

УДК 614.841

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГРІВУ МОДУЛЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2.55-62>

Лазаренко О. В. *, ORCID iD 0000-0003-0500-0598

Пазен О. Ю., ORCID iD 0000-0003-1655-3825

*E-mail: o.lazarenko@ldubgd.edu.ua

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

31.09.2024

Пройшла рецензування:

15.10.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

електромобіль, літій-іонний елемент живлення, визначення температури, математична модель, експериментальна установка

АНОТАЦІЯ

Щороку виробники електричних транспортних засобів намагаються покращити основні показники своєї продукції, а саме, збільшити загальну ємність акумуляторної батареї, забезпечити швидкою зарядкою тощо. Водночас кількість випадків загоряння подібних електричних транспортних засобів, зокрема електромобілів, поступово зростає. З огляду на наслідки таких пожеж суспільство шукає відповідні рішення щодо забезпечення безпеки громадян і місць зберігання цих засобів. Лише одне загоряння електромобіля може завдати значної шкоди. Алгоритм гасіння такої пожежі потребує залучення значної кількості сил та засобів, а її повна ліквідація може тривати понад 12 годин. Відповідно до аналізу та останніх наукових досягнень наведено методику проведення експериментальних досліджень щодо визначення чинників припинення та запобігання виникненню термохімічної реакції в літій-іонних елементах живлення (далі – ЛІЕЖ). Запропоновано та теоретично обґрунтовано експериментальні стенди щодо встановлення параметрів ЛІЕЖ під час впливу сторонніх чинників, що можуть призвести до виникнення незворотної термохімічної реакції в елементі. Визначено математичний апарат, що дасть змогу згідно з результатами експериментальних досліджень визначити теплофізичні параметри ЛІЕЖ. Під час експериментальних розвідок заплановано здійснювати підвищення внутрішньої температури ЛІЕЖ за допомогою двох чинників, зокрема зовнішнього високотемпературного джерела (полум'я) та надлишкового постійного струму. У разі досягнення визначених температурних показників слід здійснити охолодження ЛІЕЖ із використанням вуглекислотного вогнегасника. Отримані експериментальні значення стануть підґрунтям для розроблення математичної моделі прогріву повнорозмірної комірки акумуляторної батареї електромобіля або іншого транспортного засобу.

Вступ. На сьогодні використання людиною автономних джерел енергії є вже буденною справою. Практично для будь-якої речі з нашого повсякдення потрібні автономні джерела енергії, зокрема батарейки різного формату, ємності, напруги. Найбільш поширеними засобами, в яких використовуються літій-іонні акумуляторні блоки живлення, є мобільні телефони, персональні комп'ютери (ноутбуки) тощо. Також спостерігається

значна зацікавленість і засобами пересування, що працюють на електротязі від акумуляторних батарей. Враховуючи очевидні переваги такого виду транспорту, люди все частіше використовують електросамокати, електровелосипеди, електромобілі тощо. Щороку виробники намагаються покращити основні показники своєї продукції, зокрема збільшити загальну ємність акумуляторної батареї, забезпечити швидкою зарядкою.

Водночас кількість випадків загоряння подібних електричних транспортних засобів (електромобілів) поступово зростає [1–3], і з огляду на наслідки пожеж суспільство змушене шукати відповідні рішення щодо забезпечення безпеки громадян та місць зберігання електротранспорту.

Лише одне [4–6] загоряння електромобіля може завдати значної шкоди. Алгоритм гасіння такої пожежі потребує залучення значної кількості сил і засобів, а повна її ліквідація може тривати понад 12 годин. Саме тому дослідження ефективного гасіння літій-іонних елементів живлення залишається відкритим питанням сьогодення.

Постановка проблеми. Як зазначено вище, завдання щодо винайдення ефективного засобу пожежогасіння акумуляторних батарей електромобілів нині не розв'язано. З огляду на те, що вода є основним ефективним вогнегасним засобом, для гасіння електромобілів здебільшого застосовують саме цю рідину [6–7]. Однак особливістю такого тактичного підходу є використання значної кількості води, якої в деяких випадках може знадобитись близько 9 тонн лише для безпосереднього гасіння, не враховуючи додаткових процедур [8], що ускладнює процес гасіння таких загорянь, особливо ЛПЕЖ.

