

УДК 614.843

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ ПІД ДІЄЮ ВІДКРИТОГО ПОЛУМ'Я

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.32-41>

Гаврилюк А. Ф., ORCID iD 0000-0002-8727-9950

Яковчук Р. С., ORCID iD 0000-0001-5523-5569

E-mail gavrilyk3@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.08.2023

Пройшла рецензування: 11.10.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа електромобіля, літій-іонна батарея, пожежна безпека електромобіля, температура займання, тепловий потік, температура горіння.

### АНОТАЦІЯ

Наведено динаміку збільшення парку електромобілів у різних країнах світу, а також прогнози щодо зазначеного на теренах Європейського Союзу. Визначено небезпеку їх використання, яка зумовлена виникненням незворотної екзотермічної реакції, що часто спричиняє займання і призводить не лише до пожеж, а й вибухів. Проаналізовано сучасний стан наукових досліджень щодо забезпечення пожежної безпеки та гасіння пожеж електромобілів, пожежної безпеки силових літій-іонних батарей, систем зберігання водню тощо. У роботі застосовувались експериментальний та теоретичний методи дослідження з використанням таких операцій, як синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо. Сутність запропонованої методики експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки відкритим полум'ям полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також у з'ясуванні впливу чинників на зазначені параметри. У цій методиці експериментальним шляхом обґрунтовано параметри модельного вогнища пожежі класу В, а також розміщення дослідних взірців силових акумуляторних батарей електромобілів і засобів вимірювальної техніки. Її застосування дасть змогу систематизувати та узагальнити пожежонебезпечні параметри елементів силових батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки, а також дослідити вплив чинників на вказані параметри. Це сприятиме створенню підґрунтя до подальшого розвитку безпечних умов використання електромобілів, а також розроблення нових та ефективних засобів їх гасіння.

### Постановка проблеми.

Збільшення кількості електромобілів як приватного, так і комерційного використання у загальному світовому парку автотранспорту є важливим кроком на шляху досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. За деякими прогнозами, до 2030 р. в ЄС буде налічуватись понад 30 млн електромобілів [1–2].

На рис. 1 наведено динаміку збільшення парку електромобілів за останні п'ять років у різних країнах світу. Їхню кількість станом на 2023 рік

спрогнозовано на основі продажу за перші два квартали поточного року [3].

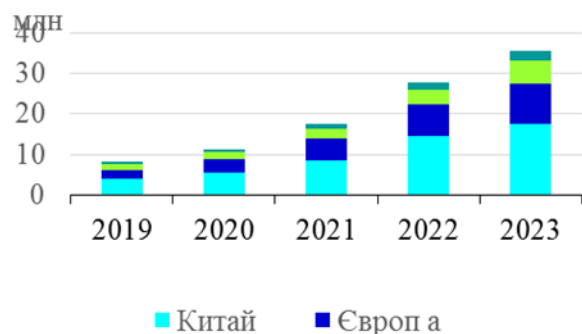


Рисунок 1 – Динаміка збільшення парку електромобілів у світі

Джерело: розробка авторів

Разом із тим у силових акумуляторних кислотних батареях (далі – АКБ) електромобілів за певних умов [4] може виникнути незворотна екзотермічна реакція, що часто спричиняє займання і призводить не лише до пожеж, а й вибухів електромобілів [5–9].

Значне занепокоєння у громадськості виникає через виділення горючих, вибухонебезпечних та токсичних газів [10], а також труднощі з огляду на особливості пожежі та необхідність великої кількості вогнегасних речовин [11], що відповідно зумовлює нові виклики для пожежно-рятувальних служб.

Зважаючи на це, проведення наукових розвідок щодо дослідження пожеж та інших пожежонебезпечних ситуацій, які можуть виникати в електромобілях, є надзвичайно важливим. Нові розроблені та досліджені безпекові підходи вплинуть на створення підґрунтя для зменшення матеріальних збитків та людських жертв унаслідок таких пожеж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розв’язанням актуальних питань щодо забезпечення пожежної безпеки та гасіння пожеж електромобілів, пожежної безпеки силових літій-іонних батарей, систем зберігання водню опікувались такі вчені, як: Олена Функ, Кондрат Браун (Данія), Ола Вісланд, Йонна Гініенд, Фредрік Ларсон, Петра Андерссон, Роланд Бішоп (Швеція), Пітер Штурм, Даніель Фрувіт, Андрій Голубков (Австрія), Сонвук Кан (Корея), Ванг Цистон, Пінг Пінг, Чжан Цінзон, Цзянхао Ніу, Інбо Лю, Бінбін Мао (Китай), Юрій Ключка, Валентна Кривцова, Юрій Абрамов (Україна), Станіслав Столяров, Алекс Гарбер, Ян Пен, Ахмед Саїд (США), Дженифер Вен, Чен Хаодун (Великобританія) та інші.

