



А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950> – А. Ф. Гаврилюк

<https://orcid.org/0000-0001-5523-5569> – Р. С. Яковчук



gavriylk3@ukr.net

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДУЛІВ СИЛОВИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Постановка проблеми. Кількість електромобілів у світі продовжує зростати. Станом на перший квартал 2024 року, за даними Головного сервісного центру МВС, в Україні зареєстровано 93976 електромобілів. Разом з тим, впродовж 2019-2024 років на території України підрозділами Державної служби України з надзвичайних ситуацій зареєстровано 173 пожежі електромобілів, внаслідок яких завдано прямих збитків на суму 9 млн 53 тис. грн, побічних – 18 млн 450 тис. грн.

Метою дослідження є розроблення основних положень методики експериментальних досліджень модулів літій-іонних батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки відкритим полум'ям. Кінцева мета дослідження полягає у визначенні теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційних отворів, займання, виникнення необоротної екзотермічної реакції, горіння тощо), які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також у розкритті особливостей розвитку та поширення горіння у модулі літій-іонної батареї електромобіля.

Методи дослідження. У роботі використано експериментальний та теоретичний методи досліджень. У теоретичному методі досліджень були застосовані такі операції, як: синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо.

Опис матеріалу. Суть запропонованої методики полягає у визначенні температури спрацювання вентиляційних отворів, займання, виникнення необоротної екзотермічної реакції, дослідженні впливу чинників на ці параметри, а також розкритті особливостей розвитку та поширення горіння по модулі літій-іонної батареї електромобіля. Для створення теплового потоку на досліджуваній взірці необхідно визначити джерело тепла та обґрунтувати його параметри. В якості наукової розвідки вибрані модельні вогнища класу С. Перевагою таких модельних вогнищ є простота виконання газової установки-пальника, можливість регулювати подачу газу, тощо. Для розміщення термопар здійснюються наскрізні отвори у досліджуваному модулі, діаметром який забезпечить розміщення термопар, але не більшим ніж 3 мм. З метою визначення внутрішнього короткого замикання, яке виникає внаслідок руйнування сепаратора та замкнення катода та анода літій-іонного елемента, використовується цифровий мультиметр. Цифровий мультиметр підключається до полюсів літій-іонного елемента за допомогою двожильного мідного провідника діаметром 1,5 мм² (з метою зменшення опору на провіднику та підвищення точності вимірювань) та визначає спад напруги на елементі.

Висновки. Розроблена методика експериментальних досліджень модулів літій-іонних батарей електромобілів під дією відкритого полум'я модельного вогнища класу С. Використання даної методики дасть змогу визначити температуру спрацювання вентиляційних отворів, виникнення необоротної екзотермічної реакції та займання модуля літій-іонних батарей електромобілів, а також окреслити особливості поширення необоротної реакції по модулі. Експериментальним шляхом обґрунтовано критерії розміщення газового пальника, витрату газу та розміщення засобів вимірювальної техніки, описано порядок проведення експерименту, а також оброблення отриманих експериментальних даних.

Ключові слова: методика експериментальних досліджень, електромобілі, пожежна небезпека літій-іонних елементів, необоротна екзотермічна реакція.

А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TESLA MODEL S POWER BATTERY CELLS FOR OPEN FLAME FIRE HAZARD

Introduction. The number of electric vehicles continues to grow. As of the first quarter of 2024, according to the Main Service Centre of the Ministry of Internal Affairs, 93976 electric vehicles were registered in Ukraine. At the same time, in 2019-2024, the units of the State Emergency Service of Ukraine registered 173 electric vehicle fires in Ukraine, which caused direct losses of UAH 9 million 53 thousand and indirect losses of UAH 18 million 450 thousand.

Purpose. Is to develop the main provisions of the methodology for experimental studies of lithium-ion battery modules of electric vehicles in terms of open flame fire hazard.

The ultimate goal of the study is to determine the thermal parameters (temperature of ventiation holes, ignition, irreversible exothermic reaction, combustion, etc.) that describe the combustion processes of lithium-ion battery modules of electric vehicles, as well as to reveal the peculiarities of the development and spread of combustion in the module of a lithium-ion battery of an electric vehicle.

To do this, it is necessary to identify the necessary equipment and measuring instruments (hereinafter referred to as M&I); justify the model fire, the placement of M&I on the research module; justify the procedure for conducting full-scale fire tests with ensuring labour safety conditions, as well as the procedure for processing the obtained experimental data.

Methods of research. The research used experimental and theoretical research methods. The theoretical research method used such operations as synthesis, analysis, systematisation, generalisation, etc.

