


*А. Ф. Гаврилюк*

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

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

 [gavrilyk13@ukr.net](mailto:gavrilyk13@ukr.net)

## ОБГРУНТУВАННЯ НАЙБІЛЬШ ЗНАЧУЩИХ КРИТЕРІЇВ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**Постановка проблеми.** Сьогодні індустрія електромобілів стрімко розвивається, а кількість проданих електромобілів зростає. Це зумовлено з одного боку енергетичною кризою, а з іншого – захистом довкілля. Така тенденція призводить до збільшення абсолютної та відносної кількості електромобілів у світовому автопарку. Тому дослідження пожежної небезпеки електромобілів і їх компонентів є актуальним питанням в умовах сьогодення.

**Мета дослідження** полягає у розкритті особливостей впливу ступеня заряду на пожежну небезпеку літій-іонних батарей (температуру горіння, втрату маси, час викиду горючих газів) а також на час спрацювання їх запобіжних механізмів (клапана вентиляційного отвору). Для досягнення задекларованої мети проведено експериментальні дослідження з використанням відкритого полум'я на літій-іонні елементи живлення, а також виявлено та описано залежності впливу чинників на їх пожежну небезпеку.

**Методи та результати дослідження.** У роботі для досягнення задекларованої мети використаний експериментальний та теоретичний методи дослідження. У теоретичному методі досліджень, були застосовані такі операції, як: синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо. Для дослідження відбирались зразки з силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S ємністю 75 кВт·год. Літій-іонний елементи живлення формату 18650 мають циліндричну форму (18 мм діаметр та 65 мм висота), ємністю – 3,2 А·год, номінальна напруга живлення – 3,7 В. При чому мінімальна напруга розрядженої батареї становить 2,7 В, а зарядженої – 4,2 В.

**Висновки.** За результатами натурних вогневих досліджень елементів живлення силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S типу 18650 за розробленою методикою встановлено, що найбільшу пожежну небезпеку становить повністю заряджена літій-іонна батарея, а також отримано такі результати: ступінь заряду батареї є визначальним чинником, який впливає на її температуру горіння, яка для повністю зарядженої літій-іонної батареї складає понад 800 °С. Разом з тим час спрацювання вентиляційного отвору від моменту виникнення необоротної екзотермічної реакції зменшується із збільшенням заряду, що описується поліноміальною регресійною залежністю. Час викиду вентиляційних газів збільшується зі збільшення заряду літій-іонної батареї, а значить і час її горіння. Для 100 % зарядженої батареї час викиду вентиляційних газів становить 7-8 с, а для розрядженої 2-3 с. Втрата маси літій-іонної батареї залежить від ступеня заряду батареї та не залежить від дії на неї зовнішніх теплових потоків. Для розрядженої батареї втрата маси під час вогневих випробувань складає 7-8 г, а повністю зарядженої – 25-28 г. Це стане підґрунтям подальших досліджень для ідентифікації стану заряду батареї під час пожежі. Результати таких досліджень можуть бути використані під час проведення експертизи дослідження пожеж електромобілів та встановлення ймовірної причини їх загорянь.

**Ключові слова:** пожежа електромобіля, необоротна екзотермічна реакція, TESLA MODEL S, пожежна небезпека літій-іонних елементів, ємність, вентиляційні гази.

*А. Ф. Гаврилюк*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## SUBSTANTIATION OF THE MOST SIGNIFICANT CRITERIA OF FIRE HAZARD OF POWER LITHIUM-ION BATTERIES OF ELECTRIC VEHICLES

**Introduction.** In recent years, the electric vehicle industry has been developing rapidly, and the number of electric vehicles sold has been growing. This is due, on the one hand, to the energy crisis and, on the other hand, to environmental protection. This trend leads to an increase in the absolute and relative number of electric vehicles in the global fleet. Therefore, comprehensive studies of the fire hazard of electric vehicles and their components are an urgent issue today.

**Purpose.** The aim of the study is to reveal the peculiarities of the influence of the degree of charge on the fire hazard of lithium-ion batteries (combustion temperature, mass loss, time of flammable gas emission) and the time of operation

of their safety mechanisms (vent valve). To achieve the declared goal, experimental studies were carried out using an open flame on lithium-ion batteries, and the dependencies of the factors on their fire hazard were identified and described.

**Methods and results of the research.** To achieve the declared goal, the study used experimental and theoretical research methods. In the theoretical research method, the following operations were used: synthesis, analysis, systematization, generalization, etc. For the study, samples were taken from the power battery of the TESLA MODEL S electric vehicle with a capacity of 75 kWh. The lithium-ion batteries were cylindrical in shape of 18650 format (18 mm diameter and 65 mm height), with a capacity of 3.2 Ah and a nominal supply voltage of 3.7 V. The minimum voltage of the discharged battery was 2.7 V and the charged one was 4.2 V. The samples were placed vertically above the model fire: anode up and down, and horizontally. A total of 27 experiments were performed. During the experimental studies, the temperature of the battery prototypes was recorded, and photos and videos were taken.

