

А.Ф. Гаврилюк

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ПІД ДІЄЮ НАГРІВАЛЬНОЇ ПАНЕЛІ

Обґрунтовано передумови важливості контролю параметрів безпеки за широкого використання літій-іонних елементів живлення в електромобілях. Окреслено небезпеки та пожежі, які виникають у силових акумуляторних батареях живлення електромобілів із літій-іонних елементів. За результатами аналізу особливостей виникнення та перебігу необоротної екзотермічної реакції розроблено методика експериментальних досліджень силових батарей електромобілів з використанням електронагрівальної панелі.

Ключові слова: пожежа електромобіля, необоротна екзотермічна реакція, літій-іонна батарея.

Постановка проблеми

Існують різні типи акумуляторних батарей, як-от свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, натрієво-сірчані та літій-іонні батареї (lithium-ion batteries, далі – LIB), останні з яких набули найбільшого поширення, зокрема, в електромобілях через високу щільність енергії, довгий термін служби та малу швидкість саморозряду [1]. Щільність енергії LIB за останнє десятиліття зросла зі 150 Вт·год/кг до 350 Вт·год/кг [2, 3], що створило передумови ще більшого використання LIB в електромобілях [4].

Незважаючи на те, що LIB піддають різним випробуванням та дослідженням на етапі виробництва, виникають непоодинокі випадки займання електромобілів, динаміка розвитку є непередбачувана [5–12].

Особливою небезпекою таких пожеж є виділення кисню під час перебігу необоротної екзотермічної реакції у LIB, що створює нові виклики для пожежно-рятувальних служб під час гасіння таких пожеж [13–15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що у промисловості виробництва LIB є чимало стандартів, які покликані забезпечити безпеку таких батарей. У більшості випадків ці стандарти регламентують випробовування LIB при штатних режимах використання, а також встановлюють вимоги до внутрішньої конструкції та матеріалів LIB.

Однак зазначені стандарти не передбачають рішення забезпечення безпеки LIB, коли вони піддаються механічному пошкодженню, перезаряджанню чи впливу джерела тепла (IEC 62133-2:2017, SAE J2464_202108).

Автори роботи [16] експериментальним шля-

хом обґрунтували найбільш значущі критерії небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів.

У науковій праці [17] для створення необоротної екзотермічної реакції у LIB використовували пропановий пальник потужністю 15 кВт. Однак використання відкритого полум'я великої потужності (15 кВт) створює низьку відтворюваність результатів дослідження.

Автори роботи [18] розробили та запропонували методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. Обґрунтовано модельне вогнище пожежі, розміщення засобів вимірювальної техніки та дослідних взірців, порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих результатів досліджень. Однак така методика не передбачає здійснення теплового впливу на LIB іншими джерелами нагрівання – радіаційною (нагрівальною) панеллю тощо.

У науковій статті [19] розроблено концепцію дослідження літій-іонних батарей з використанням калориметра. З його допомогою досліджується швидкість виділення теплової енергії, а також склад газів, які виділяються під час згоряння. Однак створення такого калориметра потребує чималих фінансових затрат.

Мета та завдання статті

Мета роботи полягає у розробленні основних положень методики експериментальних досліджень силових батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки з використанням електронагрівальної панелі.

Кінцева мета дослідження полягає у визначенні температур початку виникнення необоротної екзотермічної реакції, відкриття вентиляційних отворів

та горіння (вибуху) силових батарей електромобілів, а також часових параметрів, за яких такі процеси відбуваються.

Для цього необхідно розв'язати наступні задачі:

- обґрунтувати критерії, які характеризують початок виникнення необоротної екзотермічної реакції, відкриття вентиляційних отворів та горіння (вибуху) силових батарей електромобілів;

- визначити необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), а також їх розміщення на дослідних взірцях;

- обґрунтувати потужність електронагрівальної панелі;

- описати порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих результатів досліджень.

У роботі для досягнення задекларованої мети використаний теоретичний метод дослідження. У ньому були застосовані такі операції, як: синтез,

аналіз, систематизація, узагальнення тощо.

