



А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук, М. В. Лемішко

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

<https://orcid.org/0009-0007-5148-9394> – М. В. Лемішко



gavrilyk3@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ БАТАРЕЇ TESLA MODEL S НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Постановка проблеми. Кількість електромобілів у масштабі світового автопарку продовжує зростати. Цьому сприяють привабливі урядові програми таких країн, як Норвегія, Німеччина, Швеція, Китай, Франція тощо. Поряд із зростанням кількості електромобілів зростає і кількість пожеж таких транспортних засобів. Тому різноманітні дослідження пожежної небезпеки електромобілів і їх компонентів є актуальним питанням в умовах сьогодення.

Мета дослідження полягає у розкритті особливостей горіння, визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі елементів силових батарей TESLA MODEL S), а також дослідження впливу чинників на ці параметри за розробленою методикою вогневих випробувань. Для досягнення задекларованої мети здійснено експериментальні дослідження впливу відкритого полум'я на силові літій-іонні акумулятори електромобілів, а також виявлено та описано залежності впливу чинників на теплові параметри та особливості горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів.

Опис матеріалу. Для дослідження відбирались зразки з силових АКБ електромобіля TESLA MODEL S ємністю 75 кВт·год. Відібрані зразки елементів акумуляторної батареї, були поділені на три групи: зі ступенем заряду 100%, 50 % та повністю розряджені. Кожна група містила по дев'ять дослідних зразків. Вогнева дія на досліджувані зразки батарей здійснювалась модельним полум'ям класу В. Зразки розміщались над модельним вогнищем вертикально: анодом вгору та вниз, та горизонтально. Загалом була проведена серія з 27 експериментів. При проведенні експериментальних досліджень фіксувалась температура дослідних взірців батарей, а також проводилась фото та відеозйомка.

Висновки. За результатами натурних вогневих випробувань елементів силових АКБ електромобіля TESLA MODEL S та розробленою методикою встановлено, що при вертикальному розміщенні елементів анодом вниз, вентиляційний отвір спрацьовує найпізніше, а при горизонтальному розміщенні – найшвидше. У розряджених елементах через 9-11 с після початку виникнення необоротної екзотермічної реакції спрацьовує вентиляційний отвір, з якого виходять гази, що горять, викид яких триває 3-5 сек. Горіння таких батарей не супроводжується вибухом. Втрата маси елемента батареї становила 15-21 %. У всіх експериментах незалежно від стану заряду чи розміщення батареї необоротна екзотермічна реакція відбувається при досягненні температури батареї 165-195 °С. При збільшенні заряду батареї збільшується час викиду вентиляційних газів, які горять, що супроводжувалося гучнішим звуком, а також зменшується час між завершенням викиду вентиляційних газів та вибухом (що не стосується розряджених батарей). Стан заряду практично не впливає на температуру горіння вентиляційних газів, яка становить 700-780 °С для різного стану заряду батарей.

Ключові слова: пожежа електромобіля, TESLA MODEL S, пожежна небезпека літій-іонних елементів, вибух, необоротна екзотермічна реакція.

А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук, М. В. Лемішко

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE ELEMENTS OF THE TESLA MODEL S POWER BATTERY ON THE SUBJECT OF FIRE HAZARD

Introduction. The number of electric vehicles on the global car fleet scale continues to grow. This is facilitated by attractive government programmes in countries such as Norway, Germany, Sweden, China, France, etc. Along with the growth

in the number of electric vehicles, the number of fires in such vehicles is also increasing. Therefore, comprehensive research on the fire hazard of electric vehicles and their components is an urgent issue today.

Purpose. The study aims to determine the thermal parameters (ignition temperature, combustion temperature, and heat flux) that describe the combustion processes of electric vehicle power lithium-ion batteries (using the example of TESLA MODEL S power battery cells), as well as to study the influence of factors on these parameters using the developed fire test methodology. To achieve the declared goal, experimental studies of the effect of an open flame on electric vehicle power lithium-ion batteries were carried out, and the dependencies of the influence of factors on the thermal parameters and combustion characteristics of electric vehicle power lithium-ion batteries were identified and described.

Material description. For the study, samples were taken from the power battery of the TESLA MODEL S electric vehicle with a capacity of 75 kWh. The sampled battery cells were divided into three groups: with a charge level of 100%, 50%, and completely discharged. Each group contained nine prototypes. The fire effect on the battery test samples was carried out by a class B model flame. The samples were placed vertically above the model flame: anode up and down, and horizontally. A total of 27 experiments were performed. During the experimental studies, the temperature of the battery prototypes, and the heat flux, as well as photo and video recording were recorded.

Conclusions. Based on the results of full-scale fire tests of the TESLA MODEL S electric vehicle power battery cells according to the developed methodology, it was found that when the cells are placed vertically with the anode down, the vent hole operates the latest, and when they are placed horizontally, it operates the fastest. In discharged cells, 9-11 seconds after the onset of an irreversible exothermic reaction, the vent is triggered, and burning gases are released, which last 3-5 seconds. The combustion temperature of the vent gases is 700-750 °C. The combustion of such batteries is not accompanied by an explosion. The mass loss of the battery cell was 15-21 %. In all the experiments, regardless of the state of the charge or placement of the battery, an irreversible exothermic reaction occurs when the battery temperature reaches 165-195 °C. As the battery charge increases, the time for the release of burning ventilation gases increases, accompanied by a louder sound, and the time between the completion of ventilation gas release and explosion decreases (which is not the case for discharged batteries). The state of charge has virtually no effect on the combustion temperature of ventilation gases, which is 700-780 °C for different states of battery charge.

Keywords: electric vehicle fire, TESLA MODEL S, fire hazard of lithium-ion cells, explosion, irreversible exothermic reaction.

Постановка проблеми. Пожежі електромобілів – події, які трапляється все частіше. Це обумовлено збільшенням їх кількості, як в абсолютному так і у відносному значеннях у

загальній кількості світового автопарку.

Динаміка відносної (а) та абсолютної (б) кількості електромобілів у Європі наведена на рисунку 1.