**Conclusions.** According to the results of full-scale fire tests of the 18650 power battery of the TESLA MODEL S electric vehicle using the developed methodology, it was found that the greatest fire hazard is posed by a fully charged lithium-ion battery, and the following results were obtained: the degree of battery charge is a determining factor affecting its combustion temperature, which for a fully charged lithium-ion battery is more than 800 °C. At the same time, the time of operation of the vent from the moment of the irreversible exothermic reaction decreases with increasing charge, which is described by a polynomial regression relationship. The time of ventilation gas emission increases with the increase in the charge of the lithium-ion battery, and thus its burning time. For a 100% charged battery, the ventilation gas emission time is 7-8 s, and for a discharged battery, 2-3 s. The weight loss of a lithium-ion battery depends on the battery charge level and is independent of external heat flows. For a discharged battery, the mass loss during fire tests is 7-8 g, and for a fully charged battery, 25-28 g. This will be the basis for further research to identify the state of charge of the battery during a fire. The results of such studies can be used in the examination of electric vehicle fires and the establishment of the probable cause of their fires.

**Keywords:** electric vehicle fire, irreversible exothermic reaction, TESLA MODEL S, fire hazard of lithium-ion cells, capacity, ventilation gases.

**Вступ.** Останніми роками індустрія електромобілів стрімко розвивається, а кількість проданих електромобілів зростає. Це зумовлено з одного боку енергетичною кризою, а з іншого – захистом довкілля. Така тенденція призводить до збільшення абсолютної та відносної кількості електромобілів у світовому автопарку [1, 2]. Варто відмітити, що сумарна ємність батарей електромобілів у 2022 році перевищила 357 ГВт·год [3].

Літій-іонні батареї через ряд технічних переваг стали найпоширенішими джерелами електричної енергії у електромобілях, сонячних станціях, мобільних телефонах та інших електроприладах [4-6].

Вагомим недоліком літій-іонних батарей є виникнення в їх корпусі, за певних умов, необоротної екзотермічної реакції. Така реакція супроводжується неконтрольованим виділенням тепла, горючих та вибухонебезпечних газів, що призводить не лише до виходу з ладу батареї, але й до займань та вибухів [7-9]. Виникнення таких ситуацій спричиняє пожежі електромобілів, детальний огляд яких наведено у науковій праці [10].

**Методи дослідження.** У роботі для досягнення задекларованої мети використаний експериментальний та теоретичний методи дослідження. У теоретичному методі досліджень, були застосовані такі операції, як: синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Дослідженню різних чинників пожежної небезпеки літій-іонних батарей присвячено ціла

низка робіт. Опис алгоритму генерації енергії при необоротній екзотермічній реакції, яка вникає у літій-іонних батареях, як одного із важливих чинників впливу на пожежну безпеку наведено у працях [11-15]. Для запобігання цьому використовують методи, які недопускають виникненню, або переривають перебіг необоротної екзотермічної реакції. Ці методи поділяються на активні та пасивні [16].

До пасивних методів боротьби відносять підвищення термічної стабільності компонентів літій-іонної батареї на етапі проектування та виготовлення, тим самим забезпечуючи їх надійність з точки зору безпеки. Такі питання досліджені та описані у наукових працях [17-18].

Зокрема підвищення температури розкладу сепаратора, як фактора підвищення пожежної безпеки батареї, описано у [19]. А дослідження застосування негорючих чи важкогорючих електролітів описано у працях [20, 21].

Натомість активні методи боротьби із необоротною екзотермічною реакцією здійснюють контроль температури батареї та використовують різноманітні системи охолодження [22, 23].

Зокрема у роботі у [24] досліджено застосування рідкого азоту для охолодження літій-іонної батареї з метою запобігання розвитку необоротної екзотермічної реакції.

Ряд наукових робіт присвячено дослідженню чинників механічного впливу на пожежну безпеку літій-іонних елементів [25-29].

У роботі [30] досліджено вплив надмірних струмів заряджання для літій-іонного елемента типу NCM622. Результати експериментів

показали, що струм заряджання 4С може стати причиною виникнення необоротної екзотермічної реакції, при якій може виникнути температура понад 400 °С порівняно з 187 °С для батареї при зарядному струмі 1С.