Відповідно значна частина наукових досліджень націлена на виявлення альтернативних методів ефективного гасіння ЛПЕЖ [9–13]. Зокрема, в [9] розглядалося питання ефективності використання води та водних розчинів для гасіння безпосереднього горіння ЛПЕЖ загальною потужністю 40 Вт/год. Згідно з розробленою математичною моделлю процесу, на противагу дрібно розпиленним струменям води, найефективніше себе показала вода. В роботі [10] окремо визначали ефективність використання компресійної азотної піни для гасіння

літій-залізофосфатної батареї ємністю 280 Ам/год. Експериментальні результати засвідчили, що компресійна піна, подана під тиском 0,7 МПа, здатна ефективно загасити відкрите полум'я і водночас понизити температуру елемента на 11% відсотків від початкової. Відповідно автори дійшли висновку, що ефективність використання компресійної азотної піни для пониження температури ЛПЕЖ відносно невелика порівняно з іншими вогнегасними речовинами. З огляду на те, що основним способом гасіння ЛПЕЖ є пониження безпосередньої температури елемента, автори [13] провели експериментальні дослідження з визначення впливу вогнегасної речовини з пониженою температурою на перебіг безпосереднього горіння ЛПЕЖ. Експериментально встановлено, що чим нижча температура літій-іонної батареї, тим нижча швидкість протікання термохімічної реакції елемента, відповідно сповільнюється і її безпосереднє горіння. За температури ЛПЕЖ -20°C та безпосереднього контакту з високотемпературним джерелом не відбувається запалення елемента. Якщо температура ЛПЕЖ є нижчою -30°C , зупиняється безпосереднє горіння ЛПЕЖ.

Загалом для гасіння ЛПЕЖ можна використовувати всі відомі засоби пожежогасіння, зокрема вогнегасні порошки, вуглекислотні засоби та різноманітні водо- та гелеподібні розчини. Однак ефективність використання тих чи інших засобів, зокрема у варіанті гасіння повнорозмірної акумуляторної батареї, залишається невирішеним завданням.

Загальновідомим та повністю доведеним фактом причини горіння ЛПЕЖ та подальшої ланцюгової реакції їх горіння в акумуляторній батареї є протікання незворотної термохімічної реакції, виникнення якої можуть спричинити різноманітні фактори (див. рис. 1).



Рисунок 1 – Потенційна ланцюгова реакція в літій-іонному елементі живлення, зумовлена зовнішніми чинниками [14]

Однією з основних передумов протікання та появи незворотної термохімічної реакції є безпосереднє підвищення внутрішньої температури ЛІЕЖ до критичної позначки $80\text{--}150^{\circ}\text{C}$ залежно від типу та виду ЛІЕЖ.

Статистично підтверджено, що значна частина верифікованих випадків загоряння електромобілів відбувається під час заряджання або безпосередньо після заряджання електромобіля [15]. Логічно припустити, що в такому разі з'являються неправильні або надлишкові струми

внаслідок виходу з ладу відповідного обладнання тощо.

Попередні дослідження щодо виявлення впливу надлишкового струму на ЛІЕЖ формату 18650 показали, що незворотна термохімічна реакція в цьому виді ЛІЕЖ починається в межах $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$, і зростання температури триває близько 15–12 с, після чого відбувається інтенсивне горіння з виділенням полум'я та іскор за середньої температури 850°C (див. рис. 2) [16].

