

*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

gavrilyk3@ukr.net

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДУЛІВ СИЛОВОЇ БАТАРЕЇ TESLA MODEL S НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

**Постановка проблеми.** Кількість електромобілів у Європі, Америці та Азії продовжує стрімко зростати. Така тенденція зумовлена з одного боку енергетичною кризою, а з іншого – захистом довкілля. Вагомим недоліком літій-іонних батарей є виникнення в їх корпусі, за певних умов, необоротної екзотермічної реакції. З виділенням тепла, горючих та вибухонебезпечних газів, що призводить є не лише до виходу з ладу батареї, але й до займань та вибухів.

**Мета дослідження** полягає у розкритті особливостей горіння, визначення теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційного клапана, займання, горіння) які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі модулів силових батарей Tesla model S). Для досягнення задекларованої мети здійснено експериментальні дослідження впливу відкритого полум'я від пропанового пальника на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model S, а також виявлено та описано особливості розвитку необоротної екзотермічної реакції та особливостей його горіння.

**Опис матеріалу.** Для дослідження відбирались модулі з силової АКБ електромобіля Tesla model S ємністю 75 кВт·год. Модуль складався із 462 елементів формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та вистою 65 мм). Анод даних елементів живлення виконаний з графіту, а катод –  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  (NCA). Загальна ємність модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга при повній ємності – 27 В. Розміри модуля становили 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм. Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Згідно із методикою досліджень, перед початком випробувань модуль силової літій-іонної батареї піддавався зважуванню. Маса модуля перед початком випробувань становила 28,4 кг.

Для створення теплового потоку використовувався газовий пальник, на який подавався газ пропан з балона об'ємом 50 л. Потужність пальника становила 1 кВт. Для впливу полум'я від пальника та створення необоротної реакції у одному з елементів модуля силової літій-іонної батареї використовувався отвір, розміром 35 мм на 35 мм, який був утворений в металевому листі, на який поміщався модуль. Власне через цей отвір відбувалося нагрівання частини модуля (елемента) за допомогою газового пальника.

Для фіксації температур використовувались термопари хромель-алюмель (ТХА) з діапазоном вимірювання 0-1500 °С та точністю 0,1 °С. Термопари підключались до перетворювача вимірювального інтелектуального ПВІ-111 А. Фіксація температур від термопар здійснювалась кожену секунду та записувалась на накопичувач формату SD перетворювача у вигляді масиву даних.

**Висновки.** За результатами натурних вогневих випробувань модулів силової АКБ електромобіля Tesla model S за розробленою методикою отримано такі результати. При дії відкритого полум'я на модуль акумуляторної батареї електромобіля Tesla model S спрацювання вентиляційного отвору відбулось на 1545 с після початку проведення експерименту при температурі з обігріваної сторони 613-645 °С, по середині елемента 175-176 °С та з необігріваної сторони 95-96 °С за умов проведення експерименту. Напередодні відкриття вентиляційного отвору відбувається падіння напруги, що свідчить про руйнування сепаратора та виникнення внутрішнього короткого замикання між анодом та катодом елемента. Виділення тепла від чотирьох елементів живлення внаслідок перебігу необоротної екзотермічної реакції та викиду від них вентиляційних газів є достатнім для утворення ланцюгової реакції та полум'яного горіння власне самого модуля літій-іонної батареї. Подальші спрацювання вентиляційних отворів елементів мали стохастичний характер.

**Ключові слова:** необоротна екзотермічна реакція, Tesla model S, пожежа електромобіля, пожежа.

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

**Introduction.** The number of electric vehicles in Europe, America and Asia continues to grow rapidly. This trend is driven on the one hand by the energy crisis and on the other by environmental protection. A significant disadvantage of lithium-ion batteries is that, under certain conditions, an irreversible exothermic reaction occurs in their bodies. This results in the release of heat, flammable and explosive gases, which leads not only to battery failure but also to fires and explosions.

