

УДК 614.841

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.88.1245

ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

КОВАЛИШИН В. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
МАРИЧ В. М.^{2*}, *докторант, канд. техн. наук, доц.*,
ФІРМАН В. М.³, *канд. техн. наук, доц.*,
ГАМАН Б. В.⁴, *курсант*

¹ Кафедра експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (067) 673-57-47, e-mail: kovalyshyn.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

^{2*} Кафедра експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (068) 649-08-58, e-mail: marychvolodj@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет ім. Івана Франка, вул. Дорошенка, 41, 79000, Львів, Україна, тел. +38 (067) 785-50-49, e-mail: yfirman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

⁴ Кафедра превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (098) 008-43-13, e-mail: gamanbohndan2005@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0549-8373>

Анотація. Постановка проблеми. Стрімке поширення літій-іонних акумуляторів у побуті, транспорті, енергетичних системах і цифрових технологіях зумовлює зростання кількості пожеж нового типу, що характеризуються високою температурою горіння, виділенням токсичних речовин і ризиком повторного займання. Особливу небезпеку становить явище теплового розгону, яке ускладнює локалізацію та ліквідацію пожеж і створює додаткові ризики для населення та рятувальників. **Мета статті.** Аналіз причин виникнення пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, дослідження механізмів розвитку теплового розгону та визначення особливостей гасіння таких пожеж, а також узагальнення результатів сучасних наукових досліджень щодо ефективності різних вогнегасних засобів і способів їх ліквідації. **Основні результати дослідження.** Встановлено, що основними причинами пожеж є перегрів, перезаряд, механічні пошкодження та внутрішні короткі замикання. Визначено, що ключовим фактором розвитку пожеж є тепловий розгін, який супроводжується інтенсивним виділенням тепла та горючих газів. Доведено, що традиційні засоби пожежогасіння (порошкові та газові) мають обмежену ефективність, тоді як найбільш результативним є інтенсивне охолодження водою або використання водяного туману. Виявлено основні труднощі гасіння, зокрема ризик повторного займання, поширення вогню між елементами батареї та складність доступу до осередку горіння. **Висновок.** Обґрунтовано необхідність удосконалення тактики гасіння пожеж за участю літій-іонних акумуляторів із акцентом на охолоджувальні методи. Запропоновано розроблення спеціалізованих вогнегасних речовин і технічних засобів, впровадження систем раннього виявлення теплового розгону, а також підвищення рівня підготовки рятувальників і обізнаності населення щодо безпечної експлуатації акумуляторів. Вирішення проблеми потребує комплексного підходу, що поєднує наукові дослідження, нормативне вдосконалення та практичні заходи безпеки.

Ключові слова: *пожежна небезпека; літій-іонні акумулятори; гасіння пожеж; вогнегасні речовини; безпека праці*

PROBLEMS OF FIRE EXTINGUISHING IN THE PRESENCE OF LITHIUM-ION BATTERIES

KOVALYSHYN V.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
MARYCH V.M.^{2*}, *Doctoral Stud., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
FIRMAN V.M.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
HAMAN B.V.^{4*}, *Cadet*

¹ Department of Vehicle Operations and Emergency Rescue Operations, ESI of Fire and Technological Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (067) 673-57-47, e-mail: kovalyshyn.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

^{2*} Department of Vehicle Operations and Emergency Rescue Operations, ESI of Fire and Technological Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (068) 649-08-58, e-mail: marychvolodj@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

³ Department of Life Safety, Ivan Franko National University of Lviv, 41, Doroshenka St., Lviv, 79000, Ukraine, tel. +38 (067) 785-50-49, e-mail: vfirman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

⁴ Department of Preventive Measures in Fire and Industrial Safety, Institute of Fire and Industrial Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (098) 008-43-13, e-mail: gamanbohdan2005@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0549-8373>

Abstract. Raising of the problem. The rapid spread of lithium-ion batteries in everyday life, transportation, energy systems, and digital technologies leads to an increase in a new type of fires characterized by high combustion temperatures, the release of toxic substances, and the risk of re-ignition. A particular danger is posed by the phenomenon of thermal runaway, which complicates fire localization and suppression and creates additional risks for the population and emergency responders. **Purpose of the article.** Analyze the causes of fires involving lithium-ion batteries, to investigate the mechanisms of thermal runaway development, and to determine the specific features of extinguishing such fires, as well as to summarize the results of modern scientific research on the effectiveness of various extinguishing agents and methods. **Main results of the study.** It has been established that the main causes of fires are overheating, overcharging, mechanical damage, and internal short circuits. It is determined that the key factor in fire development is thermal runaway, which is accompanied by intense heat release and the emission of flammable gases. It is proven that traditional fire extinguishing agents (powder and gas-based) have limited effectiveness, while the most efficient method is intensive cooling with water or the use of water mist. The main challenges in fire suppression have been identified, including the risk of re-ignition, fire propagation between battery cells, and difficulty in accessing the fire source. **Conclusions.** The necessity of improving fire suppression tactics involving lithium-ion batteries with an emphasis on cooling methods has been substantiated. The development of specialized extinguishing agents and technical means is proposed, along with the implementation of early thermal runaway detection systems and the improvement of firefighter training and public awareness regarding the safe use of batteries. Solving this problem requires a comprehensive approach that combines scientific research, regulatory improvements, and practical safety measures.

