



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.08>

О. В. Лазаренко

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598> – О. В. Лазаренко

✉ lazarenkoalexandr@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОДУКТІВ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДУ ЯК СПОСІБ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАГОРАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЖИВЛЕННЯ

Вступ. Різноманітні пожежні сповіщувачі та давачі залежно від своїх характеристик виявляють осередки горіння на ранніх стадіях загорань, що призводить до спрацювання систем пожежогасіння та/або виклику оперативно-рятувальних підрозділів. Однак, такий шлях виявлення горіння може бути запізнілим та неефективним в разі горіння літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ) та акумуляторних батарей великої потужності на їх основі.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є аналіз продуктів термічного розкладу, що утворюються внаслідок виникнення незворотної термохімічної реакції у внутрішньому наповненні ЛІЕЖ з подальшим визначенням ключових параметрів, які можуть слугувати індикаторами початку виникнення незворотної термохімічної реакції в ЛІЕЖ. Для досягнення поставленої мети в роботі було: здійснено аналіз сучасного стану науково-обґрунтованих результатів експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу ЛІЕЖ; встановлено ключові показники та параметри типові для всіх ЛІЕЖ під час перебігу реакції термічного розкладу; визначено та обґрунтовано параметри та показники за якими можливо встановити початок горіння ЛІЕЖ.

Методи. Для вирішення поставлених задач дослідження необхідно здійснити аналітичне опрацювання сучасних результатів наукових досліджень (теоретичних та експериментальних) щодо визначення та встановлення хімічного складу та параметрів, що супроводжують термічний розклад внутрішнього наповнення ЛІЕЖ під час виникнення незворотної термохімічної реакції.

Результати. Встановлено, що основними показниками, що визначають початок виникнення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛІЕЖ є безпосереднє зростання абсолютного тиску в об'ємі розташування ЛІЕЖ внаслідок термічного розкладу твердого електроліту, аноду та катоду елемента. В подальшому зростає концентрація вуглекислого та чадного газу за рахунок інтенсивного розкладу та згорання інших продуктів термічного розкладу. В окремих випадках, зокрема при термічному розкладі ЛІЕЖ NCR 18650В, також може виділятися HF.

Висновки. На першопочаткових стадіях термічного розкладу елемента (90–120 °С) йде інтенсивне виділення C_2H_4 , CO_2 , CO , HF , DMS , EMC . Після зростання температурних показників вище (в межах 180–300 °С), відбувається інтенсивний термічний розклад DMS , EMC на такі сполуки як CH_3OCH_3 , C_2H_5OH , C_2H_6 , C_2H_4 ; основними показниками попереднього виявлення термічного розкладу ЛІЕЖ можна вважати зростання тиску в замкнутому об'ємі зберігання (використання) елементів, підвищення концентрації CO_2 , CO .

Ключові слова: продукти термічного розкладу, літій-іонний елемент живлення, ЛІЕЖ, реакція термічного розкладу, горіння ЛІЕЖ.

ANALYSIS OF THERMAL DECOMPOSITION PRODUCTS AS A METHOD FOR EARLY DETECTION OF LITHIUM-ION BATTERIES FIRE

Introduction. Various fire detectors and sensors, depending on their characteristics, detect combustion centers in the early stages of fire development, which leads to the activation of fire extinguishing systems and/or the call of emergency services. However, this way of preventing the spread of combustion may be delayed and ineffective in the case of burning lithium-ion batteries (LIB) and high-capacity rechargeable batteries based on them.

The purpose and objectives of the study. The aim of the work is to analyze the thermal decomposition products formed as a result of the occurrence of an irreversible thermochemical reaction in the internal filling of the LIB with the subsequent determination of key parameters, indicators that can serve as indicators of the onset of an irreversible thermochemical reaction in the LIB. To achieve the set goal, the work: analyzed the current state of scientifically substantiated results of experimental studies on the determination of thermal decomposition products of the LIB; established key indicators and parameters typical for all LIB during the course of the thermal decomposition reaction; determined and substantiated the parameters and indicators by which it is possible to establish the onset of combustion of the LIB.

Methods. To solve the research tasks, it is necessary to carry out an analytical study of modern results of scientific research (theoretical and experimental) on the determination and establishment of the chemical composition and parameters that accompany the thermal decomposition of the internal filling of the LIB during the occurrence of an irreversible thermochemical reaction.

Results. It has been established that the main indicators that determine the onset of thermal decomposition of the internal filling of the LIB are the direct increase in absolute pressure in the volume of the LIB location as a result of thermal decomposition of the solid electrolyte, anode and cathode of the element. Subsequently, the concentration of carbon dioxide and carbon monoxide increases due to intensive decomposition and combustion of other products of thermal decomposition. A separate indicator of the course of thermal decomposition of LIB is also the presence of a compound such as HF, in particular during the thermal decomposition of LIB NCR 18650B.

