе. Эти данные были использованы для задания к расчету исходного состава системы.

Предварительно в базу данных программного комплекса Terra была добавлена информация о наборе термодинамических свойств кобальтата лития LiCoO_2 , полученная из базы данных HSC 9. Наборы свойств других предполагаемых участников взаимодействий, в т. ч. вышеупомянутых, уже присутствовали в базе данных программного комплекса.

Термодинамическое моделирование высокотемпературного равновесного состава

исследуемой системы было выполнено в температурном интервале 373–1073 К, с шагом 25 градусов.

Для оценки влияния высокого давления на равновесный состав продуктов пиролиза было выполнено два расчета — для давлений 0,1 и 0,5 МПа.

Возможность образования конденсированных растворов для продуктов взаимодействия в расчете не рассматривалась.

Таблица
Компоненты литий-ионного аккумулятора Samsung ICR 30A 18650,
предположительно способные к взаимодействиям при пиролизе

Table
Components of the Samsung ICR 30A 18650 lithium-ion battery
that are potentially capable of pyrolysis interactions

№	Наименование компонента Component name	Химическая формула Chemical formula	Масса, г Weight, g	Массовая доля, % Mass fraction, %
1	Пластиковые части клапана и оболочки, сепаратор Plastic parts of the valve and shell, separator	$\text{C}_3\text{H}_6(\text{n})$	2	6
2	Электролит (диметилкарбонат) Electrolyte (dimethyl carbonate)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	6	18
3	Углеродная масса Carbon mass	C	8	24
4	Кобальтат лития Lithium cobaltate	LiCoO_2	15	45
5	Восстановленная форма лития The reconstituted form of lithium	Li	1	3
6	Алюминиевая фольга Aluminum foil	Al	1(2)	3
7	Разбавитель газовой фазы (по требованию к расчету) Gas phase diluent (upon request)	Ar	0,3	1

Результаты термодинамического моделирования

На рис. 1 и 2 показаны температурные зависимости равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ

Samsung ICR 30A 18650» при давлениях 1 и 5 атм. Согласно полученным результатам моделирования, в обоих расчетах основными компонентами газовой фазы являются метан и молекулярный водород, т. е. газовую фазу образуют продукты разложения органических

компонентов ЛИАЭ (сепаратора, электролита, пластиковых элементов). При этом в температурном интервале 373–773 К при давлении 1 атм ведущим компонентом газовой среды является метан. При дальнейшем повышении равновесной температуры его начинает замещать молекулярный водород.

При повышении равновесного давления с 1 до 5 атм температурный интервал, в котором метан является лидирующим компонентом газовой фазы, становится шире: 373–873 К.

Из рис. 1 и 2 можно отметить, что повышение давления влияет на расположение

высокотемпературного интервала конверсии метана — при 1 атм наблюдается более интенсивное потребление метана с образованием угарного газа, конденсированного углерода и углекислого газа, при этом интенсивное увеличение содержания CO , CO_2 становится заметным с 973 К. При давлении 5 атм интенсивный рост содержания CO , CO_2 начинается только выше 1 048 К, т. е. рост равновесного давления в системе приводит к снижению образования молекулярного водорода и расширению температурного диапазона, в котором главным компонентом газовой фазы является метан.

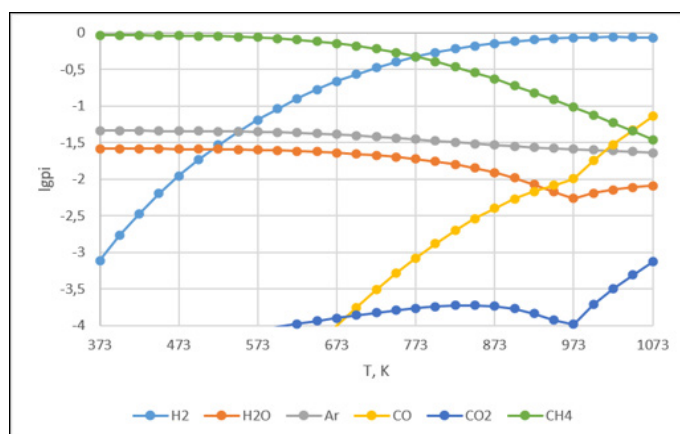


Рис. 1. Температурная зависимость равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 1. Temperature dependence of the equilibrium composition of the gas phase in the high-temperature system «Samsung ICR 30A 18650 LRE» at a pressure of 1 atm