Так, у праці О. Функ з Датського інституту пожежної техніки та технологій безпеки зазначено про проведення повномасштабних вогневих випробувань електромобілів на закритому паркінгу. За результатами експериментів, температура продуктів горіння на висоті стелі становила понад 1000 °С, що створює

ризик для сталених конструкцій. А перекидання полум’я на поруч припарковані автомобілі становило від 3 хв до 45 хв від початку вогневих випробувань і залежало від місця розміщення джерела займання [12].

О. Вісланд та її колеги з Дослідницького інституту Швеції (RESE) вивчали потужність теплового випромінювання, яка генерується пожежами електромобілів, а також токсичність продуктів згоряння. Дослідники встановили, що кількість продуктів згоряння внаслідок пожеж електромобілів є значно більшою, ніж від пожеж аналогічних автомобілів, які обладнані двигуном внутрішнього згоряння (далі – ДВЗ) [13].

П. Штурм із Технологічного університету Граца встановив, що внаслідок пожежі електромобіля із силовою АКБ ємністю 80 кВт/год за 100% заряду батареї потужність теплового потоку складає понад 10 МВт, що удвічі більше, ніж для аналогічного автомобіля із ДВЗ [14].

Науковці Йонна Гініен та інші [15] з Науково-дослідного інституту Швеції на підставі повномасштабних випробувань з’ясували, що для електромобілів, обладнаних силовою АКБ ємністю 50 кВт/год зі станом заряду 90%, 40 кВт/год зі станом заряду 80% та 24 кВт/год зі станом заряду також 80%, сумарна енергія тепловиділення складає 5,7 ГДж, 5,2 ГДж та 6,7 ГДж відповідно.

Сонвук Кан із Корейського центру пожежних випробувань та досліджень розглянув питому теплоту згоряння речовин та матеріалів, які використовуються для виготовлення електромобілів. Встановлено, що матеріали нових електромобілів мають вищу теплоту згоряння, ніж ті, що були виготовлені 5–7 років тому [16].

Пінг із Університету науки і технологій встановив, що внутрішнє коротке замикання силових батарей електромобілів є основною причиною, яка призводить до займань електромобілів [17].

А. Голубков із Технологічного університету Граца вивчав процеси виникнення незворотної екзотермічної реакції у корпусі силової батареї електромобілів. Встановлено, що температура у момент виникнення незворотної екзотермічної реакції за декілька секунд збільшується від 220 °С до 700–750 °С [18].

Також було досліджено вплив старіння батарей електромобілів на їх пожежну безпеку. З'ясовано, що з процесом старіння, зменшенням ємності АКБ потужність перебігу незворотної екзотермічної реакції зменшується, а отже, зменшується рівень пожежної небезпеки таких батарей. Винятком може слугувати випадок утворення свіжого літію внаслідок експлуатації електромобіля, що потребує детального вивчення [19–20].

Цінсон Чан з Університету цивільної авіації Китаю встановив залежність між ступенем заряду батареї та процесом її горіння. У разі збільшення заряду батарея демонструє нижчу термічну стабільність (тобто є більш пожежонебезпечною). А батареї, що на 100% заряджені, здатні створювати найбільший тиск вибуху [21].

Інбо Лю з Науково-технологічного парку Китаю розглянув питання пожежної небезпеки силових батарей у разі їх надмірного заряджання. Досліджено температурні параметри, які виникають у разі надмірного заряджання силових батарей, а також їх здатність до займання [22].

Бабін Моа з Університету науки і технологій Китаю дослідив висоту полум'я пожежі для батарей типу 18650, яка може складати до 0,4 м під час горіння лише одного елемента [23].

У науковій праці [24] надано оцінку пожежній безпеці різних типів силових АКБ, які використовуються в електромобілях.