**Purpose.** Is to reveal the features of combustion, and determine the thermal parameters (temperature of ventilation valve operation, ignition, combustion) that describe the combustion processes of lithium-ion battery modules of electric vehicles (for example, power battery modules of Tesla Model S). To achieve the declared goal, experimental studies of the effect of an open flame from a propane burner on a lithium-ion battery module of the Tesla Model's electric vehicle were carried out, and the peculiarities of the development of an irreversible exothermic reaction of combustion of lithium-ion battery modules of electric vehicles were identified and described.

**Material description.** For the research, modules were selected from the power battery of the Tesla Model S electric vehicle with a capacity of 75 kWh. The module consisted of 462 18650 cells (cylindrical in shape with a diameter of 18 mm and a height of 65 mm). The anode of these batteries is made of graphite, and the cathode is  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  (NCA). The total capacity of the module was 5.7 kWh, and the voltage at full capacity was 27 V. The module dimensions are 6550 mm by 2750 mm and 120 mm high.

The battery charge state was diagnosed using a digital multimeter. According to the research methodology, the power lithium-ion battery module was weighed before the tests. The module weighed 28.4 kg before the start of the tests. A gas burner was used to create the heat flux, which was supplied with propane gas from a 50-litre cylinder. The power of the burner was 1 kW. To expose the flame from the burner and create an irreversible reaction in one of the elements of the lithium-ion power battery module, a 35 mm by 35 mm hole was used, which was formed in the metal sheet on which the module was placed. It was through this hole that a part of the module (cell) was heated using a gas burner. To record the temperatures, chromel-alumel (CA) thermocouples with a measuring range of 0-1500 °C and a step of 1 °C were used. The thermocouples were connected to the measuring intelligent converter PVI-111 A. The temperatures from the thermocouples were recorded every second and recorded on the SD storage device of the converter as a data array.

**Conclusions.** According to the results of full-scale fire tests of the elements of the power battery of the Tesla Model S electric vehicle using the developed methodology, the following results were obtained. When an open flame was exposed to the battery module of the Tesla Model S electric vehicle, the vent was triggered at 1545 s after the experiment at a temperature of 613-645 °C on the heating side, 175-176 °C in the middle of the cell, and 95-96 °C on the non-heating side under the conditions of the experiment. Before the vent is opened, a voltage drop occurs, which indicates the destruction of the separator and the occurrence of an internal short circuit between the anode and cathode of the cell. This process leads not only to the generation of heat but also to the formation of gases in the lithium-ion cell body. The heat generated by the four batteries as a result of the irreversible exothermic reaction and the release of ventilation gases from them is sufficient to cause a chain reaction and flammable combustion of the lithium-ion battery module itself, under the conditions of the experiment. Further operation of the cell ventilation holes was stochastic.

**Keywords:** thermal runaway, Tesla Model S, electric vehicle fire, fire.

### **Постановка проблеми.**

Кількість електромобілів продовжує стрімко зростати. Варто відмітити, що сумарна ємність батарей електромобілів у 2022 році перевищила 357 ГВт·год [1], а вартість світового ринку електромобілів до 2025 року становитиме понад 93 млрд. дол. США [2]. Вагомим недоліком літій-іонних батарей (далі – LIB Lithium-ion batteries) є виникнення в їх корпусі, за певних умов, необоротної екзотермічної реакції. Це призводить до виділення тепла, горючих та вибухонебезпечних газів, що призводить не лише до виходу з ладу батареї, але й до займань та вибухів [3-5].

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Для створення необоротної реакції у літій-іонних батареях використовуються різні способи нагрівання.

