

А.Ф. Гаврилюк, В.В. Ковалишин, Р.С. Яковчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕНОСНИХ ВОГНЕГАСНИКІВ ПРИ ГАСІННІ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Обґрунтовано тенденції використання акумулювальних систем електроенергії, а також небезпеки, які вони створюють. На підставі отриманих експериментальних даних виявлено вплив різних вогнегасних речовин переносних вогнегасників на ефективність гасіння літій-іонних акумуляторів. Запропоновано рекомендації щодо вибору норм належності та застосування переносних вогнегасників з метою ефективного гасіння літій-іонних акумуляторів.

**Ключові слова:** літій-іонна батарея, пожежа, незворотній електротепловий процес, пожежна безпека.

### Постановка проблеми

Під час зухвалого та неспровокованого повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України чималих руйнувань зазнала енергетична система. У зв'язку з браком потужності електроенергії почались запроваджуватись почергові відключення електроенергії (блекаути), які тривають від 2–4 год і більше по кілька разів на добу. Така ситуація окреслила тенденції пошуку альтернативних джерел енергії не лише на виробництвах, але й у домівках українців. Найбільшого поширення набуло використання генераторів, які обладнані двигунами внутрішнього згоряння, а також акумулювальних систем електроенергії. Останні зазвичай складаються з акумуляторної батареї (або декількох, далі – АКБ), інвертора, з'єднувальних провідників, запобіжної автоматики, а також за необхідності сонячних панелей. У таких системах переважно використовують літій-іонні АКБ через низку технічних переваг: велику питому енергетичну ємність, високі струми розряду-заряду, а також немалу кількість циклів заряду-розряду, тобто довговічність роботи [1, 2]. Нерідко використовуються для таких систем літій-іонні акумуляторні модулі з силових акумуляторів електромобілів. Хімічні та електрохімічні реакції, які відбуваються під час циклів заряду-розряду літій-іонних акумуляторів, здатні призвести до необоротних електротеплових процесів. Такі процеси спричиняють неконтрольоване збільшення температури, викид небезпечних газів, займання, вибухи, що часто супроводжується пожежею [3, 4]. Наочним прикладом є пожежа у квартирі багатоквартирного будинку у м. Київ, яка супроводжувалася не лише горінням, але й і вибухом, який спричинив руйнування панорамних віконних прорізів.

На рис. 1 зображено зовнішній вигляд фасаду будинку після вибуху та горіння літій-іонного АКБ

в одній із квартир.



Рис. 1. Зовнішній вигляд пожежі квартири в м. Київ унаслідок вибуху літій-іонного АКБ

Тож використання акумулювальних систем електроенергії через можливість займання АКБ підвищує пожежну небезпеку об'єкта чи приміщення, де така система влаштована.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних наукових досліджень та публікацій показує, що світова наукова спільнота приділяє чимало уваги безпековим питанням літій-іонних АКБ, зокрема і їх пожежній безпеці, способам та методам їх гасіння. Пожежі літій-іонних АКБ є гібридними, тобто включають горіння твердих речовин (клас пожежі А), горіння рідин (клас пожежі В), горіння газів (клас пожежі С) та горіння металів (клас пожежі D).

Власне правильний вибір вогнегасної речовини, яка здійснює найкращий вогнегасний ефект при гасінні пожеж літій-іонних АКБ, створює передумови для підвищення пожежної безпеки об'єктів, де влаштовано системи акумулювання електроенергії.

У роботі [5] вказано, що зазвичай в акумулювальних станціях електроенергії використовують газові системи пожежогасіння, а як вогнегасну

речовину застосовують азот та вуглекислоту.

Ефективність використання вуглекислоти для гасіння пожеж літій-іонних АКБ окреслено також у науковій праці [6].

Автори роботи [7] розробили на основі калій-алюмінієвого карбонату вогнегасний порошок з покращеною температурною стійкістю для гасіння літій-іонних АКБ.