Material description. The essence of the proposed methodology is to determine the temperature of ventilation holes, ignition, and the occurrence of an irreversible exothermic reaction, to study the influence of factors on these parameters, and to reveal the features of the development and propagation of combustion in the module of an electric vehicle lithium-ion battery. To create a heat flux in the sample under study, it is necessary to identify the heat source and justify its parameters. Class C model fires were selected as a scientific study. The advantage of such model fires is the simplicity of the gas burner installation, the ability to regulate the gas supply, etc. To place the thermocouples, through holes are made in the test module with a diameter that will allow the placement of thermocouples, but not more than 3 mm. A digital multimeter is used to determine the internal short circuit that occurs as a result of the separator destruction and the short circuit of the cathode and anode of the lithium-ion cell. The digital multimeter is connected to the poles of the lithium-ion cell using a two-core copper conductor with a diameter of 1.5 mm² (to reduce the resistance on the conductor and increase the measurement accuracy) and determines the voltage drop across the cell.

Conclusions. The article develops a methodology for experimental research of modules of lithium-ion batteries of electric vehicles under the influence of an open flame of a class C model fire. The use of this methodology will make it possible to determine the temperature of ventiation holes, the occurrence of an irreversible exothermic reaction and ignition of a module of lithium-ion batteries of electric vehicles, as well as to outline the features of the propagation of an irreversible reaction along the module. The criteria for the placement of the gas burner, gas consumption and placement of measuring equipment are experimentally substantiated, and the procedure for conducting the experiment and processing the obtained experimental data are described.

Keywords: experimental research methodology, electric vehicles, fire hazard of lithium-ion cells, irreversible exothermic reaction.

Постановка проблеми. Станом на перший квартал 2024 року, за даними Головного сервісного центру МВС, в Україні зареєстровано 93976 електромобілів [1]. Разом з тим, упродовж 2019-2024 років на території України підрозділами Державної служби України з надзвичайних ситуацій зареєстровано

173 пожежі електромобілів, внаслідок яких завдано прямих збитків на суму 9 млн 53 тис. грн, побічних – 18 млн 450 тис. грн. Загибелі та травмування людей – не реєструвалося [2]. Динаміка кількості електромобілів та їх пожеж за останні п'ять років наведено на рисунку 1.

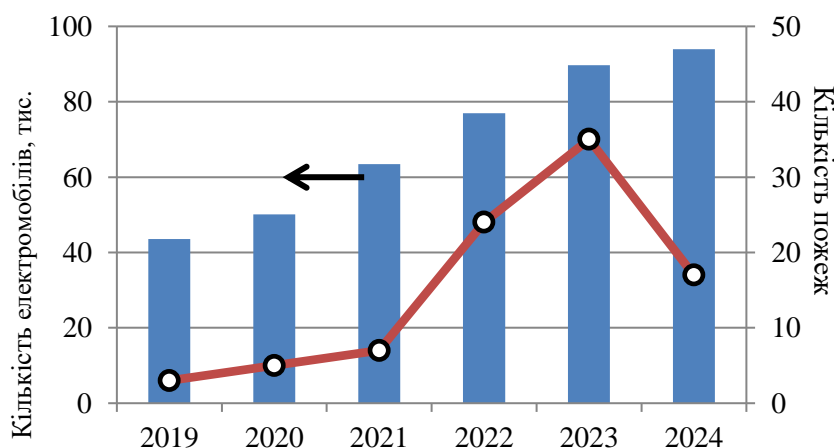


Рисунок 1 – Динаміка кількості електромобілів та їх пожеж за останні п'ять років в Україні

Варто відмітити, що за останні п'ять років автопарк електромобілів в Україні подвоївся.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Існує ціла низка наукових праць, присвячених розробленню різноманітних методик, які

покликані дослідити механізми виникнення та розвитку необоротної екзотермічної реакції, як найнебезпечнішого фактора використання літій-іонних акумуляторних батарей (АКБ) [3-7], а також дослідження пожежонебезпечних чинників

таких батарей в цілому [8-12]. Більшість наукових праць зосереджені на калоритмі використання кисню під час горіння літій-іонних батарей та визначенні на підставі цього густини теплового потоку та загальної енергії тепловиділення під час горіння літій-іонних елементів АКБ. Так у науковій праці [13] використовували експериментальну установку SBI, яка зазвичай використовується для класифікації будівельних матеріалів відповідно до європейської класифікаційної схеми EN13823. Суть методології випробувань полягає у дії на елементи силових АКБ теплового потоку потужністю 15 кВт, який створювався пропановим газовим пальником. Усі гази, які виділялись внаслідок випробувань аналізувались за допомогою газоаналізатора Antaris IGS. Значення теплового потоку визначалось за допомогою методу споживання кисню, згідно [14]. Кисень, який бере участь у згорянні батарей впливає на загальну концентрацію, зменшуючи її з часом [15]. На основі цього визначають загальне тепловиділення та потужність теплового потоку. Приймалось, що при споживанні 1 кг кисню виділяється 13,1 МДж енергії з точністю 0,5 МДж. [16]. Такий же метод використовували науковці Ribière, P та інші у науковій праці [17].