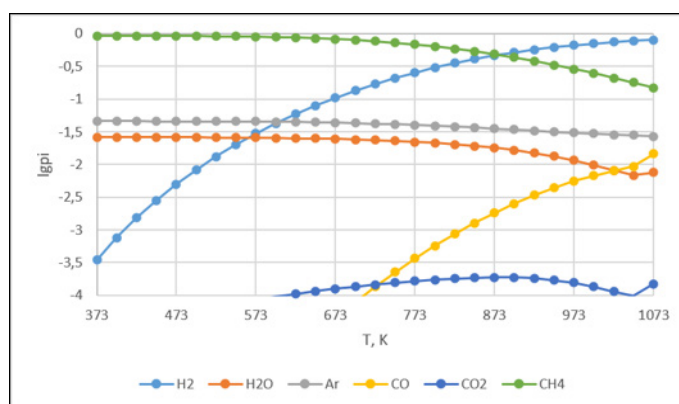


Рис. 2. Температурная зависимость равновесного состава газовой фазы в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 2. Temperature dependence of the equilibrium composition of the gas phase in the high-temperature system «Samsung ICR 30A 18650 LRE» at a pressure of 5 atm

В целом результаты моделирования температурной зависимости равновесного состава газовой фазы позволяют сделать следующие выводы:

1. С точки зрения предельных принципов термодинамики, процесс термического разложения компонентов внутри ЛИАЭ приводит к образованию смеси метана и водорода.

2. Соотношение метан/водород в газовой смеси сильно зависит от температуры в системе.

3. При увеличении равновесного давления в системе с 1 до 5 атм температурный

интервал, в котором лидирующим компонентом газовой фазы является метан, расширяется на 100 градусов и соответствует диапазону 373–873 К.

На рис. 3 и 4 показаны балансы распределения водорода между компонентами в исследуемой системе при равновесном давлении 1 и 5 атм. Поскольку водород как элемент входит в состав обоих основных горючих компонентов газовой фазы, рис. 3 и 4 следует воспринимать как температурную зависимость компонентного состава газообразного топлива, имеющегося в данной горючей нагрузке.

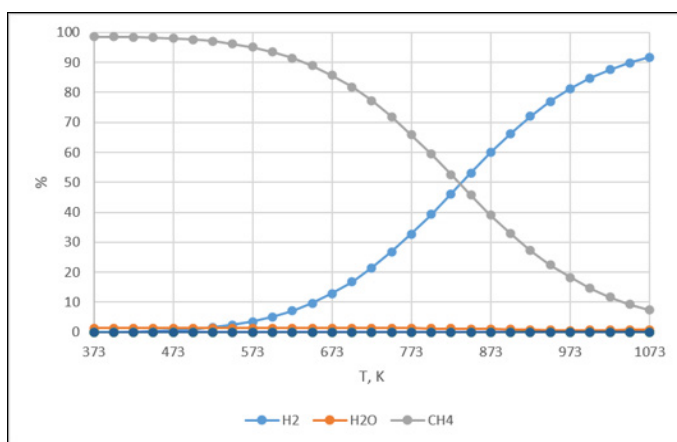


Рис. 3. Баланс водорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 3. Hydrogen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

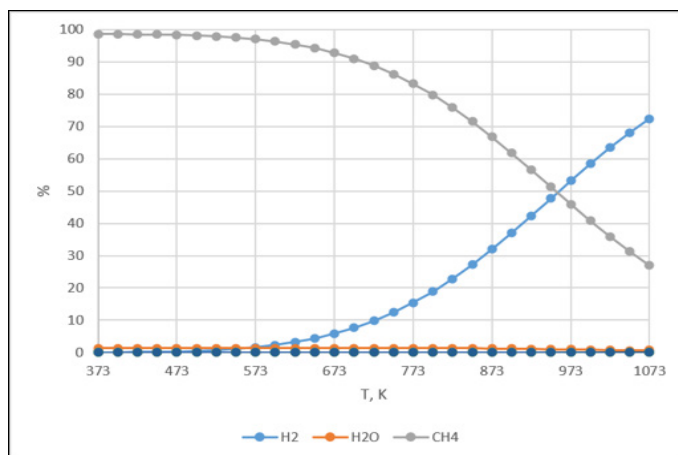


Рис. 4. Баланс водорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 4. Hydrogen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

Также следует обратить внимание, что ожидаемое из реакций (2–4) образование паров воды, согласно результатам моделирования, оказалось полностью устранено за счет их взаимодействия с активными ме-

таллами в системе: при окислении парами воды лития получился конденсированный карбонат лития, алюминия — конденсированный оксид Al_2O_3 , а водород вернулся в состав топливных газов.



