

УДК 614.84:621.35

## ПРОЦЕСИ ПРИПИНЕННЯ САМОНАГРІВАННЯ ПОШКОДЖЕНИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ПОДАВАННЯМ ВОДИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-8

Трегубов Д. Г., ORCID iD 0000-0003-1821-822X

Майборода А. О., ORCID iD 0000-0001-6108-9772

Турбін Є. А., ORCID iD 0009-0005-4777-0269

Нуюнзін В. М., ORCID iD 0000-0003-4785-0814

Журбинський Д. А., ORCID iD 0009-0004-5652-4177

\*E-mail: trehubov\_dmytro@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

21.02.2026

Прийнято: 21.04.2026

Опубліковано:

30.05.2026

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

літій-іонний акумулятор, механічне пошкодження, самонагрівання, тепловий розгін, пожежогасіння, вода, охолодження, витрата, кислотність.

### АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є аналіз побудови, принципів роботи та механізмів теплового розгону літій-іонних акумуляторів; увага зосереджена на їх перевагах та недоліках, матеріалах розчинників та електродів, що використовуються, складі газової фази електродних реакцій та особливостях пожежної небезпеки. Узагальнено перебіг процесів, що спостерігаються на основних стадіях теплового розгону акумуляторів. Розроблено методологію та зібрано установку для дослідження процесів теплового розгону пошкодженого акумулятора та його гасіння. Визначено типові зовнішні механічні пошкодження акумулятора, що призводять до неконтрольованого теплового розгону. Відповідність температурного режиму процесу самонагрівання акумулятора стадіям теплового розгону визначається на основі даних вимірювання температури та візуальних спостережень. Розглянуто набір можливих хімічних реакцій, що викликають інтенсивне самонагрівання, подальше розкладання матеріалів та деформацію акумулятора. Припинення самонагрівання досліджували шляхом занурення акумулятора в ємність з надлишком води відносно стехіометричної кількості для максимальної маси металевого літію, яка може накопичуватися під час роботи акумулятора. Виділення газів реєстрували візуально, а у складі визначали водень. Вимірювали зміну кислотності отриманого водного розчину під час гасіння шляхом охолодження водою в надлишку. Встановлено залежності часу завершення реакції з водою для досліджуваного механічного пошкодження. Розраховано кількість води, необхідну для поглинання тепла, яке може виділятися під час реакцій; отримане значення корелює з експериментальними даними. Розглянуто можливі заходи щодо запобігання та зупинки горіння літій-іонних акумуляторів. Планується повторити поточну схему дослідження теплового розгону літій-іонного акумулятора, але не через механічне пошкодження, а за умов підвищеної температури навколишнього середовища та поганого теплообміну із зовнішнім простором.

**Постановка проблеми.** Сучасна концепція розвитку технічних пристроїв, вимоги до їх автономності та стабільності роботи, для можливості накопичення енергії періодичних процесів в електроенергетиці привели до широкого використання акумуляторних систем.

Вимоги до цих систем включають легкість, компактність, ефективність, пожежну, хімічну та екологічну безпеку. Найбільш ефективними та розвинутими є технології літій-іонних акумуляторів, але їх недолік – схильність до теплового розгону (самонагрівання) з ініціюванням пожежі.

Світова статистика фіксує займання таких акумуляторів під час використання та зберігання, що подекуди призводить до масштабних пожеж: у 2017 р. загорівся резервний акумулятор на електростанції біля Брюсселя з виділенням великої кількості токсичного диму [1]. У 2019 р. аномальне відкладення металевого літію в акумуляторі ініціювало його тепловий розгін та каскадну пожежу в системі акумулявання Arizona Public Service [2]; на момент прибуття рятувальників у приміщенні вже накопичилася горюча концентрація газів, що спричинило потужний вибух під час відкривання дверей. У 2024 р. кілька акумуляторів вибухнули на складі в Сеулі, загинуло 22 людини, знищено будівлі; того ж року на складі заводу SNAM (Франція) під час пожежі згоріло 900 т літєвих акумуляторів [3, 4].

Тому актуальними проблемами у даній технології є зниження ризику теплового розгону, розвиток систем охолодження акумуляторів у стаціонарних та аварійних режимах роботи, розвиток методології прогнозування можливості виникнення відповідних пожеж. Це передбачає вивчення варіантів теплового розгону окремих акумуляторів, випадків їх запалювання та розвитку масштабних пожеж. Дана робота зосереджена на аналізі стадій розвитку теплового розгону пошкодженого акумулятора та дослідженні умов ефективного гасіння під час його загоряння.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Явище теплового розгону відоме ще для лужних акумуляторів і виникає під час заряджання. За нештатних ситуацій, відсутності електроліту або його старіння, механічного пошкодження, перевищення зарядної напруги, заряджання після повної зарядки, поганих умов тепловоду – виникає підвищення температури електроліту та сили струму (через менше падіння напруги на акумуляторі), який посилюється до струму короткого замикання. Починаючи з певної сили струму виникає електроліз електроліту з виділенням водню і кисню. Кисень

поглинається кадмієвим катодом з окисненням і додатковим виділенням тепла. Підвищення температури посилює виділення газів [5], викликає роздуття акумулятора. Надалі або вибухає суміш газів [6], або починають реагувати матеріали, що контактують з перегрітим акумулятором. Водень може виділятися внаслідок пасивації кадмієвого катода. Процес протікає автокаталітично – самоприскорюється. Окремі типи літій-іонних акумуляторів мають підвищену схильність до теплового розгону, який може нагріти акумулятор до 600 °С.