Виклад основного матеріалу

Силова акумуляторна батарея (далі – АКБ) будь-якого електромобіля складається з модулів. Залежно від ємності АКБ кількість модулів може бути від двох до шістнадцяти чи навіть більше. Кожен модуль складається з елементів. Елементи можуть мати циліндричну чи призматичну форму, бути з'єднанні між собою у групи. При послідовному з'єднанні елементів збільшується напруга групи, а при паралельному – ємність. Відповідно, послідовні з'єднання позначаються літерою «s», а паралельне з'єднання – літерою «p».

Будь-який елемент літій-іонної батареї складається з анода, катода, сепаратора та електроліту, що розміщується у корпусі.

Перелік основних екзотермічних реакцій, які складають необоротну реакцію у LIB з катодом LiFePO₄ та графітовим анодом, відображено у табл. 1.

Таблиця 1

Екзотермічні реакції, які складають необоротну екзотермічну реакцію [22]

Реакція	Температура початку реакції, °C	Питома енергія тепловиділення, кДж/кг
Катодне розкладання	200	500
Анодне розкладання	228	1200
Фаза розкладу твердого електроліту	80	200
Регенерація електроліту	110	700
Розкладання електроліту	203	250
Плавлення сепаратора	155	-100

Температурні межі, наведені в табл. 1, можуть змінюватись залежно від матеріалів виготовлення сепаратора, електроліту, катода та анода.

На підставі аналізу наукових праць [21, 22] встановлено, що внаслідок плавлення сепаратора поглинається певна кількість енергії (яка необхідна для його розплавлення) (табл. 1), і, як наслідок, температура LIB дещо знижується. Після цього відбувається невелике стрибкоподібне підвищення температури. Це стається внаслідок внутрішнього короткого замикання між катодом і анодом, що призводить до виділення джоулевого тепла. Зазвичай температура плавлення сепаратора для літій-іонних акумуляторів лежить в межах 120–170 °C. Однак вона може змінюватись залежно від умов експлуатації батареї, матеріалу виготовлення, а також при відхиленні від технологічного процесу виготовлення літій-іонних батарей.

Тому власне першим критерієм виникнення необоротної екзотермічної реакції у силових АКБ є розплавлення сепаратора і виникнення внутрішнього короткого замикання (далі – КЗ), яке спостерігається спершу зменшенням температури, а потім різким стрибком в околі температури плавлення матеріалу

сепаратора, який заявлений заводом-виробником.

Цей ефект був підтверджений експериментально у науковій праці [23]. Водночас при руйнуванні сепаратора та виникненні внутрішнього КЗ відбувається різкий спад напруги внаслідок саморозряду LIB (електрична енергія перетворюється в теплову). Такі процеси детально описано у науковій праці [24].

Після цього з подальшим підвищенням температури відбувається розкладання анода (при температурі 200 °C і більше). Катод також піддається розкладанню електролітом. Ці екзотермічні реакції починаються при 160–220 °C. Окрім цього, електроліт, який використовується у LIB, також піддається розкладу при температурі 230–290 °C і є джерелом виділення фтористого водню [21].

З урахуванням особливостей виникнення та перебігу необоротної екзотермічної реакції була розроблена методика, сутність якої полягає у визначенні температур початку виникнення необоротної екзотермічної реакції силової батареї електромобіля, відкриття вентиляційних отворів та горіння (вибуху) силових батарей електромобілів, температур горіння вентиляційних газів, а також часових параметрів, за яких ці процеси відбуваються, які можуть змінюва-

тись під час експлуатації батареї і не відповідати заявленим параметрам виробника.

Для цього LIB піддають дії теплової енергії від електронагрівальної панелі та фіксують значення температур та часу, під час якого відбувається необоротна екзотермічна реакція від моменту виникнення внутрішнього КЗ до пожежі чи вибуху.

Тому для проведення натурних вогневих досліджень необхідно таке обладнання: досліджувані взірці силових батарей електромобілів, електронагрівальна панель, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото- та відеозйомки.