Дослідники Ping та інші [18] у своїй методиці експериментальних досліджень також використовували калориметр, а для нагрівання – електричну радіаційну панель потужністю 3 кВт. Для контролю температури використовували термопари типу хромель-алюмель у кількості 7 шт. Вимірювання концентрації O₂, CO та CO₂ здійснювалось за допомогою приладу Fire Testing Technology Ltd, FTT.

У методиці, яка описана у науковій праці [19], використовували аеродинамічну трубу, яка складається з чотирьох основних секцій: змішувальної камери, секції попереднього випробування, секції випробувань та діагностики. Власне у цьому дослідженні встановлено, що температура початку виникнення необоротної реакції становить 364±12 К, причому температуру визначали з обігрівальної сторони батареї. Для дослідження використовувались комбінації із 12 літій-іонних елементів живлення формату 18650.

Автори Stoliarov, S та інші у своїй науковій праці [20] навели методику дослідження літій-іонних батарей із використанням приладу CSBS. Основним компонентом приладу CSBS є порожнистий циліндр, що складається з чистої (99,5%) міді. У цьому циліндрі розміщується зразок літій-іонної батареї. Верхня поверхня зразка вирівнюється з верхнім краєм циліндра так, щоб вентиляційні отвори камери були спрямовані

в атмосферу. Внутрішні розміри циліндра забезпечують хороший тепловий контакт з досліджувальним взірцем. Для ініціювання необоротної реакції використовувався електричний нагрівач, що складався з резистивного нагрівального дроту та живиться від джерела постійного струму.

У науковій роботі [21] описано методику проведення експерименту із нагріванням літій-іонної батареї ємністю 50 А·год (яка складалась із 5 елементів призматичної форми) під дією електронагрівальної панелі потужністю 3 кВт. Для визначення температури використовувались 7 термопар типу хромель-алюмель.

У роботі [22] описано методику досліджень літій-іонних елементів на пожежну безпеку з використанням модельного вогнища пожежі класу В, що дає змогу визначити теплові параметри (температури займання, горіння та теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних елементів.

На підставі аналізу літературних джерел, встановлено, що переважна більшість наукових праць зосереджена на дослідженні літій-іонних елементів невеликої ємності, яка лежить в межах 4-100 Вт·год. Це зумовлено доступністю таких літій-іонних елементів та зручністю проведення таких експериментальних досліджень. Разом з тим вищеописані методи потребують дорогі вартісних калориметрів.

На підставі аналізу встановлено, що дослідженню широкоформатних літій-іонних модулів ємністю від 1 кВт·год і більше приділена недостатня увага.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробленні основних положень методики експериментальних досліджень модулів літій-іонних батарей електромобілів щодо пожежної безпеки відкритим полум'ям.

Кінцева мета дослідження полягає у визначенні теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційних отворів, займання, виникнення необоротної екзотермічної реакції, горіння тощо), які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також розкритті особливостей розвитку та поширення горіння по модулі літій-іонної батареї електромобіля.

Для цього необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ);
- обґрунтувати модельне вогнище пожежі, розміщення ЗВТ на досліджуваному модулі;
- обґрунтувати порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих експериментальних даних.

Методи дослідження. У роботі використано експериментальний та теоретичний методи дослідження. У теоретичному методі досліджень були застосовані такі операції, як: синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Сутність запропонованої методики полягає у визначенні температури спрацювання вентиляційних отворів, займання, виникнення необоротної екзотермічної реакції, дослідженні впливу чинників на ці параметри, а також розкритті особливостей розвитку та поширення горіння по модулі літій-іонної батареї електромобіля. Для створення теплового потоку на досліджуваній взірці необхідно визначити джерело тепла та обґрунтувати його параметри. В якості наукової розвідки вибрані модельні вогнища класу С. Перевагою таких модельних вогнищ є простота виконання газової установки-пальника, можливість регулювати

подачу газу тощо. У якості горючого газу обрано зріджений нафтовий газ пропан-бутан, також відомий як LPG (liquefied petroleum gas) через його доступність, прийнятну температуру горіння (1960 °C) і питому теплоту згорання (46,23 МДж/кг) [23, 24].

На рисунку 2 наведено загальну схему влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, 1 – модуль силової АКБ, яка піддається дослідженню, 2 термопари (кількість зображено умовно), 3 перетворювач вимірювальний інтелектуальний ПВІ -111 А, 4 мультиметр цифровий, 5 електричний провідник, 6 балон із зрідженим пропаном, 7 пальник з вентилем, 8 – металева основа для розміщення дослідного взірця на штативі. Причому розмір металевої основи має бути не менше ніж на 50 мм більшим від розміру досліджуваного модуля. Місце перед початком проведення експерименту наведено на рисунку 3.