Автори роботи [31] провели повномасштабні випробування літій-іонної батареї із різним станом заряду ємністю 10 кВт·год на вміст фтористого водню в продуктах згоряння, а також досліджували сумарну енергію тепловиділення. На підставі експериментів встановлено, що питома кількість енергії, яка виділяється внаслідок горіння літій-іонної батареї становить 28-75 кДж/Вт·год, а питомий тепловий потік, який створюється такою пожежею, лежить в межах 110-490 Вт/Вт·год

Автори роботи [32] досліджували пожежні ризики та поведінку літій-іонних батарей типу 18650 під час дії на них теплового потоку густиною 60 кВт/м<sup>2</sup>. За результатами експериментів встановлено, що найбільшу небезпеку становлять 100% заряджені батареї, температура горіння яких сягає 934 °С.

Дослідження [33] зосереджене на визначенні тиску вибуху, внаслідок утворення вибухонебезпечних газів від необоротної екзотермічної реакції літій-іонних батарей, де зазначено, що за умов дослідження, тиск вибуху може складати 0,6 МПа.

Цікаве дослідження проведене у Дослідницькому інституті Швеції (RESI). Акумуляторну літій-іонну батарею піддавали дії полум'я газового пальника, надмірного перезаряджання та дії проникнення стороннього предмета. При цьому визначали склад та концентрацію продуктів згоряння, а також втрату маси взірця. За результатами дослідження встановлено, що температура початку виникнення необоротної екзотермічної реакції зменшується із збільшенням заряду батареї [34].

У наукові праці [35] для дослідження автори використовували літій-іонні батареї ємністю 60, 150 та 180 А·год та піддавали їх дії електрошафі потужністю 2 кВт, тим самим ініціювавши необоротну екзотермічну реакцію. Встановлено, що максимальна температура полум'я для таких батарей складала 2307 °С, а середня – 1200 °С.

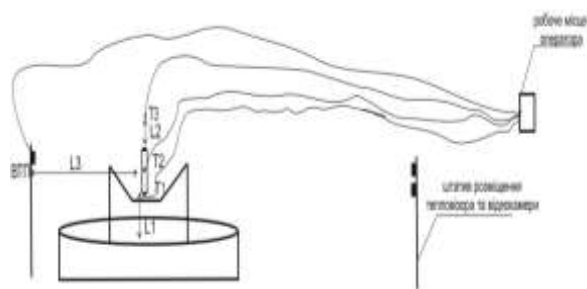
На підставі аналізу наукових праць можна зробити висновок, що дослідженню пожежної небезпеки літій-іонних елементів живлення електромобілів під час дії відкритим полум'ям приділено недостатньо уваги. Це дає підстави наголосити на доцільності проведення досліджень такого роду.

**Мета і здача дослідження.** Мета дослідження полягає у розкритті особливостей впливу ступеня заряду на пожежну небезпеку літій-іонних батарей (температуру горіння, втрату маси, час викиду горючих газів) а також на час спрацювання їх запобіжних механізмів (клапана вентиляційного отвору).

**Опис експериментальної частини.** Для дослідження відбирались зразки з силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S ємністю 75 кВт·год. Літій-іонні елементи живлення були циліндричної форми формату 18650 (18 мм діаметр та 65 мм висота), ємністю 3,2 А·год з номінальною напругою живлення 3,7 В. Причому мінімальна напруга розрядженої батареї становила 2,7 В, а зарядженої – 4,2 В.

Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. З метою зменшення заряду батареї використовували інвертор напруги з лампою розжарення потужність 60 Вт. Для збільшення – зарядний пристрій для літій-іонних батарей, який живився від електромережі змінного струму.

Були також підготовлені дослідні зразки елементів живлення із ступенем заряду 100 %, 50 % та повністю розряджені. Для кожного стану заряду було відібрано по дев'ять дослідних зразків. Згідно із методикою, усі дослідні взірці перед початком випробувань зважувались. П'ять одиниць акумуляторних батарей мали масу 240 г (+2 г), тобто 48 г кожен елемент. Стан заряду батарей не впливав на їх масу. Модельне вогнище створювалось бензином, марки А-92, об'ємом 200 мл, яке поміщалося у металеве деко діаметром 140±3 мм, висотою борта 100±5 мм та товщиною стінки борта 2,0±0,5 мм. На рисунку 1 забражено розміщення термопар відносно дослідного взірця.



а)



б)

**Рисунок 1** – Улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки: а) схематичне б) натурне

Термопара Т1 розміщувалась на відстані 7 см (L1) по вертикалі від борта дека та фіксувала температуру під батареєю, термопара Т2 розміщувалась посередині батареї Термопара Т3 розміщувалась над батареєю (L2= 6,5 см) на відстані 20 см від борта дека.

Згідно із методикою проведення досліджень, експеримент був поділений на три етапи: дослідження батарей заряджених на 100%, дослідження батарей заряджених на 50% та дослідження розряджених батарей. Загалом було проведено серію із 27 експериментів.

### Результати досліджень та їх обговорення.

За усередненими результатами натурних експериментів виявлено закономірності впливу ступеня заряду літій-іонних батарей на їх пожежну небезпеку (температуру горіння, втрату маси, час викиду горючих газів) а також на час спрацювання запобіжних механізмів (клапана вентиляційного отвору).