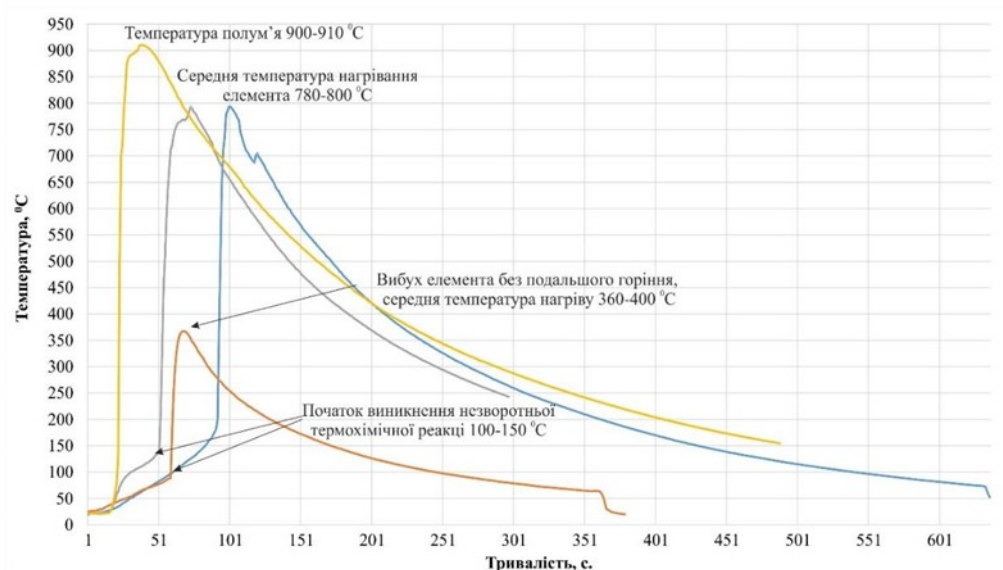


Рисунок 2 – Потенційна ланцюгова реакція в літій-іонному елементі живлення, зумовлена зовнішніми чинниками [14]

Враховуючи дослідження, наведені на рис. 2, виникає запитання, як запобігти та сповільнити відповідне зростання температурних показників, що своєю чергою допоможе запобігти або повністю припинить виникнення незворотної термохімічної реакції в ЛПЕЖ? Короткий проміжок часу, за якого відбувається зростання внутрішньої температури елемента, може стати тим вікном можливостей, за якого дія стороннього охолоджувального джерела сповільнить відповідне зростання і, таким чином, убезпечить від горіння акумуляторної батареї.

Окрім того, додаткове виявлення закономірностей нагрівання ЛПЕЖ та його теплофізичних показників дасть розуміння щодо розроблення загальної моделі нагріву повноцінної акумуляторної батареї та способів і параметрів її подальшого охолодження як до горіння, так і під час безпосереднього горіння.

Також можна розглянути результати наукових розвідок, наведених у роботах [17–18]. Відповідно в [17] вказано порядок проведення дослідження, а у [18] – безпосередні результати щодо визначення пожежної небезпеки модуля акумуляторної батареї «Tesla» із загальною кількістю елементів – 462 шт. Мета роботи полягала у визначенні теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційного клапана, займання, горіння), які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів. Для досягнення мети здійснено вплив відкритого полум'я від пропанового пальника на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля «Tesla» (model S). Однак згідно з результатами дослідження встановлено лише температурні показники безпосереднього займання ЛПЕЖ та батареї загалом. Також обґрунтовано, що екзотермічна реакція (горіння ЛПЕЖ) почала відбуватися за температури з обігрівного боку 613–645°C, всередині елемента 175–176°C та з необігрівного боку 95–96°C.

Проте отримані експериментальні результати не дають чіткого розуміння закону розподілу температури в повнорозмірній комірці акумуляторної батареї. Варто зауважити, що для

отримання математичного закону розподілу теплової енергії в комірці необхідно отримати безпосередні теплофізичні характеристики самого ЛПЕЖ (коефіцієнта теплопровідності, теплопередачі, щільності тощо), що не задекларовано в авторів роботи.

Формулювання цілей дослідження. Згідно з аналізом та останніми науковими досягненнями метою роботи є розроблення методики проведення експериментальних досліджень щодо визначення чинників припинення та попередження виникнення термохімічної реакції в ЛПЕЖ.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- здійснити теоретичне проектування та обґрунтування експериментального стенда щодо визначення теплофізичних параметрів ЛПЕЖ під час впливу сторонніх чинників, що можуть призвести до виникнення незворотної термохімічної реакції в елементі;
- визначити математичний апарат, що дасть змогу обґрунтувати, верифікувати результати експериментальних досліджень та отримати відповідні значення ЛПЕЖ (коефіцієнта теплопровідності, теплопередачі, щільності).

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети експериментальні дослідження необхідно розділити на три етапи:

1. Експериментальне визначення теплофізичних показників ЛПЕЖ.
2. Експериментальне визначення впливу вогнегасної речовини на сповільнення зростання внутрішніх температурних показників ЛПЕЖ.
3. Математичне моделювання процесу нагрівання та охолодження комірки акумуляторної батареї електромобіля.

Метою першого етапу дослідження є визначення температурних та часових показників внутрішньої обмотки ЛПЕЖ залежно від зовнішнього джерела впливу.

