



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.06>

*В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський,
Вол. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Р. Я. Лозинський, Я. В. Геревич
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000-0001-7051-4494> – В. М. Марич
<https://orcid.org/0000-0003-3266-578X> – Р. Б. Веселівський
<https://orcid.org/0000-0003-3739-8668> – Вол. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000-0002-7967-4491> – Н. Р. Великий
<https://orcid.org/0009-0004-7292-711X> – Р. Я. Лозинський
<https://orcid.org/0009-0003-0555-1098> – Я. В. Геревич
✉ marychvolodj@ukr.net

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК З ВИЗНАЧЕННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Проблема. Стрімке впровадження літій-іонних акумуляторів у транспорті, системах накопичення енергії, портативній електроніці та безпілотних літальних апаратах супроводжується зростанням рівня пожежної небезпеки. Чинні нормативні документи та методики випробувань не повною мірою враховують специфіку фізико-хімічних процесів, притаманних таким пожежам, що ускладнює об'єктивне оцінювання ефективності гасіння та порівняння результатів різних досліджень.

Мета роботи – провести аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами, а також виявлення основних недоліків чинних підходів і обґрунтування напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів цивільного та спеціального призначення.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного аналізу, порівняння та узагальнення наукових публікацій і нормативних документів.

Основні результати дослідження. Встановлено, що існуючі методики суттєво відрізняються за способом моделювання пожежі. У низці методик використовується обмежена ємність акумуляторів або умови, що не відтворюють реальні сценарії пожежі, що знижує практичну цінність результатів. Виявлено відсутність уніфікованих підходів до визначення граничної температури теплового розгону, мінімальної інтенсивності подачі вогнегасної речовини та критеріїв припинення горіння. Доведено, що ефективність гасіння суттєво залежить від режиму подачі вогнегасної речовини, конструкції батареї та умов теплового навантаження.

Висновки. Сучасні дослідження підтверджують відсутність комплексної уніфікованої методики оцінювання ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів і обґрунтовують необхідність систематизації та вдосконалення існуючих підходів з урахуванням реальних умов експлуатації та сучасних загроз.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, гасіння пожеж, методики, вогнегасні речовини, легкі метали.

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF EXTINGUISHING LITHIUM-ION BATTERIES WITH FIRE EXTINGUISHING AGENTS

Problem. The rapid adoption of lithium-ion batteries in transportation, energy storage systems, portable electronics, and unmanned aerial vehicles is accompanied by an increased fire hazard. Current regulatory documents and testing methodologies do not fully account for the specific physicochemical processes inherent in such fires, which complicates the objective assessment of extinguishing effectiveness and the comparison of results across different studies.

Objective is to analyze existing methods for assessing the effectiveness of extinguishing lithium-ion battery fires using various fire extinguishing agents, to identify the main shortcomings of current approaches, and to justify directions for improving evaluation methodologies to enhance fire safety in both civil and specialized facilities.

Research Methods. This study employs methods of system analysis, comparison, and synthesis of scientific publications and regulatory documents.

Main research results. It was established that existing methodologies differ significantly in the way fires are modeled. In some methods, batteries of limited capacity are used or conditions that do not replicate real fire scenarios, which reduces the practical value of the results. A lack of standardized approaches was identified for determining the critical temperature for thermal runaway, the minimum intensity of fire extinguishing agent delivery, and criteria for fire cessation. It was demonstrated that the effectiveness of extinguishing largely depends on the mode of agent application, battery design, and thermal load conditions.

Conclusions. Current studies confirm the absence of a comprehensive, standardized methodology for evaluating the effectiveness of extinguishing lithium-ion battery fires and justify the need to systematize and improve existing approaches, taking into account real operating conditions and contemporary threats.

Key words: lithium-ion batteries, fire suppression, methodologies, fire extinguishing agents, light metals.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток електротранспорту, портативної електроніки, систем зберігання енергії та відновлюваної енергетики зумовив широке впровадження літій-іонних акумуляторів у різні галузі промисловості та побуту. Паралельно з воєнними загрозами в Україні спостерігається стрімке зростання виробництва та використання безпілотних літальних апаратів, що, у свою чергу, обумовлює масове виготовлення, зберігання та експлуатацію літій-іонних батарей. Водночас експлуатація літій-іонних акумуляторів супроводжується підвищеним рівнем пожежної небезпеки, зумовленої можливістю теплового розгону, коротких замикань, механічних пошкоджень або порушення режимів заряджання та розряджання. Пожежі за участю таких акумуляторів характеризуються високою температурою горіння, виділенням токсичних газів і схильністю до повторного займання, що суттєво ускладнює процес їх гасіння.