Larsson та інші [6] використовували відкрий вогонь у камері апарата Single Burning Item, який зазвичай використовується для класифікації будівельних матеріалів згідно зі схемою Європейської класифікації EN 13823. Пропановий пальник був розміщений під елементами/батарейми та запаливався через дві хвилини після початку тесту. Для дослідження використовувались елементи з літій-залізофосфатним катодом (LFP),  $\text{LiFePO}_4$ . Пікові значення густини теплового випромінювання змінювалися в досить широкому діапазоні, між 13 і 57 кВт для батарей з енергетичною ємністю 100 Вт·год. Нормоване загальне виділення тепла на енергоємність становило 28–75 кДж Вт·год<sup>-1</sup>, а нормовані максимальні значення потужності

теплого випромінювання 110–490 Вт·Вт·год<sup>-1</sup>

Ряд науковців використовують різні електричні нагрівачі для створення необоротної екзотермічної реакції (далі TR — thermal runaway) у LIB. Це обумовлено зручністю використання, простою конструкцією нагрівачів, а також можливістю регулювати потужність нагрівання. Загалом усі електричні нагрівачі, які використовують для створення TR, можна розділити на такі, які гріють LIB, завдяки тепловому випромінюванню, тобто безпосередньо не контактують із LIB і такі, що передають теплову енергію контактним способом – теплопровідністю.

Дослідники у наукових працях [7-9] використовували електричний нагрівач плівкового типу, який безпосередньо контактував із LIB. Для досліджень використовувались літій-кобальт-оксидні елементи формату 18650 і номінальною електричною ємністю 2600 мА·год. Встановлено, що нижня межа займистості горючих газоподібних продуктів становить  $5,79 \pm 0,12$  об.% у повітрі. Обчислено хімічне виділення тепла в результаті реакцій між матеріалами батареї всередині та поза корпусом елементів, яке становить  $56,6 \pm 2,5$  кДж на елемент, а загальна кількість тепла, що виділяється від полум'яного горіння, становить  $60,1 \pm 17,5$  кДж на елемент.

У наукових працях [10-11] використано електронагрівальну спіраль, яка намотувалась на корпус та нагрівала досліджуваний взірець LIB. Дослідженню піддавались взірці літій-іонних батарей типу Li (Ni<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>)O<sub>2</sub> ємністю 4600 мА·год. При цьому всебічно досліджено вплив зовнішнього тиску, де встановлено, що з найвищою швидкістю полум'я розповсюджуються при тиску 60 кПа.

Автори у своїх роботах [12, 13] з використанням FDS – моделювання провели дослідження температурних параметрів під час пожежі електромобіля на закритому паркінгу. На підставі моделювання визначено, що з врахуванням критерію значення температури в 120°C на стіні будівлі і часу вільного розвитку пожежі 600 с мінімальна протипожежна відстань від електромобіля до стіни будівель різного функціонального призначення повинна становити не менше 3 м.

У роботі [14] автори провели чисельний аналіз батареї NMC пакетного типу ємністю 200 Вт·год та станом заряду (SOC) 50 % за допомогою ANSYS Fluent v19.2. Для виникнення TR використовувався бутановий палик потужністю 12 кВт. На підставі моделювання встановлено критичний час для

поширення TR між модулями LIB. Власне час поширення пожежі від першого модуля до п'ятого становить понад 700 с.

Автори роботи [15] для дослідження LIB використовували калориметр, а для виникнення TR у LIB - теплову панель потужністю 30 кВт. Під час експериментальних досліджень виділено дві стадії горіння LIB. Перша стадія характеризується дифузійним полум'ям, а друга – частково змішаним полум'ям із найвищим значенням теплового випромінювання і сильним вибухом.

У науковій роботі [16] проведено експериментальні дослідження з використанням відкритого полум'я власне на окремо взятих літій-іонних елементах від батареї електромобіля Tesla model S, де встановлено, що при дії полум'я на вертикально розміщені елементи анодом вниз, вентиляційний отвір спрацьовує найпізніше, а при горизонтальному розміщенні – найшвидше.

Автори роботи [17] досліджували механічний вплив на літій-іонний елемент живлення Panasonic NCR18650B. За результатами досліджень встановлено, що корпус досліджувальних взірців Panasonic NCR18650B витримує без подальшого займання навантаження близько 7,84 МПа. Збільшення навантаження призводить до займання дослідних взірців.