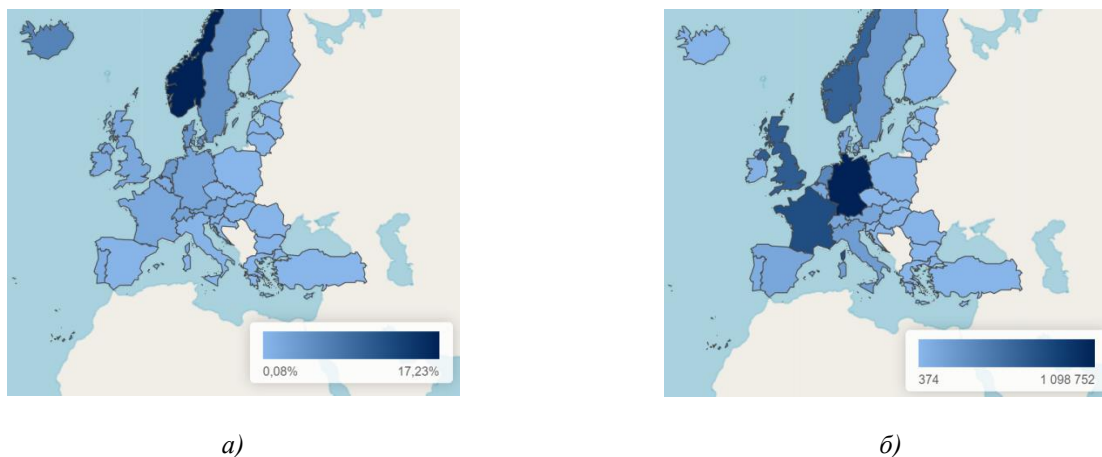


Рисунок 1 – Динаміка відносної (а) та абсолютної (б) кількості електромобілів у Європі [1]

У науковій праці [2] детально описано огляд випадків пожеж різних марок електромобілів, за різних умов, причини та місць їх виникнення. Зважаючи на таку тенденцію, різнобічні дослідження пожежної небезпеки електромобілів та їх компонентів є актуальним питанням сьогодення.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Дослідженням пожежної небезпеки електромобілів, причин виникнення їх займань (зокрема причини та

особливості виникнення необоротної екзотермічної реакції), розроблення та дослідження нових методів та способів їх пожежогасіння, вплив особливостей розвитку таких пожеж на протипожежні відстані, будівельні конструкції чи інші об'єкти можна поділити за об'єктом проведення досліджень на: експериментальні дослідження на одному чи кількох елементах, на модулі силової акумуляторної батареї (далі – АКБ), на власне силовій АКБ та на електромобілі в цілому [2].

Очевидно, що експериментальні дослідження на елементах силових АКБ електромобілів є найбільш доступними, та вартісно зростають у напрямку збільшення ємності АКБ, які піддаються дослідженню. А приміром натурне вогневе експериментальне дослідження електромобіля може становити щонайменше від 10 тис. дол. США і більше, враховуючи забезпечення відтворюваності експериментальних даних.

Таким чином наукових досліджень у царині пожежної безпеки електромобілів, які ґрунтуються на елементах силових АКБ, є найбільше через очевидну причину.

Так у науковій праці [3] досліджено вплив надлишкового струму заряду на пожежну небезпеку елемента Panasonic NCR18650B (LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O₂) та його працездатність після впливу надлишкового постійного струму. Також встановлена критична температура початку необоротної екзотермічної реакції та температура горіння елемента.

Автори роботи [4] досліджували вплив статичного навантаження на елемент живлення Panasonic NCR18650B. Експериментально встановлено, що в середньому корпус Panasonic NCR18650B LIPС витримує без подальшого займання навантаження близько 80 кгс/см² (або 7,84 МПа). Збільшення сили тиску в діапазоні понад 85–90 кгс/см² призводить до необоротної екзотермічної реакції, яка протягом 2–3 секунд призводить до займання батареї. Рівномірне стиснення батареї по його бічній поверхні показало виникнення горіння при навантаженні на елемент 150 кгс/см².

У роботі [5] досліджено вплив надмірних струмів заряджання для літій-іонового елемента типу NCM622. За результатами натурального експерименту встановлено, що струм заряджання 4С може призвести до більш небезпечної необоротної екзотермічної реакції, що створює температуру 413 °С порівняно з 187 °С для батареї при зарядному струмі 1С.

Опис механізму генерації енергії при необоротній екзотермічній реакції, як одного із важливих чинників впливу на пожежну небезпеку, наведено у працях [6-10].

Механізми виникнення внутрішнього короткого замикання при аварійному проникненні сталевого стержня у елемент АКБ описано у [11].

Огляд причин виходу з ладу літій-іонних батарей, які стають джерелом займання електромобілів деально описано у [12].

Різноманітні системи керування температурою літій-іонних барей з метою запобігання виникненню необоротної екзотермічної реакції описано у роботах [13, 14].

У роботі [15] наведено результати досліджень пожежі електромобіля на закритому паркінгу з використанням Fire Dynamic Simulator. Власне досліджувався розподіл видимості на висоті 1,8 м над підлогою закритого паркінгу, а також розподіл температури під стелею під час пожежі електромобіля.

Автори роботи [16] провели експериментальне дослідження з визначення поширення пожежі від електромобіля на інші транспортні засоби, що розміщені паралельно. Встановлено, що реактивне полум'я від електромобіля, що горів, досягало довжини понад 2,5 м. І вже через 94 хв від початку вогневого випробування відбулося займання паралельно припаркованого автомобіля. Такий великий час займання сусіднього автомобіля можна пояснити тим, що експеримент проводився на відкритій місцевості, і багато тепла розсіювалось у навколишнє середовище.

У роботі [17] були досліджені фактори, що впливають на пішоходів під час пожежі електромобіля на відкритій стоянці. Однак у даному дослідженні приймалось, що тепловий потік, який виділявся, становив лише 1/3 від можливого теплового потоку при повністю зарядженій батареї електромобіля. Тому безпечна відстань для пішоходів становить лише 2,8 м від палаючого електромобіля при швидкості повітряних потоків у 2,2 м/с. А безпечна відстань для паралельно припаркованих транспортних засобів складає 3 м з врахуванням вищенаведених умов.