Графічна залежність, що зображена на рисунку 2, демонструє вплив стану заряду батареї на температуру горіння вентиляційних газів, які виділяються внаслідок необоротної екзотермічної реакції.

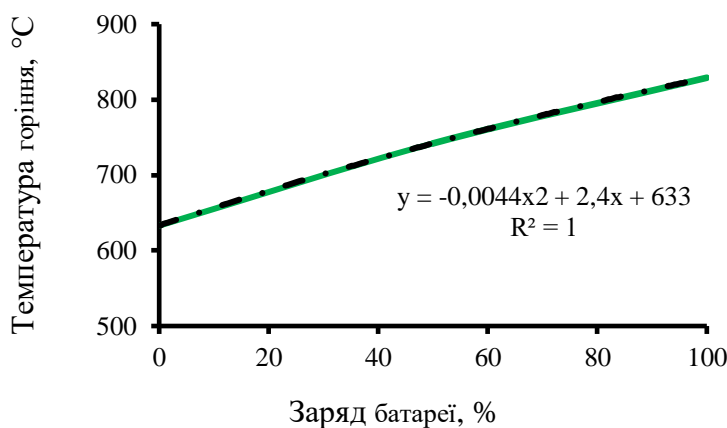


Рисунок 2 – Вплив стану заряду літій-іонної батареї на її температуру горіння

При збільшенні заряду батареї від 0% до 50 % температура горіння вентиляційних газів зростає на 80-100 °C, а при збільшенні заряду батареї до 100% температура збільшується ще на 80-90 °C і дорівнює 820-840 °C.

Регресійна модель залежності, що відображена на рисунку 2 описується поліноміальною залежністю виду  $y = -0,0044x^2 + 2,4x + 633$  з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2 = 1$ , де  $y$  – температура горіння

вентиляційних газів, °C, а  $x$  – ступінь заряду батареї, %. При збільшенні заряду батареї відсотковий склад водню, який входить до суміші газів збільшується. Оскільки температура горіння водню у повітрі становить понад 2000 °C, це і призводить до збільшення температури горіння суміші газів [36, 37].

На рисунку 3 наведено втрату маси силових батарей від стану заряду.

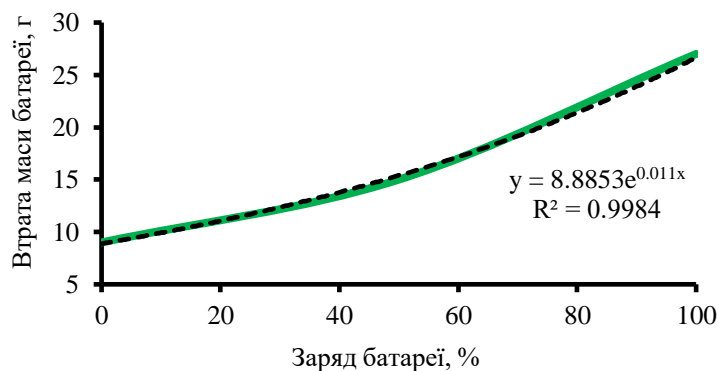


Рисунок 3 – Втрата маси силових батарей від стану заряду

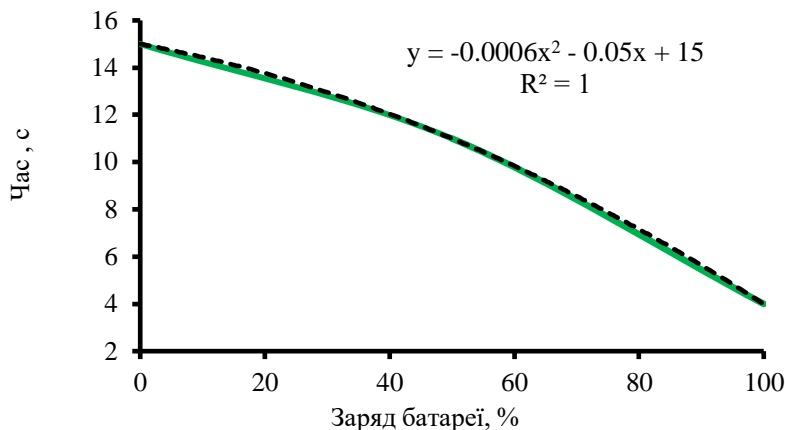
Як помітно з графічної залежності (рис 3) при збільшенні заряду батареї під час вогневих випробувань модельним вогнищем пожежі класу

В, втрата маси також збільшується. Така зміна описується експоненціальною залежністю виду  $y = 8,8853e^{0,011x}$  з коефіцієнтом достовірності

апроксимації  $R^2 = 0,9984$ , де  $y$  – втрата маси батареї під час випробувань, а  $x$  – ступінь заряду батареї, %.