Попит на Li досягає 1 млн т на рік і зростає [9], але порівняно з натрієм він є більш дефіцитною корисною копалиною. Широке використання Li зумовлене тим, що він має малий розмір атому, молярну масу, велику здатність віддавати електрони та схильність до асоціації в надмолекулярні структури, рухливість у формі іонів тощо. Li часто вводять у склад електролітів [7] та сцинтиляційних кристалів [8], електродів для неводних розчинників або у вакуумованих системах, як каталізатор полімеризації, для електропровідності, міцності і пластичності сплавів. Серед лужних металів іон Li має найбільший коефіцієнт поляризації і найменший – поляризованості. Ці властивості є корисними для зменшення розмірів і ваги акумулятора, швидкої зарядки.

Наразі основним джерелом автономного живлення є літій-іонні елементи з напругою 3,7–4,2 В, які, залежно від матеріалу анода (графіт на алюмінієвій фользі) і катода (на мідній фользі), існують у 2-х основних типах [10, 11, 12]: Li-NMC (літій-нікель-марганець-кобальт оксидний катод з вбудованими молекулами  $\text{Li}_2\text{O}$ ) та  $\text{LiFePO}_4$  (літій залізофосфатний катод) [13]. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки: обидві – мають графітовий анод; щільність енергії більша в NMC-акумуляторі – 0,2 проти 0,15 кВт·год/кг; він має плавне зниження напруги під час розряду, на відміну від  $\text{LiFePO}_4$ -акумулятору; але виділяє кисень, містить токсичні матеріали, має більшу швидкість саморозряду – 4 проти 3 %/місяць, меншу

допустиму глибину розряду – 90 проти 100 % і кількість робочих циклів – 2500 проти 5000, меншу термічну стійкість до теплового розгону – 160 проти 250 °С.

Електроліти застосовують рідкі, гелеподібні, полімерні на основі солей Li у полярному розчиннику: перхлорат, фторид, тетрафтороборат або гексафторофосфат Li у середовищі карбонатів (вініл-, етилен-, пропілен-, диметил-, диетил-, метилетил-) [10, 11, 14]. Розчинники мають різні температури плавлення  $t_{пл}$ , кипіння  $t_{кип}$ , спалаху  $t_{сп}$ , густину, в'язкість та повинні мати високу діелектричну проникність, і є середовищем руху іонів Li. Діапазон працездатності акумулятора пов'язаний з  $t_{пл}$  розчинника (37, 35, -50, -13, -14 °С для вказаних сполук; низька  $t_{пл}$  пропіленкарбонату означає менші кластери [15]);  $t_{кип}$  (243, 248, 240, 91, 126, 107 °С) визначає тиск пари,  $t_{сп}$  (160, 160, 132, 17, 33, 27 °С) – легкість запалювання. Перші 3 розчинника є горючими рідинами – небезпечні за умов перегріву, останні 3 – легкозаймистими [16, 17, 18].

У зарядженому стані система має велику щільність енергії. Пошкодження акумулятора (прокол сепаратора голчатиими дендритами літію, який за швидкої зарядки не встигає входити у структуру аноду; голчаті дефекти на мідній та алюмінієвій основах електродів) починає вивільняти цю енергію, що призводить до його розігріву, ініціює процеси випаровування або деструкції розчинника, виділення парів або газів, здуття і розриву батареї [19, 20].

Реакції з виділенням газів можуть відбуватися у приелектродних областях і в об'ємі електроліту:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $POF_3$ ,  $C_2H_5F$ ,  $PF_5$  ( $H_2 + CO$  – 70% суміш)і. Газы, що утворюються є токсичними та вибухонебезпечними. У разі розгерметизації акумулятора можливе надходження кисню повітря до розігрітого Li, що активує відповідні реакції; волога повітря може змінювати напрямок реакцій. За умови контакту з графітом і перегріву може утворитися  $Li_2C_2$ , який у присутності вологи реагує з виділенням  $H_2$  [21].

Перегрітий акумулятор може викликати самозаймання або

самоспалахування присутніх горючих речовин [16, 21]. Для партії акумуляторів самонагрівання одного з них може спричинити ланцюговий процес самонагрівання для інших. Ця проблема є більш актуальною для вживаних батарей, доцільно їх розряджати перед складуванням, можливо відновити залишкову енергію.