У статті [8] досліджено позитивний вплив фторовмісних вогнегасних речовин на вогнегасний ефект при гасінні літій-іонних АКБ. Крім того, низка досліджень показали, що матеріали, які містять фтор, можуть блокувати ланцюгову реакцію під час згоряння літій-іонних АКБ, не руйнуючи електрообладнання [9, 10].

Ефективність гасіння літій-іонних АКБ рідкими вогнегасними речовинами, до основного складу яких входить вода, описано у наукових працях [11, 12].

У роботі [13] проведено дослідження синергічного впливу вуглекислоти та розпиленої води на гасіння та охолодження літій-іонних АКБ.

Низка досліджень показала, що використання вогнегасних порошків є практично неефективним при гасінні літій-іонних батарей [14, 15].

Ефективність гасіння водою описано у статті [16], однак автори зазначають, що компактні струмені можуть призвести до вторинних небезпек.

Тому у наукових працях [17–19] обґрунтовано ефективність використання власне дрібнорозпиленої води, яка швидко випаровується і, як наслідок, поглинає велику кількість тепла, охолоджуючи літій-іонні батареї, що горять.

### Мета статті

Мета роботи полягає в експериментальному дослідженні впливу різних вогнегасних речовин найпоширеніших переносних вогнегасників в Україні на ефективність гасіння літій-іонних АКБ.

Кінцева мета дослідження полягає у розробленні рекомендацій щодо вибору норм належності та застосування переносних вогнегасників для ефективного гасіння літій-іонних АКБ, що стане підґрунтям для підвищення пожежної безпеки приміщень, де розміщені системи акумуляування електроенергії.

Для цього необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), яке необхідне для проведення експериментального дослідження;
- описати порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці;
- розробити методичні рекомендації щодо вибору норм належності та застосування переносних вогнегасників з метою ефективного гасіння літій-іонних АКБ.

У роботі для досягнення задекларованої мети

використано експериментальний метод дослідження, а також синтез, аналіз, систематизація та узагальнення.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень були відібрані та підготовлені модулі з силової АКБ електромобіля Tesla Model S ємністю 75 кВт·год. Зовнішній вигляд одного із дослідних зрізів наведено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд модуля силової АКБ електромобіля Tesla Model S: а) вигляд згори; б) вигляд збоку

Модуль містить 462 елементи формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та висотою 65 мм). Анод виготовлений з графіту, а катод – з  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  (NCA). Сумарна енергетична ємність елементів модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга – 27 В. Довжина модуля становить 6550 мм, ширина – 2750 мм та висота – 120 мм. Діагностування стану заряду батареї здійснювалось з використанням цифрового мультиметра. Усі досліджувані зрізи мали заряд 55–60 % від максимального. Модулі були у справному стані та візуально без пошкоджень. Напруга модулів напередодні випробувань була в межах 23,5–24,2 В. Для створення необоротного електротеплового процесу в модулі використовувався газовий пальник потужністю 1 кВт. Теплова потужність пальника створювалась завдяки горінню пропану, який подавався з балона об'ємом 80 л.

Для вимірювання розподілу температури по модулю під час нагрівання, а також пікових значень температури використовувалась телевізійна камера Leader T1C 3 з діапазоном вимірювання температур від  $-40$  °C до  $1150$  °C. З метою фіксації розвитку полум'яного горіння здійснювалась відеозйомка з використанням відеокамери з роздільною здатністю 12 Мп. Час фіксувався за допомогою цифрового секундоміра з точністю вимірювань 0,01 с.

Також були підготовлені переносні вогнегасники ВП-5(з), ВВК-5(з), ВПП-5(з), ВВ-5(з) з вогнегасними речовинами: вогнегасний порошок загального призначення, вуглекислота, повітряно-механічна піна низької кратності та дрібнорозпилена вода з сольовими добавками, відповідно.