Таким чином, для досліджень необхідно підготувати взірць ЛПЕЖ, розряджений на 100%. Після цього слід в експериментальному підготовленому взірці розмістити термометр.

Фіксація температурних показників зміни температури здійснюватиметься

впродовж всього експерименту за допомогою термопар хромель-алюмель з можливістю фіксації температурних показників від -50 до 1200°C . Прийом показників від термопар та їх подальша обробка забезпечуватиметься

вторинним приладом, регулятором-вимірювачем ПВІ-111.

Лабораторний стенд для здійснення нагріву ЛЕЖ від зовнішнього джерела теплового випромінювання (полум'я) та подальшої фіксації температурних показників наведений на рисунку 3.

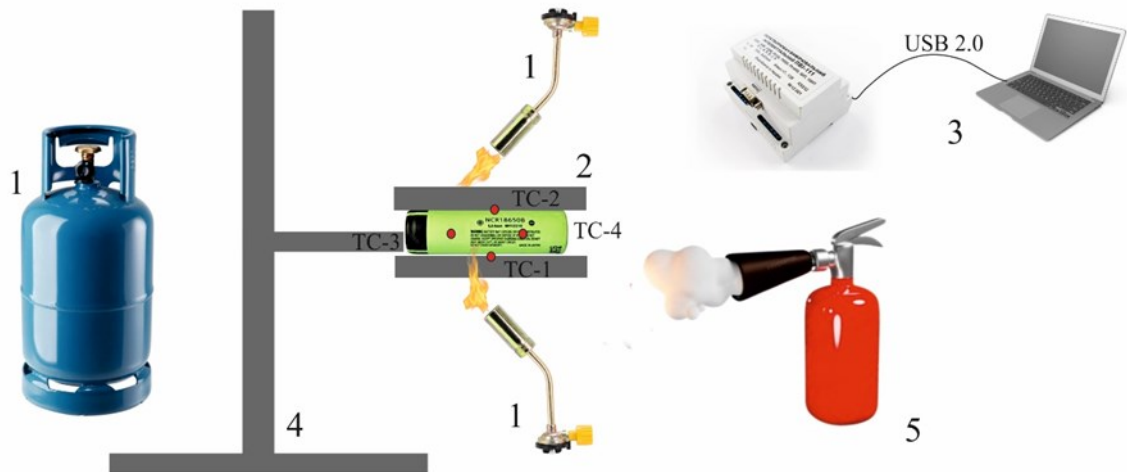


Рисунок 3 – Схема лабораторного стенда для здійснення нагріву циліндричної ЛЕЖ від зовнішнього джерела (полум'я) та подальшої фіксації температурних показників: 1 – пальники з газовим балоном; 2 – додатковий металевий корпус для розміщення ЛЕЖ; 3 – регулятор-вимірювач ПВІ-111 з можливістю підключення до персонального комп'ютера з термопарами (ТС-1, ТС-2, ТС-3, ТС-4); 4 – штатив для закріплення елемента, 5 – вуглекислотний вогнегасник

Джерелом відкритого горіння (полум'я) слугуватимуть два газових пальники, що живитимуться від газового балона. Термопари ТС-1 та ТС-2 розміщуватимуться безпосередньо всередині ЛЕЖ, а ТС-3 та ТС-4 на поверхні елемента. Сам ЛЕЖ за допомогою спеціальних кріплень фіксується на штативі. Заплановано здійснювати прогрів елемента до досягнення температурних показників усередині ЛЕЖ до температури $150-200^{\circ}\text{C}$. Після проведення нагрівання здійснено охолодження нагрітої батареї з використанням вуглекислотного вогнегасника протягом 10, 20, 30 с відповідно. Упродовж охолодження проведено подальшу фіксацію

температурних показників внутрішньої оболонки ЛЕЖ.

На другому етапі досліджень планується здійснити експериментальне моделювання зростання внутрішньої температури ЛЕЖ унаслідок подавання надлишкового постійного струму силою 17А. Безпосередньо під час проведення експерименту термопари закріплюватимуться з двох боків ЛЕЖ. В експериментальних дослідженнях розглянуто лише ЛЕЖ зі ступенем заряду 100% та напругою 4,2 В. Джерелом постійного струму слугуватиме трансформатор із можливістю регулювання сили струму, для фіксації вольт-амперних характеристик використовуватиметься амперметр (рис. 4).