Етапами розвитку аварійної ситуації є наступні [22]: пошкодження акумулятора за умов теплової, електричної або механічної дії; підвищення температури до 140 °С і тиску в системі; утворення та накопичення горючих газів електролізу, плавлення сепаратора за температур 110–160 °С; коротке замикання акумулятора з тепловим розгоном і стрімким зростанням температури до 850 °С з утворенням щільного диму; самоспалахування або зовнішнє запалювання газів електролізу, парів електроліту, газоподібних продуктів розкладання або прилеглих матеріалів. За температур близько 250 °С оксиди катоду вступають у реакції диспропорціювання з виділенням кисню. За температур > 600 °С карбон графітового аноду починає окиснюватися з виділенням теплоти [23]. У певний момент плавиться алюмінієва основа електрода. Під час горіння температура акумулятора може досягати 1000 °С. Об'єм газів, що виділяються, та їх нагрів викликає здуття та руйнування корпусу батареї з вивільненням та займанням цих газів. Енергія, що виділяється під час теплового розгону зарядженого акумулятора, може бути порівняна з тротиловим еквівалентом вибуху, наприклад, для акумулятора ноутбука це становить до 50 г.

Наукові розробки з підвищення безпеки акумуляторів мають напрями: розробка технологій, які усувають можливість теплового розгону; розробка систем швидкого моніторингу аварійної та пожежної небезпеки; розробка ефективних систем охолодження та гасіння пожеж акумуляторів. Більш простими методами моделювання теплового розгону є випробування на зовнішню теплову дію [24] та імітація зовнішнього механічного пошкодження, що в цій роботі є базовим напрямом.

Необхідно розрізнити режим горіння розчинника батареї від горіння металу за теплового розгону. Для 1-го сценарію підходять типові засоби гасіння пожеж класів А, В, С, а для пожежі металу всередині щільної конструкції ефективних методів гасіння немає [25]; стандартний засіб їх – порошок спеціального призначення, що плавиться від високої температури металу та утворює плівку, яка заважає доступу кисню повітря до поверхні або виходу парів металу у зону полум'я [21]. Але типова конструкція акумуляторів не дає можливості застосовувати цей метод, оскільки немає доступу порошку до поверхні, що горить. Можна також прийняти до уваги, що під час аргонодугового зварювання для захисту металу від окиснення подають аргон [26]. Але конструкції акумуляторів і на це не розраховані, тому Ar погано ізолює і не створює достатнє охолодження ( $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$  підтримують горіння металів) [21, 27].

Достатнє теплопоглинання забезпечує вода [25], але водночас вона інтенсивно реагує з Li. Виходом з цієї ситуації для пожежогасіння є подавання води у значному надлишку для компенсації тепловиділення реакції Li з  $\text{H}_2\text{O}$  [28, 29]. Наразі розроблено потужні акумулятори з можливістю прокачування води крізь конструкцію для її охолодження за теплового розгону. Тобто, охолодження літій-іонного акумулятора водою під час теплового розгону залишається більш прийнятним методом гасіння. Для підвищення ефективності даного процесу потрібно проведення додаткових досліджень. Актуальним питанням є можливість і режими хімічної та теплової нейтралізації теплового розгону пошкодженого акумулятора надлишком води.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою роботи є проаналізувати та дослідити процеси, що відбуваються під час теплового розгону в літій-іонних акумуляторах за умов зовнішнього механічного пошкодження та під час охолодження такого акумулятора водою.

Для досягнення поставленої мети було зазначено ряд задач:

- провести моделювання та дослідити процес теплового розгону літій-іонного акумулятора за зовнішнього механічного пошкодження;

- провести охолодження літій-іонного акумулятора за умов його теплового розгону та дослідити процес пожежогасіння за умови забезпечення наявності води у надлишку.

**Методи дослідження.** Об'єктом дослідження є теплові процеси в літій-іонному акумуляторі під час теплового розгону та занурення у воду. Дослідження теплового розгону після зовнішнього механічного пошкодження і охолодження водою передбачало 3 етапи: 1) добір типу літій-іонного акумулятора і підготовка механічного пошкодження; 2) вимірювання температурного режиму самогрівання та теплового розгону в часі до займання; 3) охолодження та видалення активного металевого Li шляхом занурення акумулятора у ємність з водою у надлишку відносно маси Li для проведення реакції з врахуванням необхідності достатнього тепловідводу від осередку реакції. Достатність тепловідводу визначена розрахунками за тепловиділенням реакції літію з водою, енергією батареї та теплопоглинанням, яке забезпечує вода у рідкому стані.

Для дослідження використано літій-іонну батарею ємністю 2000 мА·год з напругою 3,7 В. Механічне пошкодження створено проколом корпусу свердлом  $\varnothing$  1 мм на глибину 1,5 мм. Отвір використано для вимірювали температури внутрішніх шарів акумулятора. Контроль температури проводили термопарою, яку було введено у внутрішні шари батареї. Через отвір термопара контактувала з активними елементами акумулятора, що дозволяло реєструвати зміну температури під час самогрівання та термічного розгону. Такий підхід також забезпечував проникнення кисню повітря та води всередину акумулятора, а також відведення газів, які утворювалися в процесі реакцій. Для контролю температури поверхні

аккумулятора застосовували безконтактний інфрачервоний термометр (радіаційний пірометр). Це забезпечило швидке виявлення критичного стану батареї – термічного розгону, який може призвести до займання або вибуху.

У ході дослідів реєстрували: час самонагрівання та горіння, характеристики полум'я, інтенсивність виділення газів, стан аккумулятора після реакції, зміни кислотності води.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження теплового розгону літій-іонного аккумулятора підготовлено установку, принципову схему якої наведено на рис. 1.