Загальний вигляд розміщення модуля та ЗВТ перед проведенням дослідження зображено на рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд розміщення модуля та ЗВТ перед проведенням дослідження

Згідно із методикою проведення досліджень, після пересвідчення, що всі ЗВТ влаштовані і працюють правильно, переносні вогнегасники підготовлені, вмикалась відеокамера, відкривався вентиль подачі газу на пальник, та відбувалось його підпалення з використання підготовленого факела. У момент підпалення пальника вмикався секундомір.

При досягненні температури 225–230 °С спрацював вентиляційний отвір одного з елементів модуля, та відбулось його займання. Такий процес поширювався на інші елементи, маючи стохастичний характер. Після спрацювання вентиляційних отворів 20–25 елементів (що становить близько 5 % від загальної кількості елементів) подача газу у пальник припинилася шляхом перекривання вентиля на балоні з пропаном. Зовнішній вигляд горіння елементів у модулі, а також їх самостійне горіння без участі газового пальника наведено на рис. 4.

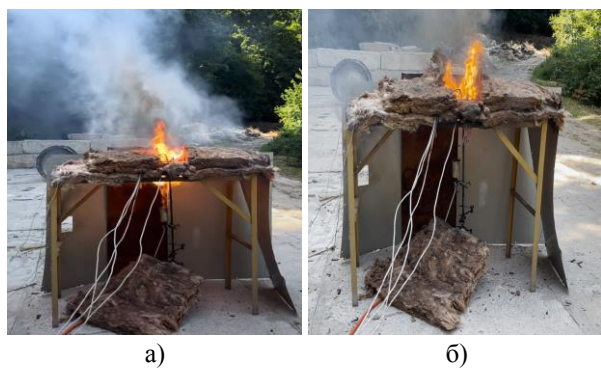


Рис. 4. Зовнішній вигляд горіння модуля: а) за участі полум'я пальника; б) без участі полум'я пальника

Згідно із методикою проведення експериментального дослідження, гасіння модуля відбувається після спрацювання сумарно 40–50 елементів, що дорівнює близько 10 % від загальної кількості елементів модуля. На момент гасіння орієнтовна площа основи полум'я по модулю становила 0,02–0,025 м<sup>2</sup> (із врахуванням горіння інших полімерних матеріалів

модуля), а температура горіння – понад 600 °С (рис. 5).

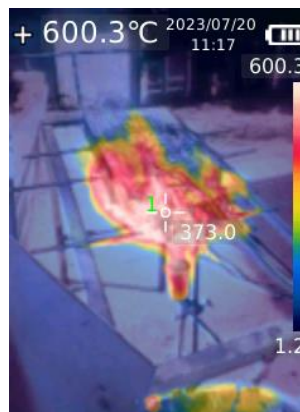


Рис. 5. Термографічне зображення модуля перед гасінням

Першим для гасіння застосовувався порошковий вогнегасник ВП-5(з) із зарядом вогнегасного порошку загального призначення 5 кг. Під час гасіння вдалось збити полум'я. Однак через 18–20 с полум'яне горіння самостійно відновилося. Після цього був відведений час на самостійне розгорання модуля орієнтовно до площі початкового гасіння, а саме 0,02–0,025 м<sup>2</sup>. Час, за який була досягнута початкова площа горіння після застосування ВП-5(з), становив 245 с. Потім був застосований вуглекислотний вогнегасник ВВК-5 з масою вуглекислоти 5 кг. Слід зазначити, що цей тип вогнегасника менш ефективно збивав полум'я, як порівняти з ВП-5(з), і повторне полум'яне горіння відбулось вже через 3–4 с після припинення подачі вуглекислоти. Така закономірність свідчить про гіршу вогнегасну здатність ВВК-5, ніж ВП-5(з). За аналогією був застосований переносний вогнегасник ВВП-5(з). Після використання цього типу вогнегасника повторне займання не спостерігалось впродовж 1 год, а температура модуля зменшилась до 70–78 °С, що є прийнятною і унеможливує повторний розвиток електротеплового процесу [20, 21].