Автори роботи [18] провели повномасштабні вогневі випробування пожеж електромобілів у дорожніх тунелях. Це дослідження націлене на визначення шкідливих газів, які виділяються внаслідок пожежі, а також на способах пожежогасіння таких пожеж. Було встановлено, що фтористий водень є найбільш небезпечним продуктом згорання, що виникає внаслідок пожеж електромобілів. Однак концентрація, що перевищує порогове значення для здоров'я людини, була виявлена лише в шарі диму на відносно великих висотах. На висоті 1,6 м над проїжджою частиною зафіксовані рівні концентрації залишалися нижче порогових значень.

У роботі [19] прокласифіковано за рівнем пожеженої небезпеки різні типи силових АКБ, які використовують виробники електромобілів.

У науковій праці [20] змодельовано пожежу електромобіля Tesla Model 3 на закритому паркінгу з використанням програмного комплексу Fire Dynamics Simulator. На підставі досліджень встановлено мінімальну протипожежну відстань впродовж часу вільного розвитку 610 с, для пожежі такого електромобіля на закритому паркінгу, яка становить по флангу 10 м, а по фронту 6 м.

Як показує аналіз наукових праць, дослідженням власне пожежної небезпеки елементів силових батарей електромобілів відкритим полум'ям приділена недостатня увага. Це дає підстави стверджувати про доцільність проведення досліджень такого роду.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає у розкритті особливостей горіння, визначення теплових параметрів (температури займання, горіння) які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі елементів силових батарей TESLA MODEL S), а також дослідження впливу чинників на дані параметри за розробленою методикою вогневих випробувань.

Для досягнення задекларованої мети необхідно вирішити такі задачі:

- експериментально дослідити вплив відкритого полум'я на силові літій-іонні акумулятори електромобілів;

- виявити та описати залежності впливу чинників на теплові параметри та особливості горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів.

Опис експериментальної частини.

Для дослідження відбирались зразки з силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S ємністю 75 кВт·год.

Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Для зменшення заряду силових літій-іонних батарей використовувалось навантаження у вигляді лампи розжарення потужністю 100 Вт, та інвертора напруги з ККД 98%. Інвертор забезпечує можливість фіксувати номінальне значення напруги. Для збільшення заряду дослідних зразків використовувались зарядні пристрої із індикацією стану заряду.

Відібрані зразки акумуляторних батарей, які були заряджені на 100 %, 50 % та повністю розряджені. Для кожної групи було відібрано по дев'ять дослідних зразків.

Згідно із методикою, усі дослідні зразки перед початком випробувань піддаються зважуванню. П'ять одиниць акумуляторних батарей мали масу 240 г (+2 г), тобто 48 г кожен елемент. Стан заряду батарей не впливав на їх масу.

Моделльне 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 $2,0 \pm 0,5$ мм.

Розміщення батарей та кріплення термопар здійснювалось згідно із схемою, яка наведена на рис 2.

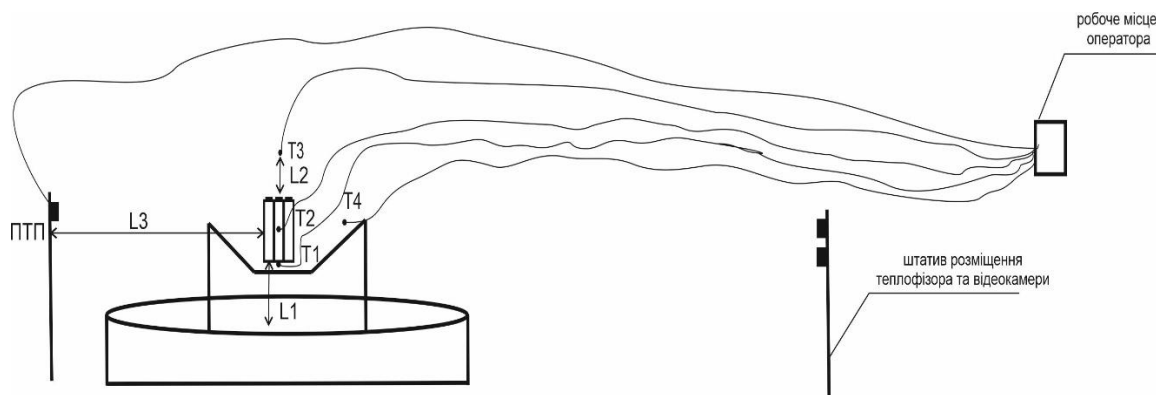


Рисунок 2 – Схема влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Термопара T1 (лінія зеленого кольору) фіксувала температуру під батареєю на відстані 7 см (L1) по вертикалі від борта дека, термопара T2 (лінія червоного кольору) фіксувала температуру батареї і була розміщена по її середині. Термопара T3 (лінія синього кольору) фіксувала температуру над батареєю (L2= 6,5 см) на відстані 20 см від борта дека.

Дослідження було поділене на три етапи: експериментальне дослідження розряджених батарей; експериментальне дослідження заряджених батарей на 50%; експериментальне дослідження заряджених батарей на 100%.

Для кожного із етапів проводилось дослідження для двох позицій розміщення батарей: горизонтального та вертикального по три експерименти на кожену позицію. Причому дослідження батареї у вертикальному положенні проводилось для двох позицій: анодом вгору та вниз. Тому загалом було проведено серію із 27 експериментів.

Результати досліджень та їх обговорення. На рисунку 3 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань анодом донизу.

Як помітно із графіка (рис 3) у момент запалювання модельного вогнища температура на термопарах T1 та T3 починає стрімко зростати.

Однак температура на термопарі T2 зростає не так стрімко. Така інерційність пояснюється теплоємністю батареї (лінія червоного кольору).