Існуючі вогнегасні речовини та методи пожежогасіння, які традиційно застосовуються для твердих, рідких або газоподібних горючих матеріалів, не завжди є ефективними у випадку пожеж літій-іонних акумуляторів. На практиці спостерігається відсутність єдиного підходу до оцінювання ефективності гасіння таких пожеж, а результати експериментальних досліджень різних авторів часто

є суперечливими або важко порівнюваними через відмінності у методиках випробувань, умовах експерименту та критеріях ефективності.

Аналіз сучасного стану проблеми свідчить, що існуючі нормативні документи, методики випробувань і розрахунку вогнегасної ефективності не повною мірою враховують специфіку пожеж, спричинених літій-іонними акумуляторами.

У зв'язку з цим актуальною науково-практичною проблемою є аналіз існуючих методик визначення ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами. Необхідність систематизації наявних підходів, виявлення їх переваг і недоліків, а також визначення напрямів удосконалення методик оцінювання зумовлена потребою підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів, де використовуються літій-іонні акумулятори, і розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо вибору ефективних засобів пожежогасіння.

Таким чином, дослідження, спрямоване на аналіз та узагальнення існуючих методик визначення ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів вогнегасними речовинами, є актуальним та має важливе наукове і прикладне значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Літій є одним з найлегших металів, який використовується в промисловості [1]. Дослідження

ефективності гасіння легких металів різними вогнегасними речовинами представлено у роботах [2-6]. У даних працях авторами розроблено рецептуру вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D, A, B, проведено успішне гасіння вогнищ пожеж класу D і B, що свідчить про ефективність розроблених порошків, а також розроблена технологія комбінованого гасіння пожеж класу D і A. Проблематика пожежної небезпеки літій-іонних акумуляторів упродовж останнього десятиліття набула значної уваги в роботах вітчизняних та зарубіжних науковців. У численних дослідженнях розглядаються механізми виникнення теплового розгону, особливості розвитку пожеж і вибухів літій-іонних батарей, а також токсикологічні та екологічні наслідки їх горіння. Значна частина наукових праць присвячена експериментальному вивченню процесів займання акумуляторів різної ємності та конструкції під впливом електричних, теплових і механічних факторів.

Дослідники з Китаю в роботі [7] описують причини займання Li-іон батарей (перезаряд, коротке замикання, механічні пошкодження, перегрів), вивчають ефективність різних засобів гасіння (вода та водяний туман, піни, сухі порошки, газові агенти (CO₂, інертні гази) аерозолі та спеціалізовані добавки) та зазначають потребу у розробці спеціалізованих вогнегасних засобів і стандартизованих методів гасіння саме для літій-іонних батарей.

Італійські вчені [8] провели випробування на одному літій-іонному елементі та наборі взаємопов'язаних елементів. Випробування проводилися з використанням полум'я пальника LPG потужністю приблизно 7,5 кВт. Використовувалися літій-іонні елементи EIG C020, і оцінювалася ефективність гасіння вуглекислим газом, піною, сухим порошком, чистою водою та водяним туманом. Результати випробувань показали, що найефективнішими є вода та піна. Оброблені елементи заряджалися до 50 % заряду. Експериментальні дослідження показали, що літій-іонні акумулятори мають високий ризик пожежі. Окислення металевого літію генерує спалах під час нагрівання акумулятора.

В роботі [9] описано проникнення гострих предметів в акумуляторну батарею, що призводить до короткого замикання та, отже, горіння, ймовірно, трапляється під час зіткнень електромобілів. Автори провели моделювання поведінки проникнення цвяхів в батарею. Під час розробки методики, щодо випробування вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів одним із способів створення пожежі є пробиття акумулятора гострим предметом. Недоліком даного

методу ініціації горіння є неможливість забезпечення точної відтворюваності процесу пробиття акумулятора.

Науковці у роботі [10] наводять сучасний стан щодо ефективного гасіння пожеж електро-транспорту. Автори систематизують питання, аналізуючи літературу про пожежі, де літій-іонні акумулятори є критичним елементом, який може ініціювати пожежу. Також було проаналізовано методи гасіння пожежі, а також використані вогнегасні речовини.