Аналіз наукових праць показав, що для досліджень зазвичай використовують елементи від силових батарей з малою ємністю – 8-20 Вт·год, а дослідженням які стосуються великоємних літій-іонних батарей електромобілів приділена недостатня увага.

**Мета і значі дослідження.** Мета дослідження полягає у розкритті особливостей та визначенні теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційного клапана, займання), які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі модулів силових батарей Tesla model S).

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

– експериментально дослідити вплив відкритого полум'я на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model S;

– виявити та описати особливості розвитку необоротної екзотермічної реакції та особливості горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів.

**Опис експериментальної частини.**

Для дослідження відбирались модулі з силової АКБ електромобіля Tesla model S ємністю 75 кВт·год (рис 1).



а)



б)

**Рисунок 1** – Зовнішній вигляд модуля силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S :  
а) вигляд згори б) вигляд збоку

Модуль складався із 462 елементів формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та висотою 65 мм). Анод даних елементів живлення виготовлений з графіту, а катод – з  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  (NCA). Загальна ємність модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга при повній ємності – 27 В. Розміри модуля становлять 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм, а заряд – 65 %. Модулі були у справному стані та візуально без пошкоджень.

Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Напруга модуля перед початком випробувань становила 24,8 В.

Згідно із методикою досліджень, перед початком випробувань модуль силової літій-іонної батареї піддавався зважуванню. Маса модуля перед початком випробувань становила 28,4 кг.

Для створення теплового потоку використовувався газовий пальник, на який подавався газ пропан з балона об'ємом 50 л, потужність пальника 1 кВт.

У металевому листі, на якому було розміщено модуль силової літій-іонної батареї, зроблено отвір розміром 35x35мм. Через цей отвір відбувалося нагрівання полум'ям від напальника частини модуля(елемента) для виникнення у ньому необоротної реакції.

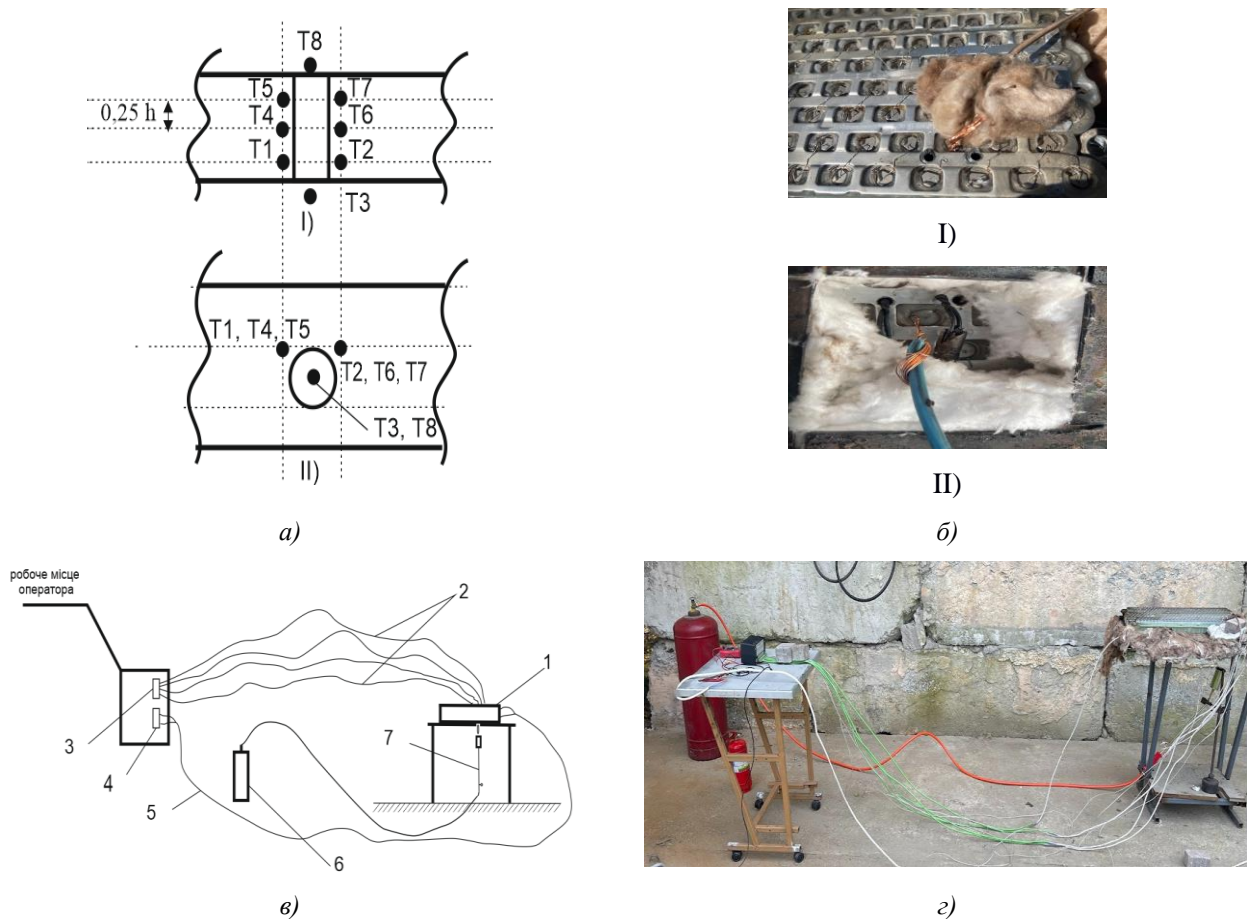
Для фіксації температур використовувались термопари хромель-алюмель (ТХА) з діапазоном вимірювання 0-1500 °С та точністю 0,1 °С. Термопари було під'єднані до перетворювача