Автори роботи [25] провели моделювання пожежі електромобіля, що перебуває на закритому паркінгу. З огляду на зазначене встановлено, що мінімальна протипожежна відстань впродовж часу вільного розвитку 610 с для пожежі

електромобіля на закритому паркінгу по флангу становить 10 м, а по фронту – 6 м. Ураховуючи, що паркування авто може бути як поздовжнім, так і поперечним, доцільно взяти найбільше значення протипожежної відстані, тобто 10 м.

Ю. Ключка [26] досліджував основи забезпечення пожежовибухобезпечності систем зберігання водню на автотранспортних засобах, зокрема й на електромобілях. Ю. Абрамов [27] обґрунтував характеристики контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подавання водню на електромобілях.

С. Столяров із Інженерної школи А. Джеймса Кларка США досліджував загальну концепцію безпеки літій-іонних батарей [28].

Науковець Ахмед Саїд із Університету Міреленда США досліджував гасіння пожежі літій-іонних батарей типу 18650 за допомогою дрібнорозпиленої води [29].

Однак у згаданих вище роботах не досліджено питання стосовно розроблення концептуальної методики, яка б дала змогу дослідити основні пожежонебезпечні параметри літій-іонних батарей.

**Формулювання цілей дослідження.** Мета роботи полягає у розробленні основних положень методики експериментальних досліджень літій-іонних батарей щодо пожежної небезпеки відкритим полум'ям.

Кінцева мета дослідження полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та густини теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, дослідженні впливу чинників на ці параметри та виявленні закономірностей, а також розкритті особливостей перебігу таких процесів (горіння).

Для цього необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ);

- обґрунтувати модельне вогнище пожежі, розміщення ЗВТ та дослідних взірців;

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

**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.

**Виклад основного матеріалу.** Сутність розробленої методики полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та густини теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідженні впливу чинників на вказані параметри. Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: модельне вогнище пожежі класу В, досліджувані зразки, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото- та відеознімання.

Для наукової розвідки вибрані модельні вогнища класів В, перевагою яких щодо модельних вогнищ класу А є те, що вони дають кращу повторюваність теплових характеристик. Це зумовлюється незмінними параметрами пального. Натомість деревина може бути різних хвойних порід (сосна, ялина, ялівець тощо). Ба більше, бруски можуть виготовлятися також із різного сорту деревини, що і впливає на температурні параметри. Отже, з огляду на це для ініціювання займання вибрано модельне вогнище класу В.

Модельне вогнище створюється бензином марки А-92 та об'ємом 200 мл,

який розміщується у металевому деку діаметром  $140 \pm 5$  мм, висотою борта  $100 \pm 5$  мм та товщиною стінки борта  $2,0 \pm 0,5$  мм. Розміри дека та кількість пального обґрунтовано експериментальним шляхом з міркувань забезпечення часу горіння модельного вогнища 6–7 хв, а також охоплення дослідних взірців полум'ям.

Перед проведенням експерименту необхідно провести зважування кожного елемента за допомогою електронних ваг із точністю зважування не менше 0,5 г.

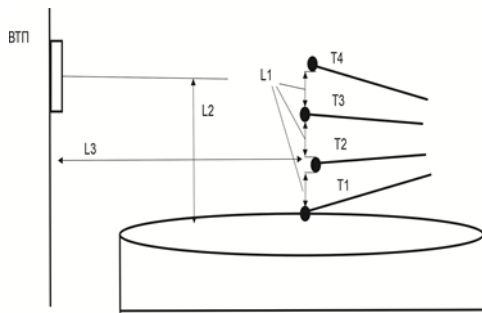
Стан заряду батарей необхідно здійснювати за допомогою мультиметра (рис. 2а) з точністю не менше 0,1 В. У разі необхідності для збільшення заряду можна використовувати зарядний пристрій, який сумісний із параметрами досліджуваних взірців батарей електромобілів.

Розподіл температурного поля, а також температуру зовні осередка горіння доцільно фіксувати за допомогою телевізійної камери LEADER TIC 3 (або аналог), з діапазоном вимірювання температур  $-40$  °С до  $1150$  °С.

З метою обґрунтування місця розміщення випробувальних зразків проведено експериментальні дослідження із визначення розподілу температур щодо джерела нагрівання.