Conclusions. At the initial stages of thermal decomposition of the element (90–120 °C) there is an intensive release of C_2H_4 , CO_2 , CO , HF , DMC , EMC . After the temperature increases above (within 180–300 °C), there is an intensive thermal decomposition of DMC , EMC into such compounds as CH_3OCH_3 , C_2H_5OH , C_2H_6 , C_2H_4 and the rest of the combustible gases of the group; The main indicators of preliminary detection of thermal decomposition of LIB can be considered an increase in pressure in the closed volume of storage (use) of elements, an increase in the concentration of CO_2 , CO .

Key words: thermal decomposition products, lithium-ion battery, LIB, thermal decomposition reaction, LIB combustion.

Вступ. Статистика випадків загорань та пожеж кожного року змінюється, на жаль, досить часто загальна кількість пожеж зростає в тій чи іншій галузі промисловості чи інфраструктурних об'єктів. Одним з шляхів зменшення кількості випадків пожеж є системна робота відповідних служб та органів в напрямку превентивної діяльності. Проведення різноманітних інформаційно-роз'яснювальних заходів, тренінгів та загалом навчання населення правилам та вимогам пожежної безпеки спрямовані саме на зниження кількості пожеж в цілому на об'єктах різної форми власності. Додатковим заходом виявлення виникнення загорань та як наслідок розвитку пожежі є системи пожежної сигналізації та контролю, які на ранніх стадіях горіння дозволяють локалізувати та унеможливити перебіг горіння в цілому, що призводить до мінімальних матеріальних втрат та зберігає людські життя. Пожежні сповісвачі

залежно від своїх характеристик виявляють осередки горіння на ранніх стадіях горіння, що призводить до спрацювання систем пожежогасіння та/або виклику оперативного-рятувальних підрозділів. Відповідно до типу пожежного сповісвача вони можуть спрацьовувати на інтенсивне виділення продуктів горіння (диму), наявність інфрачервоного випромінювання або високої температури (теплові, інфрачервоні). Відповідно, такий засіб виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ) та акумуляторних батарей (АБ) великої потужності на їх основі може бути запізним та не ефективним.

Постановка проблеми. Низка наукових досліджень та практичні випадки горіння ЛІЕЖ засвідчують, що природа їхнього горіння та подальшого розвитку пожежі може бути як надзвичайно стрімкою – з появою інтенсивного полум'я та високими

температурними показниками (900–1000 °С) [1, 2], так і відбуватися повільно з виділенням значної кількості продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ без відкритого горіння [3]. Застосування в таких умовах типових пожежних сповіщувачів (димових, теплових, комбінованих, тощо) не призведе до швидкого виявлення загорань ЛПЕЖ чи АБ, а тим більше не здійснить оповіщення про виникнення загорання.

Враховуючи особливості будови та різноманіття ЛПЕЖ (циліндричні, призматичні, пакетні) та їх хімічного наповнення (LCO – літій-кобальт-оксид, NCA – літій-нікель-кобальт-алюміній-оксид, NCM – літій-нікель-манган-кобальт-оксид, LMO – літій-манган-оксид) [4] під час початку виникнення реакції термічного розкладу може відбуватися виділення різноманітних за своїм хімічним складом, хімічних речовин. Залежно від хімічного наповнення ЛПЕЖ продукти термічного розкладу будуть відрізнятися один від одного. Якісний склад продуктів термічного розкладу також залежить від того, в яких саме компонентах ЛПЕЖ протікає термічний розклад: в твердому електроліті, катоді чи аноді, а також від ступеня заряду елемента (SOC).

Зазначені факти та результати попередніх наукових досліджень дають підстави вважати, що під час горіння ЛПЕЖ мають бути розроблені спеціалізовані засоби раннього виявлення початку їх термічного розкладу та/або займання.

Постановка мети та завдань дослідження. Метою роботи є аналіз продуктів термічного розкладу, що утворюються внаслідок виникнення незворотної термохімічної реакції у внутрішньому наповненні ЛПЕЖ з подальшим визначенням ключових параметрів, показників які можуть слугувати індикаторами початку виникнення незворотної термохімічної реакції в ЛПЕЖ.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– здійснити аналіз сучасного стану науково-обґрунтованих результатів експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ;

– встановити ключові показники та параметри типові для всіх ЛПЕЖ під час перебігу реакції термічного розкладу;

– визначити та обґрунтувати параметри та показники за якими можливо встановити початок термічного розкладу ЛПЕЖ.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач дослідження необхідно здійснити аналітичне опрацювання сучасних результатів наукових досліджень (теоретичних та експериментальних) щодо визначення та встановлення хімічного складу та параметрів, що супроводжують

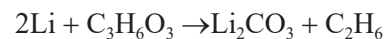
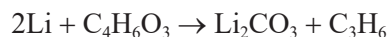
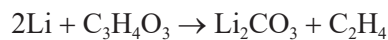
термічний розклад внутрішнього наповнення ЛПЕЖ під час виникнення незворотної термохімічної реакції.