З метою дослідження ефективності гасіння ВВ-5(з) із сольовими добавками було використано інший літій-іонний модуль та дотримано аналогічних умов, описаних вище. Водяний вогнегасник, який подавав розпилену воду із сольовими добавками, найкраще візуально здійснював гасіння літій-іонного модуля, як порівняти з попередніми типами переносних вогнегасників. Після використання вогнегасника ВВ-5(з) повторного займання полум'я впродовж 1 год не спостерігалось, а температура модуля зменшилась до 62–68 °С.

Переносні водопінні та водяні вогнегасники із зарядом вогнегасних речовин 4 кг (ВВП-4(з), ВВ-4(з)) за умов проведення експерименту не впорались із гасінням. Застосування різних типів переносних



вогнегасників під час гасіння літій-іонного модуля представлено на рис. 6. Аналізуючи вогнегасну ефективність вогнегасних засобів, які були досліджені, можна дійти висновку, що основним ефектом, який призводить до гасіння літій-іонних батарей, є ефек-

тивне охолодження, притаманне водяному і водопінному вогнегаснику, у поєднанні з ефектом інгібування (що досягається додаванням розчину солі) та ізолювальним ефектом (у водопінному вогнегаснику).



Рис. 6. Використання різних типів переносних вогнегасників під час гасіння літій-іонного модуля:  
а) ВП-5(з); б) ВВК-5; в) ВВП-5(з); г) ВВ-5(з)

Отже, застосування переносних вогнегасників з вогнегасним порошком загального призначення та вуглекислою є неефективним при гасінні літій-іонних батарей. Причому при застосуванні вуглекислотного вогнегасника полум'яне горіння відновлюється вже через 3–4 с після припинення подачі вогнегасної речовини. Натомість використання водопінного та водяного вогнегасника з сольовими добавками ефективно здійснює гасіння.

Зважаючи на енергетичну ємність літій-іонного модуля, що досліджувався, а також масу вогнегасних речовин, можна стверджувати, що необхідною умовою для забезпечення пожежної безпеки об'єкта чи приміщення, де влаштовані акумулювальні системи електроенергії, є розміщення переносного вогнегасника ВВП або ВВ із сольовими добавками з розрахунком не менше 5 кг вогнегасної речовини на 5 кВт·год енергетичної ємності батареї. Причому вогнегасник має розміщуватись поблизу акумулювальної системи електроенергії із врахуванням вимог чинного законодавства. Під час гасіння літій-іонної батареї вогнегасник слід використовувати з відстані не менше ніж 1,5 м та спрямовувати струмінь в осередок горіння.

### Висновки і перспективи подальших досліджень

За результатами натурного експерименту проведено польове дослідження гасіння літій-іонного модуля енергетичною ємністю 5,7 кВт·год переносними вогнегасниками з різними вогнегасними речовинами. На підставі експерименту встановлено, що гасіння літій-іонного модуля з використанням переносного вогнегасника ВВК-3,5 є найменш ефективним серед всіх досліджуваних вогнегасників, відновлення полум'яного горіння відбувається вже через 3–4 с

після припинення подачі вуглекислоти в осередок горіння. Під час застосування переносного вогнегасника ВП-5(з) полум'яне горіння досліджуваного модуля відновлювалось через 18–20 с. Бажаний ефект гасіння досягнутий завдяки застосуванню повітряно-механічної піни низької кратності з вогнегасника ВВП-5, а також розпиленої води з сольовими добавками з вогнегасника ВВ-5(з). На підставі отриманих результатів досліджень запропоновано рекомендації щодо вибору норм належності та застосування переносних вогнегасників з метою ефективного гасіння літій-іонних АКБ з розрахунку не менше 5 кг заряду робочого розчину або води з сольовими добавками на 5 кВт·год енергетичної ємності літій-іонної АКБ.