Для цього у деку поміщено 200 мл пального, і над деком розміщено 4 термопари, перша із них – у центрі дека по горизонталі із верхнім краєм стінки дека. Кожна наступна термопара розміщувалась на 7 см ( $L1=7$  см) вище першої, як це наведено на рис. 2.

Пристрій для визначення густини теплового потоку ВТП-01 розміщувався на відстані 30 см ( $L3$ ) по вертикалі та 20 см від центра ( $L2$ ) дека по горизонталі (рис. 2).



а



б

Рисунок 2 – Схематичне (а) та натурне (б) зображення розміщення термопар щодо дека

*Джерело: розробка авторів*

На рис. 3 показано проведення експерименту із визначення температурного розподілу від модельного вогнища пожежі класу В.



Рисунок 3 – Фото під час проведення експерименту

*Джерело: розробка авторів*

Результати досліджень наведені на рис. 4. Час повного вигорання пального становив 11 хв 20 с, а інтенсивного горіння – 7 хв 10 с. Найбільша температура досягала на 3–4 хв від початку випробувань. Найбільше значення температури фіксувала термопара T2, яка розміщувалась на висоті 7 см від борта дека, пікові значення якої становили близько 1000 °С, а усереднені – 600–650 °С. Значення термопари T3, яка розміщувалась на висоті 14 см, незначно відрізнялось від значення термопари T2, і усереднене значення коливалося в межах 580–650 °С, а максимальна – 950 °С. Термопара T1 розміщувалась на одній горизонталі із краєм дека і фіксувала максимальну температуру до 550 °С, а усереднена була в межах 400–420 °С.

Таким чином, встановлено: для модельного вогнища класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92, що поміщене в кругле деко діаметром 140 мм, максимальна температура горіння досягається на відріжку 7–14 см по вертикалі від краю дека і складає 950–1000 °С, а усереднена – 600–650 °С.

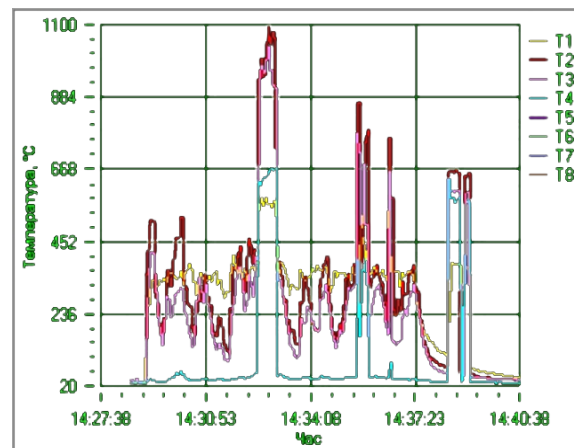


Рисунок 4 – Результати досліджень щодо обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків щодо джерела нагрівання

*Джерело: розробка авторів*

Отже, обґрунтовано розміщення дослідних зразків у модельному вогнищі пожежі класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92, у деку діаметром 140 мм на висоті 7–14 см по вертикалі від верхнього краю дека.

На випробувальні зразки елементів літій-іонних батарей кріпились дві термопари, як зображено на рис. 5.

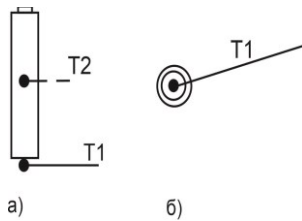


Рисунок 5 – Схема улаштування термопар на випробувальних зразках: а) вигляд збоку; б) вигляд знизу

Джерело: розробка авторів

Термопара Т1 фіксує температуру дії модельного полум'я на силові АКБ,

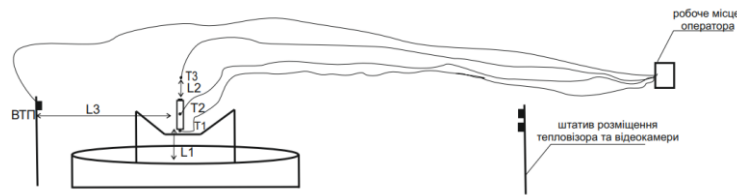


Рисунок 6 – Схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Джерело: розробка авторів

Випробування елементів літій-іонних батарей здійснюється у трьох положеннях: вертикальному анодом вниз, вертикальному анодом вгору, горизонтальному.

