

О. В. Лазаренко, В. І. Посполітак

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

СПОСОБИ ВИПРОБУВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЖИВЛЕННЯ НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Вступ. Безперечно, безумовно, літій-іонний елемент живлення (ЛІЕЖ) є основною складовою транспортних засобів на альтернативних джерелах живлення. Але неодноразові дослідження ЛІЕЖ показали їхню надзвичайну пожежну небезпеку. Наступні дослідження показали, що для того, щоб уникнути використання неякісних ЛІЕЖ, необхідно впроваджувати нормативно-правову базу яка б обумовлювала порядок та методику їх тестування на предмет пожежної небезпеки. На жаль в Україні відсутні подібні стандарти та загалом є прогалина в напрямку досліджень пожежної небезпеки ЛІЕЖ

Мета та задачі дослідження. Зважаючи на передовий досвід та актуальність питання проведення експериментальних та теоретичних досліджень з визначення пожежної небезпеки ЛІЕЖ, запропоновано провести низку експериментальних досліджень на ЛІЕЖ Panasonic NCR18650B, які широко застосовуються в автомобілях Tesla. Зокрема метою дослідження є провести низку експериментів, щоб визначити температурні показники, характер та тривалість горіння ЛІЕЖ внаслідок їх механічного пошкодження (стискання корпусу, пробиття гострим предметом) та дією надлишкових струмів (перезарядження). В роботі запропоновано та описано порядок проведення випробування, необхідне обладнання для проведення експериментів та схеми його розміщення.

Висновки. Представлення подібної методики випробування та результати проведених експериментів можуть стати базою для створення та впровадження на теренах України власної методики випробування та тестування ЛІЕЖ на предмет пожежної небезпеки. Проведення експериментальних досліджень на одиничних ЛІЕЖ дасть можливість здійснити планування та експериментальні дослідження подібного характеру на повноцінних акумуляторних батареях на основі ЛІЕЖ. Отримані числові дані та характеристики дадуть змогу зробити математичний опис процесу охолодження ЛІЕЖ, що може стати науковим підґрунтям для розробки та впровадження актуальних методів та засобів гасіння акумуляторних батарей на основі ЛІЕЖ.

Ключові слова: літій іонний елемент живлення, порядок випробування, пожежна небезпека, механічне пошкодження, перезарядження.

О. В. Lazarenko, V. I. Pospolítak

Lviv State University of Life Safety

METHODS OF TESTING LITHIUM-ION BATTERIES FOR FIRE HAZARD

Introduction. One way or another, lithium-ion battery (LIB) is a major component of vehicles on alternative power sources. Repeated LIB studies have shown their extreme fire hazard. At the same time, the following analysis of research has shown that to prevent the use of low-quality LIB it is necessary to introduce a legal framework that would determine the procedure and methods of their testing for fire hazards. Unfortunately, there are no such standards in Ukraine and in general, there is a gap in the direction of fire hazards research.

The purpose and objectives of the study. Following the best practices and relevance of the issue of experimental and theoretical studies to determine the fire hazard of LIB, it is proposed to conduct a series of experimental studies on LIB Panasonic NCR18650B, which are widely used in Tesla cars. In particular, the study aims is to conduct a series of experiments to determine the temperature, nature and duration of LIB combustion due to their mechanical damage (compression of the case, penetrating with a sharp object) and the action of excess currents (overcharging). The paper proposes and describes the procedure for conducting the test, the necessary equipment for conducting experiments and the scheme of its placement.

Conclusions. The presentation of such test methods and the results of experiments can be the basis for the creation and implementation in Ukraine of its method of testing as well as testing LIB for fire hazards. Carrying out experimental researches on a single LIB will give the chance to carry out further planning and experimental researches of a similar character on full-fledged rechargeable batteries based on LIB. The obtained numerical data and characteristics will allow making a mathematical description of the cooling process of LIB, which can become a scientific basis for the development and implementation of current methods and means of extinguishing batteries based on LIB.

Keywords: lithium-ion battery, test procedure, fire hazard, mechanical damage, overcharging.