Следует отметить, что протекание реакции (5) в интервале температур 373–933 К более вероятно, чем реакции (6), поскольку на практике наличие оксидной пленки на алюминиевой фольге способно в определенной степени удерживать алюминий от взаимодействия с другими химически активными компонентами за счет ограничений химической кинетики.

Из рис. 3 и 4 также можно видеть ранее отмеченный эффект повышения стабильности содержания метана как основного компонента газовой фазы при увеличении равновесного давления. Если при равновесном давлении 1 атм паритет между метаном и молекулярным водородом достигается в области ~830 К, то при давлении 5 атм содержание водорода в этих газах сравнивается при ~950 К.

На рис. 5 и 6 показаны балансы кислорода в исследуемой системе при равновесных давлениях 1 и 5 атм. Данные графики демонстрируют, что в случае вовлечения в описываемые высокотемпературные взаимодействия химически активных металлов практически весь кислород системы оказывается в составе оксидных или солевых конденсированных соединений этих металлов. При равновесном давлении 1 атм в широком температурном диапазоне 373–998 К 88 % кислорода содержится в виде кон-

денсированного карбоната лития Li_2CO_3 , 11 % — в виде конденсированного оксида алюминия Al_2O_3 , 0,9 % — в виде паров воды. Изменения в таком распределении кислорода становятся заметными только при повышении равновесной температуры выше 1 023 К за счет термического разложения карбоната лития с образованием преимущественно угарного газа CO и конденсированного оксида лития Li_2O .

Из рис. 5 и 6 следует, что при повышении равновесного давления с 1 до 5 атм увеличивается стабильность оксидных и солевых конденсированных фаз, в результате чего в области температур 973–1073 К практически отсутствуют заметные на рис. 5 признаки термического разложения карбоната лития.

Из балансов кислорода также следует, что, с точки зрения термодинамического моделирования, алюминиевая электродная фольга еще на стадии пиролиза полностью окисляется кислородом, поставляемым из электродной массы кобальтата лития. Это противоречит результатам натурных экспериментов, демонстрирующих горение частиц алюминия после разгерметизации аккумуляторных элементов на воздухе с образованием характерного фонтана искр. Таким образом, процесс искрообразования в модели горения следует оценивать дополнительными средствами.

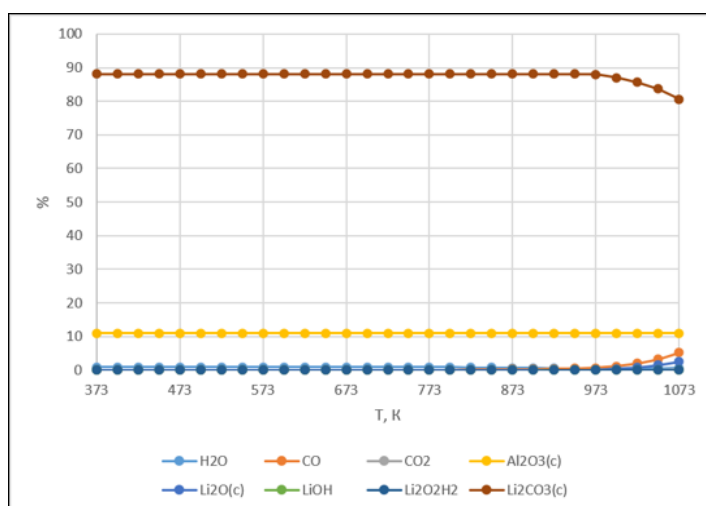


Рис. 5. Баланс кислорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм

Fig. 5. Oxygen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

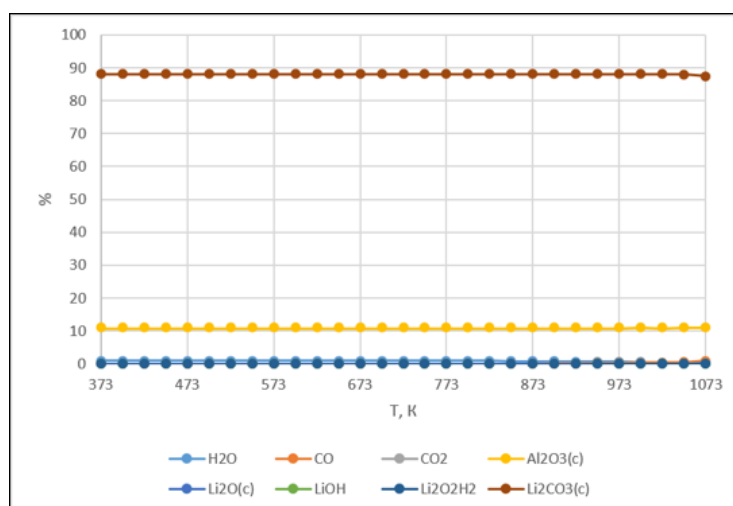


Рис. 6. Баланс кислорода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм

Fig. 6. Oxygen balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

На рис. 7 и 8 показаны балансы углерода в исследуемой системе при равновесных давлениях 1 и 5 атм.