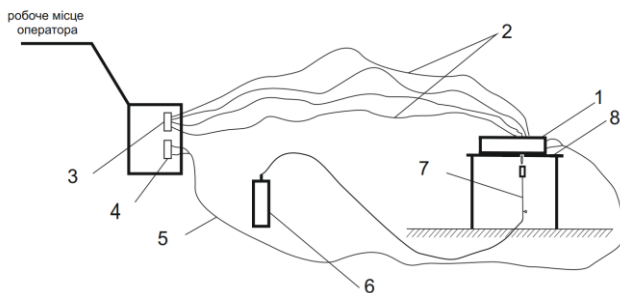


Рисунок 2 – Загальна схема влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

У металевій основі 8, на яку поміщається модуль, зроблено отвір, такого розміру щоб забезпечити вплив полум'я від пальника для створення необоротної реакції у одному з елементів модуля. Між сталевим листом та модулем розміщено термоізоляційний шар (за винятком площі отвору) з мінеральної вати чи іншого термоізоляційного негорючого матеріалу товщиною не менше 3 см та коефіцієнтом теплопровідності не більше 0,045 Вт/м·°C. Ізоляційний матеріал використовується для захисту від нагрівання поверхні модуля, поза площею отвору у сталевому листі. Товщина ізоляційного матеріалу та коефіцієнт теплопровідності обґрунтований температурними межами виникнення незворотної екзотермічної реакції, а також часом проведення експерименту з врахуванням розміщення пальника.

Для розміщення термопар зроблені наскрізні отвори у досліджуваному модулі, діаметром який забезпечить розміщення термопар, але не

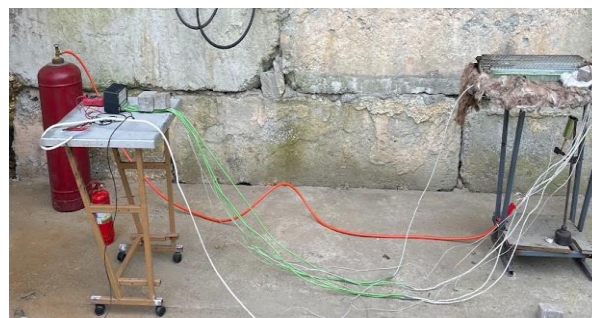


Рисунок 3 – Натурний вигляд обладнання та засобів вимірювальної техніки перед початком проведення експерименту

більшим ніж 3 мм в діаметрі. Отвори слід здійснювати у місцях, як показано на рисунку 4 (точка 1). Отвір більший ніж 3 мм в діаметрі призведе до руйнування корпусу елементів літій-іонних батарей та виникання короткого замикання (стосується модулів літій іонних елементів АКБ усього модельного ряду електромобілів Tesla, де використовуються елементи живлення формату 18650). Отвори слід здійснювати у одній секції модуля, де всі елементи з'єднанні паралельно. При створенні отвору необхідно враховувати розміщення між рядами елементів системи рідинного охолодження модуля. Отвори слід робити таким чином, щоб вони не проходили через рідинну систему охолодження, що забезпечить збільшення точності вимірювань через уникнення інерційності нагрівання металевої системи охолодження, по якій циркулює антифриз, що зображено на рисунку 2 точкою 2.

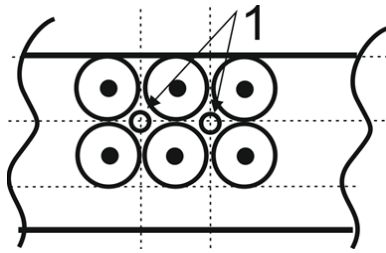


Рисунок 3 – Схематичне зображення місць здійснення наскрізних отворів відносно елементів модуля

Термопари у досліджуваному модулі розміщуються так, як показано на рисунку 5, де рисунок I – вигляд збоку, а рисунок II – вигляд

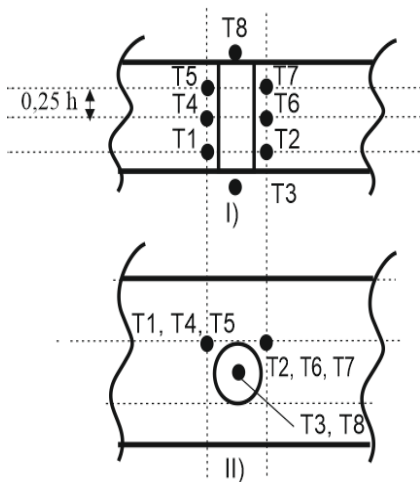


Рисунок 5 – Схематичне влаштування термопар

Термопари розміщуються навколо елемента, на який спрямовується теплова дія полум'я газового пальника. Термопара T1 фіксує температуру полум'я, термопари T1 та T2 розміщуються з обігрівальної сторони модуля на відстані 0,25 h від краю модуля (де h – товщина модуля), термопари T4 та T6 посередні модуля, термопари T5 та T7 розміщуються з необігрівальної частини модуля на відстані 0,25 h від краю модуля. Термопара T8 фіксує температуру на необігрівальній поверхні модуля.