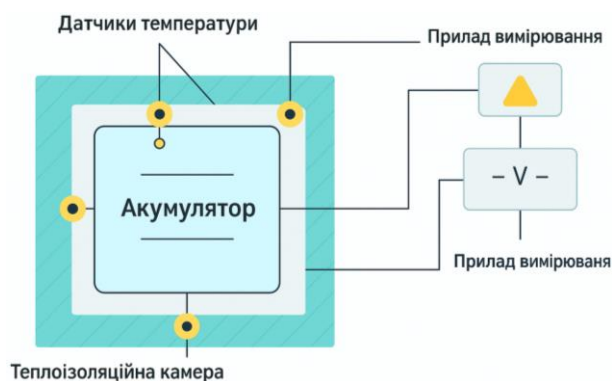


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження зміни температур всередині механічно пошкодженого літій-іонного аккумулятора

Під час дослідження самонагрівання аккумулятора ідентифіковано стадії теплового розгону і встановлено їх тривалість за умов експерименту, рис. 2: I – первинне самонагрівання до 80 °С протягом 4 с; II – деформації після нагрівання до 110 °С за наступні 1,5 с; III – початок та інтенсифікація виходу газів з місця пошкодження за наступні 11 с та температур до 150 °С; IV – починаючи зі 160 °С коротке замикання між електродами з прискореним зростанням температури без полум'яного горіння протягом 3 с; V – інтенсифікація виходу газів та їх займання за температури 310 °С через 10 с досліду у вигляді яскравого полум'я з незначною інтенсивністю димоутворення від отвору пошкодження та з шипінням.

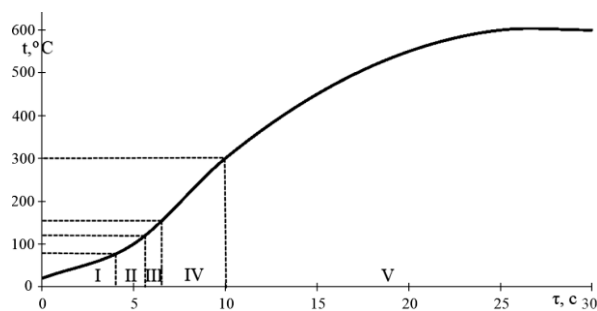


Рисунок 2 – Зміна температури механічно пошкодженого літій-іонного аккумулятора за стадіями розвитку теплового розгону

Горючі газы, що виходили з отвору пошкодження, зайнялись шляхом самоспалахування від температури перегрітого осередка реакцій. Для  $H_2$   $t_{cc} = 510$  °С, розчинник може містити естери вугільної кислоти, наприклад, диметилкарбонат, який має  $t_{cc} = 440$  °С. Тобто газы з отвору пошкодження виходили у повітря з температурою  $\approx 500$  °С. Сповільнення підйому температури на V стадії самонагрівання пов'язано зі зростанням інтенсивності тепловтрат, витрачанням реагентів у місці реакції, дифузійними ускладненнями під час горіння.

Отримані результати підтвердили, що зовнішнє механічне пошкодження літій-іонного аккумулятора може спричинити тепловий розгін, який завершується інтенсивним горінням і виділенням горючих газів. Тепловий, електричний або механічний вплив пошкоджує елементи конструкції, викликаючи зростання температури й тиску всередині комірок, що супроводжується екзотермічними реакціями, наприклад:  $4Li + O_2 \rightarrow 2Li_2O$ .

За перегріву відбувається випаровування або розкладання компонентів аккумулятора, починають виділятися горючі газы. Електроліт розкладається за реакцією:  $LiPF_6 \rightarrow LiF + PF_5$ , а пентафторид фосфору надалі гідролізується:  $PF_5 + H_2O \rightarrow POF_3 + 2HF$ . Початок теплового розгону є межею між можливістю запобігання пожежі та необхідністю здійснення її гасіння. Екзотермічні реакції (окиснення Li, розкладання електроліту) підвищують температуру до 400–600 °С. Катодні матеріали розкладаються з виділенням  $O_2$ :

$2\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{O} + 2\text{CoO} + \text{O}_2$ , що підтримує горіння карбонових та карбонвмісних компонентів будови акумулятора (сепаратора, електродів) з утворенням  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ . Жовтогаряче полум'я зумовлене згорянням літію, натрію (домішок) та карбонвмісних сполук зі складу розчинника.

Оскільки на стадії досліду 1 було досягнуто стан теплового розгону акумулятора виникла можливість для реалізації стадії 2 досліду – гасіння водою. Теоретична кількість води для припинення горіння була розрахована на основі технічних характеристик акумулятора. Накопичена електрична енергія визначається ємністю 2,0 А·год для обраного акумулятора та робочою напругою – 3,7 В; тобто – 7,4 Вт·год. Водночас відомо, що за умови повного згорання літій-іонного акумулятора виділяється близько 500 кДж теплоти на 1 Вт·год накопиченої енергії. Тоді за рівня цієї енергії 7,4 Вт·год під час пожежі виділиться 3700 кДж теплоти.