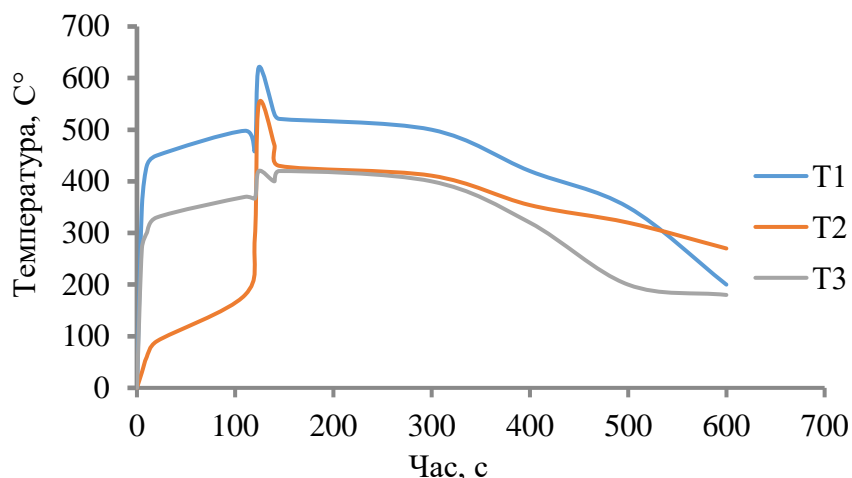


Рисунок 3 – Динаміка зміни температури батареї повністю розрядженої розміщеної вертикально анодом вниз під час випробувань

На 110-112 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 170-190 °C, що пояснюється бурхливим розвитком необоротної екзотермічної реакції і, як наслідок, генерації великої кількості тепла, яка починає нагрівати батарею зсередини. Це корелює з роботою [19], де зазначено, що руйнування сепаратора і початок розвитку необоротної екзотермічної реакції відбувається за температури 150-170 °C.

На 120-123 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити газів, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі T1, розміщеній над батареєю, з 461°C до 621°C.

На рисунку 7 зображено модельне вогнище, при спрацюванні вентиляційного отвору. Оскільки газів, які горять виходять під тиском, це змінює факел полум'я, що і помітно з рисунка 4.



Рисунок 4 – Викид палаючих газів через вентиляційний отвір

Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 280-300 °C. Під час викиду газів, який супроводжувався свистом та шумом, температура стрімко зростає (червона лінія практично вертикально йде вгору). Це спостерігається у всіх трьох експериментах орієнтовно 3-5 сек. При цьому температура

батареї досягла значення близько 550-580 °C на момент закінчення викиду

З цього можна зробити висновок, що при спрацюванні вентиляційного отвору температура батареї різко зростає з 280-300 °C до 550-580 °C.

Після припинення викиду температура батареї знижується з 550-580 °C до 470-480 °C,

тобто до температури, яка близька до температури модельного вогнища.

Це підтверджується також показами термопарі Т3 (синя лінія), яка фіксує температуру полум'я над батареєю.

На 120-122 с до моменту відкриття вентиляційного отвору температура полум'я становила 450 °С, і вже після 120 с стрімко зростає і становить піку 620 °С. Тобто різниця температур полум'ям до спрацювання вентиляційного отвору батареї і під час складає 150-170 °С. Іншими словами, вентиляційні гази, що горять додатково створюють температуру 150-170 °С, себто температура їх горіння складає становить 620 °С за динних умов.

Після закінчення викиду вентиляційних газів температура полум'я монотонно спадає із ступенем вигоряння пального у деку модельного вогнища. І вже після 8 хв від початку випробування горіння припиняється. Однак температура батареї зберігає певну інерційність, тому лінія термопарі Т1 (синя лінія) і лінія термопарі Т2 (пересікаються).

Отже при вертикальному розміщенні силової батареї анодом вниз і дії на неї відкритим полум'ям модельного вогнища класу В, який забезпечував температурний режим в зоні розміщення батареї 470-500 °С необоротна екзотермічна реакція почалась приблизно при температурі батареї 170-190 °С на 105-114 с від початку випробувань. Це спричинило різке збільшення температури впродовж 10-12 с від 170-190 °С до 300-320 °С і відкриття вентиляційного отвору, що супроводжувалось впродовж 3-5 с викидом вентиляційних газів, горіння яких спричинило ріст температури батареї з 300-320 °С до 560-580 °С. Причому температура полум'я над батареєю зросла від 460-480 °С до 620-635 °С. Втрата маси елементів складала 6-8 г.

На наступному етапі батарея розміщувалась вертикально анодом вгору.

Термопарі розміщувались аналогічно попередньому випадку.

Температурні характеристики у цьому випадку є наближеними до вертикального розміщення батареї анодом вгору. Початок необоротної екзотермічної реакції почався на 108-115 с після початку випробування.

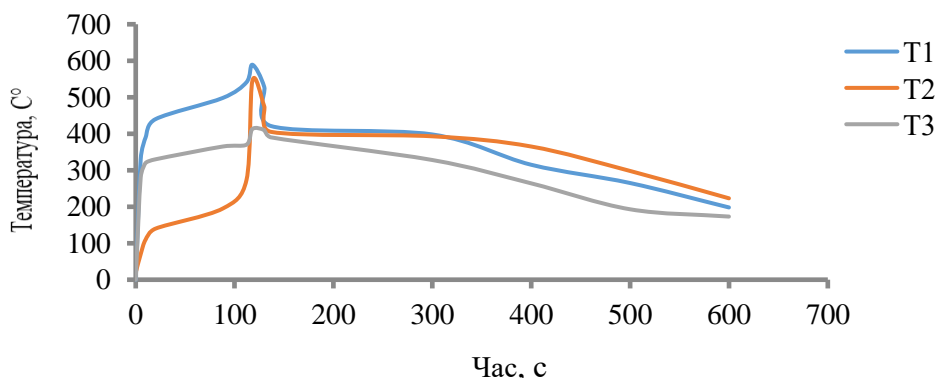
На 118-121 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т3, розміщеній під батареєю, з 355-375 °С до 735-755 °С. Це пояснюється викидом та горінням вентиляційних газів струменем вниз, власне на термопару Т3, розміщену під батареєю.