Подальші дослідження будуть направлені на виявлення закономірностей впливу інтенсивності подачі вогнегасних речовин (повітряно-механічної піни низької кратності та розпиленої води з сольовими добавками) на ефективність гасіння літій-іонних АКБ.

### Література

1. Wang, H., Du, Z., Rui, X., Wang, S., Jin, C., He, L., & Feng, X. (2020). A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (NixCoyMnz) O2 battery with different nickel contents at cell and module level. *Journal of hazardous materials*, 393, 122361.
2. Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O'kane, S., Liu, X., Chen, J., & Wu, B. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1, 100011.
3. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., Ruduk, Y. (2023). Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):2023, doi:10.4271/09-11-03-0013
4. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р.С., Лемішко М.В. (2023). Експериментальні дослідження елементів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*, 43, 50-62. DOI:10.32447/20786662.43.2023.07.

5. Wang, S., Gong, X., Shao, R., Xu, L., Li, Y., He, F., Feng, X. (2024). *Suppression Effects of Different Extinguishing Agents on Vent Gases Fires from Lithium-ion Batteries after Thermal Runaway: A comprehensive experimental and numerical study*. *Fire Safety Journal*, 104227.

6. Bolshova, T. A., Shvartsberg, V. M., & Shmakov, A. G. (2021). *Synergism of trimethylphosphate and carbon dioxide in extinguishing premixed flames*. *Fire Safety Journal*, 125, 103406.

7. Zhang, Y., Wang, Z., Liu, J., Li, Q., Pan, R., & Zhou, X. (2023). *Alkaline potassium aluminum carbonate: A novel high-efficiency dry powder extinguishing agent with high heat-resistant*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 173, 106038.

8. Zhang, L., Li, Y., Duan, Q., Chen, M., Xu, J., Zhao, C., Wang, Q. (2020). *Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires*. *Journal of energy storage*, 32, 101801.

9. Jiang, L., Wang, Q., Li, K., Ping, P., Jiang, L., & Sun, J. (2018). *A self-cooling and flame-retardant electrolyte for safer lithium ion batteries*. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(6), 1323-1331.

10. Zhou, X., Lu, D., Chao, M., & Chen, W. (2014). *Experimental and theoretical studies on the thermal decomposition of 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4-heptafluorocyclopentane*. *Journal of Fluorine Chemistry*, 164, 70-77.

11. Hu, J., Tang, X., Zhu, X., Liu, T., & Wang, X. (2024). *Suppression of thermal runaway induced by thermal abuse in large-capacity lithium-ion batteries with water mist*. *Energy*, 286, 129669.

12. Liu, T., Liu, Y., Wang, X., Kong, X., & Li, G. (2019). *Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist*. *Energy Conversion and Management*, 199, 111969.

13. Ping, P., Gao, X., Kong, D., Gao, W., Feng, Z., Yang, C., Dai, X. (2024). *Experimental study on the synergistic strategy of liquid nitrogen and water mist for fire extinguishing and cooling of lithium-ion batteries*. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 713-725.

14. Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2024). *A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire*. *Fire Technology*, 60(2), 817-858.

15. Meng, X., Yang, K., Zhang, M., Gao, F., Liu, Y., Duan, Q., & Wang, Q. (2020). *Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate battery*. *Journal of Energy Storage*, 30, 101532.

16. Zhang, Y., Wang, H., Wang, Y., Li, C., Liu, Y., & Ouyang, M. (2021). *Thermal abusive experimental research on the large-format lithium-ion battery using a buried dual-sensor*. *Journal of Energy Storage*, 33, 102156.

17. Xu, J., Zhang, L., Liu, Y., Duan, Q., Jin, K., & Wang, Q. (2022). *Electrochemical performance and thermal stability of 18650 lithium-ion battery with water mist after high-temperature impact*. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 589-599.

18. Liu, T., Tao, C., & Wang, X. (2020). *Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules*. *Applied energy*, 267, 115087.