Вступ. Живучи в епоху четвертої науково-технічної революції можна однозначно стверджувати, що технології випереджають сподівання. Яскравим підтвердженням цього є пришвидшення темпів переходу країн Європейського союзу на транспортні засоби на альтернативних джерелах енергії. Так, нещодавно з'явилася інформація, що Норвегія планує вже до кінця 2022 року [1-3], а не як планувалося в 2025 році, повністю заборонити продаж автомобілів на двигунах внутрішнього згорання та перейти на гібридні та автомобілі на альтернативних джерелах енергії.

Невпинне зростання попиту на автомобілі (транспортні засоби) на альтернативних джерелах енергії так чи інакше, технічно [4, 5] пов'язане з використанням літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ).

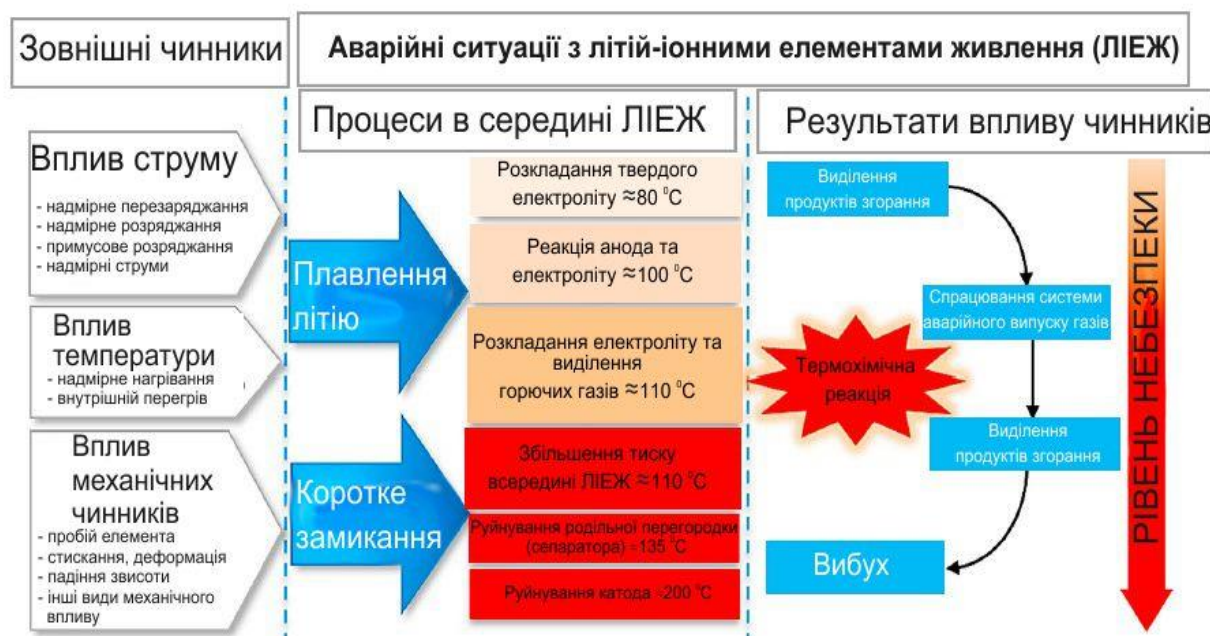
Постановка проблеми. Розуміючи сьогодишню тенденцію та перспективи розвитку цього напрямку наша держава повинна завчасно готувати науково-технічну та нормативну базу щодо способів та засобів визначення, оцінки та сертифікації ЛІЕЖ в контексті пожежної безпеки. На сьогодні в Україні банально відсутні будь-які нормативно-правові документи, які б регламентували чи описували способи оцінки пожежної безпеки ЛІЕЖ, що використовуються чи можуть використовуватися в електросамокатах, електроавтомобілях та приладах.

Більш того, питання пожежної безпеки ЛІЕЖ є малодослідженим. Зважаючи на стрімкий та постійне розширення та оновлення, конструкції та технічних показників ЛІЕЖ провідними виробниками світу [6], це питання повинно бути предметом постійного вивчення та вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень. Провівши аналіз закордонного досвіду та стану вивчення питання пожежної безпеки ЛІЕЖ можна сформулювати низку тверджень та висновків.