У роботах низки авторів [11, 12] доведено, що традиційні засоби пожежогасіння не завжди забезпечують припинення теплового розгону та запобігання повторному займанню акумуляторів. Ефективність вогнегасних засобів суттєво залежить від режиму подавання вогнегасної речовини, конструкції батареї та умов експерименту [13, 14]. Дослідники [15] запропонували технологію раннього попередження та засіб гасіння пожежі для запобігання та контролю небезпеки систем зберігання енергії та узагальнили методи моніторингу зосереджуючись на п'яти аспектах: «акустика, тепло, сила, електрика та газ». Також важливим чинником, що буде впливати на пожежну небезпеку літій-іонних акумуляторів є їх тепловий розгін, зокрема, автори [16] встановили, що температура початку теплового вибуху для акумулятора, нагрітого циліндричним нагрівачем є нижчою, ніж для акумулятора, нагрітого електричною пічкою. Дослідивши вплив трьох ключових параметрів таких як положення нагрівання, площа та потужність, встановили, що більше іскор та викиду газу спостерігалось для акумулятора, нагрітого циліндричним нагрівачем, тоді як акумулятор, нагрітий електричною пічкою, спричиняв більший вибух та більше займання.

У наукових працях [17–20] показано, що ємність акумулятора і його відсоток заряду акумулятора буде мати безпосередній вплив на його тепловий розгін, виділення тепла, вуглекислого газу та втрату маси.

Аналіз публікацій показує, що більшість досліджень мають прикладний або вузькоспеціалізований характер і спрямовані на вивчення окремих аспектів гасіння літій-іонних акумуляторів.

Мета статті – провести аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами з урахуванням специфіки розвитку теплового розгону, умов повторного займання та сучасних вимог пожежної безпеки, а також виявлення основних недоліків чинних підходів і обґрунтування напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності для

підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів цивільного та спеціального призначення.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів.

В Чеській методиці [21] описано вимоги до переносних вогнегасників, які ефективні для гасіння пожеж, спричинених літій-іонними батареями, а також методи випробувань, якими перевіряється така придатність та правила маркування продукції після успішних випробувань. На рис. 1 зображено процес гасіння літій іонного акумулятора згідно запропонованої Чеської методики [21].

В процесі гасіння літій-іонних акумуляторів проводили спостереження за температурою

горіння (рис. 2). Як видно з графіку, що максимальна температура горіння становить 400 °С.

Згідно методики процес гасіння відбувається після досягнення пікової температури (рис. 2), вогнегасна речовина подається в отвір кришки ємності де горить літій-іонна батарея і заповнює її. Дана методика не є ефективною для випробування вогнегасних речовин, адже літій-іонна батарея знаходиться в металевій ємності, яку заповнюють вогнегасною речовиною, для охолодження. Такий процес не потребує конкретної вогнегасної речовини, а достатньо ємність заповнити водою, таким чином досягнемо припинення процесу горіння.

У відомій методиці запропонованій в роботі [22] проводили гасіння літій-іонного модуля