Виклад основного матеріалу. Досить ранні дослідження особливостей термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ показують, що незалежно від виду хімічного складу аноду та катоду, першопочатково в наслідок зростання внутрішньої температури елемента та термічного розкладу твердого електроліту в середині елемента [5, 6] за температури 90–120 °С утворюються наступні речовини:



Відповідно хімічної реакції відбувається інтенсивне виділення вуглекислого газу та не значна частка кисню, що також пояснює ефект повторного займання елементів та складності їх гасіння традиційними методами.

Подальший перебіг термічного розкладу супроводжується порушенням контакту розділу поверхонь твердого електроліту з анодом елемента, що призводить до виділення горючих газів групи СН [7]. Продукти термічного розкладу твердого електроліту утворюють такі сполуки як диметилкарбонат ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$, далі – DMC), пропіленкарбонат ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$, далі – PC), етиленкарбонат ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$, далі – EC):

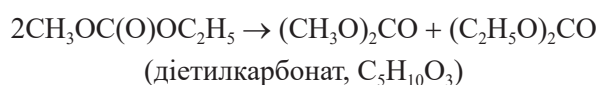


Подальше зростання температури ЛПЕЖ призводить до безпосередньої взаємодії катода і анода (внаслідок повної деструкції розділяючого прошарку при температурі 135–166 °С), що спричиняє коротке замикання, інтенсивне газо- й тепло-виділення та подальше горіння.

Подальший хімічний склад продуктів термічного розкладу буде вже залежати від типу катода, що використовується в ЛПЕЖ. Як правило, внаслідок розкладу будуть утворюватися оксиди металів, такі як Co_3O_4 для LCO [8], $\text{Li}_x\text{CO}_y\text{Al}_z\text{O}_p$ для NCA, $(\text{Mn}, \text{Ni})\text{O}$ та $\text{Li}_x(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ для NCM [9] та інші.

Висвітлені результати досліджень можна вважати основоположними та такими, що визначили подальші задачі дослідження для всіх видів ЛПЕЖ. Пізніші дослідження дають можливість отримати більш повний опис хімічного складу продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ з визначенням їх відсоткового співвідношення та додаткових параметрів, що впливають на їх концентрацію, об'єм, тощо.

Зокрема, значна кількість публікацій [10–12] присвячена детальному дослідженню термічного розкладу та згорання зокрема таких речовин як DMC, PC, EC. Так, у дослідженні [10] зазначено, що внаслідок підвищення температури в межах 280–300 °C відбувається стрімкий розклад DMC, в результаті чого, окрім уже наявних речовин, а саме карбон(II) оксиду (CO), карбон(IV) оксиду (CO₂), утворюються метанол (CH₃OH), метан (CH₄), диметиловий етер (CH₃OCH₃), ацетатна кислота (CH₃COOH). Додатково в дослідженні [11, 12] представлено детальний опис термічного розкладу вихідних сполук DMC та EMC (етилметилкарбонат, C₄H₈O₃) за температури 180–300 °C. Першочергово визначено, що DMC утворюється внаслідок розкладу EMC під час реакції:



Проведенні дослідження показали наявність відповідних речовин (табл. 1).

Висвітлені результати є безсумнівно актуальними, однак при розгляді питання можливості раннього виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ слід враховувати, що зазначені речовини є продуктами високотемпературного розкладу, який відбувається вже після розвитку горіння ЛПЕЖ.

За результатами дослідження [12] встановлено, що на склад і концентрацію продуктів термічного розкладу та подальшого горіння ЛПЕЖ, окрім уже зазначених чинників, впливають також способи їх нагрівання та ініціювання термохімічної реакції (нагрівання, механічне пошкодження, надмірна дія струму тощо). Точність отриманих результатів залежить від обраного методу визначення продуктів термічного розкладу і подальшого горіння, а також від точності використовуваної апаратури (зокрема, хроматографів, засобів спектрального аналізу тощо).

Додатково, в роботі [13] наведені результати експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу за початкової стадії термічного розкладу різних видів ЛПЕЖ, а саме: NMC (анод нікель-манган-кобальт), циліндричного формату 18650 – CH₄ (125–157 °C); LFP (анод літій-ферум-фосфат), циліндричного формату 26650 – DMC, EMC, C₂H₄, CO₂, CO, (80 °C); NCA, 18650 – CO₂, C₂H₂, (116–139 °C).