Охолоджуюча здатність води визначається теплоємністю рідкого та парового станів та її теплотою випаровування [21]. Але, оскільки для компенсації тепловиділення воду взято у значному надлишку, пароутворенням і подальшим нагріванням пари можна нехтувати. Тоді за умови нагріву води за контакту з перегрітою батареєю на 70 °С питоме поглинання теплоти складе 292,6 кДж/кг, а для поглинання повної теплоти потрібно:  $3700/292,6 = 12,65$  кг (л) води. Така кількість води забезпечує ефективне охолодження акумулятора з її нагрівом до 90–95 °С у разі достатнього теплообміну, що у досліді здійснено зануренням акумулятора в означений об'єм води. Але нагрів води відбувся до менших температур внаслідок сповільнених реакцій та не завершеного згорання акумулятора. Водночас слід враховувати, що взаємодія  $\text{Li}_2\text{O}$  водою супроводжується виділенням водню:  $2\text{Li} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{LiOH} + \text{H}_2$ , що вимагає додаткових заходів безпеки для запобігання повторному займанню. Візуально виділення  $\text{H}_2$  фіксували у вигляді бульбашок, що підіймаються крізь шар

води від отвору пошкодження. У результаті реакції формується гідроксид літію, який створює лужне середовище.

Таким чином, після досягнення критичної температури із займанням акумулятора його гасили повним зануренням у воду; застосовано водопровідну воду, що відповідає реальним умовам гасіння. Завершення реакцій тривало 2 доби через поступове проникнення води до внутрішніх шарів батареї та повільне розчинення сполук літію й кобальту. Протягом 1-ї доби рН зріс до 12, а протягом 2-ї – до 14, тобто з часом реакція гальмувалася внаслідок вичерпання літію та погіршення умов дифузії до віддалених частин акумулятора.

Після термічного розгону загоранню піддаються як окремі модулі, так і вся система накопичення енергії. Конструкція блоків батареї максимізує щільність зберігання енергії, що водночас сприяє швидкому поширенню пожежі. Після займання вогонь легко поширюється на сусідні елементи й конструкційні матеріали, що може зробити його неконтрольованим.

На перших 2-х стадіях термічного розгону є можливість припинення самонагрівання акумулятора, наступні 2-і – вимагають застосування активних заходів пожежогасіння. Для 2-ї стадії доцільно проводити ранній моніторинг виділення горючих газів у повітря з одночасним відключенням акумулятора від джерела живлення та флегматизацією середовища негорючим газом для запобігання вибуху. На 3-й і 4-й стадіях необхідний пізній моніторинг продуктів горіння у повітрі для своєчасного залучення професійних пожежних підрозділів та засобів.

Таким чином, розвиток самонагрівання батареї може призвести як до її спонтанного займання, так і до ініціювання горіння речовин, що перебувають у контакті з нею. Для гасіння важливо розрізняти складові цього процесу: відносно легко ліквідувати полум'я горючих газів об'ємними вогнегасними засобами протягом кількох секунд, однак це не зупиняє внутрішніх

реакцій. З урахуванням цього стандартні водяні вогнегасні склади не є повністю придатними для зупинення горіння акумуляторів: водяні струмені [29, 30], піни [31, 32], водяні гелі [18, 33]. У відкритих умовах для гасіння металів застосовуються спеціальні порошкові засоби, які при плавленні утворюють ізолюючу плівку [34]. Проте для складної конструкції батареї цей підхід, як й інші, є малоефективним через обмежений доступ вогнегасних речовин у внутрішні шари. Крім того, Li може горіти навіть у середовищі негорючих газів, таких як CO<sub>2</sub>.

Отже, водяне охолодження залишається більш ефективним шляхом гасіння літій-іонних акумуляторів за умови швидкого забезпечення значного надлишку води або її тривалого подавання для компенсації тепловиділення. На ранніх стадіях термічного розгону вода може застосовуватися для охолодження стінок акумуляторів. Теоретично можливе продування акумулятора інертними газами, зокрема аргонем (інертний газ з великою теплоємністю) або перфторвуглеводнями, однак останні є потужними парниковими газами тривалої дії.

**Висновки та напрями пошардших досліджень.** 1. У досліді з моделюванням механічного пошкодження літій-іонного акумулятора отримано неконтрольований термічний розгін з виділенням горючих газів та їх самоспалахуванням. Температура отвору пошкодження в момент займання становила близько 300 °C, що відповідає стадії розвитку теплового розгону «розгерметизація корпусу та утворення горючих газів». Водночас температура самоспалахування газів, що виділяються становить 440–510 °C, що передбачає наявність такої температури всередині

акумулятору біля отвору. Самонагрівання спричиняє виділення накопиченої енергії окиснення літію, розкладання електроліту і катодного матеріалу з виділенням кисню і подальшими реакціями.