Як дослідні взірці використовуються силова батарея електромобіля або її окремі модулі. Для проведення досліджень підготовлюються не менше трьох ідентичних дослідних взірців, пожежонебезпечні параметри яких потрібно дослідити. Ємність дослідних взірців повинна бути не менше ніж 90 % від номінального значення. Перед проведенням експерименту дослідні взірці розряджають до мінімально допустимого значення напруги, яке зазначене заводом-виробником. Для розрядження дозволяється використовувати навантаження, при якому струм розряду не перевищує 50 % від максимального струму розряду, вказаного заводом-виробником. Причому навантаження, яке використовується для розряду, для всіх дослідних взірців має бути ідентичним за потужністю. Після розряду взірці заряджаються до 100 %.

Власне 100 % заряд батареї, за даними наукових праць [24, 25], обумовлює найбільш бурхливий розвиток необоротної реакції, інтенсивніше вивільнення тепла, тобто найгірший сценарій розвитку пожежі.

Для заряджання слід використовувати штатні зарядні пристрої із номінальним струмом заряду не більше ніж 50 % від максимального струму заряду, вказаного заводом-виробником, для даного типу батарей. Вимірювання стану заряду батареї необхідно здійснювати за допомогою мультиметра (вольтметра) з точністю не менше 0,1 В.

Після цього дослідні взірці поміщаються у вентильовану камеру при температурі 18 °C (± 2 °C) на час 20–24 год для кондиціонування, що забезпечить відтворюваність результатів дослідження.

Перед початком випробувань і після випробувань дослідні взірці піддаються зважуванню. Точність вимірювання ваг має складати не більше 0,01 кг.

Для фіксації часу слід використовувати електронний чи механічний секундомір із точністю вимірювань не більше 1 с.

Для встановлення розподілу температурного поля в елементах дослідного взірця шляхом фіксації термографічного зображення LIB під час нагрівання використовується тепловізор Leader TIC 3 (або аналог) з діапазоном вимірювання температур від –40 °C

до 1500 °C.

Відеокамера фіксуватиме динаміку розвитку полум'я у часі. Розміщуються тепловізор і відеокамера на штативі з врахуванням вимог їх безпечної роботи.

Для фіксації теплового потоку під полум'я досліджуваних взірців силових АКБ електромобілів використовується приймач теплового потоку, який розміщується за допомогою штатива на одній горизонталі з досліджуваними зразками.

Для фіксації температури доцільно використовувати термопари хромель–алюмель або іншого типу з діапазоном фіксації 0–1500 °C та похибкою не більше 1 %. Для збору температурних параметрів із термопар доцільно обрати регулятор-вимірювач РТ 0102-8-К або його аналог. На рис. 1, I) наведено схему розміщення термопар на дослідному взірці, де a – ширина дослідного взірця, b – довжина, h – висота (модуля чи АКБ).

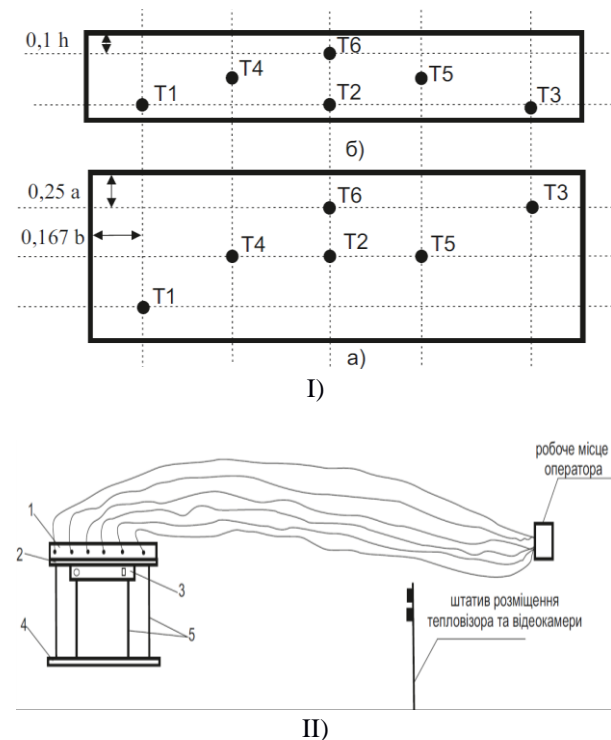


Рис. 1. I) Схема розміщення термопар на дослідному взірці (а) – вигляд зверху; б) – вигляд у розрізі); II) Схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Розміщення та кількість термопар на досліджуваному взірці обґрунтовано експериментальним шляхом.