Из рис. 7 следует, что при давлении 1 атм в температурном интервале 373–723 К конденсированная углеродная фаза демонстрирует выраженную химическую инертность. Примерно 15 % углерода системы содержится в виде конденсированного кар-

боната лития, столько же — в виде метана, остальные 70 % представлены конденсированной углеродной фазой.

Также из рис. 7 следует, что в температурном интервале 673–1023 К наблюдается уменьшение содержания метана, продуктами взаимодействия в этом случае являются молекулярный водород и конденсированный углерод:



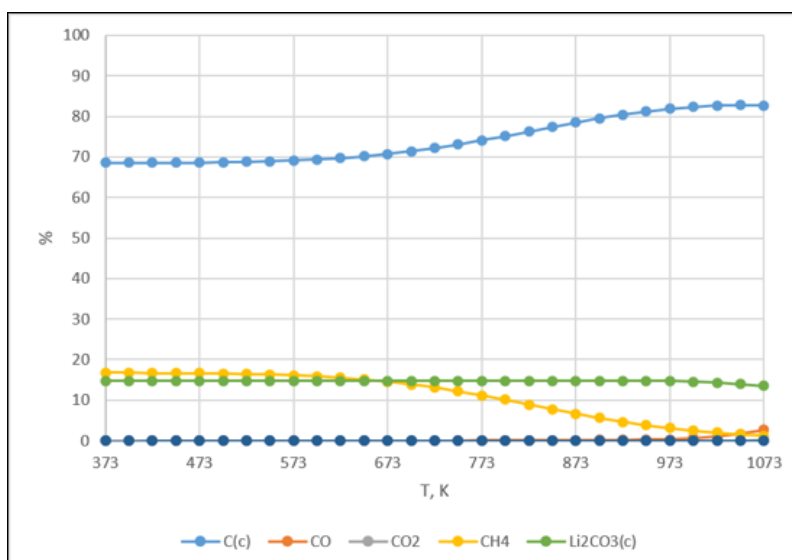


Рис. 7. Баланс углерода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 1 атм
 Fig. 7. Carbon balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 1 atm

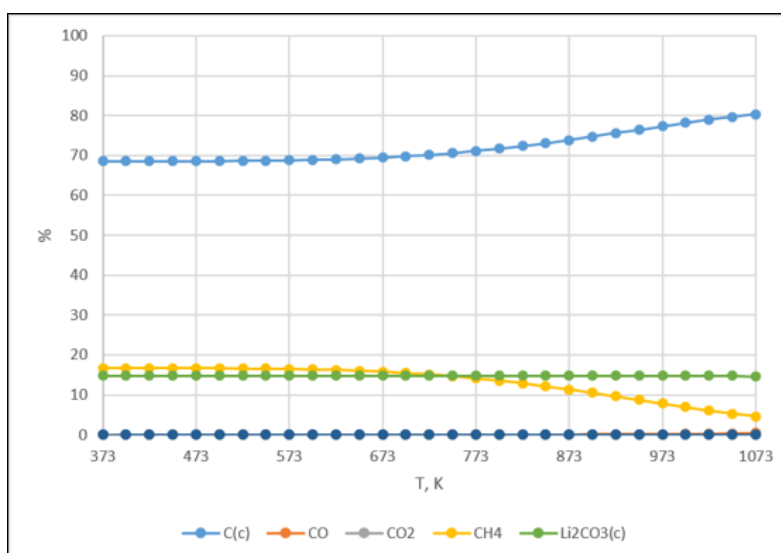


Рис. 8. Баланс углерода в высокотемпературной системе «ЛИАЭ Samsung ICR 30A 18650» при давлении 5 атм
 Fig. 8. Carbon balance in the high-temperature Samsung ICR 30A 18650 LRE system at a pressure of 5 atm

Данные рис. 7 и 8 свидетельствуют, что при увеличении равновесного давления с 1 до 5 атм изменения в распределении углерода в системе выражаются в снижении степени конверсии метана в температурном интервале 873–1073 К, которая теперь преимущественно протекает по схеме (7), в результате чего образование угарного газа по схеме (8) оказывается пренебрежимо малым.