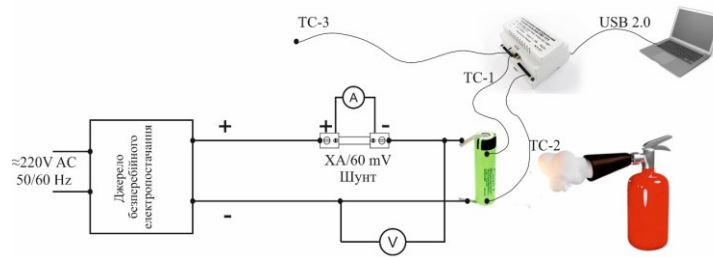


Рисунок 4 – Схема лабораторного стенда для проведення експериментального дослідження з визначення критичних показників ЛПЕЖ за умови впливу надлишкових струмів

Під час перебігу струму спостерігатиметься поступове зростання температурних показників відповідно за досягнення температури елемента 80°C вогнегасної речовини з вуглекислотного вогнегасника протягом 10 с з фіксацією надалі температурних показників. За умови подальшого зростання температури тривалість подавання вогнегасної речовини буде збільшено до 20 с. За задумом та попередніми експериментальними результатами [16] температура ЛПЕЖ має спадати, метою експерименту є безпосереднє визначення часового проміжку спадання температури до умовно безпечної та подальшої поведінки ЛПЕЖ.

Отриманні експериментальні результати мають стати підґрунтям для розроблення математичної моделі нагрівання ЛПЕЖ до критичних показників. Отримання такої моделі дасть можливість здійснити моделювання повнорозмірної комірки акумуляторної батареї, яка може містити до 400 ЛПЕЖ формату 18650.

Для отримання повного математичного опису процесу нагрівання внутрішньої оболонки ЛПЕЖ та подальшої математичної моделі буде знайдено розв'язок диференціального рівняння теплопровідності у циліндричній системі координат [19–20]:

$$c\rho \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), r \in [0, r_n], \tau > 0, \quad (1)$$

$$t(r, 0) = t_0 = 20^\circ C \quad (2)$$

Для знаходження розв'язку рівняння (1) необхідно додати початкову умову, зокрема температури навколишнього середовища перед початком експериментального випробування:

де: $t(r, \tau)$ – температура, °C; r – радіус, м.; τ – час, с; c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°C); ρ – щільність матеріалу, кг/м³; λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·°C); α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C).

Врахуємо, що теплообмін між середовищем і поверхнею корпусу ЛПЕЖ відбуватиметься за законом теплообміну Ньютона-Ріхмана.

Після виконання відповідних математичних розрахунків із урахуванням обробки експериментальних даних

отримаємо аналітичну формулу процесу нагрівання ЛПЕЖ. Отримання відповідної математичної моделі надалі допоможе сформулювати математичну модель прогріву повнорозмірної комірки акумуляторної батареї з оцінкою часових меж її охолодження у разі загоряння. Детальний порядок розв'язку зазначених рівнянь визначено в роботі.

Висновки та напрями подальших досліджень. Відповідно до поставленої мети та завдань дослідження можна сформулювати такі висновки:

- запропоновані експериментальні стенди забезпечать отримання відповідних температурних та часових показників нагріву та охолодження ЛПЕЖ як у разі

фіксації зовнішніх, так і внутрішніх температурних показників;
- результати експериментальних досліджень стануть підґрунтям для розроблення і визначення теплофізичних показників (коефіцієнта теплопровідності, теплопередачі, щільності) ЛПЕЖ, які