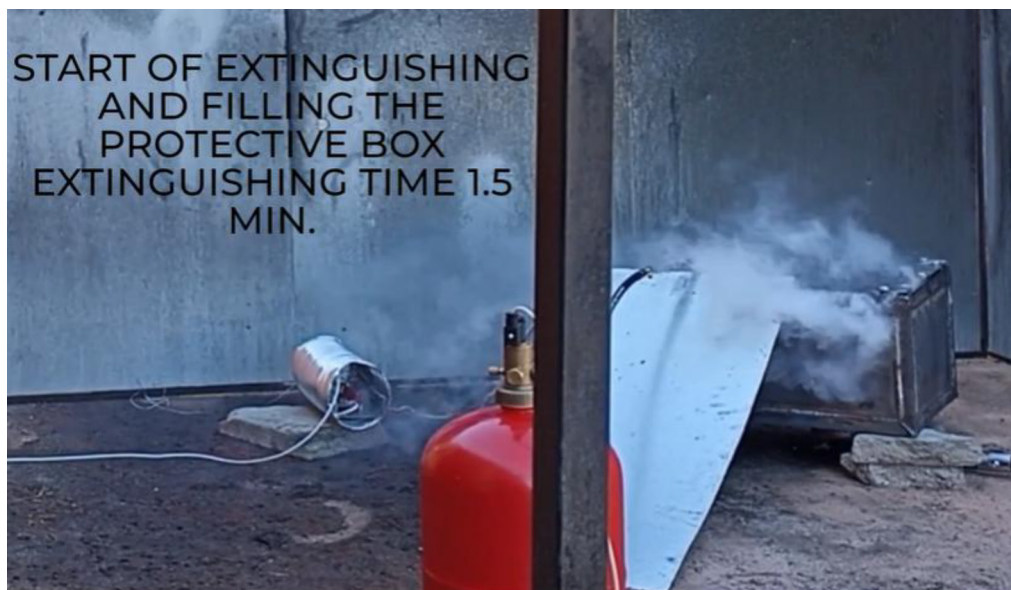


Рис. 1. Модельне вогнище з випробування вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів [21]

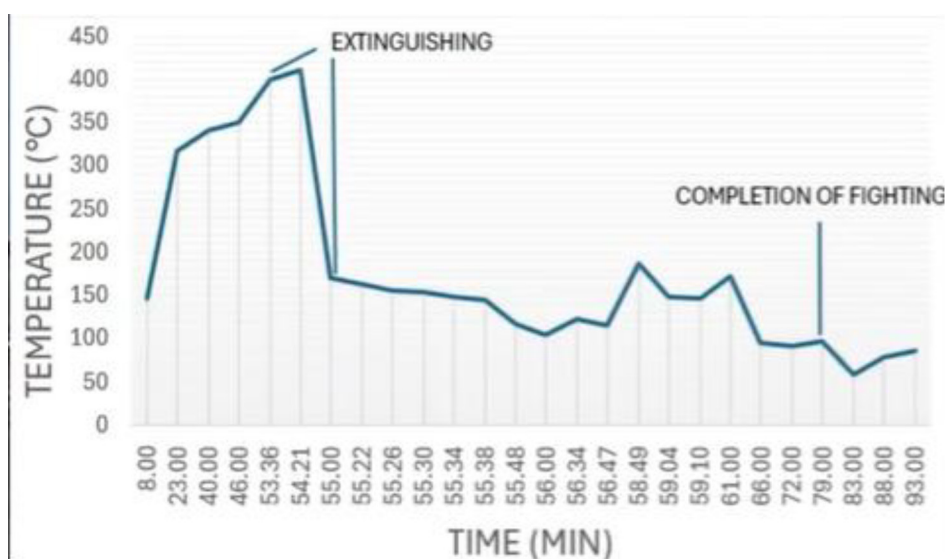


Рис. 2. Графік зміни температури залежності від часу горіння та під час подачі вогнегасної речовини [21]

енергетичною ємністю 5,7 кВт·год переносними вогнегасниками з різними вогнегасними речовинами. Згідно із методикою проведення експериментального дослідження, гасіння модуля відбувається після загорання сумарно 40–50 елементів, що дорівнює близько 10 % від загальної кількості елементів модуля. На момент гасіння орієнтовна площа горіння модуля становила 0,02–0,025 м², а температура горіння – понад 600 °С. Така методика не в повній мірі відповідає реальним умовам пожежі у зв'язку з відсутністю прошарку повітря між станиною та літій-іонним модулем [23]. Також, недоліком цієї методики, є відтворюваність процесу ініціації модуля нагріванням газовим пальником, що в процесі нагріву не може забезпечити однаковий тепловий потік при проведенні серії експериментів. Це обумовлено швидкістю вітрового потоку, що безпосередньо впливає на площу нагрівання літій-іонного модуля та

час і періодичність загорання елементів модуля від початку проведення експерименту.

В Нідерландській методиці [24] описується вимоги до переносних вогнегасників, що доповнюють NEN-EN 3-7:2004+A1:2007, для випробування їхньої придатності для гасіння пожеж літєвих акумуляторів обмеженого розміру, що використовуються в смартфонах, ноутбуках, електроінструментах, побутовій техніці, портативному медичному обладнанні та дронах. Згідно даної методи випробування проводяться з обмеженням номінальної ємності композитних плоских пакетних елементах не більшою 6750 мА (рис. 3).

Також вважається, що така методика буде ефективною для гасіння композитних циліндричних елементів такої ж або меншої номінальної ємності.