Keywords: fire hazard; lithium-ion batteries; fire extinguishing; extinguishing agents; occupational safety

Постановка проблеми. Стрімке зростання використання літій-іонних акумуляторів у побутовій техніці, електронному обладнанні, інструментах, системах зберігання енергії та транспортних засобах (зокрема електромобілях, електросамокатах, електровелосипедах, дронах) суттєво підвищує ризик виникнення пожеж нового типу, що характеризуються специфічними механізмами розвитку та підвищеною небезпекою для людей і рятувальних підрозділів. Літій-іонні акумулятори відзначаються високою енергетичною щільністю, що за певних умов (механічні пошкодження, коротке замикання, перегрів, порушення режимів заряджання) може призводити до явища теплового розгону, інтенсивного виділення тепла, вибухонебезпечних газів та повторного займання.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах зростання кількості електротранспорту та систем автономного енергоживлення. Пожежі за участю літій-іонних акумуляторів суттєво відрізняються від традиційних пожеж твердих або рідких

горючих речовин складністю локалізації, тривалістю горіння, ризиком повторного спалаху після видимого припинення горіння, а також необхідністю застосування значних обсягів води або спеціалізованих засобів пожежогасіння.

Проаналізуємо пожежі спричинені вибухом літій-іонних акумуляторів.

21 листопада 2025 р. виникла пожежа у м. Городок в одноповерховому складському приміщенні. Горіли літій-іонні батареї на площі 2100 м². Врятовано 3 складських приміщення. До ліквідації пожежі було залучено 70 осіб та 19 одиниць пожежної та спеціальної техніки [1].

Уранці, 14 листопада 2022 р., у м. Київ в квартирі на дев'ятому поверсі вибухнув портативний акумулятор (повербанк), який заряджався від мережі. Під час вибуху та пожежі ніхто не постраждав, проте, житло та фасад багатоповерхівки зазнали значних пошкоджень. Під час евакуації, з верхніх поверхів врятовано 12 осіб, з них 3 дитини [2].

У ніч на 28 грудня 2022 р. у Львові сталося дві пожежі, в житлових багатоповерхових будинках, які були

спричинені загорянням літій-іонними акумуляторами та інвертором. Вибухом зруйновано три стіни у двох квартирах.

Постраждав один із власників квартири 30-річний чоловік який потрапив до лікарні з сильними опіками рук [3].

Вночі 2 липня 2024 р. у с. Городилець Ковельської громади вибухнув літій-іонний акумулятор, частково пошкодивши приміщення житлового будинку та електромережу. Рятувальники зазначають, що на території району зросла кількість пожеж внаслідок використання електрогенераторів та акумуляторів [4].

14 грудня 2024 р. у Львові сталася пожежа в підвальному приміщенні триповерхового житлового будинку. Причиною пожежі рятувальники назвали вибух літійового акумулятора, що спричинив загорання речей у підвалі будинку. Ніхто не постраждав [5].

16 січня 2025 р. сталася пожежа на заводі компанії Vistra Energy (Каліфорнія США), що є одним із найбільших заводів із виробництва та зберігання акумуляторів у світі. Внаслідок пожежі в атмосферу викинулися клуби токсичного диму, що призвело до евакуації до 1500 осіб. Пожежа також сколихнула молоду індустрію акумуляторних батарейних накопичувачів [6].

27 вересня 2025 р. у Львові сталася пожежа, в квартирі у 10-поверхового будинку. Загорання виникло через літійовий акумулятор електросамоката, який залишили заряджатися на ніч. Три людини постраждали – двоє дітей та дорослий. Діти отримали отруєння продуктами горіння і опіки, дорослий – опіки рук. Постраждалих госпіталізували [7].

У Львові 4 серпня 2025 р в готелі «Власта» виникла пожежа на 6 поверсі.

Під час пожежі усіх мешканців і працівників евакуювали. Госпіталізовано шестеро осіб, один чоловік отримав сильні опіки. Після локалізації пожежі виявлено залишки літій-іонної батареї, з електросамоката. Причина пожежі, вибух літій-іонної батареї електросамокату під час зарядки його в номері готелю [8].

6 листопада 2025 у м. Івано-Франківськ, в офісному приміщенні 3-поверховому

будинку стався вибух зарядної станції, що містила літій-іонні акумулятор. Внаслідок вибуху виникла пожежа на площі до ~20 м², двоє людей отримали травми; понад 40 осіб евакуйовано з будівлі, працювали 25 рятувальників і 6 спецмашин [9].