вимірювального інтелектуального ПВІ-111 А, який фіксував температуру термопар. Для більшої точності отриманих результатів здійснювалась відеофіксація температурних параметрів, які відображались на екрані ПВІ-111 А. З відео ми брали температурні параметри з частотою 1 Гц, а параметри з SD-карти були резервними та враховувались при верифікації.

Розміщення термопар у модулі зображено на рисунку 2 а, де рисунок I)- вигляд збоку, а II)-вигляд знизу. Натурний вигляд розміщення отворів та влаштування термопар приведено на рисунку 2 б, де рисунок I) вигляд зверху, а рисунок II) вигляд знизу. Для де I)-вигляд збоку, а II)- вигляд знизу.

розміщення термопар було зроблено два отвори діаметром 3 мм у модулі поруч із елементом, який піддавався нагріванню. Загалом було зроблено 8 термопар. Для фіксації спаду напруги на елементі, який піддається тепловому впливу, до катода та анода під'єднується двожилний провідник ПВ січенням 1,5 мм<sup>2</sup>, а іншим кінцем-до цифрового мультиметра. На рисунку 2 в наведено загальну схему влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, де 1 - модуль силової АКБ, яка піддається дослідженню, 2 - термопари (кількість зображено умовно), 3 - перетворювач вимірювального інтелектуального ПВІ - 111 А, 4 - мультиметр цифровий, 5 - електричний провідник, 6 - балон із зрідженим пропаном, 7 - пальник з вентиляем. Місце перед початком проведення експерименту наведено на рисунку 2 г.





**Рисунок 2** – а) схематичне розміщення термопар б) натурний вигляд розміщення термопар в) схематичне розміщення обладнання та засобів вимірювальної техніки г) фото перед початком проведення експерименту