Щоб викликати тепловий розгін у елементах, набір із чотирьох елементів перезаряджається,

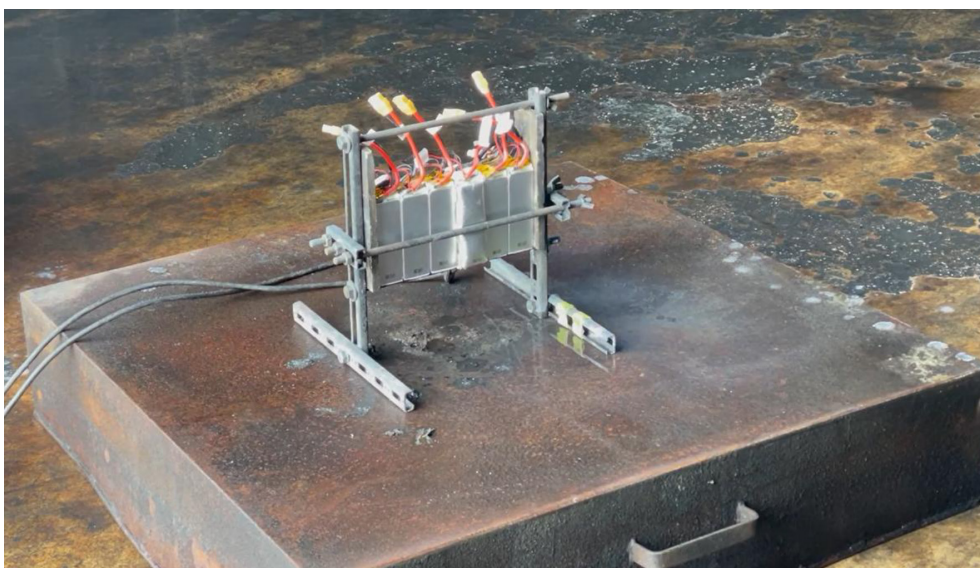


Рис. 3. Збірка експериментальної установки для проведення дослідження [24]



Рис. 4. Процес гасіння літій-іонних акумуляторів [24]



Рис. 5. Стан акумуляторних батарей після завершення процесу гасіння [24]



Рис. 6. Система високого тиску Cold Cut Cobra

доки вони не займаються, утворюючи видиме полум'я.

Процесі гасіння літій-іонних акумуляторів відповідно даної методики відображено на рисунку 4.

Після завершення гасіння необхідно спостерігати протягом 20 хв. чи не розпочнеться повторне загоряння рис. 5.

Проведення випробування вогнегасних речовин за даною методикою є не ефективним тому, що використовують акумулятори з ємністю, яка не створює пожежі з великою складністю гасіння.

В проєкті Європейського стандарту [25] описано вимоги до експлуатаційних характеристик портативних вогнегасників на додаток до вимог EN 3-7:2004+A1:2007, щоб випробувати їх для гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів з обмеженою ємністю, що використовуються в:

- портативному електронному обладнанні (смартфони, ноутбуки);
- електроінструментах та побутових приладах;
- портативному медичному обладнанні;
- іграшках та радіокерованих об'єктах;
- безпілотних літальних апаратах;
- велосипедах.

У ньому також зазначено відповідне маркування.

Документ охоплює випробування на гасіння, масштабовані до типових ємностей портативних акумуляторів, і чітко виключає валідацію для великих ризиків, таких як тягові акумулятори транспортних засобів або стаціонарні системи накопичення енергії. Слід зазначити, що, як і метод [24] проєкт Європейського стандарту обмежує максимальну потужність літій-іонних акумуляторів, які піддаються гасінню значенням 600 Вт. Також, у проєкті стандарту чітко зазначено, що він не застосовується для тягових акумуляторів транспортних засобів або великих стаціонарних систем накопичення енергії.

В Шведській методиці [26] проводять дослідження з випробування система високого тиску Cold Cut Cobra (рис. 6).

Дана система призначена для пробивання будівельних конструкцій водяно-абразивним струменем та подачі тонкорозпиленої води для гасіння пожеж без доступу кисню.

Система Cold Cut Cobra – це вдосконалений засіб пожежогасіння, розроблений для підвищення як безпеки, так і ефективності. Використовуючи струмінь води надвисокого тиску, здатний досягати до 300 бар, система може пробивати практично будь-який будівельний матеріал. Змішуючи абразив у струмінь води, Cobra ефективно



Рис. 7. Практичне застосування Cold Cut Cobra

прорізає поверхню, не надаючи вогню додаткового кисню, допомагаючи його стримувати (рис. 7).