Так, однозначно можна стверджувати, що всі провідні країни світу, а саме: країни ЄС, США, Південна Корея, Індія та Китай мають низку нормативно-правових документів які регламентують порядок випробування ЛІЕЖ [7]. Зокрема, основними видами тестувань ЛІЕЖ для всіх країн є механічне пошкодження (проколювання, стискання, кидання з висоти тощо), електричне перевантаження (перезаряд, коротке замикання, розрядження тощо). Додатково деякі стандарти передбачають такі тести, як нагрівання ЛІЕЖ від стороннього джерела, вплив низьких температур, відкритий вогонь, занурення в воду тощо.

В роботі [8] проаналізовано вищезазначені способи тестування та запропоновано потенційні шляхи вирішення проблем пожежної безпеки ЛІЕЖ. Зокрема, на рис.1 автори показали потенційну ланцюгову реакцію, яка відбувається в ЛІЕЖ після його механічного пошкодження.



Рисуюнок 1 – Потенційна ланцюгова реакція в літій-іонному елементі живлення, викликана зовнішніми чинниками [8]

Однак, як зазначалося вище, заводиробники ЛІЕЖ здійснюють постійний пошук альтернативних компонентів (хімічного складу) ЛІЕЖ з метою збільшення їхньої ємності та

довговічності, досить часто не враховуючи або забуваючи таку важливу складову як пожежна безпека елемента.

Черговим доказом актуальності здійснення тестування та випробування ЛПЕЖ є низка публікацій [9-12, 15], метою яких є визначення показників пожежної безпеки ЛПЕЖ внаслідок порушення їхнього сталого функціонування, викликаного зовнішніми чинниками (механічне пошкодження, перезарядження електричним струмом тощо).

Додатковим обґрунтуванням здійснення та проведення експериментальних досліджень щодо пожежної безпеки ЛПЕЖ (внаслідок механічного пошкодження чи перезарядження) є постійна зростання та наповнення статистичних даних про випадки загорань електроавтомобілів [13] внаслідок ДТП, під час заряджання тощо.

Мета. Відповідно до викладеного вище, метою цього дослідження є розробка та планування експерименту щодо визначення пожежної безпеки ЛПЕЖ Panasonic NCR18650B (які широко застосовуються в автомобілях Tesla Model S) внаслідок порушення нормального режиму роботи, викликаного зовнішніми чинниками.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити експериментальні стенди для проведення дослідження з визначення пожежної безпеки ЛПЕЖ внаслідок порушення

нормального режиму роботи, викликаного зовнішніми чинниками.

2. Провести дослідження з визначення температурних показників та тривалості горіння ЛПЕЖ внаслідок їх механічного пошкодження: пробиття гострим предметом, стискання під пресом.

3. Провести дослідження з визначення температурних показників та тривалості горіння ЛПЕЖ внаслідок їх перезарядки постійним струмом.

4. Розробити математичну модель опису процесу охолодження літій-іонних елементів живлення залежно від способу (причин) їх загорання.

Реалізуючи першу задачу дослідження пропонується розглянути порядок, обладнання та конструкцію експериментальних стендів.

Для забезпечення визначення достовірності отриманих результатів дослідження та зменшення похибки вимірювання передбачається повторення кожного з етапів дослідження мінімум три рази.

Таким чином для кожного з етапів дослідження необхідна наявність, як мінімум, трьох ЛПЕЖ. В якості дослідного взірця обрано найбільш розповсюджений на сьогодні формат ЛПЕЖ – 18650 (рис.2) від автомобілів Tesla (Tesla model S, Model X 2015-2018 р.в.), заводські параметри [14] батарейки наведені в табл.1.