На рисунку 4 наведено вплив стану заряду батареї на зміну часу спрацювання вентиляційного отвору батареї від моменту

виникнення необоротної екзотермічної реакції у батареї (це відбувається при досягненні температури батареї 150-170 °С за якої відбувається руйнування сепаратора і початок розвитку необоротної екзотермічної реакції).

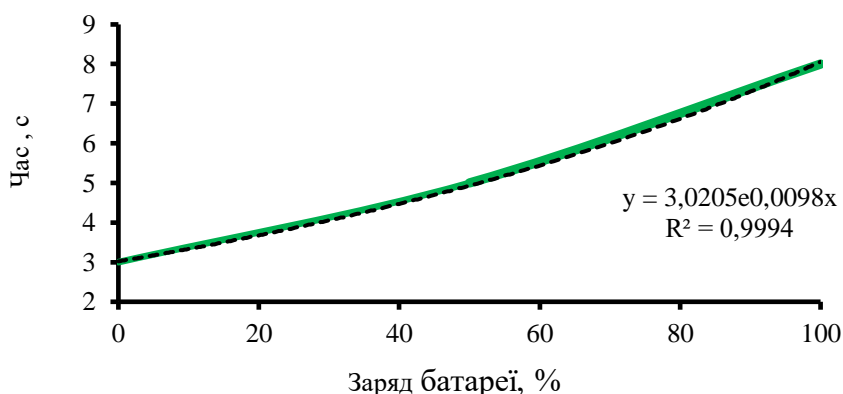


**Рисунок 4** – Вплив стану заряду батареї на час спрацювання вентиляційного отвору батареї від моменту виникнення необоротної екзотермічної реакції

При збільшенні заряду час спрацювання вентиляційного отвору зменшується. Це пояснюється тим, що при більшій кількості електроенергії, яка міститься у батареї, генерується більша кількість газів при необоротній екзотермічній реакції. Тому тиск, при якому спрацьовує вентиляційний отвір досягається за менший час.

На підставі цього отримана поліноміальна регресійна залежність виду  $y = -0,0006x^2 - 0,05x + 15$  з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2 = 1$ .

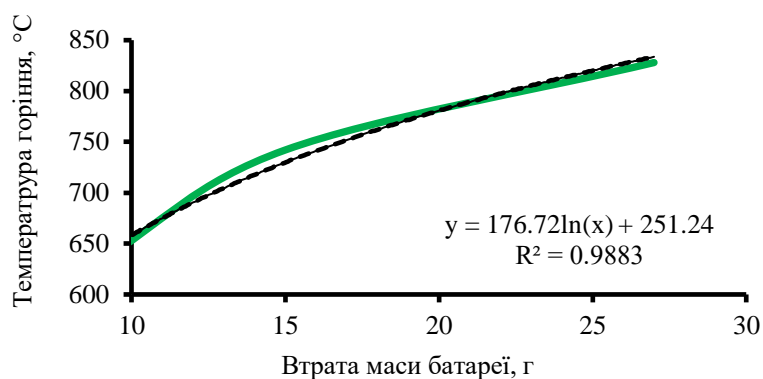
На рисунку 5 наведено вплив рівня заряду батареї на час викиду вентиляційних газів від моменту спрацювання вентиляційного отвору. При збільшенні заряду батареї час викиду вентиляційних газів зростає, що описується експоненціальною залежністю виду  $y = 3,0205e^{0,0098x}$  з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2 = 0,9984$ , де  $y$  – втрата маси батареї під час випробувань, а  $x$  – ступінь заряду батареї, %.



**Рисунок 5** – Вплив стану заряду батареї на час викиду вентиляційних газів від моменту спрацювання вентиляційного отвору

Власне час викиду вентиляційних газів обумовлює час інтенсивного горіння літій-іонних батарей як таких. Цей параметр є особливо значущим з точки зору пожежної безпеки, оскільки визначає сумарну енергію тепловиділення горіння, а отже впливатиме на швидкість і розвиток пожежі.

На рисунку 6 наведено вплив втрати маси батареї на температуру горіння вентиляційних газів, що описується логарифмічною залежністю виду  $y = 176,72\ln(x) + 251,24$  з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2 = 0,9883$ , де  $y$  – температура горіння вентиляційних газів, °С а  $x$  – втрати маси батареї, г.



**Рисунок 6** – Вплив втрати маси батареї під час випробувань на температуру горіння вентиляційних газів

Аналізуючи вищенаведені залежності можна зробити висновок, що власне стан заряду батареї є значущим та визначальним чинником, який впливає на динаміку розвитку полум'я, а також на його температуру

горіння. Для підтвердження цього на рисунку 7 наведено фото горіння вентиляційних газів для батарей, які були повністю розряджені (рис 7 а), заряджені на 50 % (рис 7 б) та 100 % (рис 7 в).