Варто зазначити, що в роботі [14] наведені результати щодо визначення першопочаткових продуктів термічного розкладу та особливо їхньої кількості для ЛПЕЖ пакетного формату. Цікавим є той факт, що в продуктах термічного розкладу виявлена незначна частка такої речовини як HF (гідроген флуорид). Також наведено розподіл

Таблиця 1

Хімічні речовини, які утворюються під час термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ відповідно до дослідження [12]

Продукти термічного розкладу	Температура термічного розкладу, °C					
	180		240		300	
	DMC	EMC	DMC	EMC	DMC	EMC
CH ₃ OC(=O)H	+	–	+	–	+	–
H ₂	+	+	+	+	+	+
CH ₃ OCH ₃	+	+	+	+	+	+
CO ₂	+	+	+	+	+	+
CO	–	–	+	+	+	+
CH ₃ OH	+	+	+	+	+	+
CH ₄	–	–	+	–	+	+
CH ₃ C(=O)OCH ₃	–	–	–	–	–	+
C ₂ H ₄	–	–	–	+	–	+
CH ₃ C(=O)H	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	–	–	–	–	–	+
CH ₃ OC ₂ H ₅	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₅ OH	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₆	–	–	–	–	–	+
C ₃ H ₆	–	–	–	–	–	+
DMC	–	+	–	+	–	+
EMC	–	+	–	+	–	+

Примітка: «–» – відповідний продукт термічного розкладу не виділяється, «+» – відповідний продукт термічного розкладу виділяється.

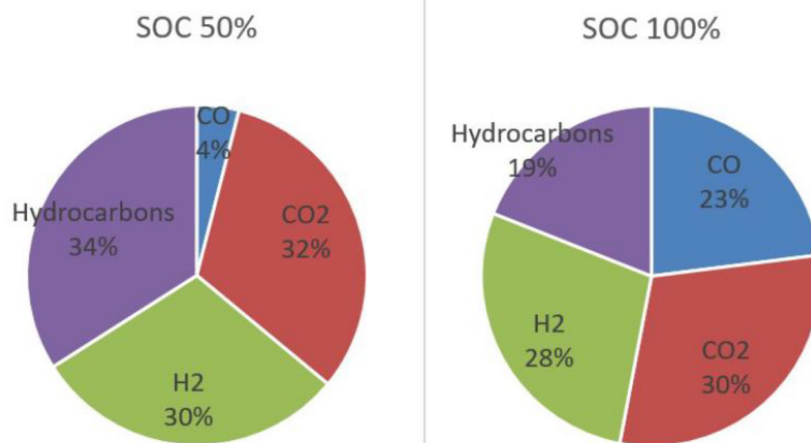


Рис. 1. Відсотковий склад продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ відповідно до [14, 15] залежно від ступеня заряду (SOC)

основних продуктів термічного розкладу залежно від ступеня заряду елемента (SOC) ЛПЕЖ (рис. 1).

Окрім того слід зауважити, що за результатами досліджень [15] також встановлено величину зростання тиску в середині камери згорання внаслідок термічного розкладу ЛПЕЖ, відповідно величина зміни тиску становила практично 50 % першопочаткового і склала 103 421 Па для ЛПЕЖ потужністю 7.7 Вт/год.

В переважній більшості, подальший аналіз наукових результатів досліджень [16-19] підтверджує наявність відповідних речовин відмінності стосуються, лише концентрації та об'єму продуктів термічного розкладу.

Однак дослідження [16] можна виокремити, оскільки в роботі наведені досить цікаві та інформативні результати з точки зору розподілу концентрації продуктів термічного розкладу саме залежно від температурних показників циліндричної ЛПЕЖ, особливо на ранніх стадіях початку термохімічної реакції. Окрім того, висвітлена залежність зміни тиску враховуючи інтенсивне виділення продуктів згорання. Використовуючи отримані результати [16], можна окремо зобразити наступні залежності рис. 2.

Отримані результати показують та вчергове підтверджують можливість виділення HF. Разом з тим концентрація всіх зазначених речовин інтенсивно збільшується впродовж процесу термічного розкладу наповнення ЛПЕЖ до моменту виникнення повноцінного горіння. Загальний час проведення експериментального дослідження, зокрема нагрівання ЛПЕЖ з інтенсивністю 5 °C/хв становив 4500 с. Максимальна температура нагрівання ЛПЕЖ становила 550 °C, що відповідає часу нагрівання 3150 с. Початок виявлення продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ припадає на 1600 с, що відповідає температурі близько 90 °C.

Як зазначають автори роботи [16], DMC схильний до подальшого розкладу, тому її концентрація є не стабільною і змінюється в сторону зменшення впродовж всього процесу термічного розкладу та безпосереднього подальшого горіння ЛПЕЖ. Результати представлені на рис. 2. важливі з точки зору подальшого визначення залежності зміни концентрації відповідних речовин під час протікання термохімічної реакції в ЛПЕЖ.

Загалом приведені дані щодо зміни концентрації DMC, відповідно корелюються з результатами попередніх досліджень [7-12]. Аналогічно кількісні показники наявності основних речовин, включно з HF, приведені в роботах [17-18].