Після проколювання використовується лише вода, створюючи дрібний туман, який охолоджує гази, що утворюються внаслідок пожежі, та знижує температуру. Систему можна оснастити додатковими функціями, такими як насос для добавок або багатоцільова форсунка (MPN) для регульованих режимів розпилення, що робить її універсальною для різних потреб пожежогасіння.

Система Cobra розроблена для гнучкого встановлення на широкий спектр транспортних засобів, що робить її адаптованою до різних операційних потреб пожежно-рятувальних служб.

Методики оцінювання ефективності пожежогасіння, запропоновані різними авторами, суттєво відрізняються за критеріями результативності, тривалістю спостереження, параметрами теплового впливу та умовами повторного займання. Це ускладнює порівняння отриманих результатів і формування уніфікованих рекомендацій щодо вибору вогнегасних засобів.

У нормативних документах та стандартах, що регламентують випробування вогнегасників і вогнегасних речовин, питання гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів або взагалі не розглядаються, або висвітлюються фрагментарно, без урахування специфічних фізико-хімічних процесів, притаманних таким пожежам. Особливо актуальною ця проблема є в умовах України, де, поряд із розвитком цивільних технологій, відбувається інтенсивне виготовлення та експлуатація безпілотних літальних апаратів із літій-іонними батареями в умовах підвищених ризиків пошкодження та займання.

Висновки. Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про відсутність комплексного підходу до оцінювання ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів та необхідність систематизації існуючих методик. На підставі виконаного дослідження, встановлено, що існує відмінність у процесі проведення

стандартизованих випробувань вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів. На основі виявлених недоліків в існуючих методиках, встановлено ключові чинники, які будуть впливати на визначення ефективності гасіння акумуляторів, будуть:

- метод ініціації літій-іонних акумуляторів, що призводить до їх горіння (перезарядження, пробивання, механічне пошкодження);

- експериментальна установка для випробувань (акумулятори які піддаються гасінню знаходяться у підвішеному стані, поміщаються у закриту ємність, випробовуються окремі елементи акумуляторів, збірки з акумуляторів різних ємностей);

- засоби подачі вогнегасних речовин (відстань до об'єкту гасіння, засоби гасіння, параметри подачі вогнегасних речовин);

- час горіння акумуляторів з моменту їх ініціації, час гасіння, фіксація часу до можливого повторного загорання і встановлення необхідності продовження гасіння;

- тип акумуляторів, що піддаються випробуванням, відсоток їхнього заряду перед початком досліджень та максимальна потужність збірки акумуляторів.

Це зумовлює потребу в узагальненні наукових результатів, критичному аналізі застосовуваних методів випробувань і визначенні перспективних напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності з урахуванням реальних умов експлуатації та сучасних загроз.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дослідження найлегшого металу. URL: <https://ssalloy-steel.com/uk/blog/lightest-metal/> (дата звернення: не вказано).

2. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskyi R., Kovalyshyn V., Lozynskyi R. Обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04>

3. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V., Chernetskiy V. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2(16). С. 123–134. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2(16).123-134)
4. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошоків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2018. № 29. С. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33>
5. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05>
6. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В. Патент на корисну модель № 145068 Україна, МПК А62D 1/00; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 3 с.
7. Huang J., Jin J., Zhao L., et al. Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire. *China Journal of Environmental Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 11. P. 2121–2136.
8. Russo P., Di Bari C., Mazzaro M., De Rosa A., Morriello D. Effective fire extinguishing systems for lithium-ion battery. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 67. P. 727–732. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1867122>
9. Chiu K.-C., Lin C.-H., Yeh S.-F., Lin Y.-H., Chen K.-C. An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration. *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 254. P. 263.
10. Lesiak P., Pietrzela D., Mortka P. Methods used to extinguish fires in electric vehicles. *Safety & Fire Technology*. 2021. Vol. 58(2). P. 38–57.
11. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire. *Fire Technology*. 2022. Vol. 60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>
12. Majeed F., Jamal H., Kamran U., et al. Review – recent advances in fire-suppressing agents for mitigating lithium-ion battery fires. *Journal of The Electrochemical Society*. 2024. Vol. 171. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad5620>
13. Chang C., Wang R. Experimental investigation of thermal runaway behaviour and inhibition strategies in lithium iron phosphate batteries. *International Journal of Electrochemical Science*. 2024. Vol. 19. Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100877>
14. Xiao X., Chen B., Jin X., et al. Experimental study on the effect of synergistic extinguishing method based on liquid nitrogen on lithium-ion battery fire after thermal runaway. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 479. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7120479>
15. Wang K., Ouyang D., Qian X., et al. Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*. 2023. Vol. 16(7). Article 2960. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16072960>
16. Wang Z., Yang H., Li Y., et al. Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium-ion batteries with different heating methods. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.007>
17. Wang Z., Ning X., Zhu K., et al. Evaluating the thermal failure risk of large-format lithium-ion batteries using a cone calorimeter. *Journal of Fire Sciences*. 2019. Vol. 37. P. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734904118816616>
18. Md Said M. S. B. Experimental study and numerical modelling of lithium-ion battery thermal runaway behaviour: дис. ... докт. філософії. Sheffield: The University of Sheffield, 2018.
19. Wei N., Zhang F., Zhang W., Li X. Comparative study on the thermal runaway characteristics of Li(NixCoyMnz)O₂ batteries. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e31203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31203>
20. Kang R., Jia C., Zhao J., Zhao L., Zhang J. Effects of capacity on the thermal runaway and gas venting behaviors of lithium iron phosphate batteries induced by overcharge. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 84. Article 111523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111523>
21. Metodika zkoušení hasicí směsi FRS EXcellent 1 při hašení požárů hořlavých kapalin, lehkých kovů a Li-ion baterií. Praha: VÚPO, 2025.
22. Havryliuk A. F., Yakovchuk R. S., Kovalyshyn V. V. Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 58–66.
23. Havryliuk A. F. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів): дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Львів, 2025. 395 с.
24. Portable fire extinguishers – Performance requirements, test methods and marking for suitability for extinguishing lithium battery fires (NTA 8133:2021+A1:2025).
25. Portable fire extinguishers – Part 11: Performance requirements, test method and marking for EN 3-7 extinguishers suitable for lithium-ion battery fires: prEN 3-11:2025. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2025.
26. Demonstration of extinguishing method for lithium-ion batteries: method application at different levels of aggregation – module, sub-battery, electric car pack and vehicle level. Karlstad: Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2023.

REFERENCES

1. (n.d.). *Doslidzhennia nailehshoho metalu* [Study of the lightest metal]. Retrieved from: <https://sسالloy-steel.com/uk/blog/lightest-metal/> [in Ukrainian].
2. Kovalyshyn, V., Marych, V., Veselivskiy, R., Kovalyshyn, V., & Lozynskiy, R. (2024). *Obgruntu-*

vannia tekhnolohii hasinnia kombinovanykh pozhezh za naiavnosti lehkykh metaliv chy fosfornykh [Substantiation of technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus]. *Pozhezhna bezpeka*, (44), 30–40. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04> [in Ukrainian].

3. Kovalyshyn, V., Marych, V., Veselivskiy, R., Kovalyshyn, V., & Chernetskiy, V. (2023). *Optymizatsiia retseptury vohnehasnogo poroshku spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu A, B ta D* [Optimization of formulation of special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of class A, B, and D fires]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(16), 123–134. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).123-134) [in Ukrainian].

4. Kovalyshyn, V., Marych, V., Kyryliv, Y., Koshelenko, V., & Mirus, O. (2018). *Doslidzhennia khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlia hasinnia lehkykh metaliv* [Study of chemical substances as components of fire-extinguishing powders for light metals]. *Pozhezhna bezpeka*, (29), 46–56. Retrieved from: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33> [in Ukrainian].

5. Husar, B., Kovalyshyn, V., Marych, V., Lozynskiy, R., & Pastukhov, P. (2019). *Kombinovane hasinnia pozhezh klasu D ta A, B* [Combined extinguishing of class D and A, B fires]. *Pozhezhna bezpeka*, (35), 30–34. <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05> [in Ukrainian].

6. Kovalyshyn, V. V., Husar, B. M., Kovalyshyn, V. V., & Marych, V. M. (2020). *Vohnehasnyi poroshok spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu D, A, B* [Special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of class D, A, B fires] (Ukrainian Utility Model Patent No. 145068). [in Ukrainian].

7. Huang, J., Jin, J., Zhao, L., et al. (2024). Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire. *China Journal of Environmental Engineering*, 18(11), 2121–2136.