8 березня 2026 року у вейп-шопі в Юніон-Корнер, (Шотландія) п'ятиповерховій будівлі, сталася велика пожежа, що призвело до часткового обвалення будівлі та серйозно порушило залізничне сполучення на станції, яка є найзавантаженішою в Шотландії. На місці події працювало понад 250 пожежників, які залишалися на місці події до 11 березня. Причина пожежі загорання зарядної станції, до якої було підключено велику кількість зарядних пристроїв [10].

З аналізу пожеж, небезпекою загорання є залишення без нагляду ввімкненого акумулятора під час його підзарядки. Тому перед початком використання акумуляторів необхідно уважно прочитати інструкцію до них, а для їхнього безпечного встановлення – звертатися до фахівців і дотримуватися усіх правил безпеки, у жодному випадку їх не порушуючи.

Дані пожежі літій-іонних елементів характеризуються:

- високою температурою горіння;
- повторним займанням;
- тривалим тепловиділенням;
- виділенням токсичних газів.

Застосування води можливе для охолодження, проте при наявності металевого літію існує ризик реакції з водою з виділенням водню.

Тому з аналізу можна сказати, що це актуальна проблема, яку потрібно вирішувати розробленням ефективних способів та засобів гасіння пожеж за наявності літій іонних акумуляторів з врахуванням їх особливостей.

Аналіз досліджень та публікацій. У статті [11] досліджується ефективність різних типів переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних батарей. Показано, що під час заряду-розряду можуть виникати неконтрольовані електротермічні процеси, що призводять до нагрівання, виділення газів

та пожежі. Автор аналізує ефективність водяних, порошкових і газових засобів гасіння.

У статті [12] аналізуються процеси теплового розгону літій-іонних батарей та методи їх гасіння. Проведено експерименти із використанням води та автоматичних систем пожежогасіння з борвмісними речовинами. Результати показали, що для гасіння батарей необхідне інтенсивне охолодження, а повне горіння акумулятора може тривати до однієї години.

У дослідженні [13] експериментально визначено, яким чином різні вогнегасні речовини (вода, CO₂, порошки) впливають на зниження температури циліндричних літій-іонних акумуляторів типу 18650. Встановлено, що головною проблемою є тепловий розгін, коли одна батарея може спричинити займання сусідніх елементів.

У статті [14] проведено систематичний огляд причин виникнення пожеж у літій-іонних акумуляторах. Особливістю є те, що електроліт батареї є легкозаймистим органічним розчинником, тому пожежа супроводжується виділенням тепла і газів, що ускладнює гасіння.

У роботі [15] розроблено методіку дослідження пожежної небезпеки літій-іонних батарей, включаючи визначення температур займання та швидкість поширення теплового потоку. Показано, що пожежі акумуляторів є складними через виділення кисню під час екзотермічних реакцій, що підтримує горіння навіть без доступу повітря.

У роботі [16] проведено дослідження пожежної небезпеки літій-іонних елементів типу 18650, які широко використовуються в електротранспорті, дронах і портативній електроніці. Розроблено рекомендації щодо: інтенсивності подачі вогнегасної речовини; тактики дій пожежно-рятувальних підрозділів; схем розташування сил і засобів при гасінні пожеж батарей.

У роботі [17] досліджено ефективність водяного туману з добавками для придушення теплового розгону батарей. Експерименти показали, що оптимальний водяний туман здатний зменшити

температуру батареї з 700 °C до приблизно 413 °C, значно скорочуючи час охолодження.

Дослідження [18] присвячене пожежам акумуляторів LiFePO₄, які широко використовуються у дронах, системах резервного живлення та електротранспорті. Автори встановили, що пожежі виникають через тепловий, механічний або електричний вплив, який викликає тепловий розгін і подальший вибух або горіння батарей.

У роботі [19] розглянуто явище теплового розгону, як головну причину пожеж батарей. Воно виникає через перегрів, внутрішні короткі замикання або дефекти виробництва, що може призвести до вибуху або займання акумулятора.

Дослідження ефективності гасіння легких металів різними вогнегасними речовинами представлено у роботах [20–25]. До легких металів відносяться алюміній, магній, берилій, кальцій, барій, літій і натрій які мають важливе промислове значення.

Згідно з результатами досліджень різних авторів, основні причини виникнення пожеж літій-іонних батарей є:

- перезаряд або глибокий розряд акумулятора;
- механічні пошкодження елементів батареї;
- внутрішні короткі замикання;
- перегрів або неправильна експлуатація акумуляторних систем.

Ці фактори можуть спричинити явище теплового розгону – неконтрольований процес швидкого підвищення температури батареї, що супроводжується виділенням тепла, горючих газів та токсичних продуктів горіння.

Метою статті є аналіз причин виникнення пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, дослідження механізмів розвитку теплового розгону та визначення особливостей гасіння таких пожеж, а також узагальнення результатів сучасних наукових досліджень щодо ефективності різних вогнегасних засобів і способів ліквідації пожеж акумуляторних систем з урахуванням їх конструктивних та фізико-хімічних особливостей.