З метою дослідження впливу стану заряду АКБ на теплові характеристики формується три групи дослідних взірців: зі 100% станом заряду, із 50% та повністю розряджені. За потреби інтервал стану заряду можна зменшити. Для кожного стану заряду АКБ та її розміщення проводиться не менше трьох експериментів.

Тепловізор фіксує зміну розміру полум'я та термографічне зображення

а також температуру нагрівання батарей на межі полум'я – батарея. Термопара Т2 кріпиться посередині батареї та фіксує температуру нагрівання батарей.

Термопара Т3 (рис. 6) розміщується на відстані L2 (L2=7 см) від верхнього краю силових АКБ і фіксує температуру полум'я, яке утворено модельним вогнищем пожежі та полум'ям, яке може утворитись внаслідок горіння силових АКБ.

розвитку горіння. Відеокамера фіксуватиме динаміку розвитку полум'я у часі. Розміщується телевизор і відеокамера на штативі із врахуванням вимог їх безпечної роботи.

Приймач теплового потоку розміщується за допомогою штатива на одній горизонталі з досліджуваними зразками літій-іонних батарей.

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час натурних вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики наведені в таблиці.

Таблиця 1 Технічні характеристики обладнання, призначеного для досліджень

№ з/п	Найменування обладнання, призначеного для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1	Пристрій для вимірювання теплового потоку	Густина теплового потоку			
2	Приймач теплового потоку ВТП-01	Густина теплового потоку	0÷630	кВт/м <sup>2</sup>	±5%
3	Термопари ТХА	Температура	-40÷1350	°С	±2,5 %
4	Регулятор-вимірювач РТ 0102-8-К	Температура	-40÷1350	°С	±2,5 %
5	Фото-, відеокамера	Матриця	14,2	пікселей	
6	Тепловізор	Матриця	320 x 240	пікселей	
7	Ваги ТВЕ 150	Маса	0.04 ÷120.0кг	кг	

Джерело: розробка авторів

Послідовність проведення досліджень:

- підготовка ЗВТ та обладнання, пристроїв фото- та відеофіксації (табл. 1).
- здійснення вимірювання показників температури і вологості повітря, швидкості вітру, абсолютного атмосферного тиску;
- здійснення вмикання та вимірювань значень температур усіх влаштованих термопар і теплового випромінювання пристроєм ВТП-01 без дії полум'я та перевірка їх роботи ;
- заповнення дека бензином А-92 за 2 хв до початку випробувань;
- вмикання вимірювально-обчислювальних пристроїв у режим реєстрації, здійснюється відеознімання та підпалюється модельне вогнище пожежі класу В.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснюється вимірювання та реєстрація температур поверхні дослідного зразка, полум'я та потужність теплового потоку від модельного вогнища пожежі.

Реєстрація температури і теплового потоку здійснюється з інтервалом не більше ніж 2 с. Фото- та відеознімання проводиться на всьому етапі експериментальних досліджень з метою визначення геометричних параметрів полум'я.

Дослідження тривають до повного вигорання пального у вогнищі пожежі класу В.

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

За отриманими даними визначається похибка досліджень за формулою [31]:

$$\Delta A = \pm \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (1)$$

де  $\Delta A$  – абсолютна похибка досліджуваних величин;

$\Delta A_1$  – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

$\Delta A_2$  – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система

«Термоконт», пристрій для вимірювання теплового потоку, похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));  
 $k$  – коефіцієнт, який залежить від імовірності ( $k=1,1$  при  $P=0,95$ ).

Фіксуються середні значення температур та густини теплового потоку, а також геометричні параметри полум'я. Результати відображаються у графічній формі як залежності.

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

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

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Запропонована методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я дасть змогу визначити теплові параметри (температури займання, горіння та теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідити вплив чинників на вказані параметри. У методиці експериментальним шляхом обґрунтовано параметри модельного вогнища пожежі класу В, а також розміщення ЗВТ.