будуть враховані під час розроблення математичної моделі нагріву елемента; математична модель дасть змогу провести моделювання прогріву повнорозмірної комірки акумуляторної батареї електромобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2022 Режим доступу: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Factsheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>.
2. Faktaark 2024. Status på brande i el-og hybridbilerю Режим доступу: <https://www.brs.dk/globalassets/brs---beredskabsstyrelsen/dokumenter/forskning-statistik-og-analyse/2024/-faktaark-2024---status-pa-brande-i-el-og-hybridbiler.pdf-.pdf>.
3. Sammanställning av bränder i elfordon och eltransportmedel år 2018–2023 Режим доступу: <https://rib.msb.se/filer/pdf/29438.pdf>.
4. P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang (2020) A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technology*, 56 pp. 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
5. EV fire incident management - case study from Prague. Режим доступу: <https://www.evfiresafe.com/post/ev-fire-incident-management-case-study-from-prague>.
6. Electric car fire in an underground garage. Courtesy of Fire and Rescue Department of the Capital City of Prague. Computer translated from Czech language Nov 2023. Режим доступу: <https://www.montgomerycountymd.gov/frs-ql/Resources/Files/operations/SpecialOps/lithium-ion-battery-reference/electric-car-fire-underground-garage-incident.pdf>.
7. Wei-tao Luo, Shun-bing Zhu, Jun-hui Gong, Zheng Zhou (2018) Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. *Procedia Engineering* 211 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.045>.
8. Пархоменко В.П.О., Лазаренко О.В., Сукач Р.Ю. (2023). Аналіз обладнання для гасіння електромобілів та розробка рекомендацій з їх гасіння. *Пожежна безпека*, 42, 74-84. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.09>.
9. Davide Palma, Pierpaolo Gentile, Michele Mazzaro, Paola Russo (2023) Experimental Study on Different Extinguishing Agents for Fire of Lithium Ion Batteries for Electric Mobility. *Chemical Engineering Transactions*, V.104, 43-48 <https://doi.org/10.3303/CET23104008>.
10. Xiaobin Li, Xinzhe Li, Chenyao Li, Junli Wu, Boyu Liu (2024) Study on the fire extinguishing effect of compressed nitrogen foam on 280 Ah lithium iron phosphate battery. *Heliyon* 10 e31920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31920>.
11. Yuan, S.; Chang, C.; Yan, S.; Zhou, P.; Qian, X.; Yuan, M.; Liu, K. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *J. Energy Chem.* 2021, 62, 262–280. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.031>.
12. Wang, K.; Ouyang, D.; Qian, X.; Yuan, S.; Chang, C.; Zhang, J.; Liu, Y. Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review. *Energies* 2023, 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>.
13. Zhang, G.; Li, Z.; Wang, H.; Yuan, D. (2022) Study on the Suppression Effect of Cryogenic Cooling on Thermal Runaway of Ternary Lithium-Ion Batteries. *Fire* 5, 182. <https://doi.org/10.3390/fire5060182>.
14. Pius Victor Chombo, Yossapong Laonoul (2020) A review of safety strategies of a Li-ion battery *Journal of Power Sources* Volume 478, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>.
15. FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIFESAFE. 2024 Available online: <https://www.EVFireSafe.com>.
16. 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>.
17. Гаврилюк А., Яковчук Р. (2024). Методика експериментальних досліджень модулів силових батарей електромобілів на предмет пожежної небезпеки. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 29, 100-109. <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.11>.
18. Гаврилюк А. та Яковчук Р. (2024). Експериментальні дослідження модулів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*, 44, 5-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>.
19. O. Pazen, R. Tatsiy (2020) Mathematical modeling of the heat transfer process in the system of multilayer cylindrical solid bodies considering internal sources of heat. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety* № 1(9), pp. 66-75. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.66-75>.
20. Tatsiy R., Stasiuk M., Pazen O., Vovk S. (2019) Modeling of boundary-value problems of heat conduction for multilayered hollow cylinder. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 - Proceedings: pp. 21-25. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353>.

REFERENCES

1. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2022 Режим доступу: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Factsheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>.
2. Faktaark 2024. Status på brande i el-og hybridbilerю Режим доступу: <https://www.brs.dk/globalassets/brs---beredskabsstyrelsen/dokumenter/forskning-statistik-og-analyse/2024/-faktaark-2024---status-pa-brande-i-el-og-hybridbiler.pdf-.pdf>.
3. Sammanställning av bränder i elfordon och eltransportmedel år 2018–2023 Режим доступу: <https://rib.msb.se/filer/pdf/29438.pdf>.
4. P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang (2020) A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technology*, 56 pp. 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
5. EV fire incident management - case study from Prague. Режим доступу: <https://www.evfiresafe.com/post/ev-fire-incident-management-case-study-from-prague>.