19. Liu, T., Liu, Y., Wang, X., Kong, X., & Li, G. (2019). *Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist*. *Energy Conversion and Management*, 199, 111969.

20. Гаврилюк А. Ф. & Кушнір А.П. (2022). *Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї*. *Пожежна безпека*, 40, 31-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>

21. Choi, S., Roh, Y., Kim, U., & Lee, Y. M. (2023). *Thermally*

*Conductive Nitride-Based Ceramic-Coated-Separator for Lithium-Ion Batteries*. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts 243* (No. 55, pp. 2675-2675). *The Electrochemical Society, Inc.*

## References

1. Wang, H., Du, Z., Rui, X., Wang, S., Jin, C., He, L., & Feng, X. (2020). *A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (NixCoyMnz) O2 battery with different nickel contents at cell and module level*. *Journal of hazardous materials*, 393, 122361.
2. Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O'kane, S., Liu, X., Chen, J., & Wu, B. (2019). *Lithium-ion battery fast charging: A review*. *ETransportation*, 1, 100011.
3. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., Ruduk, Y. (2023). *Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building*. *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):2023, doi: 10.4271/09-11-03-0013
4. Gavryliuk A. F., Yakovchuk R.S., Lemishko M.V. (2023). *Eksperymentalni doslidzhenia elementiv sylovoi bata-rei tesla models na predmet pozhеzhnoi nebezpeky*. *Po-zhezhna bezpeka*, 43, 50-62. DOI:10.32447/20786662.43.2023.07.
5. Wang, S., Gong, X., Shao, R., Xu, L., Li, Y., He, F., Feng, X. (2024). *Suppression Effects of Different Extinguishing Agents on Vent Gases Fires from Lithium-ion Batteries after Thermal Runaway: A comprehensive experimental and numerical study*. *Fire Safety Journal*, 104227.
6. Bolshova, T. A., Shvartsberg, V. M., & Shmakov, A. G. (2021). *Synergism of trimethylphosphate and carbon dioxide in extinguishing premixed flames*. *Fire Safety Journal*, 125, 103406.
7. Zhang, Y., Wang, Z., Liu, J., Li, Q., Pan, R., & Zhou, X. (2023). *Alkaline potassium aluminum carbonate: A novel high-efficiency dry powder extinguishing agent with high heat-resistant*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 173, 106038.
8. Zhang, L., Li, Y., Duan, Q., Chen, M., Xu, J., Zhao, C., Wang, Q. (2020). *Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires*. *Journal of energy storage*, 32, 101801.
9. Jiang, L., Wang, Q., Li, K., Ping, P., Jiang, L., & Sun, J. (2018). *A self-cooling and flame-retardant electrolyte for safer lithium ion batteries*. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(6), 1323-1331.
10. Zhou, X., Lu, D., Chao, M., & Chen, W. (2014). *Experimental and theoretical studies on the thermal decomposition of 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4-heptafluorocyclopentane*. *Journal of Fluorine Chemistry*, 164, 70-77.
11. Hu, J., Tang, X., Zhu, X., Liu, T., & Wang, X. (2024). *Suppression of thermal runaway induced by thermal abuse in large-capacity lithium-ion batteries with water mist*. *Energy*, 286, 129669.
12. Liu, T., Liu, Y., Wang, X., Kong, X., & Li, G. (2019). *Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist*. *Energy Conversion and Management*, 199, 111969.
13. Ping, P., Gao, X., Kong, D., Gao, W., Feng, Z., Yang, C., Dai, X. (2024). *Experimental study on the synergistic strategy of liquid nitrogen and water mist for fire extinguishing and cooling of lithium-ion batteries*. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 713-725.
14. Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2024). *A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire*. *Fire Technology*, 60(2), 817-858.
15. Meng, X., Yang, K., Zhang, M., Gao, F., Liu, Y., Duan, Q., & Wang, Q. (2020). *Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate*