Цікавим та вартим уваги показником під час термічного розкладу ЛПЕЖ є визначення та встановлення залежності об'єму продуктів термічного розкладу та величини зростання тиску у відповідному об'ємі. Якщо розглядати порядок виявлення та встановлення продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ, то це є процес, який, в першу чергу, вимагає зростання гранично допустимих показників концентрації відповідної речовини та особливо часу зростання і фіксації цієї концентрації речовини. Однак, такий параметр як зростання тиску відбувається набагато швидше і його передача в просторі відбувається за іншими принципами.

Щодо визначення зростання показників тиску під час виникнення незворотньої термохімічної реакції в середині ЛПЕЖ можна також виокремити результати наведені в роботі [19]. В роботі встановлено, що об'єм продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ може обраховуватися з розрахунку 0,94 л/Вт·год (для аноду типу LTO – літій-титан-оксид). Для порівняння в роботі [15] показники об'єму продуктів термічного розкладу на Вт енергії ЛПЕЖ становить в межах 0,2÷0,4 л/Вт·год. Відповідно, за таких умов загальний тиск під

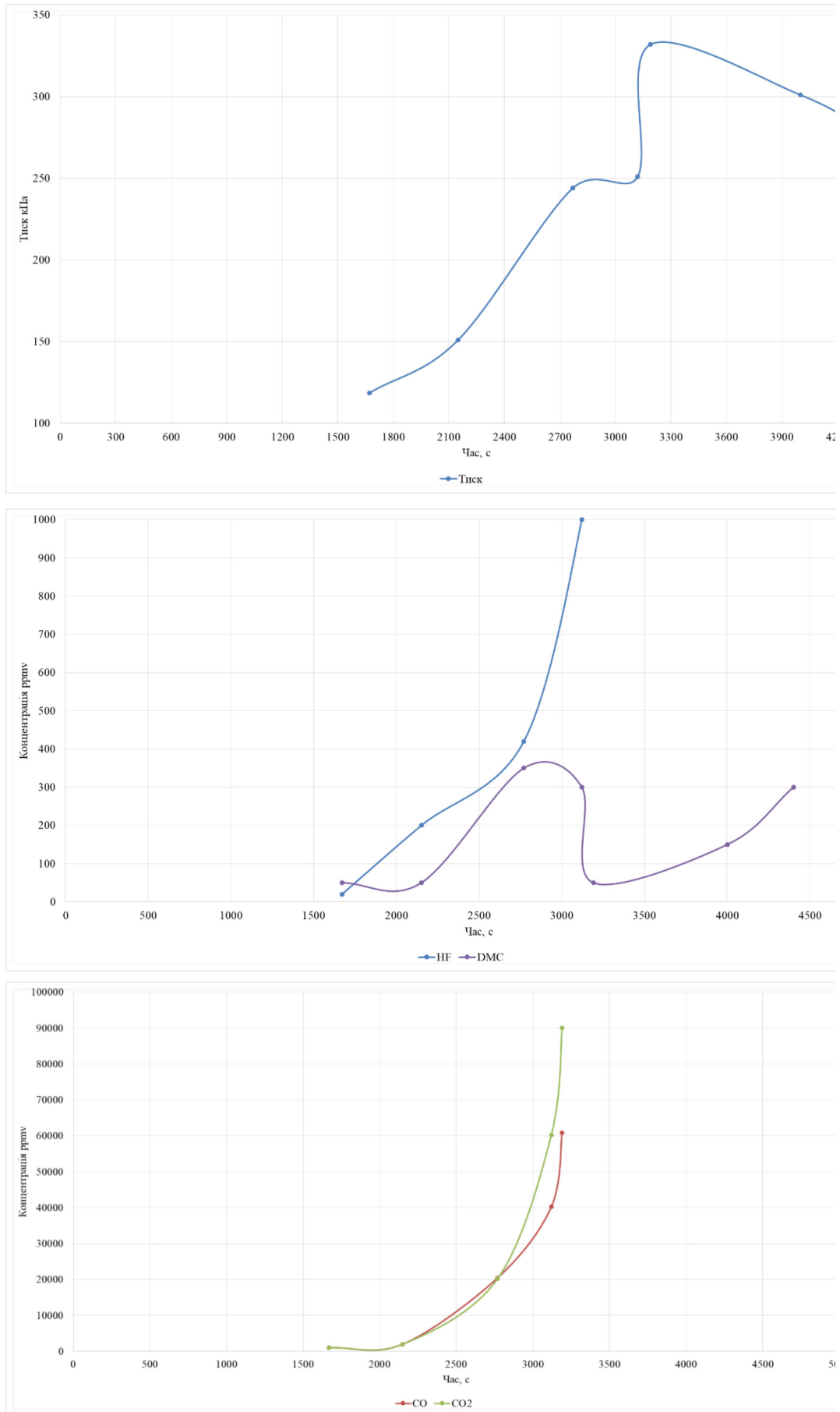


Рис. 2. Графік зміни концентрації продуктів термічного розкладу та тиску залежно від часу зростання температурних показників ЛПЕЖ (5 °С/хв) [16]

час перебігу термічного розкладу ЛПЕЖ формату 18 650 (NMC) може досягти до 232 бар, як це зазначено в роботі [19].