Виклад основного матеріалу. Літій-іонний елемент є герметизованою електрохімічною системою з високою питомою енергією (150–300 Вт·год./кг), що обумовлює наявність значного запасу внутрішньої хімічної та електричної енергії. Поєднання горючого електроліту, активних металевих оксидів та можливості

внутрішнього короткого замикання формує комплексну пожежну небезпеку, зокрема ризик розвитку термічного розгону.

Проаналізуємо окремі конструктивні елементи, щодо ризику пожежної небезпеки. На рисунку 1 детально наведено характеристику і склад літій-іонного елемента [26].



Рис. 1. Склад літій-іонного елемента

1. Катодні матеріали (LiCoO_2 , NMC, LiFePO_4 тощо) на основі оксидів перехідних металів є термічно нестійкими при підвищених температурах ($>180\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$). Особливо небезпечними є кобальтовмісні матеріали (LiCoO_2), які мають нижчу температуру початку екзотермічних реакцій порівняно з фосфатними системами (LiFePO_4).

Основні ризики пожежної небезпеки є:

- деструкція кристалічної структури з виділенням кисню;
- екзотермічні реакції з електролітом;
- підтримання самоприскорювального горіння.

2. Анод (графіт або Si-композит) накопичує інтеркальований літій у процесі заряджання. При пошкодженні або перезарядженні можливе:

- осадження металевого літію (літієве дендритоутворення);
- пробій сепаратора;
- внутрішнє коротке замикання;
- утворення горючих газів (H_2 , CH_4 , C_2H_4).

Графіт сам по собі не є легкозаймистим за нормальних умов, проте в присутності кисню та при високих температурах підтримує горіння.

3. Електроліт (LiPF_6 + органічні карбонати) є основним джерелом горючості елемента.

Характерні небезпечні властивості:

- низька температура спалаху (приблизно $20\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$ для розчинників);
- утворення токсичних продуктів розкладу (HF , PF_5);
- висока теплота згоряння.

При нагріванні або механічному пошкодженні відбувається швидке випаровування електроліту з утворенням вибухонебезпечної парогазової суміші.

4. Сепаратор (поліетилен, поліпропілен) є полімерним матеріалом з температурою плавлення $120\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$. Пожежна небезпека цього матеріалу теплове усадження або плавлення, втрата ізоляційних властивостей, ініціювання внутрішнього короткого

замикання, руйнування сепаратора часто є пусковим механізмом термічного розгону.

5. Металевий корпус виконує функцію механічного захисту та герметизації. Проте при зростанні внутрішнього тиску:

- відбувається розгерметизація;
- можливий викид полум'я;
- існує ризик вибухоподібного руйнування.

6. Механізм розвитку термічного розгону є самоприскорювальний екзотермічний процес, що складається з таких стадій:

- локальний перегрів (механічне пошкодження, перезаряд, зовнішній нагрів);
- руйнування SEI-плівки на аноді;
- плавлення сепаратора;
- внутрішнє коротке замикання;
- екзотермічні реакції електроліту та катодного матеріалу;

– різке зростання температури (до 800–1000 °C);

– вибух або факельне горіння.

Більшість існуючих літій іонних акумуляторів використовують сполуку LiCoO₂, як катод або позитивний електрод, і графіт, подібний до того, що міститься в олівцях, як анод або негативний електрод. Більшість батарей містить рідкий електроліт, який дозволяє іонам літію переміщуватися між електродами. Електроліт складається з літєвої солі, наприклад Li [PF₆] розчиненої в органічному розчиннику, наприклад, суміші етиленкарбонату і диметилкарбонату. Коли ви розряджаєте батарею, іони літію рухаються від негативного електрода до позитивного електрода; а електрони проходять через електричний ланцюг, утворюючи електричний струм.

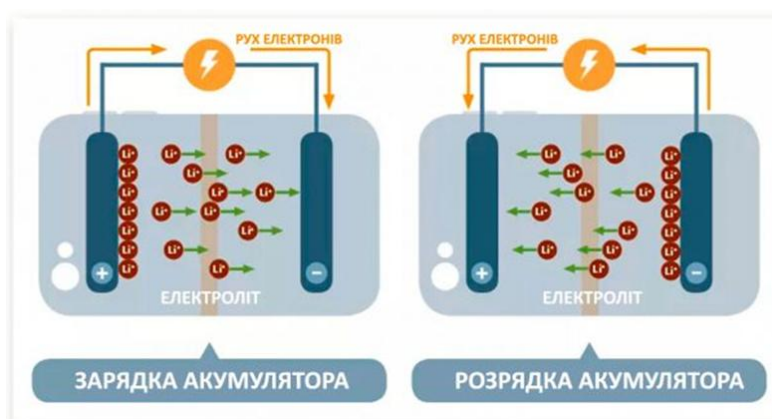


Рис. 2. Процес зарядки та розрядки літій-іонного акумулятора

Зростання використання літій-іонних акумуляторів у системах резервного живлення, зарядних станціях, павербанках та безпілотних літальних апаратах призвело до появи нових пожежних ризиків. Особливо актуально це для України в умовах блекаутів та широкого використання дронів у війні.