Надалі дослідження спрямовуватимуться на проведення експериментів згідно з цією методикою та здійснення оцінювання отриманих результатів, що й увійде у наступну публікацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Gkoumas K., Marques dos Santos, F. L., Stepniak, M., & Pekár F. (2021). Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy : A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Applied Sciences*, 11(24), 11981.
- Fetting C. (2020). The European green deal. ESDN report, 53.
- Global EV Data Explorer. Paris, France : IEA. (2021).
- Hammami A, Raymond N, Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. Doi : 10.1038/424635b. PMID: 12904779
- Schmidt A., Oehler D., Weber A., Wetzel T., & Ivers-Tiffée E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
- Chen M., Sun Q., Li Y., Wu K., Liu B., Peng P., & Wang Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*. 8(1). P. 490–500.
- Wu W., Xiao X., & Huang X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83. P. 227–240.
- Abada S., Marlair, G. Lecocq, A. Petit, M., Sauvant-Moynot V., & Huet F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306. P. 178–192.
- Anderson J., Larsson, F. Andersson, P. & Mellander B. E. Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden. P. 8–11.
- Larsson F., Andersson, P. & Mellander B. E. Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2). 2016. P. 9.
- Peng Y., Yang, L., Ju X., Liao B., Ye K., Li L., ... & Ni Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO<sub>4</sub> cathode. *Journal of hazardous materials*, 381, 120916.
- Funk E., Flecknoe-Brown K. W., Wijesekere T., Husted B. P., & Andres B. (2023). Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. *Fire Safety Journal*, 103920.
- Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic gases from fire in electric vehicles.
- 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.
- Hynynen J., Willstrand O., Blomqvist P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829.
- Kang S., Kwon M., Choi J. Y., & Choi S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497
- Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D., & Chen C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285. P. 80–89.
- Golubkov A. W., Fuchs D., Wagner J., Wiltsche H., Stangl C., Fauler G., ... & Hacker V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642
- Essl C., Golubkov, A. W., & Fuchs A. (2021). Influence of aging on the failing behavior of automotive lithium-ion batteries. *Batteries*, 7(2), 23.
- Ren D., Hsu H., Li R., Feng X., Guo D., Han X., ... & Ouyang M. A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries. *ETransportation*, 2. 2019. 100034.
- Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, . (2022). 45, 103759
- Liu Y., Huo R., Qin H., Li X., Wei D., & Zeng T. 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.
- Mao, B., Zhao, C., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2021). Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery. *Applied Energy*, 281, 116054.
- Гаврилук А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. С. 31–39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.
- Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10) (122). P. 39–46. URL : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999> (дата звернення : 12.10.2023).
- Клюшка, Ю. П., & Кривцова, В. І. Визначення характеристик витікання водню з криогенної системи зберігання.
- Абрамов Ю. А. Обґрунтування характеристик системи контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню / Ю. О. Абрамов, В. І. Кривцова, А. О. Михайлюк. *Комунальне господарство міст*. Харків, 2023. Т. 1. Вип. 175. С. 125–130. DOI : 10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130.
- Wang Q., Wen J., & Stoliarov S. (2020). Special issue on lithium battery fire safety. *Fire Technology*, 56, 2345–2347.
- Said, A. O., Garber, A., Peng, Y., & Stoliarov, S. I. (2022). Experimental investigation of suppression of 18650 lithium ion cell array fires with water mist. *Fire technology*, 1-29.
- Rappsilbe T., Yusfi N., Krüger S., Hahn S. K., Fellinger T. P., von Nidda J. K., & Tschirschwitz R. Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. № 60. 2023. 106579.
- Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти : дис. ... д-ра. техн. наук : 261. Київ, 2020. 409 с

REFERENCES

- Gkoumas, K., Marques dos Santos, F. L., Stepniak, M., & Pekár, F. (2021). Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy: A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Applied Sciences*, 11(24), 11981. [in English].
- Fetting, C. (2020). The European green deal. ESDN report, 53[in English].
- Global EV Data Explorer. Paris, France: IEA. (2021). [in English].
- Hammami, A., Raymond, N., Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779 [in English].



5. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046 [in English].
6. Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500 [in English].
7. Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240 [in English].
8. Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvart-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192 [in English].
9. Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11) [in English].
10. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9 [in English].
11. Peng, Y., Yang, L., Ju, X., Liao, B., Ye, K., Li, L., ... & Ni, Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO<sub>4</sub> cathode. *Journal of hazardous materials*, 381, 120916. [in English].
12. Funk, E., Flecknoe-Brown, K. W., Wijesekere, T., Husted, B. P., & Andres, B. (2023). Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. *Fire Safety Journal*, 103920 [in English].
13. Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic gases from fire in electric vehicles [in English].
14. 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 [in English].
15. Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829 [in English].
16. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497 [in English].
17. Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Li, K., Sun, J., Kong, D., & Chen, C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285, 80-89 [in English].
18. Golubkov, A. W., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltische, H., Stangl, C., Fauler, G., ... & Hacker, V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642 [in English].
19. Essl, C., Golubkov, A. W., & Fuchs, A. (2021). Influence of aging on the failing behavior of automotive lithium-ion batteries. *Batteries*, 7(2), 23 [in English].
20. Ren, D., Hsu, H., Li, R., Feng, X., Guo, D., Han, X., ... & Ouyang, M. (2019). A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries. *ETransportation*, 2, 100034 [in English].
21. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, 45, 103759 [in English].
22. 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 [in English].
23. Mao, B., Zhao, C., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2021). Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery. *Applied Energy*, 281, 116054 [in English].
24. Gavryliuk A. F., Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoiu stabilnistiu sylovoi litiivoi akumulatornoj batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04> [in English].
25. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10) (122), 39-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999> [in English].
26. Kliuchka, Yu. P., & Kryvtsova, V. I. (2012). Vyznachennia kharakterystyk vytkannia vodniu z kriohennoi systemy zberihannia. [in English].
27. Abramov Yu.A. Obgruntuvannia kharakterystyk systemy kontroliu pozhezhonebezpechnoho stanu systemy zberihannia ta podachi vodniu / Yu.O. Abramov, V.I. Kryvtsova, A.O. Mykhailiuk// *Komunalne gospodarstvo mist. Kharkyv*, 2023. Tom 1, Vyp. 175.- S.125-130. DOI: 10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130 [in English].
28. Wang, Q., Wen, J., & Stolarov, S. (2020). Special issue on lithium battery fire safety. *Fire Technology*, 56, 2345-2347 [in English].
29. Said, A. O., Garber, A., Peng, Y., & Stolarov, S. I. (2022). Experimental investigation of suppression of 18650 lithium ion cell array fires with water mist. *Fire technology*, 1-29 [in English].
30. Rappsilber, T., Yusfi, N., Krüger, S., Hahn, S. K., Fellingner, T. P., von Nidda, J. K., & Tschirschwitz, R. (2023). Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 60, 106579 [in English].
31. Nizhnyk, V. V. (2020) *Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty* [Development of scientific bases for assessing the danger of fire spreading to adjacent construction objects ]. (Doctor's thesis). Kyiv [in Ukrainian].

**METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH  
BEHAVIOR OF LITHIUM-ION BATTERIES UNDER THE INFLUENCE OF OPEN FLAME**

*A. Gavryliuk, R. Yakovchuk*

*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

---

**KEYWORDS**

electric vehicle  
fire, lithium-ion  
battery, fire  
hazard of an  
electric vehicle,  
ignition  
temperature,  
heat flux,  
combustion  
temperature.

**ANNOTATION**

The article presents the dynamics of the number of electric vehicles in different countries of the world, as well as forecasts of their development in the European Union. the hazards of using electric vehicles are identified, which are caused by the occurrence of an irreversible exothermic reaction, which often causes ignition and leads not only to fires but also to explosions of electric vehicles. The current state of scientific research in the field of topical issues related to fire safety and fire extinguishing of electric vehicles, fire safety of power lithium-ion batteries, hydrogen storage systems, etc. is analysed. the work uses experimental and theoretical research methods, using the following operations: synthesis, analysis, systematisation, generalisation, etc. The essence of the proposed methodology for experimental studies of electric vehicle power battery elements for open flame fire hazard is to determine the thermal parameters (ignition temperature, combustion temperature and heat flux) that describe the combustion processes of electric vehicle power lithium-ion batteries, as well as to study the influence of factors on these parameters. the proposed methodology experimentally substantiates the parameters of a model fire of class c, as well as the placement of prototypes of power batteries and their placement in the open flame. The application of the proposed methodology will allow to systematise and generalise the fire-hazardous parameters of the elements of electric vehicle power batteries for fire hazard, as well as to study the influence of factors on these parameters. this will create the basis for further development of safe conditions for the use of electric vehicles, as well as the development of new and effective means of extinguishing them.