Питання актуальних методів та засобів раннього виявлення процесу термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ в різноманітних акумуляторних системах накопичення електроенергії присвячена значна кількість наукових досліджень. Узагальнюючим доробком останніх років можуть слугувати роботи [20, 21]. Так, в дослідженні [20] висвітлено основні сучасні підходи щодо можливості визначення початку незворотної термохімічної реакції, зокрема встановлено, що перспективними та надійними методами можуть бути акустичний, газоаналітичний, електротехнічний (зміна параметрів споживання елемента) та оптичний. Разом з тим, в роботі [21] наведені результати напрацювань щодо можливості виявлення початку термохімічної реакції в ЛПЕЖ використовуючи саме параметри зміни тиску середовища одночасно зі змінами електротехнічних показників елемента.

В роботі [22] представлено метод ультразвукового визначення критичних параметрів ЛПЕЖ з метою моніторингу початку безпосереднього термічного розкладу ЛПЕЖ. Дослідження [23] приводить результати розробки безпроводного датчика моніторингу температурних показників ЛПЕЖ формату 21700. Як додатковий показник виявлення початку незворотної термохімічної реакції в ЛПЕЖ в дослідженні [24] наведено залежність зміни спектру електрохімічного опору ЛПЕЖ залежно від температури елемента.

Окремим напрямком дослідження з виявлення початку виникнення термічного розкладу в ЛПЕЖ можна вважати напрямок розробки алгоритмів та матриць оцінки ризику виходу елемента з ладу [24, 25].

Отримані результати попередніх наукових досліджень та їх подальший аналіз дозволяє зробити висновок, що основними показниками, що супроводжують протікання незворотної термохімічної реакції та подальше займання ЛПЕЖ, є безпосереднє зростання тиску в об'ємі розташування ЛПЕЖ внаслідок термічного розкладу твердого електроліту, аноду та катоду елемента. В подальшому зростає концентрація вуглекислого та чадного газу за рахунок інтенсивного розкладу та згорання продуктів, які виділяються. Суперечливими та такими, що потребують подальшого дослідження і обґрунтування є результати експериментального визначення [16] наявності під час термічного розкладу ЛПЕЖ таких речовин як HF та CH_4 . Врахування відповідних показників може бути підґрунтям для подальшої розробки та

визначення показників спрацювання мультидатчика щодо раннього виявлення термічного розкладу ЛПЕЖ та подальшого його горіння.

Висновок. Відповідно до мети дослідження та проведеного огляду сучасного стану реалізації наукових досягнень щодо визначення хімічного складу продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ, можна зробити наступні висновки:

– об'єм та хімічний склад продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ залежить від ступеня заряду елемента, причини виникнення незворотної термохімічної реакції, внутрішнього наповнення елемента та стадії протікання незворотної термохімічної реакції всередині ЛПЕЖ;

– на першопочаткових стадіях термічного розкладу елемента (90–120 °C) в переважній більшості інтенсивно виділяються C_2H_4 , CO_2 , CO, HF, DMC, EMC. Після зростання температурних показників в межах 180–300 °C, відбувається інтенсивний термічний розклад DMC, EMC на CH_3OCH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, C_2H_6 , C_2H_4 , що в свою чергу призводить до зростання концентрації вуглекислого та чадного газу;

– утворення HF можливе за умови термічного розкладу ЛПЕЖ NCR 18650B.

Відповідно, під час термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ відбувається постійне виділення продуктів термічного розкладу, що призводить до зростання абсолютного тиску ($P_{\text{абс}}$) у відповідній системі зберігання ЛПЕЖ. Зміна параметра $P_{\text{абс}}$ є одним з ключових показників виявлення термічного розкладу ЛПЕЖ.

Таким чином, подальші дослідження повинні бути зосереджені на визначенні та встановленні залежності зростання концентрації CO_2 , HF та $P_{\text{абс}}$ під час термічного розкладу ЛПЕЖ, що повинно скласти наукове підґрунтя для розробки принципів (алгоритмів) спрацювання та подальшої розробки відповідних давачів або систем раннього виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion powercell / O. Lazarenko, T. Berezhanskyi, V. Pospolityak, Pazen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, № 10 (118). P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
2. Prediction of heat release rate of single/double 32,650 lithium ion batteries / W. An et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148, № 5. P. 2057–2067. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11766-x>