З метою визначення внутрішнього короткого замикання, яке виникає внаслідок руйнування сепаратора та замкнення катода та анода літій-іонного елемента використовується цифровий мультиметр. Цифровий мультиметр підключається до полюсів літій-іонного елемента за допомогою двожильного мідного провідника діаметром 1,5 мм² (з метою зменшення опору на провіднику та підвищення точності вимірювань) та визначає спад напруги на елементі. Точність вимірювань цифрового мультиметра має становити не більше ніж 0,01 В.

Пальник підбирається таким чином, щоб витрата газу, який горить забезпечував прогрів

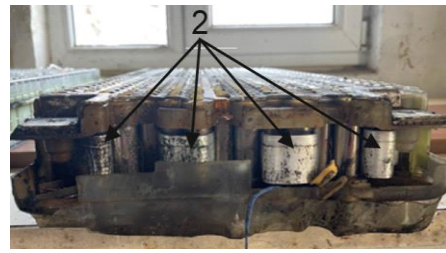


Рисунок 4 – натурний вигляд системи рідинного охолодження елементів модуля

знизу. Натурний вигляд розміщення отворів та влаштування термопар наведено на рисунку 6, де рисунок I) вигляд зверху, а рисунок II) вигляд знизу.



I)



II)

Рисунок 6 – Натурний вигляд влаштування термопар

елементів модуля літій-іонної батареї не менше як 0,1 °C/c. Це значення обґрунтоване у науковій праці [25]. Згідно з першим законом термодинаміки, роблячи припущення, що вся теплова енергія йде на нагрівання дослідного взірця, необхідну витрату газу, необхідного для нагрівання, можна визначити з рівності (1):

$$w = 10^3 \frac{c \cdot m \cdot dt}{q \cdot dT} \quad (1)$$

де w – масова витрата газу, г/с; c – усереднена питома теплоємність досліджуваного взірця, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$; m – маса досліджуваного взірця, кг; t – температура досліджуваного взірця, К; q – питома теплота згоряння газу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; T – час горіння пальника, с.

Відповідно до необхідної витрати газу підбирається пальник необхідних розмірів. Знаючи теоретичну витрату газу на пальнику експериментальним шляхом визначається коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище та нагрівання інших конструктивних елементів дослідної установки. Для цього влаштовується дослідна установка, згідно із описом вище, лише на місці дослідного

взірця розміщується деко з водою масою, що дорівнює масі елементів на які буде діяти газовий пальник. Визначається початкова температура води з використанням рідинного термометра а також маса балона до початку експерименту та запалюється пальник на час 10 хв. Після цього вимірюється температура води в деку та втрата маси балона зі зрідженим нафтовим газом. Причому точність ваг має становити не більше 10 г. Для контролю кількості використаного газу допускається використовувати витратомір. Коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище, можна знайти з рівності (2):

$$\zeta = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot dt_1}{10^3 w \cdot q \cdot dT} \quad (2)$$

де ζ – коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище; c_1 – питома теплоємність води, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$; m_1 – маса води, кг; t_1 – температура води, K.

Тому з врахуванням коефіцієнта ζ рівність (1) набуде вигляду (3):

$$w = 10^3 \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{c \cdot m \cdot dt}{q \cdot dT} \quad (3)$$

З метою визначення відстані від пальника до досліджуваного модуля доцільно провести його калібрування та визначити зону, де температура горіння є максимальною. Очевидно, що зона максимальної температури полум'я пальника залежить від розмірів полум'я, на які впливає масова витрати газу. В свою чергу, на масову витрату газу впливає маса елемента який нагрівається полум'ям пальника. Після визначення зони з найвищою температурою горіння пальник розміщується таким чином, щоб досліджуваний модуль власне потрапив у зону з найвищою температурою горіння.

Перед початком проведення експерименту відбирається не менше ніж три модулі літій-іонної батареї електромобіля. Модулі мають бути ідентичні за розміром, ємністю та з однаковим станом заряду. Перед дослідженням модулі зважують.

Послідовність проведення досліджень. Не менше ніж за 24 год до початку проведення досліджень відібрані ідентичні модулі з силової АКБ електромобіля поміщаються у вентильовану камеру при температурі 18 °C (± 2 °C) для забезпечення відтворюваності результатів дослідження. Здійснюється підготовка ЗВТ, газового пальника, штативів, пристроїв відеофіксації.