Особливість таких пожеж полягає у явищі теплового розгону, коли під дією температури починається ланцюгова реакція всередині акумулятора, що супроводжується виділенням горючих газів і кисню. У результаті пожежа може підтримуватися навіть без доступу зовнішнього повітря, що ускладнює її ліквідацію.

З аналізу використання традиційних засоби гасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники загального призначення) не є

ефективні. Найбільш результативним способом є інтенсивне охолодження великою кількістю води або спеціальних охолоджувальних агентів, що дозволяє знизити температуру та зупинити тепловий розгін.

Основні факторами загоряння є перегрів, перезаряд, механічні пошкодження, внутрішні короткі замикання.

Особливості пожеж літій-іонних акумуляторів мають ряд специфічних характеристик:

Висока температура горіння – під час теплового розгону температура може перевищувати 600–800 °C.

Самопідтримуване горіння – у процесі хімічних реакцій всередині батареї

виділяється кисень, що підтримує горіння навіть без доступу повітря.

Можливість повторного займання – навіть після ліквідації пожежі батарея може знову загорітися через залишкове тепловиділення.

Виділення токсичних газів – під час горіння утворюються HF, CO, CO₂ та інші небезпечні речовини.

Ланцюгова реакція між елементами батареї – займання одного елемента може призвести до поширення пожежі на весь акумуляторний модуль.

Метод моделювання висвітлений в [27] дає можливість прогнозувати час виникнення горіння АКБ з урахуванням найпоширеніших сучасних катодних матеріалів, ємності (с), заряду (к), та густини зовнішнього теплового потоку (q) від дії відкритого полум'я (1) та без нього (2):

– з катодним матеріалом NCM (літій-нікель-манган-кобальт оксид LiNi_xMnyCozO₂):

$$\tau_{\text{NCM}} = 499 - 60 \cdot k - 312 \cdot q + 83 \cdot c + 47 \cdot k \cdot q - 27 \cdot k \cdot c - 40 \cdot q \cdot c + 22 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (1)$$

$$\tau_{\text{NCM}'} = 5255 - 253 \cdot k - 3435 \cdot q + 1191 \cdot c + 169 \cdot k \cdot q - 51 \cdot k \cdot c - 773 \cdot q \cdot c + 26 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (2)$$

– з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид LiNi_xCo_yAlzO₂):

$$\tau_{\text{NCA}} = 453 - 66 \cdot k - 286 \cdot q + 86 \cdot c + 51 \cdot k \cdot q - 32 \cdot k \cdot c - 49 \cdot q \cdot c + 29 \cdot k \cdot q \cdot c, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{NCA}'} = 4750 - 225 \cdot k - 3112 \cdot q + 1096 \cdot c + 147 \cdot k \cdot q - 51 \cdot k \cdot c - 717 \cdot q \cdot c + 34 \cdot k \cdot q \cdot c; \quad (2)$$

– з катодним матеріалом LFP (літій-ферум-фосфат, LiFePO₄):

$$\tau_{\text{LFP}} = 540 - 75 \cdot k - 329 \cdot q + 103 \cdot c + 59 \cdot k \cdot q - 46 \cdot k \cdot c - 55 \cdot q \cdot c + 36 \cdot k \cdot q \cdot c, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{LFP}'} = 5520 - 249 \cdot k - 3612 \cdot q + 1276 \cdot c + 177 \cdot k \cdot q - 78 \cdot k \cdot c - 848 \cdot q \cdot c + 31 \cdot k \cdot q \cdot c. \quad (2)$$

За результатами аналізу наукових публікацій та існуючих пожеж можна виділити такі основні труднощі гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів:

1. Складність припинення теплового розгону. Навіть після застосування

вогнегасних речовин внутрішні хімічні реакції можуть продовжуватися, що ускладнює повне припинення горіння.

2. Недостатня ефективність традиційних засобів гасіння. Порошкові та газові вогнегасники (CO₂) здебільшого пригнічують полум'я, але не забезпечують достатнього охолодження батареї.

3. Необхідність інтенсивного охолодження. Більшість дослідників відзначає, що найефективнішим методом є охолодження великою кількістю води, яке дозволяє знизити температуру і зупинити тепловий розгін.

4. Ризик повторного займання. Навіть після ліквідації пожежі акумулятор може знову загорітися через внутрішні хімічні процеси.

5. Поширення пожежі на сусідні батареї. У батарейних модулях (зарядні станції, системи накопичення енергії, батареї дронів) пожежа може швидко поширюватися на інші елементи.

Рятувальники під час ліквідації таких пожеж стикаються з низкою проблем, зокрема:

– високою температурою горіння та швидким розвитком пожежі;

– небезпекою вибуху елементів акумуляторних батарей;

– інтенсивним виділенням токсичних продуктів горіння (фторовмісних сполук, чадного газу тощо);

– складністю доступу до осередку займання у батарейних модулях транспортних засобів;

– ризиком повторного займання через приховані осередки теплового розгону;

– недостатньою кількістю спеціалізованих тактичних рекомендацій та технічного оснащення.