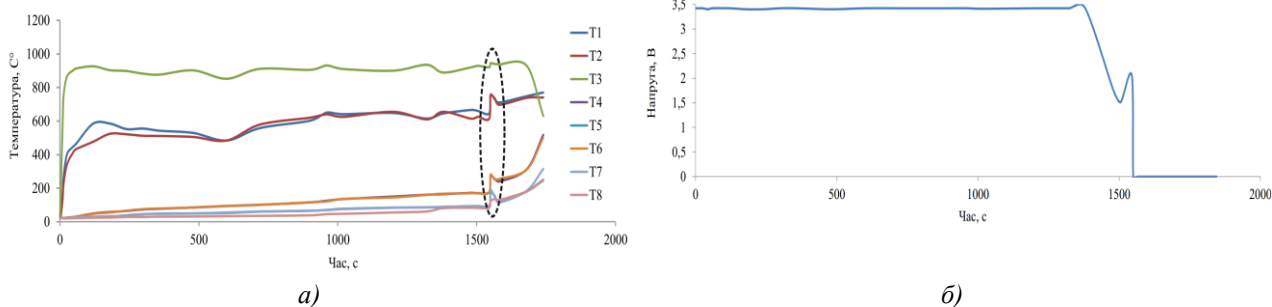
Під час проведення експерименту здійснювалась відеофікація. Для відтворюваності експериментальних даних модулі поміщались у вентиляльовану камеру при температурі 18 °C (+- 2 °C) на час 20-24 год. Загалом було проведено серію із трьох ідентичних експериментів.

Перед початком проведення досліджень напруга на елементі становила 3,42 В, а температура навколишнього середовища -24 °C.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Оброблені результати експериментальних досліджень наведено на рисунку 3. Динаміку зміни температури елемента літій-іонної силової батареї Tesla model S, який знаходився в складі модуля,

наведено на рисунку 3а. Після запалювання газового пальника термопарі T1-T3 відразу фіксують приріст температури. Термопарі T4 і T6 фіксують збільшення температури починаючи з 65 с після початку експерименту, а термопарі T5 і T7-починаючи з 130 с після початку випробувань. Це пояснюється інерційністю прогрівання модуля АКБ.

Коливання показів на термопарі T1 можна пояснити вітровим впливом на полум'я газового пальника, і, як наслідок, коливання показів на термопарах T2-T3. Впродовж часу проведення експерименту модуль рівномірно нагрівався, а початкова напруга на елементі модуля становила 3,42 В (рис. 3 б).



**Рисунок 3** – Динаміка зміни: а) температури елемента у модулі літій-іонної батареї: б) напруги на елементі

На 1380 с після початку проведення експерименту цифровий мультиметр почав фіксувати плавне падіння напруги з швидкістю орієнтовно 0,01 В/с. Падіння напруги зумовлене руйнуванням (плавленням) сепаратора і початком виникення внутрішнього короткого замикання, що призводить до виділення тепла [18]. При цьому температура у нижній частині модуля на термопарах Т1 і Т2 становила 645 і 654 °С відповідно. Термопари Т4 і Т6 фіксували 164 і 167 °С відповідно і у верхній частині модуля температура на термопарі Т5 становить 88 °С, а на термопарі Т7 – 89 °С. На 1480 с напруга становила 1,75 В. Після цього продовж 40 с напруга на елементі зростає досягаючи значення 2,05 В, а термопари Т1 і Т2 фіксують температуру 613 °С і 645 °С. По середині елемента температура становить 172 °С і 170 °С (Т4 і Т6), і на необігріваній стороні елемента температура становить 89 °С і 88 °С (Т5 і Т7). Власне при досягненні 2,05 В на 1545 с після початку проведення експерименту спрацьовує вентиляційний клапан і відбувається викид вентиляційних газів. При цьому напруга різко спадає до 0 В. При викиді відбувається займання і горіння вентиляційних газів, яке тривало 5-6 с. Це спричинило різкий стрибок температури, яку фіксують термопари. Фактично стрибкоподібний приріст температури становить 110-127 °С на усіх термопарах (за винятком Т8). Після завершення горіння газів через 11 с відбулось спрацювання вентиляційного клапана іншого елемента, що також супроводжувалось горінням вентиляційних газів. Чергові спрацювання вентиляційних клапанів інших елементів і подальше їх горіння