Выводы

1. Результаты термодинамического моделирования состава газообразных продуктов пиролиза аккумуляторных элементов Samsung ICR 30A 18650 позволяют рассматривать поврежденную литий-ионную батарею как емкость, в которой под давлением скапливаются готовые к воспламенению горючие газы, т. е. процесс рассматривается

с точки зрения пожара класса С. Основным компонентом газовой смеси, продуцируемой пиролизом компонентов литий-ионных аккумуляторов, можно считать метан, дополнительным — молекулярный водород. Масса продуцируемых пиролизом горючих газов составляет 20–25 % от общей массы литий-ионной аккумуляторной батареи в соответствии с исходным содержанием в ней органических материалов (электролита, сепаратора, других пластиковых частей).

2. Результаты термодинамического моделирования состава пиролизных газов в литий-ионных аккумуляторных батареях представляют собой предельное представление о потенциале горения данной горючей нагрузки, т. е. не учитывают возможность кинетических ограничений в ходе реализации взаимодействий компонентов, способных ограничивать накопление горю-

чих компонентов в системе. С точки зрения расчетов пожарных рисков, такой подход представляется оптимальным, поскольку является наихудшим сценарием пожара.

Таким образом, основные положения модели горения литий-ионных аккумуляторных батарей, необходимой для расчетов пожарных рисков, могут быть приняты из факта принадлежности данной горючей нагрузки к пожарам класса С.

Следует отметить, что из-за выброса части электродных масс, сопровождающего прорыв и воспламенение пиролизных газов, а также горения частей алюминиевого электрода, для учета специфики динамики дымообразования и токсичности газовой среды желательно использовать в модели горения соответствующие дополнения, позволяющие повысить точность прогнозирования динамики опасных факторов пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В России к 2030 году будет создана новая высокотехнологичная отрасль по производству электромобилей // Министерство экономического развития Российской Федерации : официальный сайт. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (дата обращения: 25.05.2025). Дата публикации: 23.08.2021.
2. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
3. Орлов О. И., Комельков В. А., Сорокин Д. В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.
4. Елисеев Ю. Н., Мокряк А. В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2020. № 3. С. 14–17.
5. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.
6. Харламенков А. С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 3. С. 96–102.
7. Контроль качества литий-ионных аккумуляторов / Д. В. Бессонов [и др.] // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 68–74.
8. Изучение термической устойчивости Li-ионных батарей / Д. В. Бессонов [и др.] // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур «Safety 2018» : сборник статей. Екатеринбург, 2018. С. 102–104.

9. Белов Г. В., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М., 2013. 96 с.

REFERENCES

1. A new high-tech industry for the production of electric vehicles will be created in Russia by 2030 // Ministry of Economic Development of the Russian Federation : official website. URL: <https://clck.ru/3QArMe> (accessed 25.05.2025). Date of publication: 23.08.2021.
2. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries / D. I. Terentyev [et al.] // Technosphere safety. 2024. No. 3 (44). P. 25–34.
3. Orlov O. I., Komelkov V. A., Sorokin D. V. Fire hazard of lithium-ion batteries // Modern problems of civil protection. 2023. No. 4 (48). P. 177–188.
4. Yelisseyev Yu. N., Mokryak A. V. Analysis of fire hazard of lithium-ion batteries // Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia. 2020. No. 3. P. 14–17.
5. Crafts C., Borek T., Mowry C. Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells. Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C, May 2000.
6. Kharlamenkov A. S. Fire hazard of using lithium-ion batteries in Russia // Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 96–102.
7. Quality control of lithium-ion batteries / D. V. Bessonov [et al.] // Bulletin of the National Library of Railways. 2021. No. 1 (47). P. 68–74.
8. 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. P. 102–104.
9. Belov G. V., Trusov B. G. Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems. Moscow, 2013. 96 p.

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; Researcher ID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@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

Тикина Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 843403; Scopus Author ID: 56444380800; Researcher ID: KMY-6069-2024; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: tikinaiv@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy I. Terentiev, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Leading Researcher of the Scientific research Department of the educational and scientific complex, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; Researcher ID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

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

Irina V. Tikina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 843403; Scopus Author ID: 56444380800; Researcher ID: KMY-6069-2024; ORCID: 0000-0001-6262-1580; e-mail: tikinaiv@uigps.ru