6. Electric car fire in an underground garage. Courtesy of Fire and Rescue Department of the Capital City of Prague. Computer translated from Czech language Nov 2023. Режим доступу: <https://www.montgomerycountymd.gov/frs-ql/Resources/Files/operations/SpecialOps/lithium-ion-battery-reference/electric-car-fire-underground-garage-incident.pdf>.
7. Wei-tao Luo, Shun-bing Zhu, Jun-hui Gong, Zheng Zhou (2018) Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. *Procedia Engineering* 211 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.045>.
8. Parkhomenko, V.-P., Lazarenko, O., & Sukach, R. (2023). Analysis of equipment for extinguishing electric vehicles and development of recommendations for their extinguishing. *Fire Safety*, 42, 74–84. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.09>
9. Davide Palma, Pierpaolo Gentile, Michele Mazzaro, Paola Russo (2023) Experimental Study on Different Extinguishing Agents for Fire of Lithium Ion Batteries for Electric Mobility. *Chemical Engineering Transactions*, V.104, 43–48 <https://doi.org/10.3303/CET23104008>.
10. Xiaobin Li, Xinzhe Li, Chenyao Li, Junli Wu, Boyu Liu (2024) Study on the fire extinguishing effect of compressed nitrogen foam on 280 Ah lithium iron phosphate battery. *Heliyon* 10 e31920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31920>.
11. Yuan, S.; Chang, C.; Yan, S.; Zhou, P.; Qian, X.; Yuan, M.; Liu, K. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *J. Energy Chem.* 2021, 62, 262–280. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.031>.
12. Wang, K.; Ouyang, D.; Qian, X.; Yuan, S.; Chang, C.; Zhang, J.; Liu, Y. Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review. *Energies* 2023, 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>
13. Zhang, G.; Li, Z., Wang, H., Yuan, D. (2022) Study on the Suppression Effect of Cryogenic Cooling on Thermal Runaway of Ternary Lithium-Ion Batteries. *Fire* 5, 182. <https://doi.org/10.3390/fire5060182>.
14. Pius Victor Chombo, Yossapong Laonual (2020) A review of safety strategies of a Li-ion battery *Journal of Power Sources* Volume 478, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>.
15. FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIFESAFE. 2024 Available online: <https://www.EVFireSafe.com>.
16. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitat, 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>.
17. Gavryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2024). Experimental research of tesla Model S power battery cells for open flame fire hazard. *Bulletin of the Lviv State University of Life Safety*, 29, 100–109. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.11>
18. Gavryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2024). Experimental research of tesla Model S power battery cells for open flame fire hazard. *Fire Safety*, 44, 5–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>.
19. O. Pazen, R. Tatsiy (2020) Mathematical modeling of the heat transfer process in the system of multilayer cylindrical solid bodies considering internal sources of heat. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety № 1(9)*, pp. 66–75. <https://doi.org/10.33269/nvcs.2020.1.66-75>.
20. Tatsiy R., Stasiuk M., Pazen O., Vovk S. (2019) Modeling of boundary-value problems of heat conduction for multilayered hollow cylinder. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 - Proceedings: pp. 21–25. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353>.

PROCEDURE FOR CONDUCT OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DETERMINATION OF HEATING OF THE ELECTRIC CAR BATTERY MODULE

O. Lazarenko, O. Pazen

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

electric car, lithium-ion battery, temperature determination, mathematical model, experimental bench	Every year, manufacturers of electric vehicles try to improve the main indicators of their products, in particular by increasing the total capacity of the battery, providing fast charging, etc. At the same time, the number of cases of such electric vehicles catching fire, in particular electric cars, is gradually increasing, and the consequences of such fires force society to think and look for appropriate solutions to ensure the safety of citizens and storage places for electric vehicles. Just one fire in an electric car can cause significant damage, and the very algorithm of extinguishing such a fire requires the involvement of a significant amount of force and means and may last more than 12 hours until complete elimination. Following the conducted analysis and the latest scientific achievements, the purpose of the work is to develop a methodology for conducting experimental studies to determine the factors for terminating and preventing the occurrence of a thermochemical reaction in lithium-ion battery cells (LIB). To achieve the goal, experimental stands were proposed and theoretically substantiated for determining the parameters of LIB during the action of extraneous factors of influence, which can lead to an irreversible thermochemical reaction in the element. A mathematical apparatus is also defined, which will make it possible to substantiate and verify the results of experimental research. During the experimental studies, the internal temperature of LIB is planned to increase due to two factors, in particular, an external high-temperature source (flame) and excess direct current. When the specified temperature indicators are reached, the LIB will be cooled down using a carbon dioxide fire extinguisher. The obtained experimental values will be the basis for developing a mathematical model of heating a full-size battery cell of an electric vehicle.
--	--