На рис. 1, II) наведено загальну схему улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, де 1 – досліджуваний взірець, 2 – металевий лист, 3 – електронагрівальна панель, 4 – електронна вага, 5 – штативи-підставки. Причому забезпечена можливість проводити зважування дослідного взірця на всьому етапі проведення експери-

ментальних досліджень. Наведена схема розміщення може бути видозмінена без втрати функціонального призначення основних елементів.

Фіксація напруги здійснюється з використанням мультиметра (вольтметра) із точністю вимірювань не менше 0,1 В.

Усі ЗВТ, які використовуються при дослідженнях, повинні пройти калібрування та мати відповідні підтверджуючі документи.

На підставі аналізу сучасних наукових праць встановлено, що потужність електронагрівальної панелі для оптимального прогріву дослідного взірця повинна становити 3–5 Вт/см².

Електронагрівальна панель повинна впливати на всю площу дослідного взірця рівномірно та мати можливість змінювати потужність нагріву. За неможливості використати електронагрівальну панель необхідних розмірів допускається використовувати між електронагрівальною панеллю та дослідним взірцем металевий лист із коефіцієнтом теплопровідності не менше 200 Вт/м·°С. Для цього добре підходять сплави на основі алюмінію. Водночас слід врахувати поправку за потужністю електронагрівальної панелі на нагрівання металевого листа.

Дослідження проводиться у такій послідовності:

- здійснюється підготовка дослідних взірців LIB;
- підготовка ЗВТ та обладнання, пристроїв фото- та відеофіксації;
- здійснення вимірювання показників температури і вологості повітря, швидкості вітру, абсолютного атмосферного тиску;
- вмикання нагрівальної панелі з входом на номінальне значення необхідної потужності та температури на її поверхні;
- здійснення вмикання та вимірювань значень температур усіх влаштованих термопар та перевірка їх роботи;
- вмикання вимірювально-обчислювальних пристроїв у режимі реєстрації, здійснюється відеозйомка та розміщення дослідного взірця на електронагрівальні панелі.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснюється вимірювання та реєстрація температур за показами термопар згідно з розміщенням (рис. 1), температури поверхні електронагрівальної панелі, напруги на LIB та часу. Тепловізор фіксує процес прогрівання дослідного взірця.

Реєстрація температури проводиться з інтервалом не більше ніж 1 с. Фото- та відеозйомка проводиться на всьому етапі експериментальних досліджень з метою визначення геометричних параметрів полум'я.

Відбувається спостереження за показами вольтметра. Як тільки напруга дослідного взірця починає падати, це свідчить про початок плавлення сепаратора і поступовий контакт анода та катода.

При падінні напруги до 0 В це характеризує повну руйнацію сепаратора та розвиток внутрішнього КЗ.

Дослідження тривають до моменту повного вигорання вентиляційних газів, які утворились внаслідок необоротної екзотермічної реакції, та припинення горіння.

Після проведення експерименту батарея піддається зважуванню, та визначається втрата маси дослідного взірця під час випробувань.

На підставі результатів досліджень для кожного моменту часу t_j вимірювання визначають температуру T_j поверхні дослідного зразка, щільність теплового потоку (q_j), геометричні параметри полум'я (h_j , δ_j). Експериментальні дані заносяться до журналу.

За отриманими даними визначається середнє значення температури \bar{t}_j :

$$\bar{t}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} t_{ji} \quad (1)$$

де n_j – кількість результатів випробувань.