**Рисунок 7** – Фото натурних експериментів горіння модельного вогнища та силових літій-іонних батарей у: а) розрядженої батареї б) зарядженої на 50% в) зарядженої на 100%

За результатами експерименту встановлено, що зі збільшенням заряду батареї (збільшенням кількості електричної енергії, яка міститься в батареї) збільшується її пожежна небезпека. При цьому збільшується температура і час горіння вентиляційних газів. Разом з тим збільшується втрата маси батареї, яка і визначає загальне тепловиділення внаслідок горіння.

**Висновки.** За результатами натурних вогневих досліджень елементів живлення силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S типу 18650 за розробленою методикою встановлено, що найбільшу пожежну небезпеку представляє повністю заряджена літій-іонна батарея, а також отримано такі результати:

1. Ступінь заряду батареї є визначальним чинником, який впливає на її температуру горіння, яка для повністю зарядженої літій-іонної батареї дорівнює понад 800 °C. Разом з тим час спрацювання вентиляційного отвору від моменту виникнення необоротної екзотермічної реакції зменшується із збільшенням заряду, що описується поліноміальною регресійною залежністю.

2. Час викиду вентиляційних газів збільшується зі збільшенням заряду літій-іонної батареї, а значить і час її горіння. Для 100 % зарядженої батареї час викиду вентиляційних газів становить 7-8 с, а для розрядженої – 2-3 с.

3. Втрата маси літій-іонних батарей залежить від їх ступеня заряду та не залежить від дії на неї зовнішніх теплових потоків, полум'я тощо. Для розрядженої батареї втрата маси під час вогневих випробувань становить 7-8 г, а зарядженої – 25-28 г. Це стане підґрунтям для подальших досліджень для ідентифікації /стану заряду батареї під час пожежі. Результати таких досліджень можуть бути використані під час проведення експертизи дослідження пожеж електромобілів та встановлення ймовірної причини їх загорянь.

**Список літератури:**

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

2. 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>
3. 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.
4. Hua, Y., Zhou, S., Huang, Y., Liu, X., Ling, H., Zhou, X., ... & Yang, S. (2020). Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 478, 228753.
5. Wang, C., Yang, C., & Zheng, Z. (2022). Toward practical high-energy and high-power lithium battery anodes: present and future. *Advanced Science*, 9(9), 2105213.
6. 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.
7. Гаврилюк А. Ф. & Кушнір А.П. (2022). Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.
8. 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.
9. Snyder, M., & Theis, A. (2022). Understanding and managing hazards of lithium-ion battery systems. *Process Safety Progress*, 41(3), 440-448.
10. Гаврилюк А.Ф., Васильєва О.Е. (2023). Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. *Пожежна безпека*, 42, 32-42. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04>
11. Wang, Y. W., & Shu, C. M. (2022). Energy generation mechanisms for a Li-ion cell in case of thermal explosion: A review. *Journal of Energy Storage*, 55, 105501.
12. Wang, Y. W., & Huang, H. L. (2023). Thermal explosion energy evaluation on LCO and NCM Li-ion polymer batteries using thermal analysis methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 82-94.
13. Shen, W., Yan, J., Zhong, M., Zhang, J., & Guo, S. (2023). Heat Generation of Graphite Anode During Electrochemical Lithiation. *Available at SSRN 4336580*.
14. 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.
15. Liu, X., Stoliarov, S. I., Denlinger, M., Masias, A., & Snyder, K. (2015). Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 280, 516-525.
16. Pham, M. T., Darst, J. J., Finegan, D. P., Robinson, J. B., Heenan, T. M., Kok, M. D., ... & Shearing, P. R. (2020). Correlative acoustic time-of-flight spectroscopy and X-ray imaging to investigate gas-induced delamination in lithium-ion pouch cells during thermal runaway. *Journal of Power Sources*, 470, 228039.
17. Hsieh, A. G., Bhadra, S., Hertzberg, B. J., Gjeltema, P. J., Goy, A., Fleischer, J. W., & Steingart, D. A. (2015). Electrochemical-acoustic time of flight: in operando correlation of physical dynamics with battery charge and health. *Energy & environmental science*, 8(5), 1569-1577.
18. Owen, R. E., Robinson, J. B., Weaving, J. S., Pham, M. T., Tranter, T. G., Neville, T. P., ... & Brett, D. J. (2022). Operando ultrasonic monitoring of lithium-ion battery temperature and behaviour at different cycling rates and under drive cycle conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(4), 040563.
19. Zhang, K., Xiao, W., Li, X., Liu, J., & Yan, C. (2020). Highly thermostable expanded polytetrafluoroethylene separator with mussel-inspired silica coating for advanced Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 468, 228403.
20. Wei, Y., Wang, Z., Wang, J., Bai, W., Zhang, Y., & Liu, B. (2023). Designing of trimetallic-phase ternary metal sulfides coupled with N/S doped carbon protector for superior and safe Li/Na storage. *Journal of Colloid and Interface Science*, 638, 524-541.
21. Li, X., Li, W., Chen, L., Lu, Y., Su, Y., Bao, L., ... & Wu, F. (2018). Ethoxy (pentafluoro) cyclotriphosphazene (PF<sub>5</sub>N) as a multi-functional flame retardant electrolyte additive for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 378, 707-716.
22. Appleberry, M. C., Kowalski, J. A., Africk, S. A., Mitchell, J., Ferree, T. C., Chang, V., ... & Murphy, S. D. (2022). Avoiding thermal runaway in lithium-ion batteries using ultrasound detection of early failure mechanisms. *Journal of Power Sources*, 535, 231423.
23. Wu, Y., Wang, Y., Yung, W. K., & Pecht, M. (2019). Ultrasonic health monitoring of lithium-ion batteries. *Electronics*, 8(7), 751.
24. Cao, Y., Wang, K., Wang, Z., Wang, J., Yang, Y., & Xu, X. (2023). Utilization of liquid nitrogen as efficient inhibitor upon thermal runaway of 18650 lithium ion battery in open space. *Renewable Energy*, 206, 1097-1105.
25. Xu, J., Liu, B., & Hu, D. (2016). State of charge dependent mechanical integrity