відбувалось з інтервалом 10-28 с. При цьому спостерігалась акумуляція теплової енергії, про що свідчать покази термопар Т1, Т2, Т4, Т6. Після спрацювання вентиляційного клапана 4-го елемента було прийнято рішення перекрити подачу пропану у пальник, однак це не припинило розвитку ланцюгової реакції. Спрацювання вентиляційних отворів елементів модуля літій-іонної батареї набуло стохастичного характеру. Особливість стохастичного розвитку полягає у випадкових спрацюваннях вентиляційних отворів елементів, які межують із елементом, в якому викликана екзотермічна реакція (штучно чи природно). Передбачити порядок спрацювання вентиляційних клапанів елементів з подальшим їх займанням, в масштабі модуля, є складною та невирішеною задачею.

На 1685 с після початку випробування відбулось полум'яне горіння частини модуля. Після цього експеримент припинився та були використанні переносні вогнегасники для гасіння полум'я. З використанням переносного вогнегасника ВП-5 вдалось «збити» полум'я, яким був охоплений модуль. Однак через 7-12 с полум'я з'явилося знову і горіння модуля продовжилось. Після цього для гасіння був використаний вогнегасник ВВК-3,5, де спостерігався схожий ефект, як при застосуванні порошкового вогнегасника. Однак полум'я з'явилося через 22 с після використання такого вогнегасника. Загалом було застосовано три вогнегасники ВП-5 та один ВВК-3,5, але і цього виявилось не достатньо для гасіння модуля, що призвело до повного його вигорання, зовнішнів що і наведено на рисунку 4.



**Рисунок 4** – Зовнішній вигляд літій-іонного модуля батареї після проведення експерименту

Варто відмітити, що втрата маси модулів після проведення експериментів становила 33-42 % від початкової їх маси.

Висновки. За результатами натурних вогневих випробувань елементів силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S за розробленою методикою отримано такі результати:

1. При дії відкритого полум'я, за умови проведення експерименту, на модуль акумуляторної батареї електромобіля Tesla model S, вентиляційний отвір спрацював на 1545 с після початку проведення експерименту при температурі з обігріваної сторони 613-645 °С, по середині елемента - 175-176 °С та з необігрівальної сторони - 95-96 °С.

2. Перед відкриванням вентиляційного отвору відбувається падіння напруги, що свідчить про руйнування сепаратора та виникнення внутрішнього короткого замикання між анодом та катодом елемента. Очевидно, що такий процес призводить не лише до виникнення теплової енергії, але й до утворення газів у корпусі літій-іонного елемента.

3. Виділення тепла від чотирьох елементів живлення внаслідок перебігу необоротної екзотермічної реакції та викиду вентиляційних газів, за умов проведення експерименту, є достатнім для виникнення ланцюгової реакції та полум'яного горіння власне самого модуля літій-іонної батареї. Подальші спрацювання вентиляційних отворів інших елементів мали стохастичний характер.

#### Список літератури

1. Zhang J., Yue L., Kong, Q., Liu Z., Zhou X., Zhang C., Chen, L. Sustainable, heat-resistant and flame-retardant cellulose-based composite separator for high-performance lithium ion battery. *Scientific reports*, 2014, 4(1), 3935.

2. Diaz L. B., He X., Hu, Z., Restuccia F., Marinescu M., Barreras J. V., Rein G. Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(9), 090559.

3. Liao Z., Zhang S., Li K., Zhang G., Habetler T. G. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2019, 436, 226879.

4. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*, 2022, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.

5. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu, L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, 2018, 10, 246-267.

6. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Lorén A., Mellander B. E. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 2014, 271, 414-420.

7. Said A. O., Lee C., Stolarov S. I., Marshall A. W. Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays. *Applied Energy*, 2019, 248, 415-428.

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. Fang J., Cai, J., He X. Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197, 117399.

10. Wang H., Shi W., Hu F., Wang Y., Hu X., Li H. Over-heating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion battery with high nickel content in positive electrode. *Energy*, 2021, 224, 120072.

11. Liu Y., Niu H., Xu C., Huang X. Thermal runaway propagation in linear battery module under low atmospheric pressure. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216, 119086.