Оцінку дисперсій результатів випробувань S_j^2 визначають з рівності:

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t}_j)^2 \quad (2)$$

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду, t_{jmin} розраховують критерій Граббса, G_{jmin} :

$$G_{jmin} = \frac{\bar{t}_j - t_{jmin}}{S_j} \quad (3)$$

Розраховані таким способом значення G_{jmax} та G_{jmin} для кожного значення часу порівнюють з 5 % ($G_{кр.} = 5 \%$) та 1 % ($G_{кр.} = 1 \%$) критичними значеннями, заданими в довідникових таблицях.

Якщо після порівняння G_{jmax} або G_{jmin} з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне (табличне) значення ($G_{кр.} = 5 \%$) і менше (або дорівнює) 1 %-го ($G_{кр.} = 1 \%$) критичного значення ($G_{кр.} = 1 \%$), тоді значення y_{jmax} або y_{jmin} вважають квазівикидом. Якщо розраховане значення G_{jmax} або G_{jmin} більше 1 %-го критичного значення ($G_{кр.} = 1 \%$), то, відповідно, y_{jmax} або y_{jmin} вважають викидом. Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} виявляються меншими (або рівними) за критичні значення 5 %, вказані у таблиці, то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Для формування висновку проводиться не мен-

ше як три експериментальні дослідження для ідентичних дослідних взірців з метою забезпечення відтворюваності результатів.

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами та інструкціями з охорони праці та іншими документами, які зумовлюють безпечно проведення експериментальних досліджень.

Перед проведенням досліджень усі залучені особи повинні пройти інструктаж з охорони праці та ознайомитись з порядком проведення досліджень. Також необхідно визначити та обгородити небезпечну зону проведення експериментальних досліджень, відстань має складати не менше 10 м. Місце проведення експерименту повинно забезпечуватись первинними засобами пожегогасіння. З метою забезпечення безпеки оператор має бути одягнений в захисний одяг пожежника загального призначення. Забороняється подавати воду в осередок вогнища пожежі [18].

Висновки і перспективи подальших досліджень

Використання запропонованої методики експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів щодо пожежної безпеки електронагрівальною панеллю дасть змогу визначити температурні межі виникнення необоротної екзотермічної реакції у LIB, а також часові параметри, за яких ці процеси відбуваються.

Обґрунтовано критерії, які характеризують початок виникнення необоротної екзотермічної реакції, перелік необхідного ЗВТ, їх розміщення, а також особливості використання електронагрівальної панелі.

Описано порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих результатів досліджень.

Надалі передбачається здійснити експериментальні дослідження за розробленою методикою та оцінити отримані результати, що ляже в основу наступної публікації.

Література

1. Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency / J. Kang, F. Yan, P. Zhang, C. Du // *Energy*. – 2014. – Vol. 70. – P. 618–625. – DOI: [10.1016/j.energy.2014.04.038](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.038).
2. A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (Ni_xCo_yMn_z) O₂ battery with different nickel contents at cell and module level / H. Wang, Z. Du, X. Rui, S. Wang, C. Jin, L. He, F. Zhang, Q. Wang, X. Feng // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 393. – Article 122361. – DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.122361](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122361).
3. Lithium-ion battery fast charging: A review / A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, B. Wu // *eTransportation*. – 2019. – Vol. 1. – Article 100011. – DOI: [10.1016/j.etrans.2019.100011](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011).

4. Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles / Y. Zheng, M. Ouyang, X. Han, L. Lu, J. Li // *Journal of Power Sources*. – 2018. – Vol. 377. – P. 161–188. – DOI: [10.1016/j.jpowsour.2017.11.094](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.094).
5. Crashed Tesla catches fire twice – second fire during transport on tow truck [Electronic resource] / CTIF – International Association of Fire and Rescue Services : website. – Ljubljana (Slovenia), 2017–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <https://www.ctif.org/news/crashed-tesla-catches-fire-twice-second-fire-during-transport-tow-truck>, free (date of the application: 15.03.2024).
6. Electric vehicle spontaneously caught fire while driving on the highway [Electronic resource] / CTIF – International Association of Fire and Rescue Services : website. – Ljubljana (Slovenia), 2017–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <https://www.ctif.org/news/electric-vehicle-spontaneously-caught-fire-while-driving-highway>, free (date of the application: 15.03.2024).
7. Video: What’s Nastier Than an Electric Car on Fire? How About Seven Electric Cars on Fire [Electronic resource] / Firefighter Nation : website. – Rochelle Park, NJ (USA), 2009–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <https://www.firefighternation.com/news/video-whats-nastier-than-an-electric-car-on-fire-how-about-seven-electric-cars-on-fire/#gref>, free (date of the application: 15.03.2024).
8. A Tesla was in a junkyard for three weeks. Then it burst into flames [Electronic resource] / The Washington Post : website. – Washington, DC (USA), 1996–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/06/22/tesla-fire-sacramento/>, free (date of the application: 15.03.2024).
9. Jaguar I-Pace catches on fire again – is this another Bolt EV battery fire situation? [Electronic resource] / Electrek : website. – Croton, NY (USA), 2014–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <https://electrek.co/2022/08/01/jaguar-i-pace-catches-fire-another-bolt-ev-battery-fire-situation/>, free (date of the application: 15.03.2024).
10. 세종시, 소담동 새샘마을 아파트 지하주차장 차량화재 발생 [Electronic resource] / 내외일보 : website. – Seoul (South Korea), 2005–2024. – Updated continuously. – Regime of access: <http://www.naewoelbo.com/news/articleView.html?idxno=365492>, free (date of the application: 15.03.2024).
11. Гаврилюк А. Ф. Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів / А. Ф. Гаврилюк, О. Е. Васильєва // *Пожежна безпека*. – 2023. – № 42. – С. 32–42. – DOI: [10.32447/20786662.42.2023.04](https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04).
12. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building / A. Gavryliuk, R. Yakovchuk, Ya. Ballo, Yu. Rudyk // *SAE International Journal of Transportation Safety*. – 2023. – Vol. 11, Issue 3. – P. 421–434. – DOI: [10.4271/09-11-03-0013](https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013).
13. Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries / M. Egelhaaf, D. Kress, D. Wolpert, T. Lange, R. Justen, H. Wilstermann // *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. – 2013. – Vol. 2, Issue 1. – P. 37–48. – DOI: [10.4271/2013-01-0213](https://doi.org/10.4271/2013-01-0213).
14. Determination of fire protection distances during a Tesla Model S fire in a closed parking lot / A. Gavryliuk, R. Yakovchuk, D. Chalyy, M. Lemishko, N. Tur // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 2, Issue 10 (122). – P. 39–46. – DOI: [10.15587/1729-4061.2023.277999](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999).
15. Sturk D. Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs / D. Sturk, L. Hoffmann, A. Ahlberg Tidblad // *Traffic Injury Prevention*. – 2015. – Vol. 16, Issue sup1. – P. S159–S164. – DOI: [10.1080/15389588.2015.1015117](https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1015117).
16. Гаврилюк А. Ф. Обґрунтування найбільш значущих критеріїв пожежної безпеки силових літій-іонних батарей електромобілів / А. Ф. Гаврилюк //

Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2023. – № 28. – С. 81–90. – DOI: [10.32447/20784643.28.2023.08](https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.08).

17. Larsson F. Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests / F. Larsson, P. Andersson, B.-E. Mellander // *Batteries*. – 2016. – Vol. 2, Issue 2. – Article 9. – DOI: [10.3390/batteries2020009](https://doi.org/10.3390/batteries2020009).

18. Гаврилюк А. Ф. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я / А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2023. – № 2 (16). – С. 32–41. – Режим доступу: <https://sci.ljubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13054>, вільний (дата звернення: 15.03.2024).

19. CFD-analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion battery fires / S. Voigt, F. Sträubig, S. Palis, A. Kwade, C. Knaust // *Fire Safety Journal*. – 2020. – Vol. 114. – Article 102989. – DOI: [10.1016/j.firesaf.2020.102989](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102989).