Разом з тим, потік газів спричинив розбризування пального, налитого у деку, що зумовило бурхливе горіння. Цим власне і пояснюються значення температур на термопарі Т1, які були зафіксовані в межах 610-620 °С, що є на 110-120 °С більшими, ніж до моменту викиду вентиляційних газів.

Оскільки певна частина пального була розбризкана потоком вентиляційних газів, які були спрямовані вертикально вниз, то починаючи з 400 с модельне вогнище практично затухає, і значення температур на термопарах Т1 і Т3 різко спадають. А значення температури на термопарі Т2 має інерційність через акумуляцію тепла на батареї, тому спадає повільно. Втрата маси елементів становила 8-10 г.

Таким чином при вертикальному розміщенні силової батареї анодом вниз і дії на неї відкритим полум'ям модельного вогнища класу В кардинальних температурних змін не виявлено. Але разом з тим спостерігалось на 4-6 с пізніше відкриття вентиляційного отвору.

Динаміку зміни температури батареї при її горизонтальному розміщенні, а також температурних параметрів модельного полум'я наведено на рисунку 5.



Рисунк 5 – Динаміка зміни температури батареї повністю розрядженої розміщеної горизонтально під час випробувань

При горизонтальному розміщенні батареї початок необоротної екзотермічної реакції відбувався на 87-95 с від початку випробувань. При цьому температура батареї становила 170-193 °С, а температура полум'я над батареєю, яка фіксувалась термопарою Т1- 472-496 °С. Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 105-112 с від початку випробувань, що є на 10-12 с швидше, ніж при вертикальному розміщенні батареї. Таку особливість можна пояснити кращим прогрівання батареї, і як наслідок, за коротшим часом досягнення температури і

відкриття вентиляційного отвору. При початку викиду вентиляційних газів температура батареї становила 268-279 °С і стрімко зросла до 562-579 °С, на момент закінчення викиду. При цьому втрата маси батареї під час випробувань складала 8-9 г.

Наступним етапом було дослідження заряджених на 50% батарей, які розміщувались вертикально анодом вниз.

На рисунку 6 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї анодом вниз під час випробувань.

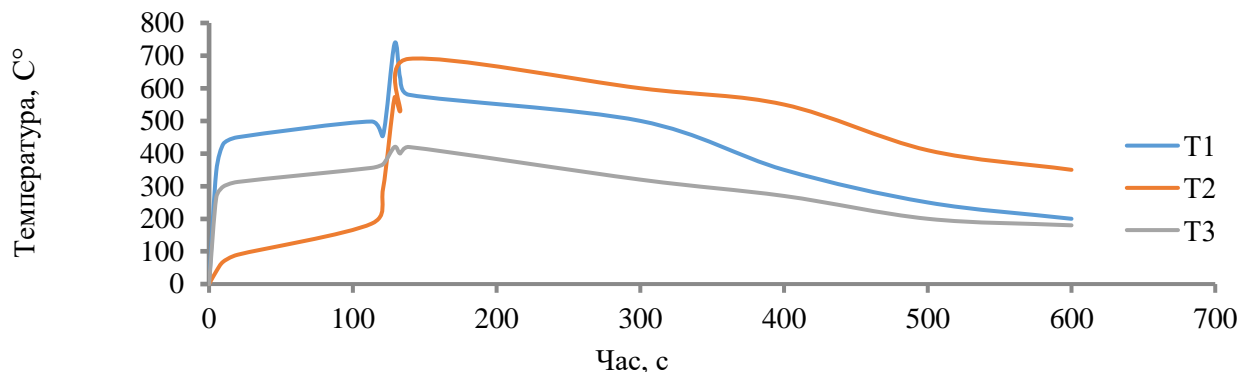


Рисунок 6 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 50 %, розміщеної вертикально анодом вниз під час випробувань

На 113-117 с після початку випробування, температура батареї почтає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 165-195 °С, що пояснюється бурхливим розвитком необоротної екзотермічної реакції і, як наслідок, генерації великої кількості тепла, яке починає нагрівати батарею зсередини.

На 121-125 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвело до різкого стрибка температури на термопарі Т1, розміщеній над батареєю, з 455-470 °С до 720-736 °С.

Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 263-289 °С.

Викид тривав у всіх трьох експериментах орієнтовно 4-6 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 553-573 °С на момент закінчення викиду і через 3-5 с стався вибух, при якому температура батареї становила 678-689 °С. При цьому втрата маси батареї під час випробувань становила 11-14 г.

На рисунку 7 наведено динаміку зміни температури зарядженої на 50% батареї розміщеної вертикально анодом вгору під час випробувань.

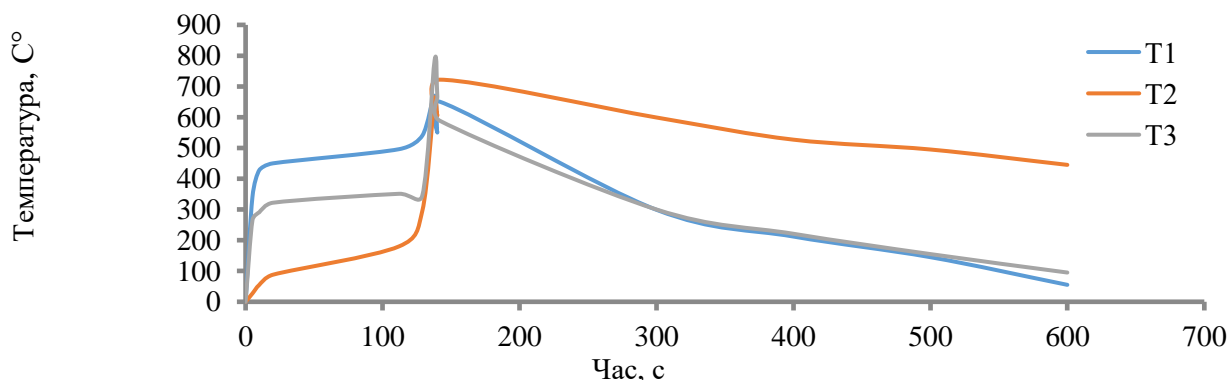


Рисунок 7 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 50 %, розміщеної вертикально анодом вгору

На 126-129 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі T2, яка розміщувалась під батареєю з 355-370 °С до 745-786 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 293-298 °С.