2. Досліджено взаємодію батареї з водою після її займання. Експеримент показав, що реакція літію з водою йде з виділенням водню і формуванням лужного розчину, що потенційно ускладнює гасіння; цей процес тривав 2 доби. За енергетичними показниками зарядженого акумулятора та охолоджуючої здатністю води у рідкому стані оцінено її теоретичну витрату для відводу тепла від акумулятора з рівнем накопиченої енергії 7,4 Вт·год – як 12,6 л; даного обсягу виявилось достатньо для поглинання тепловиділення.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки більш ефективних заходів пожежного захисту літій-іонних акумуляторів. Рекомендовано проводити ранній моніторинг виділення газів, що дозволить своєчасно реагувати на самонагрівання та ймовірне займання, а також пізній моніторинг газів на наступних стадіях – для оперативного реагування на пожежу. Полум'яне горіння можна локалізувати розпиленою водою, хмарою інгібітора або негорючого газу, одночасно з подачею надлишкової кількості води на сам акумулятор. Пропонується розробити систему продування батареї інертним газом (Ar), що може підвищити ефективність гасіння та безпеку експлуатації.

Під час подальших досліджень передбачено повторити схему поточного дослідження теплового розгону літій-іонного акумулятора, але не внаслідок механічного пошкодження, а за умов підвищеної температури середовища та поганих умов теплообміну із зовнішнім простором.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alerte levée à Drogenbos: incendie maîtrisé, plus de risque pour la santé. *RTBF Actus*. URL: <https://www.rtbf.be/article/alerte-leeve-a-drogenbos-incendie-maitrise-plus-de-risque-pour-la-sante-9760282> (дата звернення: 12.02.2026).
2. Report: APS Declares Thermal Runaway Event Caused 2019 Battery Explosion. *Japan electric power information center – USA*. URL: <https://www.jepic-usa.org/digests/2020/7/31/usa-report-aps-declares-thermal-runaway-event-caused-2019-battery-explosion> (дата звернення: 12.02.2026).

3. Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/about-20-bodies-found-after-fire-south-korea-battery-plant-yonhap-reports-2024-06-24/> (дата звернення: 12.02.2026).
4. Significant industrial site fires strike in India and France. *Reuters*. URL: <https://www.thefpa.co.uk/news/significant-industrial-site-fires-strike-in-india-and-france> (дата звернення: 12.02.2026).
5. Підвищення пожежної безпеки гальванічного виробництва / Ю. К. Гапон та ін. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 47. С. 23–28. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10919>.
6. Technology of Safe Galvanochemical Process of Strong Platings Forming Using Ternary Alloy / Y. Hapon et al. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 233–238. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.233>.
7. Design of the modified oxide-nickel electrode with improved electrical characteristics / A. Sincheskul et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/6 (89). P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112264>.
8. Lisitsyna L., Tupitsyna I., Trefilova L. Spectral and kinetic characteristics of the luminescence center in LiF-WO<sub>3</sub> and ZnWO<sub>4</sub> crystals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. № 81/1. P. 012024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/81/1/012024>.
9. Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact / V. Balaram et al. *Geoscience Frontiers*. 2024. № 15. P. 101868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>.
10. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals / M. Hannan et al. *Journal of Energy Storage*. 2021. № 42. P. 103040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.
11. Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015. № 18/5. P. 252–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
12. Lithium and lithium ion batteries for applications in microelectronic devices / Yu. Wang et al. *Journal of Power Sources*. 2015. № 286. P. 330–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.164>.
13. Henriksen Ch., Mathiesen J. K., Ravnsb D. B. Improving capacity and rate capability of Li-ion cathode materials through ball milling and carbon coating - Best practice for research purposes. *Solid State Ionics*. 2020. № 344. P. 115152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115152>.
14. Guided Lithium Metal Deposition and Improved Lithium Coulombic Efficiency through Synergistic Effects of LiAsF and Cyclic Carbonate Additives / X. Ren et al. *ACS Energy Letters*. 2017. № 3/1. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00982>.
15. Ідентифікація кластерної будови вуглеводнів за температурами плавлення / Д. Г. Трегубов та ін. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-7>.
16. Glassman I. Combustion. London : Elsevier, 2014. 757 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05402-9>.
17. Relationship Between Properties of Floating Systems and Flammable Liquids in the Stopping Their Burning Technology / D. Tregubov et al. *Key Engineering Materials*. 2023. № 954. P. 145–155. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-KrZRd9>.
18. Molecular design for electrolyte solvents enabling energy-dense and long-cycling lithium metal batteries / Zh. Yu et al. *Nature Energy*. 2020. № 5. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0634-5>.
19. Universal chemomechanical design rules for solid-ion conductors to prevent dendrite formation in lithium metal batteries / Ch. Fu et al. *Nature Materials*. 2020. № 19 (7). P. 758–766. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0655-2>.
20. Willstrand O., Pushp M., Ingason H., Brandell D. Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*. 2024. № 143. P. 104078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104078>.
21. Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння / Д. Г. Трегубов та ін. Харків : НУЦЗ України, 2024. 422 с. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>.
22. Barowy A. The Science of Fire and Explosion Hazards from Lithium-Ion Batteries. Evanston, USA : Fire Safety Research Institute, 2023. 11 p. URL: <https://digi3fvbl0xj2a.cloudfront.net/2023-01/The%20Science%20of%20Lithium-Ion%20Batteries%20Guide%20by%20FSRI%201.pdf>.
23. Tregubov D., Miroshnichenko D., Ulanovskij M. Thermomechanochemical evaluation of quality of coke. *Koks i Khimiya*. 2004. № 11. P. 14–19.
24. IEC 62133-2:2017+A1:2021. Specifies requirements and tests for the safe operation of portable sealed secondary lithium cells and batteries containing non-acid electrolyte, under intended use and reasonable. Int. standard. 2021. 50 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/32662>.
25. Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С. Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 4 (185). С. 166–171. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>.
26. Білоус В. Ю. Наукові основи аргонодугового та електронно-променевого зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.06 / Київ, Інститут електрозварювання перспективних високоміцних титанових сплавів ім. Є. О. Патона НАН України. Київ, 2023. 453 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0523U100195>.
27. Integrated fire protection solutions for Lithium-Ion batteries. Zug : Euralarm, 2022. 37 p. URL: <https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/09/Guidance-on-Li-Ion-Battery-Protection.pdf>.
28. Liu T., Tao C., Wang X. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied Energy*. 2020. № 267. P. 115087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115087>.
29. Parkhomenko V.-P., Mykhalichko B., Parkhomenko R. Current state of use in fire firefighting and ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing solutions using wetting agents. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2025. № 1 (19). С. 79–88. DOI: [https://doi.org/10.52363/nvz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvz.2025.1(19).79-88).
30. Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water / D. Dubinin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 2/10 (92). P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
31. Fire extinguishing development directions for liquids based on the foam glass primary layer / D. Tregubov et al. *Problems of Emergency Situations*. 2024. № 2/40. P. 165–184. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-13>.
32. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids / R. Pietukhov et al. *Materials Science Forum*. 2021. № 1038. P. 374–382. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374>.

33. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition / A. Chernukha et al. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70>.
34. Comparative analysis of the influence of various dry powder fire extinguishing compositions on the aquatic environment / V. Loboichenko et al. *Water and Energy International*. 2019. Vol. 62/7. P. 63–68. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10154?locale=en>.

## REFERENCES

1. Alerte levée à Drogenbos: incendie maîtrisé, plus de risque pour la santé. (2017). *RTBF Actus*. <https://www.rtbf.be/article/alerte-levee-a-drogenbos-incendie-maitrise-plus-de-risque-pour-la-sante-9760282>.
2. Japan Electric Power Information Center – USA. (2020, July 31). *Report: APS Declares Thermal Runaway Event Caused 2019 Battery Explosion*. <https://www.jepic-usa.org/digests/2020/7/31/usa-report-aps-declares-thermal-runaway-event-caused-2019-battery-explosion>.
3. Reuters. (2024, June 24). *Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers*. <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/about-20-bodies-found-after-fire-south-korea-battery-plant-yonhap-reports-2024-06-24/>.
4. The Fire Protection Association. (2024). *Significant industrial site fires strike in India and France*. <https://www.thefpa.co.uk/news/significant-industrial-site-fires-strike-in-india-and-france>.
5. Hapon, Yu. K., Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., & Filichenko, A. S. (2020). Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky halvanichnoho vyrobnytstva [Improving the fire safety of galvanic production]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, (47), 23–28. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10919>.
6. Hapon, Y., Tregubov, D., Tarakhno, O., & Deineka, V. (2020). Technology of safe galvanic process of strong platings forming using ternary alloy. *Materials Science Forum*, 1006, 233–238. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.233>.
7. Sincheskul, A., et al. (2017). Design of the modified oxide-nickel electrode with improved electrical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(89), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112264>.
8. Lisitsyna, L., Tupitsyna, I., & Trefilova, L. (2015). Spectral and kinetic characteristics of the luminescence center in LiF-WO<sub>3</sub> and ZnWO<sub>4</sub> crystals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 81(1), Article 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/81/1/012024>.
9. Balaram, V., et al. (2024). Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 15, Article 101868. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>.
10. Hannan, M., et al. (2021). Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Journal of Energy Storage*, 42, Article 103040. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.
11. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
12. Wang, Yu., et al. (2015). Lithium and lithium ion batteries for applications in microelectronic devices. *Journal of Power Sources*, 286, 330–345. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.164>.
13. Henriksen, Ch., Mathiesen, J. K., & Ravnsb, D. B. (2020). Improving capacity and rate capability of Li-ion cathode materials through ball milling and carbon coating - Best practice for research purposes. *Solid State Ionics*, 344, Article 115152. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115152>.
14. Ren, X., et al. (2017). Guided Lithium Metal Deposition and Improved Lithium Coulombic Efficiency through Synergistic Effects of LiAsF and Cyclic Carbonate Additives. *ACS Energy Letters*, 3(1), 14–19. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.7b00982>.
15. Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., Sokolov, D. L., & Tregubova, F. D. (2021). Identyfikatsiia klasternoi budovy vuhlevodniv za temperaturamy plavlennia [Identification of the cluster structure of hydrocarbons by melting points]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(34), 94–109. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-7>.
16. Glassman, I. (2014). *Combustion*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05402-9>.
17. Tregubov, D., et al. (2023). Relationship between properties of floating systems and flammable liquids in the stopping their burning technology. *Key Engineering Materials*, 954, 145–155. <https://doi.org/10.4028/p-KrZRd9>.
18. Yu, Zh., et al. (2020). Molecular design for electrolyte solvents enabling energy-dense and long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 5, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0634-5>.
19. Fu, Ch., et al. (2020). Universal chemomechanical design rules for solid-ion conductors to prevent dendrite formation in lithium metal batteries. *Nature Materials*, 19(7), 758–766. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0655-2>.
20. Willstrand, O., Pushp, M., Ingason, H., & Brandell, D. (2024). Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 143, Article 104078. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104078>.
21. Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., Minska, N. V., & Hapon, Yu. K. (2024). *Teoriia protsesiv horinnia, vybukhu ta pozhezhozasinnia* [Theory of combustion, explosion and fire extinguishing processes]. NUCZU. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>.
22. Barowy, A. (2023). *The science of fire and explosion hazards from lithium-ion batteries*. Fire Safety Research Institute. <https://d1gi3fvl0xj2a.cloudfront.net/2023-01/The%20Science%20of%20Lithium-Ion%20Batteries%20Guide%20by%20FSRI%201.pdf>.
23. Tregubov, D., Miroshnichenko, D., & Ulanovskij, M. (2004). Thermomechanochemical evaluation of quality of coke. *Koks i Khimiya*, (11), 14–19.
24. International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 62133-2:2017+A1:2021. Specifies requirements and tests for the safe operation of portable sealed secondary lithium cells and batteries*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/32662>.
25. Havryliuk, A. F., Kovalyshyn, V. V., & Yakovchuk, R. S. (2024). Efektyvnist vykorystannia perenosnykh vohnehasnykiv pry hasinni lityi-ionnykh akkumuliatoriv [Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 4(185), 166–171. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>.
26. Bilous, V. Yu. (2023). *Naukovi osnovy arhonoduhovoho ta elektronno-promenevoho zvariuvannia perspektyvnykh vysokomitsnykh tytanovykh splaviv* [Scientific basis of argon-arc and electron-beam welding of promising high-strength titanium alloys] (Doctoral dissertation). Paton Electric Welding Institute. <https://uacademic.info/ua/document/0523U100195>.