behavior of 18650 lithium-ion batteries. *Scientific reports*, 6(1), 21829.

26. Xu, J., Liu, B., Wang, X., & Hu, D. (2016). Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies. *Applied Energy*, 172, 180-189.

27. Liu, B., Yin, S., & Xu, J. (2016). Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration. *Applied Energy*, 183, 278-289.

28. Avdeev, I., & Gilaki, M. (2014). Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact. *Journal of Power Sources*, 271, 382-391.

29. Perea, A., Paoella, A., Dubé, J., Champagne, D., Mauger, A., & Zaghbi, K. (2018). State of charge influence on thermal reactions and abuse tests in commercial lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 399, 392-397

30. Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020). Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>) O<sub>2</sub> cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643

31. 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.

32. Yangyang Fu, Song Lu, Kaiyuan Li, Changchen Liu, Xudong Cheng, Heping Zhang (2015), An experimental study on burning behaviors of 18650 lithium ion batteries using a cone calorimeter, *Journal of Power Sources*, 273, 216-222.

33. Zhou, W., Li, G., Zhao, H., Zhang, X., Marquez, J. A. D., & Wang, Q. (2023). Experimental study of explosion parameters of hybrid mixture caused by thermal runaway of lithium-ion battery. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 872-880.

34. Willstrand, O., Pushp, M., Andersson, P., & Brandell, D. (2023). Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements. *Journal of Energy Storage*, 68, 107785.

35. Peng, G., Ling, X., Lin, Y., Jiang, H., Ma, M., Yu, A., & Ouyang, D. (2023). Thermal runaway features of large-format power lithium-ion cells under various thermal abuse patterns and capacities. *RSC advances*, 13(44), 31036-31046.

36. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In *Lithium-ion batteries* (pp. 409-435).

37. Chen, S., Wang, Z., Wang, J., Tong, X., & Yan, W. (2020). Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 103992

## References:

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

2. 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>

3. 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.

4. Hua, Y., Zhou, S., Huang, Y., Liu, X., Ling, H., Zhou, X., ... & Yang, S. (2020). Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 478, 228753.

5. Wang, C., Yang, C., & Zheng, Z. (2022). Toward practical high-energy and high-power lithium battery anodes: present and future. *Advanced Science*, 9(9), 2105213.

6. 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.

7. Gavryliuk A. F. & Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoi stabilnistiu sylovoi litiivoi akumulatornoj batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04.8>.

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.

8. Snyder, M., & Theis, A. (2022). Understanding and managing hazards of lithium-ion battery systems. *Process Safety Progress*, 41(3), 440-448.

9. Gavryliuk A.F., Vasylieva O.E. (2023). Analiz stanu protypozhezhnoho zakhystu elektromobiliv. *Pozhezhna bezpeka*, 42, 32-42. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04>

10. Wang, Y. W., & Shu, C. M. (2022). Energy generation mechanisms for a Li-ion cell in case of thermal explosion: A review. *Journal of Energy Storage*, 55, 105501.

11. Wang, Y. W., & Huang, H. L. (2023). Thermal explosion energy evaluation on LCO and NCM Li-ion polymer batteries using thermal analysis methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 82-94.

12. Shen, W., Yan, J., Zhong, M., Zhang, J., & Guo, S. (2023). Heat Generation of Graphite Anode



During Electrochemical Lithiation. Available at SSRN 4336580.