Викид супроводжувався у всіх трьох експериментах орієнтовно 5-9 сек. При цьому

температура батареї досягла значення близько 667-678 °С на момент закінчення викиду і через 3-4 с стався вибух, при якому температура батареї становила 722-734 °С. При цьому втрата маси батарей під час випробувань становила 15-18 г.

При горизонтальному розміщенні батареї початок необоротної екзотермічної реакції відбувався на 89-94 с від початку випробувань (рис 8).

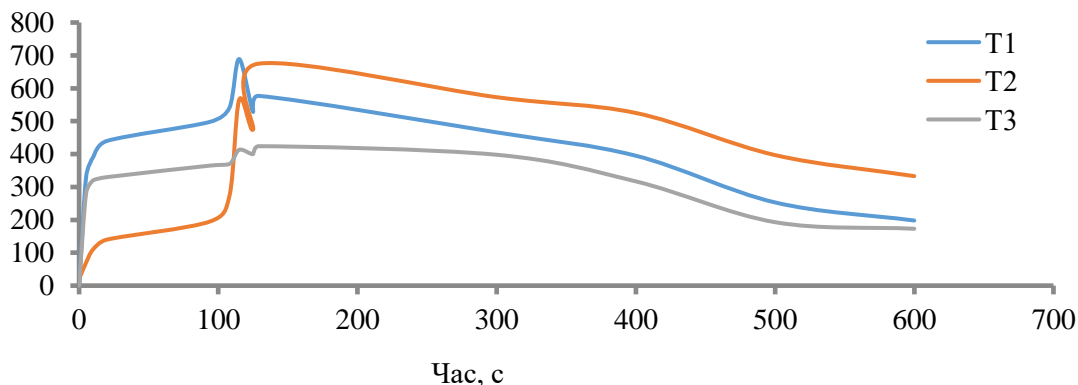


Рисунок 8 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 50 %, розміщеної горизонтально під час випробувань

При цьому температура батареї становила 173-190 °С, а температура полум'я над батареєю, яка фіксувалась термопарою T1-472-496 °С. Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 106-111 с від початку випробувань, що є на 9-11 с швидше ніж при вертикальному розміщенні батареї. Таку особливість можна пояснити кращим прогріванням батареї, і як наслідок, за короткий час досягнення температури відкриття вентиляційного отвору. На початку викиду вентиляційних газів температура батареї становила 223-284 °С і стрімко зростає до 555-569 °С на момент закінчення викиду. І вже на 121-124 с від початку випробувань відбувся

вибух, при якому температура батареї зростає до 475-480 до 671-683 °С тобто на 196-203 °С. Втрата маси дослідних зразків становила в межах 13-15 г

Наступним етапом було дослідження батарей заряджених на 100 %, які розміщувались вертикально анодом вниз.

Слід відзначити, що заряджені на 50 % батареї під час викиду вентиляційних газів давали більший шум та свист, тому з міркувань безпеки для 100% заряджених батарей між вогневим майданчиком та засобами вимірювальної техніки було встановлено металевий бар'єр. Це також мало захищати оператора на робочому місці. Фото «захисної споруди» зображене на рисунку 9.



Рисунок 9 – Фото проведення експерименту повністю заряджених батарей із захисним бар'єром

На рисунку 10 наведено динаміку зміни температури батареї зарядженої на 100% розміщеної вертикально анодом вниз під час випробувань.

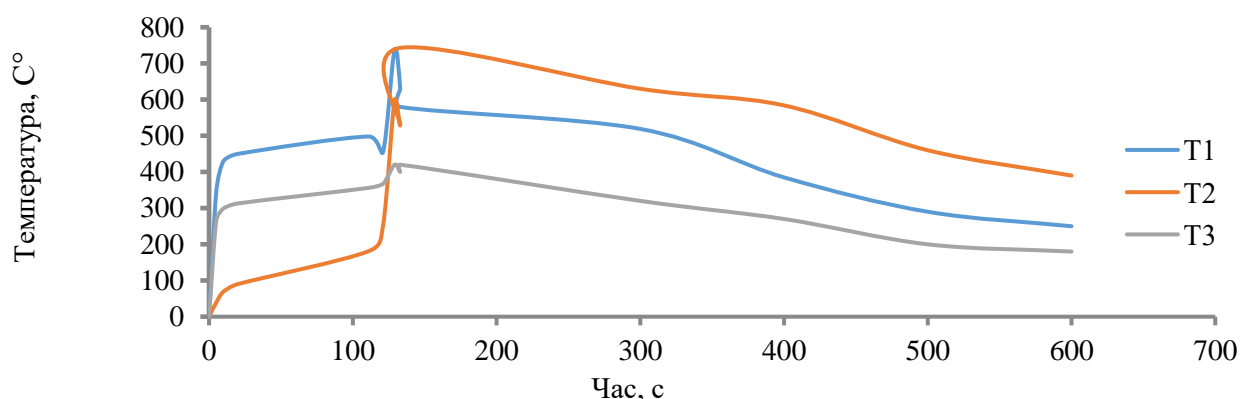


Рисунок 10 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 100 % розміщеної вертикально анодом вниз час випробувань

На 110-113 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 165-195 °С, що пояснюється бурхливим розвитком необоротної екзотермічної реакції, і як наслідок, генерації великої кількості тепла, яке починає нагрівати батарею зсередини.

На 118-121 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвело до різкого стрибка температури на термопарі T1, розміщеній над батареєю з 428-437 °С

до 738-766 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 241-255 °С.

Викид тривав у всіх трьох експериментах орієнтовно 5-8 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 583-593 °С на через 3-5 с після закінчення викиду відбувся вибух, при якому температура батареї становила 743-759 °С.

На рисунку 11 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної анодом вгору зарядженої на 100 % батареї під час випробувань.