З аналізу пожеж та досліджень, які наведені вище існують такі методами гасіння:

– інтенсивне охолодження водою;

– водяний туман;

– водяний туман з добавками;

– спеціальні системи пожежогасіння для акумуляторних модулів;

– контроль температури та системи раннього виявлення теплового розгону.

Використання пристроїв, які живляться літій-іонними акумуляторами, підвищує ризик виникнення пожеж, що потребує подальших досліджень та розробки ефективних вогнегасних речовин та методів пожежогасіння.

Також в повсякденній діяльності громадяни наражаються на небезпеку через недотримання правил експлуатації та зберігання акумуляторної техніки, використання несертифікованих зарядних пристроїв, механічні пошкодження батарей, а також відсутність належної поінформованості щодо дій у разі займання. Особливу загрозу становлять пожежі у житлових приміщеннях, на паркінгах, у громадських будівлях та під час транспортування електротехніки.

Таким чином, проблема гасіння пожеж за наявності літій-іонних акумуляторів полягає у невідповідності традиційних підходів до пожежогасіння специфіці розвитку таких пожеж, недостатній адаптації нормативно-методичної бази, обмеженості спеціалізованих технічних засобів та необхідності підвищення рівня підготовки рятувальників і обізнаності населення. Це зумовлює потребу у комплексному науковому дослідженні механізмів розвитку пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, удосконаленні тактики їх гасіння, розробленні вогнегасних речовин та превентивних заходів безпеки.

Висновки

Проведений аналіз реальних пожеж, пов'язаних із літій-іонними акумуляторами, кількість яких зростає. Встановлено, що основними причинами займання літій-іонних акумуляторів є перегрів, перезаряд,

механічні пошкодження, внутрішні короткі замикання та порушення правил експлуатації. Ці фактори можуть призводити до розвитку теплового розгону – неконтрольованого самоприскорювального процесу, що супроводжується різким підвищенням температури, виділенням горючих і токсичних газів, а також вибухонебезпечними явищами.

Аналіз результатів сучасних наукових досліджень показує, що традиційні засоби пожежогасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники) мають обмежену ефективність, оскільки вони здебільшого пригнічують полум'я, але не забезпечують достатнього охолодження акумуляторних елементів і не запобігають повторному виникненню теплового розгону.

З огляду на зростання використання літій-іонних акумуляторів у побуті, транспорті, системах автономного енергоживлення та безпілотних літальних апаратах, актуальним є подальше проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на:

- удосконалення тактики гасіння пожеж акумуляторних систем;
- розроблення нових вогнегасних речовин і технологій пожежогасіння;
- створення спеціалізованого обладнання для пожежно-рятувальних підрозділів;
- підвищення рівня обізнаності населення щодо безпечної експлуатації акумуляторних пристроїв.

Таким чином, вирішення проблеми пожеж літій-іонних акумуляторів потребує комплексного підходу, який поєднує наукові дослідження, удосконалення нормативно-методичної бази, підготовку рятувальників та впровадження сучасних технічних засобів пожежогасіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. На Львівщині понад чотири години гасили пожежу у складській будівлі. URL: <https://suspilne.media/lviv/1170870-na-lvivsini-ponad-cotiri-godini-gasili-pozezu-u-skladskij-budivli/>
2. У київській квартирі під час зарядки вибухнув павербенк. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/332827-u-kiyivskiy-kvartiri-pid-chas-zaryadki-vibuhnuv-paverbenk>
3. Вибух акумулятора у Львові зруйнував дві квартири. URL: <https://zaxid.net/shhe-odin-vibuh-akumulyatora-u-lvovi-zruynuvav-dvi-kvartiri-n1555330>