3. McKinnon M., DeCrane S., Kerber S. Four firefighters injured in lithium-ion battery energy storage system explosion – Arizona. UL Firefighter Safety Research Institute, 2020. 66 p. DOI: <https://doi.org/10.54206/102376/TEHS4612>
4. Який хімічний склад найкраще підходить для електрифікації вашого автомобіля? Давайте відкриємо для себе різні типи акумуляторів : [сайт]. URL: <https://www.flashbattery.tech/en/blog/types-of-lithium-batteries-which-chemistry-use/> (дата звернення: 22.04.2024).
5. TG-MS analysis of solid electrolyte interphase (SEI) on graphite negative-electrode in lithium-ion batteries / L. Zhao et al. *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 161, № 2. P. 1275–1280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045>
6. Investigations of the exothermic reactions of natural graphite anode for li-ion batteries during thermal runaway / H. Yang et al. *Journal of the Electrochemical Society*. 2004. Vol. 152, № 1. P. A73. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1836126>
7. Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the liion battery electrolyte degradation mechanisms study / G. Gachot et al. *Analytical chemistry*. 2011. Vol. 83, № 2. P. 478–485. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac101948u>
8. Thermal reactions between delithiated lithium nickelate and electrolyte solutions / H. Arai et al. *Journal of The Electrochemical Society*. 2002. Vol. 149, № 4. P. A401. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1452114>
9. Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy li-ion cells by over-heating / P. Ping et al. *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 398. P. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>
10. Bugryniec P. J., Vernuccio S., Brown S. F. Towards a micro-kinetic model of Li-ion battery thermal runaway – Reaction network analysis of dimethyl carbonate thermal decomposition. *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 580. Art. 233394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233394>
11. An experimental and kinetic modeling study on dimethyl carbonate (DMC) pyrolysis and combustion / W. Sun et al. *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 164. P. 224–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.11.019>
12. Fernandes Y., Bry A., de Persis S. Thermal degradation analyses of carbonate solvents used in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2019. Vol. 414. P. 250–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.077>
13. Nilsson E. J. K., Ahlberg Tidblad A. Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Review of Experimental Results and Methodologies. *Batteries*. 2024. Vol. 10. Art. 443. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10120443>
14. Darnikowsk D. Development of Thermal Runaway Emissions Aftertreatment System (TREAS) of Lithium Ion Batteries. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*. 2023. № 142. P. 47–59. DOI: <https://doi.org/10.58139/v2q1-r455>
15. Somandepalli V., Marr K., Horn Q. Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2014. Vol. 3, № 1. P. 98–104. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1857>
16. Identification of Key Events and Emissions during Thermal Abuse Testing on NCA 18650 Cells / S. Ubaldi et al. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 3250. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073250>
17. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure – Considering toxic and flammable compounds / P. J. Bugryniec et al. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 87. Art. 111288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
18. A review of nail penetration and thermal abuse tests of lithium-ion batteries and their emission characterization / A. S. Nair et al. *Batteries*. 2026. Vol. 12, № 2. Art. 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries12020074>
19. Ali M. M. E. H., Ghodrat M. Thermal and combustion characteristics of vent gases from lithiumion battery thermal runaway: a comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. Vol. 150. P. 13925–13952. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14616-8>
20. Advances in early warning of thermal runaway in lithium-ion battery energy storage systems / D. Han et al. *Adv. Sensor Res*. 2025. Vol. 4. Art. 2400165. DOI: <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>
21. Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: a review / K. Wang et al. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 2960. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16072960>
22. Ultrasonic Health Monitoring of Lithium-Ion Batteries / Y. Wu et al. *Electronics*. 2019. Vol. 8, № 7. Art. 751. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8070751>
23. Internal field study of 21700 battery based on longlife embedded wireless temperature sensor / L. Yang et al. *Acta Mechanica Sinica*. 2021. Vol. 37, № 6. P. 895–901. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01103-0>
24. Reliable and early warning of lithium-ion battery thermal runaway based on electrochemical impedance spectrum / P. Dong et al. *Journal of the Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168. Art. 090529. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>
25. The Multi-Parameter Fusion Early Warning Method for Lithium Battery Thermal Runaway Based on Cloud Model and Dempster–Shafer Evidence Theory / Z. Xie et al. *Batteries*. 2024. Vol. 10, № 9. Art. 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10090325>
26. Miao H. Research on accurate fire detection & early warning model for lithium-ion battery packs. *J. Phys.: Conf. Ser*. 2024. Vol. 2703. Art. 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012068>