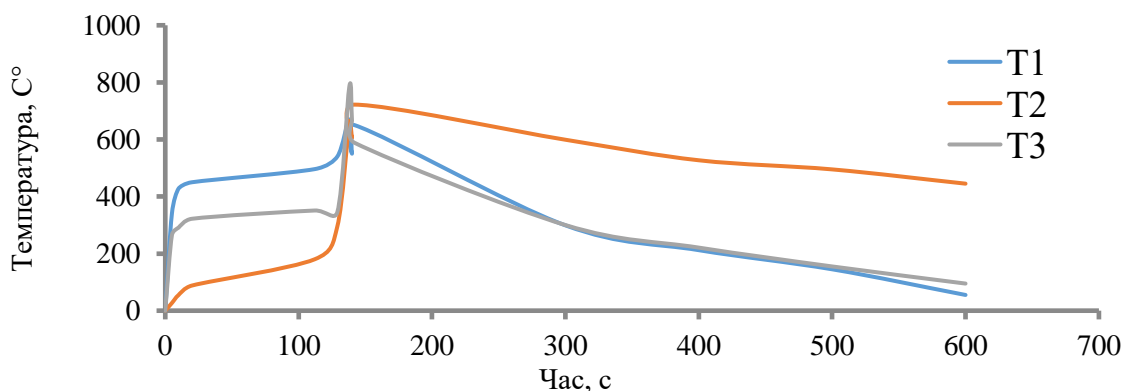


Рисунок 11 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 100 % розміщеної вертикально анодом вгору під час випробувань

На 106-115 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі T2, яка розміщувалась під батареєю з 341-360 °С до 745-756 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 273-284 °С.

Викид тривав у всіх трьох експериментах

орієнтовно 6-8 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 613-628 °С на момент закінчення викиду і через 3-5 с стався вибух, при якому температура батареї становила 668-679 °С.

При горизонтальному розміщенні батареї початок необоротної екзотермічної реакції зафіксовано на 89-94 с від початку випробувань (рис 12.)

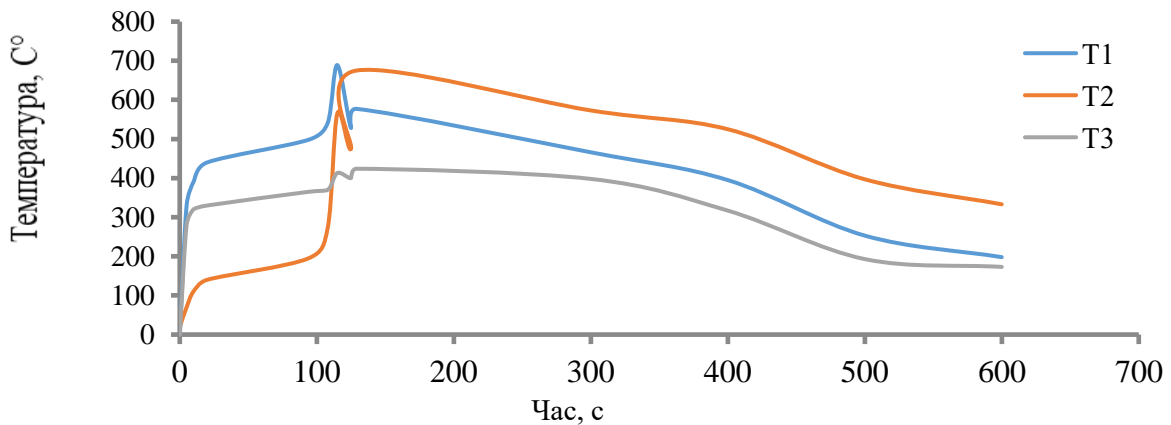


Рисунок 12 – Динаміка зміни температури батареї зарядженої на 100 % розміщеної горизонтально під час випробувань

При цьому температура батареї становила 173-190 °С, а температура полум'я над батареєю, яка фіксувалась термопарою Т1- 472-496 °С. Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 106-111 с від початку випробувань, що на 9-11 с швидше, ніж при вертикальному розміщенні батареї. Таку особливість можна пояснити

кращим прогріванням батареї, і як наслідок, коротшим часом досягнення температури відкриття вентиляційного отвору. При початку викиду вентиляційних газів (рис. 13) температура батареї становила 223-284 °С і стрімко зросла до 555-569 °С – на момент закінчення викиду.



Рисунок 13 – Початок викиду вентиляційних газів і їх горіння

І вже на 121-124 с від початку випробувань стався вибух, при якому температура батареї зросла до з 475-480 до 671-683 °С тобто на 196-203 °С

Власне стан заряду батареї показує, яка частка електричної енергії від загальної її ємності міститься у батареї. Тому акумульована електрична енергія безпосередньо впливає на вищенаведені показники.

Зі збільшенням заряду батареї під час відкриття вентиляційного отвору і виходу газів

спостерігається більшення рівня шуму та свисту. Викид газів більш реактивний. Під час вибуху спостерігається викид розпечених частинок металу, нерідко батарея відлітала на десятки метрів від місця проведення вогневих випробувань.

Власне на рисунку 14 зображено розкадровку реактивного польоту батареї із викидом частинок розпеченого металу та іскор. Такі події спостерігались лише при 100% заряду батареї.



Рисунок 14 – Фото польоту батареї при 100% заряді із викидом частинок розпеченого металу та іскор

Також варто відзначити, що заряджені на 100% батареї після вибуху продовжували горіти, власне горіли залишки вентиляційних газів, які

виходили через вентиляційний отвір, що зображено на фото рисунку 15.



Рисунок 15 – Фото горіння заряджених батареї на 100% після вибуху

Отже, результати експериментів показали, що зі збільшенням заряду батареї (зі збільшенням кількості енергії, яка міститься в батареї) збільшується її пожежна небезпека. А саме, збільшується час виходу і температура горіння вентиляційних газів, а також втрата маси батареї, яка і визначає загальне тепловиділення внаслідок горіння.

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

1. При вертикальному розміщенні елементів анодом вниз, вентиляційний отвір спрацьовує найпізніше, а при горизонтальному розміщенні – найшвидше.