27. Euralarm. (2022). *Integrated fire protection solutions for Lithium-Ion batteries*. <https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/09/Guidance-on-Li-Ion-Battery-Protection.pdf>.
28. 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, Article 115087. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115087>.
29. Parkhomenko, V.-P., Mykhalichko, B., & Parkhomenko, R. (2025). Current state of use in fire firefighting and ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing solutions using wetting agents. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(19), 79–88. [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).79-88).
30. Dubinin, D., et al. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10(92), 38–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
31. Tregubov, D., et al. (2024). Fire extinguishing development directions for liquids based on the foam glass primary layer. *Problems of Emergency Situations*, 2(40), 165–184. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-13>.
32. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., & Hovalenkov, S. (2021). Experimental study of the insulating properties of a lightweight material based on fast-hardening highly resistant foams in relation to vapors of toxic organic fluids. *Materials Science Forum*, 1038, 374–382. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374>.
33. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., & Bezuglov, O. (2020). Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70>.
34. Loboichenko, V., et al. (2019). Comparative analysis of the influence of various dry powder fire extinguishing compositions on the aquatic environment. *Water and Energy International*, 62(7), 63–68. <http://reposit.sc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10154?locale=en>.

## STOPPING SELF-HEATING PROCESSES OF DAMAGED LITHIUM-ION BATTERIES BY SUPPLYING WATER

**D. Tregubov, A. Maiboroda, Ye. Turbin, V. Nuianzin, D. Zhurbynskyi**

*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

### KEYWORDS:

lithium-ion battery, mechanical damage, self-heating, thermal runaway, fire extinguishing, water, cooling, consumption, acidity.

### ABSTRACT

This study object is the structure, operating principles and thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries are analyzed; attention is focused on their advantages and disadvantages, materials of solvents and electrodes used, the gas phase composition of electrode reactions, and fire hazard features. The processes course observed during the main stages of the batteries thermal runaway is summarized. A methodology is developed and a setup is assembled to investigate the damaged battery thermal runaway processes and for its extinguishing. Typical external mechanical damage to the battery that leads to uncontrolled thermal runaway is identified. The correspondence of the battery self-heating process temperature regime to thermal runaway stages determined based on temperature measurement data and visual observations. The possible chemical reactions set that cause intense self-heating, materials further decomposition, and battery deformation are considered. The self-heating cessation was investigated by immersing the battery in a container with an excess of water relative to the stoichiometric amount for the metallic lithium maximum mass that can accumulate during the battery operation. The gases release was visually recorded, and hydrogen was identified in the composition. The change in the resulting aqueous solution acidity during extinguishing by cooling with water in the excess measured. Dependencies for the reaction completion time for a investigated mechanical damage was established. The water amount required to absorb the heat that may be released during reactions was calculated; the resulting value correlates with the experimental data. Possible measures to prevent and stop burning of lithium-ion batteries are considered. It is planned to repeat the current research scheme of the lithium-ion battery thermal runaway, but not due to the mechanical damage, but under conditions of increased ambient temperature and poor heat exchange with the external space.