13. 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.

14. Liu, X., Stolarov, S. I., Denlinger, M., Masias, A., & Snyder, K. (2015). Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 280, 516-525.

15. Pham, M. T., Darst, J. J., Finegan, D. P., Robinson, J. B., Heenan, T. M., Kok, M. D., ... & Shearing, P. R. (2020). Correlative acoustic time-of-flight spectroscopy and X-ray imaging to investigate gas-induced delamination in lithium-ion pouch cells during thermal runaway. *Journal of Power Sources*, 470, 228039.

16. Hsieh, A. G., Bhadra, S., Hertzberg, B. J., Gjeltema, P. J., Goy, A., Fleischer, J. W., & Steingart, D. A. (2015). Electrochemical-acoustic time of flight: in operando correlation of physical dynamics with battery charge and health. *Energy & environmental science*, 8(5), 1569-1577.

17. Owen, R. E., Robinson, J. B., Weaving, J. S., Pham, M. T., Tranter, T. G., Neville, T. P., ... & Brett, D. J. (2022). Operando ultrasonic monitoring of lithium-ion battery temperature and behaviour at different cycling rates and under drive cycle conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(4), 040563.

18. Zhang, K., Xiao, W., Li, X., Liu, J., & Yan, C. (2020). Highly thermostable expanded polytetrafluoroethylene separator with mussel-inspired silica coating for advanced Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 468, 228403.

19. Wei, Y., Wang, Z., Wang, J., Bai, W., Zhang, Y., & Liu, B. (2023). Designing of trimetallic-phase ternary metal sulfides coupled with N/S doped carbon protector for superior and safe Li/Na storage. *Journal of Colloid and Interface Science*, 638, 524-541.

20. Li, X., Li, W., Chen, L., Lu, Y., Su, Y., Bao, L., ... & Wu, F. (2018). Ethoxy (pentafluoro) cyclotriphosphazene (PFPN) as a multi-functional flame retardant electrolyte additive for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 378, 707-716.

21. Appleberry, M. C., Kowalski, J. A., Africk, S. A., Mitchell, J., Ferree, T. C., Chang, V., ... & Murphy, S. D. (2022). Avoiding thermal runaway in lithium-ion batteries using ultrasound detection of early failure mechanisms. *Journal of Power Sources*, 535, 231423.

22. Wu, Y., Wang, Y., Yung, W. K., & Pecht, M. (2019). Ultrasonic health monitoring of lithium-ion batteries. *Electronics*, 8(7), 751.

23. Cao, Y., Wang, K., Wang, Z., Wang, J., Yang, Y., & Xu, X. (2023). Utilization of liquid nitrogen as efficient inhibitor upon thermal runaway of 18650 lithium ion battery in open space. *Renewable Energy*, 206, 1097-1105.

24. Xu, J., Liu, B., & Hu, D. (2016). State of charge dependent mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion batteries. *Scientific reports*, 6(1), 21829.

25. Xu, J., Liu, B., Wang, X., & Hu, D. (2016). Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies. *Applied Energy*, 172, 180-189.

26. Liu, B., Yin, S., & Xu, J. (2016). Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration. *Applied Energy*, 183, 278-289.

27. Avdeev, I., & Gilaki, M. (2014). Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact. *Journal of Power Sources*, 271, 382-391.

28. Perea, A., Paoletta, A., Dubé, J., Champagne, D., Mauger, A., & Zaghbi, K. (2018). State of charge influence on thermal reactions and abuse tests in commercial lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 399, 392-397

29. Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020). Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>) O<sub>2</sub> cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643

30. 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.

31. Yangyang Fu, Song Lu, Kaiyuan Li, Changchen Liu, Xudong Cheng, Heping Zhang (2015), An experimental study on burning behaviors of 18650 lithium ion batteries using a cone calorimeter, *Journal of Power Sources*, 273, 216-222.

32. Zhou, W., Li, G., Zhao, H., Zhang, X., Marquez, J. A. D., & Wang, Q. (2023). Experimental study of explosion parameters of hybrid mixture caused by thermal runaway of lithium-ion battery. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 872-880.

33. Willstrand, O., Pushp, M., Andersson, P., & Brandell, D. (2023). Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements. *Journal of Energy Storage*, 68, 107785.

34. Peng, G., Ling, X., Lin, Y., Jiang, H., Ma, M., Yu, A., & Ouyang, D. (2023). Thermal runaway features of large-format power lithium-ion cells under

various thermal abuse patterns and capacities. *RSC advances*, 13(44), 31036-31046.

35. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In *Lithium-ion batteries* (pp. 409-435).

36. Chen, S., Wang, Z., Wang, J., Tong, X., & Yan, W. (2020). Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 103992

© А. Ф. Гаврилюк, 2023.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 09.11.2023.

Прийнято до публікації 01.12.2023.