2. У розряджених елементах через 9-11 с після початку виникнення необоротної екзотермічної реакції спрацьовує вентиляційний отвір, з якого виходять гази, що горять, викид яких триває 3-5 сек. Температура горіння вентиляційних газів становить 700-750 °С. Горіння таких батарей не супроводжується вибухом. Втрата маси елемента батареї становила 15-21 %.

3. У заряджених на 50 % елементах через 7-9 с після початку виникнення реакції спрацьовує вентиляційний отвір, з якого виходять гази, що горять, викид яких триває 4-6 сек та супроводжується свистом і через 3-5 с після завершення викиду стається вибух. Температура горіння вентиляційних газів становила 720-760 °С, втрата маси елемента батареї складала 25-38 %.

4. У заряджених на 100 % елементах через 5-8 с після початку виникнення реакції спрацьовує вентиляційний отвір, з якого виходять гази, що горять, викид яких триває 5-9 с та супроводжується гучним свистом і через 2-4 с після завершення викиду стається вибух. Під час вибуху відбувається розбризування розплавленого металу та іскор. Температура горіння вентиляційних газів становить 720-780 °С, втрата маси елемента батареї складала 52-60 %.

5. У всіх експериментах незалежно від стану заряду чи розміщення батареї необоротна екзотермічна реакція відбувається при досягненні температури батареї 165-195 °С. При збільшенні заряду батареї збільшується час викиду вентиляційних газів, що горять, це супроводжувалося гучнішим звуком, а також

зменшується час між завершенням викиду вентиляційних газів та вибухом (що не стосується розряджених батарей). Стан заряду практично не впливає на температуру горіння вентиляційних газів, яка становить 700-780 °С.

Список літератури:

1. International Energy Agency (2022a) Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future; 2022 IIS 2380-S43. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.

2. Гаврилюк А.Ф., Васильєва О.Е. (2023). Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. Пожежна безпека, 42, 32-42. doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04

3. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10 (118)), 67–75. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001

4. Lazarenko, O., Hembara, T., Pospolitak, V., & Voytovych, D. (2023). 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>

5. 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_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}) O₂ cathode. Journal of Energy Storage, 31, 101643

6. 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.

7. 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.

8. Shen, W., Yan, J., Zhong, M., Zhang, J., & Guo, S. (2023). Heat Generation of Graphite Anode During Electrochemical Lithiation. Available at SSRN 4336580.

9. 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.

10. 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.

11. Lai, X., Jin, C., Yi, W., Han, X., Feng, X., Zheng, Y., & Ouyang, M. (2021). Mechanism,

modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. Energy Storage Materials, 35, 470-499.

12. Wang, Q., Mao, B., Stolarov, SI, & Sun, J. (2019). Обзор механизмов выхода из ладу літій-іонних акумуляторів і стратегій запобігання пожежі. Progress in Energy and Combustion Science, 73, 95-131.

13. Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., ... & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries—A review. Journal of Power Sources, 525, 231094.

14. Thakur, A. K., Sathyamurthy, R., Velraj, R., Saidur, R., Pandey, A. K., Ma, Z., ... & Ali, H. M. (2023). A state-of-the art review on advancing battery thermal management systems for fast-charging. Applied Thermal Engineering, 226, 120303.

15. Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A review of battery fires in electric vehicles. Fire technology, 56, 1361-1410

16. Cui, Y., Liu, J., Cong, B., Han, X., & Yin, S. (2022). Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel. Process Safety and Environmental Protection, 166, 524-534.

17. Zhang, D., Huang, G., Li, H., Deng, Q., & Gao, X. (2023). A study of the factors influencing the thermal radiation received by pedestrians from the electric vehicle fire in roadside parking based on PHRR. Applied Sciences, 13(1), 609

18. Sturm, P., Föbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. Fire safety journal, 134, 103695.

19. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А.П. (2022). Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. Пожежна безпека, 40, 31-39.

20. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyu, 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>

21. Zhang, S. S. (2007). A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. Journal of power sources, 164(1), 351-364

References:

1. International Energy Agency (2022a) Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future; 2022 IIS 2380-S43. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.

2. Gavryliuk A.F., Vasylieva O.E. (2023). Analiz stanu protypozhezhnoho zakhystu elektromobiliv. Pozhezhna bezpeka, 42, 32-42.

doi.org/10.32447/20786662.42.2023.043.

Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>

3. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 67–75. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001

4. Lazarenko, O., Hembara, T., Pospolitak, V., & Voytovych, D. (2023). 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. doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780

5. 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_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}) O₂ cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643

6. 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.

7. 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.

8. Shen, W., Yan, J., Zhong, M., Zhang, J., & Guo, S. (2023). Heat Generation of Graphite Anode During Electrochemical Lithiation. Available at SSRN 4336580.

9. 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.

10. 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.

11. Lai, X., Jin, C., Yi, W., Han, X., Feng, X., Zheng, Y., & Ouyang, M. (2021). Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short

circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Energy Storage Materials*, 35, 470-499.

12. Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, SI, & Sun, J. (2019). Огляд механізмів виходу з ладу літій-іонних акумуляторів і стратегій запобігання пожежі. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95-131.

13. Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., ... & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries—A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094.

14. Thakur, A. K., Sathyamurthy, R., Velraj, R., Saidur, R., Pandey, A. K., Ma, Z., ... & Ali, H. M. (2023). A state-of-the art review on advancing battery thermal management systems for fast-charging. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120303.

15. Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A review of battery fires in electric vehicles. *Fire technology*, 56, 1361-1410

16. Cui, Y., Liu, J., Cong, B., Han, X., & Yin, S. (2022). Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 524-534.

17. Zhang, D., Huang, G., Li, H., Deng, Q., & Gao, X. (2023). A study of the factors influencing the thermal radiation received by pedestrians from the electric vehicle fire in roadside parking based on PHRR. *Applied Sciences*, 13(1), 609

18. Sturm, P., Föbtleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695.

19. Gavryliuk A. F., Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoiu stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoj batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. [https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04.4](https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04.4)

20. 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. doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999

21. Zhang, S. S. (2007). A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of power sources*, 164(1), 351-364.

© А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук,
М. В. Лемішко.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 07.09.2023.

Прийнято до публікації 06.12.2023.