4. Вночі на Волині у будинку вибухнув акумулятор. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/vnochi-na-volyni-u-budynku-vybukhnuv-akumuliator/>
5. Неподалік центру Львова в будинку вибухнув акумулятор і сталась пожежа. URL: https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm_source=chatgpt.com
6. У Каліфорнії горить один з найбільших у світі акумуляторних заводів. URL: <https://ukranews.com/ua/news/1059154-vogon-u-kaliforniyi>
7. У Львові загорівся акумулятор електросамоката. URL: https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm_source=chatgpt.com
8. У Львові сталася пожежа в готелі «Власта». URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/u-lvovi-stalasia-pozhezha-v-hoteli-vlasta-onovleno/>
9. В офісі у центрі Франківська вибухнула зарядна станція, двоє постраждалих. URL: https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vybuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoye-postrazhdalih-n1623096?utm_source=chatgpt.com
10. Union Street fire. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Union_Street_fire?utm_source=chatgpt.com
11. Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries. *Municipal Economy of Cities*. 2024. № 4 (185). Pp. 166–171. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>
12. Un C., Aydin K. Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*. 2021. № 3. Pp. 480–497. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles3030029>
13. Lazarenko O., Pazen O., Ferents N., Adolf I., Parkhomenko V. P. Experimental determination of the effect of fire-extinguishing agents on a decrease in the temperature indicators of cylindrical lithium-ion batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. № 2. Pp. 45–53.
14. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A. Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*. 2020. № 13. Pp. 5117. URL: <https://doi.org/10.3390/en13195117>
15. Гаврилюк А., Яковчук Р. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник : цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 32–41.
16. Лазаренко О. В., Пархоменко В. П., Великий Я. Б., Посполітак В. І. Дослідження пожежної небезпеки літій-іонного елемента живлення Panasonic NCR18650B": науково-дослідна робота № 0122U200128. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. 92 с.
17. Li L., Chen Z., Lu Y., Zang P., Wang Z., Cheng Y. Study on the suppression of thermal runaway of lithium-ion battery by water mist with different additives. *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023. Vol. 45, № 4. Pp. 11349–11362. DOI: 10.1080/15567036.2023.2257613.
18. Yuan L., Tang W., Thomas R. A., Soles J. Experimental study on suppression of lithium iron phosphate battery fires. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024. Vol. 41, № 2. Pp. 637–645. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00938-y>
19. Chen Z., Zhang J., Liu C., Yang C., Chen S. Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries : a Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies. *Batteries*. 2026. № 12. Pp. 88. URL: <https://doi.org/10.3390/batteries12030088>
20. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V., Lozynskiy R. Обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 30–40. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04>
21. Ковалишин В., Марич В., Веселівський Р., Ковалишин В., Чернецький В. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 123–134. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).123-134)
22. Kovalyshyn V., Marych V., Kyryliv Y., Koshelenko V., Mirus O. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2018. № 29. С. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33>
23. Husar B., Kovalyshyn V., Marych V., Lozynskiy R., Pastukhov P. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 30–34. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05>
24. Ковалишин В. В., Гусар Б. М., Ковалишин В. В., Марич В. М. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В. Патент на корисну модель 145068 Україна : МПК (2020.01), А62D 1/00 № u 2019 11577; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020. Бюл. № 22. 3 с.
25. Kovalyshyn V., Mirus O., Marych V., Kovalyshyn V., Lozynskiy R. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2018. № 28. С. 58–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/226>
26. Whittingham M. S., Stanley B., Yoshino A. A. Retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>
27. Гаврилюк А. Ф. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів) : дис. д-ра техн. наук : 21.06.02. Львів, 2025. 395 с.