20. Development of thermal runaway propagation model considering vent gas combustion for electric vehicles / J. T. Kim, J. Y. Choi, S. Kang, N. G. Han, D. K. Kim // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 60. – Article 106535. – DOI: [10.1016/j.est.2022.106535](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106535).

21. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He // *Energy Storage Materials*. – 2018. – Vol. 10. – P. 246–267. – DOI: [10.1016/j.ensm.2017.05.013](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013).

22. Гаврилюк А. Ф. Експериментальні дослідження елементів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки / А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук, М. В. Лемішко // *Пожарна безпека*. – 2023. – № 43. – С. 50–62. – DOI: [10.32447/20786662.43.2023.07](https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.07).

23. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests / F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, B.-E. Mellander // *Journal of Power Sources*. – 2014. – Vol. 271. – P. 414–420. – DOI: [10.1016/j.jpowsour.2014.08.027](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027).

24. Kim S. W. Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires / S. W. Kim, S. G. Park, E. J. Lee // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2022. – Vol. 80. – Article 104851. – DOI: [10.1016/j.jlp.2022.104851](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104851).

25. A coupled conjugate heat transfer and CFD model for the thermal runaway evolution and jet fire of 18650 lithium-ion battery under thermal abuse / D. Kong, G. Wang, P. Ping, J. Wen // *eTransportation*. – 2022. – Vol. 12. – Article 100157. – DOI: [10.1016/j.etrans.2022.100157](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100157).

References

- Kang, J., Yan, F., Zhang, P., & Du, C. (2014). Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency. *Energy*, 70, 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.038>
- Wang, H., Du, Z., Rui, X., Wang, S., Jin, C., He, L., Zhang, F., Wang, Q., & Feng, X. (2020). A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (Ni_xCo_yMn_z) O₂ battery with different nickel contents at cell and module level. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122361>
- Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O'Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., Li, Y., Zheng, S., Vetterlein, S., Gao, M., Du, J., Parkes, M., Ouyang, M., Marinescu, M., Offer, G., & Wu, B. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>
- Zheng, Y., Ouyang, M., Han, X., Lu, L., & Li, J. (2018). Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 377, 161–188. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.094>

5. CTIF. (2023, March 8). *Crashed Tesla catches fire twice – second fire during transport on tow truck*. International Association of Fire and Rescue Services. <https://www.ctif.org/news/crashed-tesla-catches-fire-twice-second-fire-during-transport-tow-truck>

6. CTIF. (2023, February 3). *Electric vehicle spontaneously caught fire while driving on the highway*. International Association of Fire and Rescue Services. <https://www.ctif.org/news/electric-vehicle-spontaneously-caught-fire-while-driving-highway>

7. FirefighterNation Staff. (2022, June 12). *Video: What's Nastier Than an Electric Car on Fire? How About Seven Electric Cars on Fire*. Firefighter Nation. <https://www.firefighternation.com/news/video-whats-nastier-than-an-electric-car-on-fire-how-about-seven-electric-cars-on-fire/#gref>

8. Mark, J. (2022, June 22). *A Tesla was in a junkyard for three weeks. Then it burst into flames*. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/06/22/tesla-fire-sacramento/>

9. Lambert, F. (2022, August 1). *Jaguar I-Pace catches on fire again – is this another Bolt EV battery fire situation?* Electrek. <https://electrek.co/2022/08/01/jaguar-i-pace-catches-fire-another-bolt-ev-battery-fire-situation/>

10. Kim, J.-H. (2021, July 1). *A car fire occurred in the underground parking lot of an apartment in Saesam Village, Sodam-dong, Sejong-si*. Naewoeilbo. <http://www.naewoeilbo.com/news/articleView.html?idxno=365492> [in Korean]

11. Gavryliuk, A. F., & Vasylieva, O. E. (2023). Analysis of the state of fire protection of electric vehicles. *Fire Safety*, (42), 32–42. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04> [in Ukrainian]

12. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Ya., & Rudyk, Yu. (2023). Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 421–434. <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>

13. Egelhaaf, M., Kress, D., Wolpert, D., Lange, T., Justen, R., & Wilstermann, H. (2013). Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2(1), 37–48. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0213>

14. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a Tesla Model S fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10) (122), 39–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999>

15. Sturk, D., Hoffmann, L., & Ahlberg Tidblad, A. (2015). Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs. *Traffic Injury Prevention*, 16(sup1), S159–S164. <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1015117>

16. Gavryliuk, A. F. (2023). Substantiation of the most significant criteria of fire hazard of power lithium-ion batteries of electric vehicles. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, (28), 81–90. <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.08> [in Ukrainian]

17. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B.-E. (2016). Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests. *Batteries*, 2(2), 9. <https://doi.org/10.3390/batteries2020009>

18. Gavryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2023). Methods of experimental research of behavior of lithium-ion batteries under the influence of open flame. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, (2)(16), 32–41. <https://sci.ljubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13054> [in Ukrainian]

19. Voigt, S., Sträubig, F., Palis, S., Kwade, A., & Knaust, C. (2020). CFD-analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 114, 102989. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102989>

20. Kim, J. T., Choi, J. Y., Kang, S., Han, N. G., & Kim, D. K. (2023). Development of thermal runaway propagation model considering vent gas combustion for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 60, 106535. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106535>
21. Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246–267. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>
22. Gavryliuk, A. F., Yakovchuk, R. S., & Lemishko, M. V. (2023). Experimental research of the elements of the Tesla Model S power battery on the subject of fire hazard. *Fire Safety*, (43), 50–62. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.07> [in Ukrainian]
23. Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Mellander, B.-E. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 271, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>
24. Kim, S. W., Park, S. G., & Lee, E. J. (2022). Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104851.

<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104851>

25. Kong, D., Wang, G., Ping, P., & Wen, J. (2022). A coupled conjugate heat transfer and CFD model for the thermal runaway evolution and jet fire of 18650 lithium-ion battery under thermal abuse. *eTransportation*, 12, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100157>

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Ю.І. Рудик, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна.

Автор: ГАВРИЛЮК Андрій Федорович
кандидат технічних наук, доцент, докторант денної форми навчання докторантури та ад'юнктури Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

E-mail – gavrilyk3@ukr.net

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8727-9950>

METHODOLOGY FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FIRE HAZARD OF POWER LITHIUM-ION BATTERIES OF ELECTRIC VEHICLES UNDER THE INFLUENCE OF A HEATING PANEL

A. Havryliuk

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

Even though lithium-ion batteries (LIBs) are the subject of various tests and research at the production stage, there are no isolated cases of electric vehicle fires, and the development dynamics are unpredictable. The particular danger of such fires lies in the oxygen release during an irreversible exothermic reaction in LIBs, which creates new challenges for fire and rescue services when extinguishing such fires. The study aims to develop the main provisions of the methodology for experimental studies of electric vehicle power batteries in terms of fire hazards using an electric heating panel. The ultimate goal of the study is to determine the temperatures at which an irreversible exothermic reaction, the opening of ventilation holes, and the combustion (explosion) of electric vehicle power batteries begin, as well as the time parameters at which such processes occur.

Taking into account the peculiarities of the occurrence and course of the irreversible exothermic reaction, we have developed a methodology, the essence of which is to determine the temperatures of the onset of the irreversible exothermic reaction of the electric vehicle power battery, the opening of ventilation holes, and the combustion (explosion) of electric vehicle power batteries, the combustion temperatures of ventilation gases, as well as the time parameters at which these processes occur, which may change during battery operation and not correspond to the declared parameters of the manufacturer. For this purpose, we exposed LIBs to thermal energy from an electric heating panel and recorded the temperature and time during which an irreversible exothermic reaction occurs from the moment of an internal short circuit to a fire or explosion.

The use of the proposed methodology of experimental studies of the elements of power batteries of electric vehicles regarding the fire hazard of an electric heating panel will make it possible to determine the temperature limits of the occurrence of irreversible exothermic reactions in LIBs, as well as the time parameters under which these processes occur.

Keywords: electric vehicle fire, irreversible exothermic reaction, lithium-ion battery.