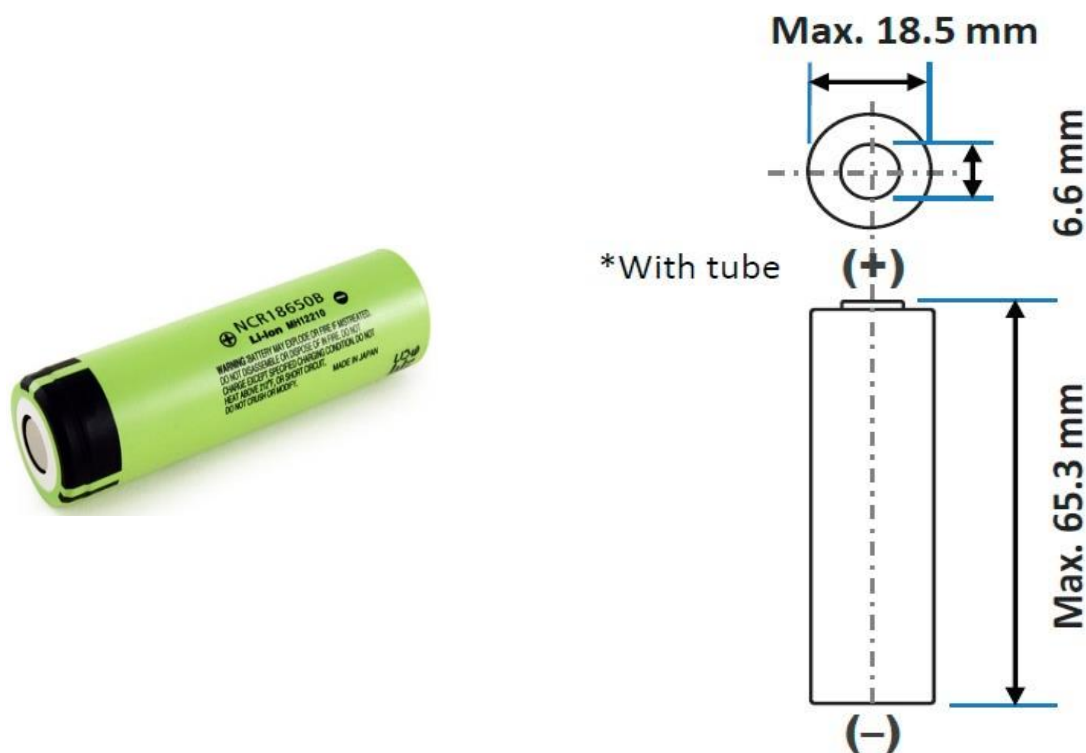


Рисунок 2 – Загальний вигляд літій-іонного елемента живлення Panasonic стандарту NCR18650B

Параметри літій-іонного елемента живлення Panasonic NCR18650B

Параметр	Значення
Діаметр	18 мм
Довжина	65 мм
Напруга (номінальна)	3.7 В
Напруга (максимальна)	4.2 В
Напруга (мінімальна)	3.3 В
Ємність (за температури +25 °С)	Мінімальна – 3250 mAh Стандартна – 3350 mAh
Вага	48.5 гр
Тип елемента живлення	Tesla Custom Panasonic 18650 (аналог NCR18650B)

Оскільки, відповідно до попередніх досліджень [15], вже неодноразово підтверджено, що найбільш пожежонебезпечними є елементи живлення, які мають ступінь заряду більший за 50%, для дослідження відбираємо елементи живлення з ступенем заряду 100% та напругою 4,2 вольт.

Рівень заряду батарейок досягатимемо використовуючи універсальний зарядний пристрій LiitoKala: Lii-PD4 (рис.3), який дає можливість здійснювати «розумну» зарядку ЛІЕЖ враховуючи його параметри, хімічний склад та специфікацію, по завершенні зарядки пристрій виводить на цифровий дисплей всі основні показники ЛІЕЖ (наявну напругу, ємність).



Рисунок 3 – Загальний вигляд універсального зарядного пристрою LiitoKala Lii-PD4 та мультиметра Digital 266FT

Щоб пересвідчитися в правильності отриманих значень напруги ЛІЕЖ, повторно будемо здійснювати контроль напруги з використанням цифрового мультиметра Digital 266FT (рис.3) похибка якого становить $\pm 0,8\%$ при вимірюванні постійного струму до 1000 В.