8. Russo, P., Di Bari, C., Mazzaro, M., De Rosa, A., & Morriello, D. (2018). Effective fire extinguishing systems for lithium-ion battery. *Chemical Engineering Transactions*, 67, 727–732. <https://doi.org/10.33031/CET1867122>

9. Chiu, K.-C., Lin, C.-H., Yeh, S.-F., Lin, Y.-H., & Chen, K.-C. (2014). An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration. *Journal of Power Sources*, 254, 263.

10. Lesiak, P., Pietrzela, D., & Mortka, P. (2021). Methods used to extinguish fires in electric vehicles. *Safety & Fire Technology*, 58(2), 38–57.

11. Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2022). A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire. *Fire Technology*, 60. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

12. Majeed, F., Jamal, H., Kamran, U., et al. (2024). Review – recent advances in fire-suppressing agents for mitigating lithium-ion battery fires. *Journal*

of The Electrochemical Society, 171. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad5620>

13. Chang, C., & Wang, R. (2024). Experimental investigation of thermal runaway behaviour and inhibition strategies in lithium iron phosphate batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 19, Article 100877. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100877>

14. Xiao, X., Chen, B., Jin, X., et al. (2024). Experimental study on the effect of synergistic extinguishing method based on liquid nitrogen on lithium-ion battery fire after thermal runaway. *Fire*, 7(12), Article 479. <https://doi.org/10.3390/fire7120479>

15. Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., et al. (2023). Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*, 16(7), Article 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>

16. Wang, Z., Yang, H., Li, Y., et al. (2019). Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium-ion batteries with different heating methods. *Journal of Hazardous Materials*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.007>

17. Wang, Z., Ning, X., Zhu, K., et al. (2019). Evaluating the thermal failure risk of large-format lithium-ion batteries using a cone calorimeter. *Journal of Fire Sciences*, 37, 81–95. <https://doi.org/10.1177/0734904118816616>

18. Md Said, M. S. B. (2018). *Experimental study and numerical modelling of lithium-ion battery thermal runaway behaviour* (Doctoral dissertation, The University of Sheffield).

19. Wei, N., Zhang, F., Zhang, W., & Li, X. (2024). Comparative study on the thermal runaway characteristics of Li(NixCoyMnz)O₂ batteries. *Heliyon*, 10, Article e31203. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31203>

20. Kang, R., Jia, C., Zhao, J., Zhao, L., & Zhang, J. (2024). Effects of capacity on the thermal runaway and gas venting behaviors of lithium iron phosphate batteries induced by overcharge. *Journal of Energy Storage*, 84, Article 111523. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111523>

21. (2025). *Metodika zkouseni hasici smesi FRS EXcellent 1 pri haseni pozaru horlavych kapalín, lehkykh kovu a Li-ion baterii* [Methodology for testing extinguishing mixture FRS EXcellent 1 for fires of flammable liquids, light metals and Li-ion batteries]. Praha: VUPO.

22. Havryliuk, A. F., Yakovchuk, R. S., & Kovalyshyn, V. V. (2024). *Efektivnist vykorystannia perenosnykh vohnehasnykiv pry hasinni liti-ionnykh akumuliatoriv* [Efficiency of portable fire extinguishers in extinguishing lithium-ion batteries]. *Pozhezhna bezpeka*, (44), 58–66 [in Ukrainian].

23. Havryliuk, A. F. (2025). *Rozvytok naukovykh osnov protypozhezhnogo zakhystu elektrychnykh kolisnykh transportnykh zasobiv (elektromobiliv)* [Development of scientific foundations of fire

protection of electric vehicles] (Doctoral dissertation). Lviv [in Ukrainian].

24.(2025). *Portable fire extinguishers – Performance requirements, test methods and marking for suitability for extinguishing lithium battery fires (NTA 8133:2021+A1:2025)*.

25.(2025). *Portable fire extinguishers – Part 11: Performance requirements, test method and marking*

for EN 3-7 extinguishers suitable to be used on lithium-ion battery fires (prEN 3-11:2025). Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

26.(2023). *Demonstration of extinguishing method for lithium-ion batteries: method application at different levels of aggregation – module, sub-battery, electric car pack and vehicle level*. Karlstad: Swedish Civil Contingencies Agency (MSB).

© В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський, Вол. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Р. Я. Лозинський, Я. В. Геревич

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026