REFERENCES

1. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
2. An, W., Lu, Y., Liu, F., Wang, T., Xu, W., & Wang, Z. (2023). Prediction of heat release rate of single/double 32,650 lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(5), 2057–2067. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11766-x>
3. McKinnon, M., DeCrane, S., & Kerber, S. (2020). Four firefighters injured in lithium-ion battery energy storage system explosion – Arizona. UL Firefighter Safety Research Institute. <https://doi.org/10.54206/102376/TEHS4612>
4. Flash Battery. (n.d.). Which chemistry is most suitable for the electrification of your vehicle? Let's discover the different types of batteries. <https://www.flashbattery.tech/en/blog/types-of-lithium-batteries-which-chemistry-use/>
5. Zhao, L., Watanabe, I., Doi, T., Okada, S., & Yamaki, J. I. (2006). TG-MS analysis of solid electrolyte interphase (SEI) on graphite negative-electrode in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1275–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045>
6. Yang, H., Bang, H., Amine, K., & Prakash, J. (2004). Investigations of the exothermic reactions of natural graphite anode for Li-ion batteries during thermal runaway. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(1), A73. <https://doi.org/10.1149/1.1836126>
7. Gachot, G., Ribiere, P., Mathiron, D., Grugeon, S., Armand, M., Leriche, J.-B., Pilard, S., & Laruelle, S. (2011). Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the Li-ion battery electrolyte degradation mechanisms study. *Analytical Chemistry*, 83(2), 478–485. <https://doi.org/10.1021/ac101948u>
8. Arai, H., Tsuda, M., Saito, K., Hayashi, M., & Sakurai, Y. (2002). Thermal reactions between delithiated lithium nickelate and electrolyte solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(4), A401. <https://doi.org/10.1149/1.1452114>
9. Ping, P., Kong, D., Zhang, J., Wen, R., & Wen, J. (2018). Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating. *Journal of Power Sources*, 398, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>
10. Bugryniec, P. J., Vernuccio, S., & Brown, S. F. (2023). Towards a micro-kinetic model of Li-ion battery thermal runaway – Reaction network analysis of dimethyl carbonate thermal decomposition. *Journal of Power Sources*, 580, 233394. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233394>
11. Sun, W., Yang, B., Hansen, N., Westbrook, C. K., Zhang, F., Wang, G., Moshhammer, K., & Law, C. K. (2016). Experimental and kinetic modeling study on dimethyl carbonate (DMC) pyrolysis and combustion. *Combustion and Flame*, 164, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.11.019>
12. Fernandes, Y., Bry, A., & de Persis, S. (2019). Thermal degradation analyses of carbonate solvents used in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.077>
13. Nilsson, E. J. K., & Ahlberg Tidblad, A. (2024). Gas emissions from lithium-ion batteries: A review of experimental results and methodologies. *Batteries*, 10, 443. <https://doi.org/10.3390/batteries10120443>
14. Darnikowsk, D. (2023). Development of Thermal Runaway Emissions Aftertreatment System (TREAS) of lithium-ion batteries. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, 142, 47–59. <https://doi.org/10.58139/v2q1-r455>
15. Somandepalli, V., Marr, K., & Horn, Q. (2014). Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 3(1), 98–104. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1857>
16. Ubaldi, S., Conti, M., Marra, F., & Russo, P. (2023). Identification of key events and emissions during thermal abuse testing on NCA 18650 cells. *Energies*, 16, 3250. <https://doi.org/10.3390/en16073250>
17. Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure – Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, 87, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
18. Shibu Nair, A., Wu, X.-Y., Das, P. K., & Fowler, M. (2026). A review of nail penetration and thermal abuse tests of lithium-ion batteries and their emission characterization. *Batteries*, 12(2), 74. <https://doi.org/10.3390/batteries12020074>
19. Ali, M. M. E. H., & Ghodrat, M. (2025). Thermal and combustion characteristics of vent gases from lithium-ion battery thermal runaway: A comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 13925–13952. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14616-8>
20. Han, D., Wang, J., Yin, C., & Zhao, Y. (2025). Advances in early warning of thermal runaway in lithium-ion battery energy storage systems. *Advanced Sensor Research*, 4, 2400165. <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>
21. Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., Yuan, S., Chang, C., Zhang, J., & Liu, Y. (2023). Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*, 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>
22. Wu, Y., Wang, Y., Yung, W. K. C., & Pecht, M. (2019). Ultrasonic health monitoring of lithium-ion batteries. *Electronics*, 8(7), 751. <https://doi.org/10.3390/electronics8070751>
23. Yang, L., Li, N., Hu, L., Wang, S., Wang, L., Zhou, J., Song, W.-L., Sun, L., Pan, T.-S., Chen, H.-S., & Fang, D. (2021). Internal field study of 21700 battery based on long-life embedded wireless temperature sensor. *Acta Mechanica Sinica*, 37(6), 895–901. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01103-0>

24. Dong, P., Liu, Z., Wu, P., Li, Z., Wang, Z., & Zhang, J. (2021). Reliable and early warning of lithium-ion battery thermal runaway based on electrochemical impedance spectrum. *Journal of The Electrochemical Society*, 168, 090529. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>

25. Xie, Z., Zhang, Y., Wang, H., Li, P., Shi, J., Zhang, X., & Li, S. (2024). The multi-parameter fusion

early warning method for lithium battery thermal runaway based on cloud model and Dempster–Shafer evidence theory. *Batteries*, 10(9), 325. <https://doi.org/10.3390/batteries10090325>

26. Miao, H. (2024). Research on accurate fire detection & early warning model for lithium-ion battery packs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2703, 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012068>

© О. В. Лазаренко

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026