Для визначення температурних показників ЛІЕЖ використаємо термопари хромель – алюмель з можливістю фіксації температурних показників від -50 до 1200 °С. Прийом показників від термопар та їх подальша обробка буде забезпечуватися вторинним приладом–регулятором–вимірювачем ПВІ-111, який має можливість здійснювати одночасне зчитування та передачу інформації на персональний комп'ютер (ПК) з 8 термопар. Всі температурні показники будуть записуватися в

реальному часі на ПК та здійснювати побудову графічних залежностей, що в подальшому полегшить обробку результатів дослідження.

Лабораторний стенд для проведення механічного пошкодження (пробиття корпусу ЛІЕЖ).

Для проведення пробиття корпусу ЛІЕЖ планується його попереднє жорстке закріплення хомутами на твердій основі. Після чого на корпусі ЛІЕЖ закріплюються чотири термопари по всьому його діаметру. Додаткове на відстані в 5 мм від корпусу ЛІЕЖ закріплюються дві термопари для фіксації температури приповерхневого шару під час горіння. Схема розміщення термопар на ЛІЕЖ наведена на рис.4.

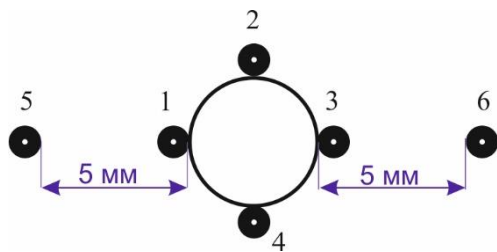


Рисунок 4 – Загальна схема розміщення термопар на літій-іонному елементі живлення

Пробій ЛПЕЖ планується металевим цвяхом довжиною 100 мм та діаметром 3 мм. Здійснення пробою планується в центральну його частину [11] оскільки попередні дослідженнями встановлено, що пробій ЛПЕЖ в центральній частині спричиняє найбільш інтенсивне горіння.



Рисунок 5 – Загальний вигляд гідравлічного преса та манометра для механічного стискання ЛПЕЖ

Фіксація температурних показників планується впродовж всього експерименту завдяки закріпленню термопарам. Планується здійснювати поступове стискання корпусу ЛПЕЖ від 0,1 КПа до моменту виникнення явного горіння. Похибка вимірювання тиску на корпус ЛПЕЖ не повинна перевищувати 1%.

Лабораторний стенд для проведення дослідження з перезарядження ЛПЕЖ надлишковим струмом.

Як заключний етап пропонується здійснити визначення температурних показників, характеру,

цікавим залишається також той факт, що глибина пробою елемента не набуто впливає на подальший перебіг термохімічної реакції та інтенсивність горіння.

По завершенні випробувань планується здійснити також фіксацію кінцевої ваги кожного елемента та здійснити її порівняння з початковою вагою елемента, що дасть можливість визначити кінцеву втрату маси ЛПЕЖ.

Лабораторний стенд для проведення механічного пошкодження (механічне стискання корпусу ЛПЕЖ).

Для механічного стискання корпусу ЛПЕЖ планується використання гідравлічного преса з манометром на 4 кПа (рис.5), який повинен забезпечити максимально критичне та плавне навантаження на досліджуваний зразок.

тривалості горіння ЛПЕЖ внаслідок її загорання від хибних параметрів вхідного струму на елемент живлення. Для досягнення цієї мети пропонується здійснювати подачу постійного електричного струму сталої величини від стороннього джерела (електротрансформатора) до появи наявних ознак горіння батарейки (дим, іскри, відкрите полум'я), після чого подачу струму припинити.

Для контролю та фіксації параметрів змінного струму, що подаватиметься на батарейку, будуть встановлені цифровий вольтметр та аналоговий амперметр (рис.6).



Рисунок 6 – Загальний вигляд амперметра та вольтметра для проведення досліджень

Детальна схема підключення та розміщення обладнання наведена на рис.7.