Після цього підключаються термопар до вимірювального перетворювача, який власне і відображає та фіксує значення температури на

термопарах, та перевіряється їхня працездатність і коректність підключення. Для цього необхідно подіяти на кінці термопар невеликим джерелом тепла (полум'ям сірника). При цьому значення на відповідній термопарі має відхилитися у більшу сторону.

Реєструються показники навколишнього середовища, а саме: температура, вологість повітря, швидкість вітру, значення атмосферного тиску. Після цього експериментальним шляхом визначається коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище. Маючи значення коефіцієнта визначається необхідна масова витрата газу, за якою підбирається газовий пальник відповідного конструктивного виконання та виставляється на вентилі потрібна витрата газу.

Після цього здійснюється калібрування газового пальника на визначення зони максимальної температури горіння.

Наступним етапом є утворення наскрізних отворів у модулі, для розміщення в них термопар, з врахуванням вищеписаних особливостей. Розміщується металевий лист з отвором над газовим пальником, на який забезпечується відповідна подача газу. Металевий лист застеляється шаром термоізоляційного матеріалу (за винятком отвору) на який поміщається дослідний літій-іонний модуль від АКБ електромобіля. Впевнившись, що всі термопари працюють коректно, їх розміщуємо у модулі, за схемою, що зображена на рис 5-6. Після розміщення термопар на елементі модуля, на який буде діяти полум'я пальника, під'єднуємо цифровий мультиметр. Цифровий мультиметр під'єднується до катода та анода елемента модуля, на який буде діяти полум'я пальника. Після цього під отвір металевого листа влаштовується газовий пальник, на відповідну висоту, який підключається до балона із зрідженим нафтовим газом.

Переконавшись, що всі ЗВТ влаштовані і працюють коректно, вмикається відеокамера, секундомір і відкривається вентиль подачі газу на пальник та відбувається його підпалення з використання підготовленого факела.

Під час проведення експериментальних досліджень відбувається фіксація температури на термопарах, напруги на елементі модуля, а також час проведення дослідження, з частотами не менше 1 Гц, за якими будуються графічні залежності.

Ключові моменти такі, як час та температура спрацювання вентиляційного клапана, викид вентиляційних газів, займання/горіння, тощо заносяться у протокол випробування за формою що наведено у таблиці.

Форма протоколу випробувань

	Температура, °С	Час, с
Початок падіння напруги		
Завершення падіння напруги		
Спрацювання вентиляційного клапана		
Викид вентиляційних газів		
Полум'яне горіння вентиляційних газів		
Вибух		
Спрацювання вентиляційного клапана і-го елемента		
Полум'яне горіння модуля		

Після спрацювання вентиляційного отвору третього елемента модуля не залежно від того чи відбулось полум'яне горіння чи не відбулось, подача газу у пальник припиняється шляхом перекривання вентиля подачі газу на балоні та відбувається спостереження за розвитком необоротної екзотермічної реакції. На підставі чого робиться висновок про її поширення або не поширення по усьому модулі силової АКБ електромобіля.

Експеримент проводиться до моменту повного вигорання модуля або припинення необоротної екзотермічної реакції. Припинення необоротної реакції вважається падіння температури на модулі нижче 80 °С та відсутній її ріст впродовж 6 год. Контроль температури модуля доцільно спостерігати з використанням тепловізійної камери LEADER TIC 3 (або аналог), з діапазоном вимірювання температур до 1250 °С. Для достовірності отриманих результатів дослід слід проводити не менше ніж три рази.

Після цього для кожної з термопар, за результатами трьох експериментів визначають середні значення та дисперсію результатів випробувань. Для визначення викидів чи квазівикидів внаслідок некоректної роботи ЗВТ або впливу на них інших непередбачуваних чинників доцільно розраховувати критерій Грабса.

Середнє значення температури визначається з рівності \bar{t}_j :

$$\bar{t}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} t_{ji} \quad (4)$$

де n_j - кількість результатів випробувань.