REFERENCES

1. *Na L'vivshchyni ponad chotyry hodyny hasyly pozhezhu u sklads'kiy budivli* [In the Lviv region, a warehouse fire was extinguished for over four hours]. URL: <https://suspilne.media/lviv/1170870-na-lvivsini-ponad-cotiri-godini-gasili-pozezu-u-skladskij-budivli/> (in Ukrainian).
2. *U kyiviv'kiy kvartyri pid chas zaryadky vybukhnuv paverbenk* [In a Kyiv apartment, a power bank exploded during charging]. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/332827-u-kiyvivskiy-kvartiri-pid-chas-zaryadki-vibuhnuv-paverbenk/> (in Ukrainian).
3. *Vybukh akumulyatora u L'vovi zruynuvav dvi kvartyry* [A battery explosion in Lviv destroyed two apartments]. URL: <https://zaxid.net/shhe-odin-vibuh-akumulyatora-u-lvovi-zruynuvav-dvi-kvartiri-n1555330> (in Ukrainian).
4. *Vnochi na Volyni u budynku vybukhnuv akumulyator* [At night in Volyn, a battery exploded in a house]. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/vnochi-na-volyni-u-budynku-vybukhnuv-akumulyator/> (in Ukrainian).
5. *Nepodalik tsentru L'vova v budynku vybukhnuv akumulyator i stalas' pozhezha* [Near the center of Lviv, a battery exploded in a building, causing a fire]. URL: https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm_source=chatgpt.com (in Ukrainian).
6. *U Kaliforniyi horyt' odyń z naybil'shykh u sviti akumulyatornykh zavodiv* [One of the world's largest battery factories is on fire in California]. URL: <https://ukranews.com/ua/news/1059154-vogon-u-kaliforniyi> (in Ukrainian).
7. *U L'vovi zahorivsyia akumulyator elektrosamokata* [In Lviv, an electric scooter battery caught fire]. URL: https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm_source=chatgpt.com (in Ukrainian).
8. *U L'vovi stalasya pozhezha v hoteli "Vlasta"* [A fire broke out at the Vlasta Hotel in Lviv]. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/u-lvovi-stalasya-pozhezha-v-hoteli-vlasta-onovleno/> (in Ukrainian).
9. *V ofisi u tsentri Frankivs'ka vybukhnula zaryadna stantsiya, dvoje postrazhdalykh* [In an office in central Frankivsk, a charging station exploded, injuring two people]. URL: https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vibuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoje-postrazhdalih-n1623096?utm_source=chatgpt.com (in Ukrainian).
10. Union Street fire. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Union_Street_fire?utm_source=chatgpt.com
11. Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries. *Municipal Economy of Cities*. 2024, no. 4 (185), pp. 166–171. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>
12. Un C. and Aydın K. Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*. 2021, no. 3, pp. 480–497. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles3030029>
13. Lazarenko O., Pazen O., Ferents N., Adolf I. and Parkhomenko V.P. Experimental determination of the effect of fire-extinguishing agents on a decrease in the temperature indicators of cylindrical lithium-ion batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025, no. 2, pp. 45–53.
14. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B. and Gamble G.A. Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*. 2020, no. 13, pp. 5117. URL: <https://doi.org/10.3390/en13195117>
15. Havryliuk A. and Yakovchuk R. *Metodyka eksperymental'nykh doslidzhen' povedinky lityi-ionnykh batarey pid diyeyu vidkrytoho polum'ya* [Experimental Methodology for Studying the Behavior of Lithium-Ion Batteries under Open Flame]. *Naukovyy visnyk : tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezha bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 32–41. (in Ukrainian).
16. Lazarenko O.V., Parkhomenko V.P., Velykyi Ya.B. and Pospolitat V.I. *Doslidzhennya pozhezhoi nebezpeky lityi-ionnoho elementu zhyvlennya Panasonic NCR18650B* : *Naukovo-doslidna robota № 0122U200128* [Study of the Fire Hazard of the Panasonic NCR18650B Lithium-Ion Cell : research work no. 0122U200128]. Lviv : Lviv State University of Fire Safety, 2023, 92 p. (in Ukrainian).
17. Li L., Chen Z., Lu Y., Zang P., Wang Z. and Cheng Y. Study on the suppression of thermal runaway of lithium-ion battery by water mist with different additives. *Energy Sources. Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023, vol. 45, no. 4, pp. 11349–11362. DOI: 10.1080/15567036.2023.2257613.
18. Yuan L., Tang W., Thomas R. A. and Soles J. Experimental study on suppression of lithium iron phosphate battery fires. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024, vol. 41, no. 2, pp. 637–645. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00938-y>
19. Chen Z., Zhang J., Liu C., Yang C. and Chen S. Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries : a Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies. *Batteries*. 2026, no. 12, pp. 88. URL: <https://doi.org/10.3390/batteries12030088>
20. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V. and Lozynskiy R. *Obgruntuvannya tekhnolohiyi hasinnya kombinovanykh pozhezha za nayavnosti lehkyykh metaliv chy fosforynykh spoluk* [Substantiation of technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds]. *Pozhezha bezpeka* [Fire safety]. 2024, no. 44, pp. 30–40. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04> (in Ukrainian).
21. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V. and Chernetsky V. *Optimizatsiya retseptury vohnehasnoho poroshku spetsial'noho pryznachennya dlya kombinovanoho hasinnya pozhezha klasu A, B ta D* [Optimization of the formulation of special-purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of class A, B and D fires]. *Naukovyy visnyk : tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezha bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 123–134. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).123-134) (in Ukrainian).

22. Kovalyshyn V., Marych V., Kyryliv Y., Koshelenko V. and Mirus O. *Doslidzhennya khimichnykh rehovyn, yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlya hasinnya lehkykh metaliv* [Research of the chemicals usable in fire extinguishing powder for light metal fires extinguish]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2018, no. 29, pp. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33> (in Ukrainian).

23. Husar B., Kovalyshyn V., Marych V., Lozynskyi R. and Pastukhov P. *Kombinovane hasinnya pozhezh klasu D ta A, B* [Combined extinguishing of class D, class A and class B fires]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2019, no. 35, pp. 30–34. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05> (in Ukrainian).

24. Kovalyshyn V.V., Husar B.M., Kovalyshyn V.V. and Marych V.M. *Vohnehasnyy poroshok spetsial'noho pryznachennya dlya kombinovanoho hasinnya pozhezh klasu D, A, B. Patent na korysnu model' 145068 Ukrayina : MPK (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; zayavl. 02.12.2019; opubl. 25.11.2020* [Special-purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of class D, A, and B fires. Patent for utility model. 145068 Ukraine : MPC (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; submitted on 02.12.2019; published on 25.11.2020.]. Bulletin no. 22, 3 p. (in Ukrainian).

25. Kovalyshyn V., Mirus O., Marych V., Kovalyshyn V. and Lozynskyi R. *Problemy hasinnya mahniyu ta yoho splaviv* [The problems of magnesium and its alloy extinguishing]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2016, no. 28, pp. 58–63. (in Ukrainian).

26. Whittingham M.S., Stanley B. and Yoshino A.A. Retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*. 2020, vol. 11. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>

27. Havryliuk A.F. *Rozvytok naukovykh osnov protypozhezhnoho zakhystu elektrychnykh kolisnykh transportnykh zasobiv (elektromobiliv) : dys. d-ra tekhn. nauk: 21.06.02* [Development of the Scientific Foundations of Fire Protection for Electric Wheeled Vehicles (Electric Cars) : Doctoral Dissertation in Technical Sciences, 21.06.02]. Lviv, 2025, 395 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 30.03.2026.

Прийнято після рецензування: 25.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.