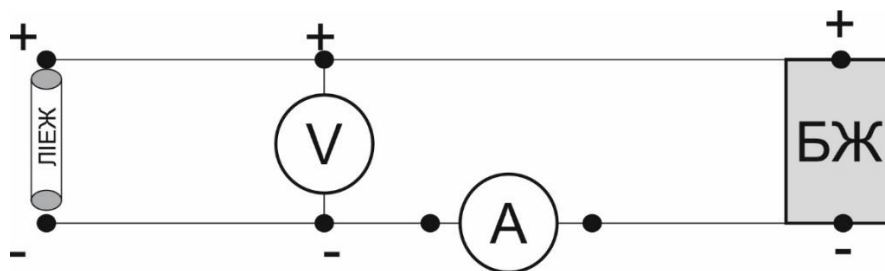


Рисунок 7 – Електрична схема підключення елементів живлення та контролю показників

Впродовж проведення експерименту планується здійснювати зміну сили струму з кроком 10 А та фіксацією часу протягом якого відбудеться займання ЛЕЖ.

Висновок. Представлення подібної методики випробування та результати проведення експериментів можуть стати базою для створення та впровадження на теренах України власної методики випробування та тестування ЛЕЖ на предмет пожежної безпеки.

Запропонована методика та порядок проведення дослідження щодо визначення пожежної безпеки ЛЕЖ та його другорядних параметрів під час горіння дасть змогу доповнити набуті знання щодо пожежної безпеки ЛЕЖ, а саме Panasonic NCR18650B.

Проведення експериментальних досліджень на одиничних ЛЕЖ дасть можливість спланувати та провести експериментальні дослідження подібного характеру на повноцінних акумуляторних батареях на основі ЛЕЖ

Отримані числові дані та характеристики дадуть змогу математично описати процес охолодження ЛЕЖ, що може стати науковим підґрунтям для розробки та впровадження актуальних методів і засобів гасіння акумуляторних батарей на основі ЛЕЖ.

Список літератури:

1. Electric road vehicles in the European Union Trends, impacts and policies. Режим доступу: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI\(2019\)637895_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI(2019)637895_EN.pdf).
2. This country may sell the last non-electric car in April: earlier than target for 2025. Режим доступу: <https://netherlandsnewslive.com/this-country-may-sell-the-last-non-electric-car-in-april-earlier-than-target-for-2025-car/246362/>.
3. Update on government targets for phasing out new sales of internal combustion engine passenger cars. International council on clean transportation, 2021. Режим доступу:

https://theicct.org/sites/default/files/publications/update-govt-targets-ice-phaseouts-jun2021_0.pdf.

4. Lazarenko O., Loik V., Shtain B., Riegert D. Research on the Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries. *Bezpieczeństwo i technika pożarnicza*, 2018. Vol. 52. Issue 44. P.58-67. <https://dx.doi.org/10.12845/bitp.52.4.2018.7>.

5. Лазаренко О.В., Пархоменко В.-П.О, Сукач Р.Ю., Кусковець А.С., Білоножко Б. В. Конструктивні особливості та безпека автомобілів на водневому паливі. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*. Львів: ЛДУ БЖД, 2020. №37. С. 52-57. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08>.

6. Yu Miao, Patrick Hynan, Annette von Jouanne, Alexandre Yokochi *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements*, Energies vol. 12 (2019), 1074; <https://doi.org/doi:10.3390/en12061074>.

7. V. Ruiza, A. Pfranga, A. Kristona, N. Omarb, P. Van den Bosscheb, L. Boon-Bretta A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) pp. 1427–1452. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.195>.

8. Pius Victor Chombo, Yossapong Laoonual (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>.

9. Joshua Lamb, Christopher J. Orendorff *Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries*. *Journal of Power Sources* 247 (2014) 189-196 p. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.066>.

10. Huang, Zonghou; Li, Huang; Mei, Wenxin; Zhao, Chunpeng; Sun, Jinhua; Wang, Qingsong (2020) Thermal runaway behavior of lithium iron phosphate battery during penetration. *Fire Technology* volume 56:2405–2426. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00967-1>.