12. Гаврилюк А., Яковчук Р., Чалий Д., Лемішко М., Тур Н. Визначення протипожежних відстаней під час пожежі Tesla Model S в закритій парковці. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*, 2023, 2(10) (122), 39-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999>

13. Гаврилюк А., Яковчук Р., Балло Ю., Рудик Ю. Теплове моделювання впливу пожежі електромобіля на будівлю паркінгу. *SAE Int. J. Trans. Safety*, 2023, 11(3), doi:10.4271/09-11-03-0013.

14. Kim J. T., Choi J. Y., Kang S., Han N. G., Kim D. K. Development of thermal runaway propagation model considering vent gas combustion for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60, 106535.

15. Kim S. W., Park S. G., Lee E. J. Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 80, 104851.

16. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С., Лемішко М. В. Експериментальні дослідження елементів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*, 2023, 43, 50-62. DOI:10.32447/20786662.43.2023.07.

17. Lazarenko O., Hembara T., Pospolita V., Voytovych D. Assessing the effect of mechanical deformation of the panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*, 2023, 2(7) (122), 69-78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>.

18. Willstrand O., Pushp M., Ingason H., Brandell D. Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 2024, 143, 104078.

#### References

1. Zhang, J., Yue, L., Kong, Q., Liu, Z., Zhou, X., Zhang, C., & Chen, L. (2014). Sustainable, heat-resistant and flame-retardant cellulose-based composite separator for high-performance lithium ion battery. *Scientific Reports*, 4(1), 3935 [in Ukrainian].

2. Diaz, L. B., He, X., Hu, Z., Restuccia, F., Marinescu, M., Barreras, J. V., & Rein, G. (2020). Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090559 [in English].

3. Liao, Z., Zhang, S., Li, K., Zhang, G., & Habetler, T. G. (2019). A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-

ion batteries. *Journal of Power Sources*, 436, 226879 [in English].

4. Gavryliuk, A. F., & Kushnir, A. P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoi stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoj batarei [Analysis of the fire hazard of electric vehicles by the thermal stability of a lithium power battery]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>. [in Ukrainian].

5. 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. [in English].

6. 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.

7. Said, A. O., Lee, C., Stoliarov, S. I., & Marshall, A. W. (2019). Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays. *Applied Energy*, 248, 415-428 [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. Fang, J., Cai, J., & He, X. (2021). Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117399 [in English].

10. Wang, H., Shi, W., Hu, F., Wang, Y., Hu, X., & Li, H. (2021). Over-heating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion battery with high nickel content in positive electrode. *Energy*, 224, 120072 [in English].

11. Liu, Y., Niu, H., Xu, C., & Huang, X. (2022). Thermal runaway propagation in linear battery module under low atmospheric pressure. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119086 [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 Ukrainian].

13. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., & Ruduk, Y. (2023). Teplove modeliuvannia vplyvu pozhezhi elektromobilia na budivliu parkinhu [Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building]. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 2023, doi:10.4271/09-11-03-0013 [in Ukrainian].

14. 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 [in English].

15. 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 [in English].

16. Gavryliuk, A. F., Yakovchuk, R. S., & Lemishko, M. V. (2023). Eksperymentalni doslidzhennia elementiv sylovoi batarei Tesla Model S na predmet pozhezhnoi nebezpeky [Experimental studies of Tesla Model S power battery elements for fire safety]. *Pozhezhna bezpeka*, 43, 50-62. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.07> [in Ukrainian].

17. Lazarenko, O., Hembara, T., Pospolitak, V., & Voytovych, D. (2023). Otsinka vplyvu mekhanichnoi deformatsii korpusu litii-ionnoho elementa zhyvlennia Panasonic NCR18650B na yoho pozhezhnu bezpeku [Assessing the effect of mechanical deformation of the panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7 (122)), 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780> [in Ukrainian].

18. Willstrand, O., Pushp, M., Ingason, H., & Brandell, D. (2024). Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 143, 104078 [in English].

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

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 19.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.