Дисперсія результатів випробувань S_j^2 з рівності

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t}_j)^2 \quad (5)$$

Критерій Грабса, G_{jmin} :

$$G_{jmin} = \frac{\bar{t}_j - t_{jmin}}{S_j} \quad (6)$$

Розраховані таким чином 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 u_{jmax} або u_{jmin} вважають квазівикидом. Якщо розраховане значення G_{jmax} або G_{jmin} більше 1 %-го критичного значення ($G_{кр. 1\%}$), то відповідно u_{jmax} або u_{jmin} вважають викидом. Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} виявляться меншими (або рівними) за критичні значення 5%, вказані у таблиці, то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Для забезпечення безпеки оператора між випробовуваним модулем та столом оператора рекомендується влаштувати захисний бар'єр виготовлений із дерев'яних дошок. Особи, які задіяні у проведенні досліджень повинні бути одягнені у захисний одяг та окуляри, бути ознайомлені з порядком проведення досліджень та пройти інструктаж з охорони праці. Майданчик, де проводиться експеримент, має бути обладнаний переносними вогнегасниками із сумарним зарядом вогнегасної речовини не менше 10 кг. Забороняється подавати воду на досліджуваний модуль під час проведення експерименту.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблена методика експериментальних досліджень модулів літій-іонних батарей електромобілів під дією відкритого полум'я модельного вогнища класу С. Використання цієї методики дасть змогу визначити температуру спрацювання вентиляційних отворів, виникнення необоротної екзотермічної реакції та займання модуля літій-іонних батарей електромобілів, а також виявити особливості поширення необоротної реакції по модулі. Експериментальним шляхом обґрунтовано критерії розміщення газового пальника, витрату газу та розміщення засобів вимірювальної техніки, описано порядок

проведення експерименту, а також оброблення отриманих експериментальних даних.

На підставі розробленої методики буде проведено експериментальне дослідження та оцінено отримані результати, що увійде у наступну публікацію.

Список літератури:

1. Кількість зареєстрованих електромобілів в Україні [Електронний ресурс] / Головний сервісний центр МВС, 2024. URL:

<https://hsc.gov.ua/index/poslugi/14419-2/poryadok-dostupu-do-nais/>.

2. Аналітичні матеріали [Електронний ресурс] / Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ), 2024. URL:

<https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>.

3. Li H., Duan Q., Zhao C., Huang Z., Wang Q. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ as cathode. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 375, pp. 241-254.

4. Yan W., Wang Z., Ouyang D., Chen S. Analysis and prediction of thermal runaway propagation interval in confined space based on response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55, 105822.

5. Feng X., Sun J., Ouyang M., Wang F., He X., Lu L., Peng H. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module. *Journal of Power Sources*, 2015, 275, pp. 261-273.

6. Ren D., Feng X., Lu L., He X., Ouyang M. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions. *Applied Energy*, 2019, 250, pp. 323-332.

7. Ren D., Feng X., Lu L., Ouyang M., Zheng S., Li J., He X. An electrochemical-thermal coupled overcharge-to-thermal-runaway model for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 2017, 364, pp. 328-340.

8. Lopez C. F., Jeevarajan J. A., Mukherjee P. P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(9), A1905.

9. Finegan D. P., Darcy E., Keyser M., Tjaden B., Heenan T. M., Jervis R., Shearing P. R. Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(6), pp. 1377-1388.

10. Ren D., Feng X., Liu L., Hsu H., Lu L., Wang L., Ouyang M. Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition. *Energy Storage Materials*, 2021, 34, pp. 563-573.

11. Liu X., Ren D., Hsu H., Feng X., Xu G. L., Zhuang M., Ouyang M. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit. *Joule*, 2018, 2(10), pp. 2047-2064.

12. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Chalyy D., Lemishko M., Tur N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 2(10 (122)), pp. 39-46.
doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999.

13. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Ruduk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE Int. J. Trans. Safety*, 2023, 11(3), doi:10.4271/09-11-03-0013.

14. Larsson F., Andersson P., Mellander B. E. Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2016, 2(2), 9.

15. Reaction to Fire Tests for Building Products—Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item; EN 13823:2010; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2010.

16. Bryant R. A., Bundy M. F. The NIST 20 MW Calorimetry measurement system for large-fire research. *Fire Technology*, 2019, pp. xx-xx (тут слід уточнити сторінки, якщо є).

17. Huggett C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, 1980, 4(2), pp. 61-65.

18. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(1), pp. 5271-5280.

19. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D., Chen C. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 2015, 285, pp. 80-89.

20. Said A. O., Lee C., Stoliarov S. I. Experimental investigation of cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays: Impact of cathode chemistry. *Journal of Power Sources*, 2020, 446, 227347.

21. Liu X., Wu Z., Stoliarov S. I., Denlinger M., Masias A., Snyder K. Heat release during thermally-induced failure of a lithium ion battery: Impact of cathode composition. *Fire Safety Journal*, 2016, 85, pp. 10-22.

22. Гаврилюк А.Ф., Яковчук Р.С. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023, №2 (16), с. 32-41. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.32-41>.

23. ДСТУ EN 589:2017 Палива автомобільні. Газ нафтовий скраплений. Технічні вимоги та методи контролювання (EN 589:2008+A1:2012, IDT).

24. Zivenko O. Lpg accounting specificity during its storage and transportation. *Measuring Equipment and Metrology*, 2019, 80(3), pp. 21-27. doi:10.23939/istcmtm2019.03.021. ISSN 0368-6418.