- battery. *Journal of Energy Storage*, 30, 101532.
16. Zhang, Y., Wang, H., Wang, Y., Li, C., Liu, Y., & Ouyang, M. (2021). Thermal abusive experimental research on the large-format lithium-ion battery using a buried dual-sensor. *Journal of Energy Storage*, 33, 102156.
17. Xu, J., Zhang, L., Liu, Y., Duan, Q., Jin, K., & Wang, Q. (2022). Electrochemical performance and thermal stability of 18650 lithium-ion battery with water mist after high-temperature impact. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 589-599.
18. Liu, T., Tao, C., & Wang, X. (2020). Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied energy*, 267, 115087.
19. Liu, T., Liu, Y., Wang, X., Kong, X., & Li, G. (2019). Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist. *Energy Conversion and Management*, 199, 111969.
20. Gavryliuk A. F. Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhzhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoiu stabilnistiu sylovoi litiivoi akumulatornoj batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.0415>.
21. Choi, S., Roh, Y., Kim, U., & Lee, Y. M. (2023). Thermally Conductive Nitride-Based Ceramic-Coated-Separator for Lithium-Ion Batteries. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts 243* (No. 55, pp. 2675-2675). The Electrochemical Society, Inc.

**Рецензент:** д-р техн. наук, головний науковий співробітник О.Ф. Нікулін, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна.

**Автор:** ГАВРИЛЮК Андрій Федорович  
кандидат технічних наук, доцент, докторант  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
E-mail – [gavrilyk3@ukr.net](mailto:gavrilyk3@ukr.net)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8727-9950>

**Автор:** КОВАЛИШИН Василь Васильович  
доктор технічних наук, професор, професор кафедри цивільного захисту  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
E-mail – [kovalyshyn.v@gmail.com](mailto:kovalyshyn.v@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

**Автор:** ЯКОВЧУК Роман Святославович  
доктор технічних наук, доцент, начальник факультету цивільного захисту  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
E-mail – [yakovchukrs@ukr.net](mailto:yakovchukrs@ukr.net)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5523-5569>

## EFFICIENCY OF USING PORTABLE FIRE EXTINGUISHERS WHEN EXTINGUISHING LITHIUM-ION BATTERIES

A. Havryliuk, V. Kovalyshyn, R. Yakovchuk

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

*The article substantiates the trends in using electric energy storage systems consisting of a battery, an inverter, connecting conductors, safety automation, and, if necessary, solar panels. Such systems typically use lithium-ion batteries because of several technical advantages: high specific energy capacity, high discharge-charging currents, and many charge-discharge cycles, i.e., longevity. The chemical and electrochemical reactions that occur during the charge-discharge cycles of lithium-ion batteries can lead to irreversible electrothermal processes. Such processes cause an uncontrolled increase in temperature, the release of hazardous gases, fires, and explosions, often accompanied by fire. Therefore, the authors conducted a successful full-scale field study of the effect of various extinguishing agents of the most common portable fire extinguishers in Ukraine on the efficiency of extinguishing lithium-ion batteries.*

*Based on the experiment, we found that extinguishing the lithium-ion module using a portable carbon dioxide fire extinguisher is the least effective among the extinguishers studied, with the resumption of flame combustion occurring within 3–4 s after the cessation of carbon dioxide supply to the combustion centre. When using a portable powder fire extinguisher, the flame combustion of the test module resumed after 18–20 s. The desired extinguishing effect was achieved using low-density air-mechanical foam from the VVK-5 fire extinguisher and sprayed water with salt additives from a water extinguisher. Based on the obtained research results, we proposed recommendations for the selection of standards for the availability and use of portable fire extinguishers for the effective extinguishing of lithium-ion batteries at the rate of at least 5 kg of charge of working solution or water with salt additives per 5 kWh of energy capacity of a lithium-ion battery.*

*Further research will identify influence patterns of the intensity of extinguishing agent supply on the efficiency of extinguishing lithium-ion batteries.*

**Keywords:** lithium-ion battery, fire, irreversible electrothermal process, fire safety.