11. Binbin Mao, Haodong Chen, Zhixian Cui, Tangqin Wu, Qingsong Wang (2018) Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration. *International Journal of Heat and Mass Transfer* V. 122: 1103-1115

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.036>.

12. Y. Fernandes, A. Bry, S. de Persis (2018) Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery. *Journal of Power Sources* Volume 389, 15: 106-119 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.034>.

13. Лазаренко О.В. *Аналіз причин загорання електроавтомобілів* : Матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – 2021. С. 33 – 35.

14. Panasonic NCR-18650B Lithium-ion/NNP + HRL technology. Режим доступу: https://www.imrbatteries.com/content/panasonic_ncr18650b-2.pdf.

15. A. Perea, A. Paoletta (2018) State of charge influence on thermal reactions and abuse tests in commercial lithium-ion cells *Journal of Power Sources* 399:392-397 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.112>.

References:

1. Electric road vehicles in the European Union Trends, impacts and policies. Access mode: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI\(2019\)637895_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI(2019)637895_EN.pdf).

2. This country may sell the last non-electric car in April: earlier than target for 2025. Access mode: <https://netherlandsnewslive.com/this-country-may-sell-the-last-non-electric-car-in-april-earlier-than-target-for-2025-car/246362/>.

3. Update on government targets for phasing out new sales of internal combustion engine passenger cars. (2021) International council on clean transportation, Access mode: https://theicct.org/sites/default/files/publications/update-govt-targets-ice-phaseouts-jun2021_0.pdf.

4. Lazarenko O., Loik V., Shtain B., Riegert D. (2018) Research on the Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries. *Bezpieczeństwo i technika pożarnicza*, Vol. 52. Issue 44. P.58-67. <https://dx.doi.org/10.12845/bitp.52.4.2018.7>.

5. Lazarenko O.V., Parkhomenko V.-P.O., Sukach R.Yu., Bilonozhko B.V., Kuskovets A.S. (2020) Konstruktyvni osoblyvosti ta nebezpeka avtomobiliv na vodnevomu palyvi [Design features and hazards of hydrogen fuel cell cars] *Fire safety*. Vol. 37, pp 52-57. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08>

6. Yu Miao, Patrick Hynan, Annette von Jouanne, Alexandre Yokochi *Current Li-Ion Battery*

Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements, *Energies* vol. 12 (2019), 1074; <https://doi.org/doi:10.3390/en12061074>.

7. V. Ruiza, A. Pfranga, A. Kristona, N. Omarb, P. Van den Bosscheb, L. Boon-Bretta A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) pp. 1427–1452. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.195>.

8. Pius Victor Chombo, Yossapong Laoonual (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>.

9. Joshua Lamb, Christopher J. Orendorff *Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries*. *Journal of Power Sources* 247 (2014) 189-196 p. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.066>.

10. Huang, Zonghou; Li, Huang; Mei, Wenxin; Zhao, Chunpeng; Sun, Jinhua; Wang, Qingsong (2020) Thermal runaway behavior of lithium iron phosphate battery during penetration. *Fire Technology* volume 56:2405–2426. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00967-1>.

11. Binbin Mao, Haodong Chen, Zhixian Cui, Tangqin Wu, Qingsong Wang (2018) Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration. *International Journal of Heat and Mass Transfer* V. 122: 1103-1115 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.036>.

12. Y. Fernandes, A. Bry, S. de Persis (2018) Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery. *Journal of Power Sources* Volume 389, 15: 106-119 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.034>.

13. Lazarenko O.V. (2021) Analysis of the causes of fire in electric cars // *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «Theory and Practice of Fire Fighting and Emergency Management»*, pp. 33 – 35.

14. Panasonic NCR-18650B Lithium-ion/NNP + HRL technology. Режим доступу: https://www.imrbatteries.com/content/panasonic_ncr18650b-2.pdf.

15. A. Perea, A. Paoletta (2018) State of charge influence on thermal reactions and abuse tests in commercial lithium-ion cells *Journal of Power Sources* 399:392-397 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.112>.

* **Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 05.10.2021 р.