25. Raslavičius L., Keršys A., Mockus S., Keršienė N., Starevičius M. Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32, pp. 513-525.

References:

1. Kilkist zareiestrovanykh elektromobiliv v Ukraini [Number of registered electric vehicles in Ukraine], [Elektronnyi resurs]. Holovnyi servisnyi tsentr MVS, 2024. URL: <https://hsc.gov.ua/index/poslugi/14419-2/poryadok-dostupu-do-nais/> [in Ukrainian].

2. Analitichni materialy [Analytical materials] [Elektronnyi resurs]. Instytut derzhavnoho upravlinnia ta naukovykh doslidzhen z tsyvilnoho zakhystu (IDU ND TsZ), 2024. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>, [in Ukrainian].

3. Li, H., Duan, Q., Zhao, C., Huang, Z., & Wang, Q. (2019). Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large

format battery module with Li (Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ as cathode. *Journal of hazardous materials*, 375, 241-254 [in English].

4. Yan, W., Wang, Z., Ouyang, D., & Chen, S. (2022). Analysis and prediction of thermal runaway propagation interval in confined space based on response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Energy Storage*, 55, 105822 [in English].

5. Feng, X., Sun, J., Ouyang, M., Wang, F., He, X., Lu, L., & Peng, H. (2015). Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module. *Journal of Power Sources*, 275, 261-273 [in English].

6. Ren, D., Feng, X., Lu, L., He, X., & Ouyang, M. (2019). Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions. *Applied Energy*, 250, 323-332 [in English].

7. Ren, D., Feng, X., Lu, L., Ouyang, M., Zheng, S., Li, J., & He, X. (2017). An electrochemical-thermal coupled overcharge-to-thermal-runaway model for lithium ion battery. *Journal of power sources*, 364, 328-340 [in English].

8. Lopez, C. F., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2015). Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules. *Journal of the electrochemical society*, 162(9), A1905 [in English].

9. Finegan, D. P., Darcy, E., Keyser, M., Tjaden, B., Heenan, T. M., Jervis, R., ... & Shearing, P. R. (2017). Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits. *Energy & Environmental Science*, 10(6), 1377-1388 [in English].

10. Ren, D., Feng, X., Liu, L., Hsu, H., Lu, L., Wang, L., & Ouyang, M. (2021). Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition. *Energy Storage Materials*, 34, 563-573 [in English].

11. Liu, X., Ren, D., Hsu, H., Feng, X., Xu, G. L., Zhuang, M., ... & Ouyang, M. (2018). Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit. *Joule*, 2(10), 2047-2064 [in English].

12. 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> [in English].

13. Gavryliuk, A., Yakovchuk R. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building., R., Ballo, Y., Ruduk, Y. (2023). *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):2023, doi:10.4271/09-11-03-0013 [in English].

14. 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. [in English].
15. Reaction to Fire Tests for Building Products—Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item; EN 13823:2010; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium [in English].
16. Bryant, R. A., & Bundy, M. F. (2019). The NIST 20 MW Calorimetry measurement system for large-fire research [in English].
17. Huggett, C. (1980). Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and materials*, 4(2), 61-65, [in English].
18. Ribière, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., & Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5271-5280 [in English].
19. Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Li, K., Sun, J., Kong, D., & Chen, C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285, 80-89, [in English].
20. Said, A. O., Lee, C., & Stoliarov, S. I. (2020). Experimental investigation of cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays: Impact of cathode chemistry. *Journal of Power Sources*, 446, 227347, [in English].
21. Liu, X., Wu, Z., Stoliarov, S. I., Denlinger, M., Masias, A., & Snyder, K. (2016). Heat release during thermally-induced failure of a lithium ion battery: Impact of cathode composition. *Fire Safety Journal*, 85, 10-22, [in English].
22. Gavryliuk A.F., Yakovchuk R.S. (2023). *Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen povedinky litii-ionnykh batarei pid diieiu vidkrytoho polumia* [Methodology for experimental studies of the behaviour of lithium-ion batteries under the influence of an open flame]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka* №2 (16), 32-41. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.32-41> [in Ukrainian].
23. DSTU EN 589:2017 Palyva avtomobilni. Haz naftovyi skraplenyi. Tekhnichni vymohy ta metody kontroliuvannia [Automotive fuels. Liquefied petroleum gas. Technical requirements and control methods] (EN 589:2008+A1:2012, IDT), [in Ukrainian].
24. Zivenko, Oleksiy (2019). Lpg accounting specificity during its storage and transportation. *Measuring Equipment and Metrology* T. 80, № 3. c. 21—27. doi:10.23939/istcmtm2019.03.021. ISSN 0368-6418, [in English].
25. Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513-525 [in English].

© А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 24.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.