

ЩОДО ОБҐРУНТУВАННЯ ТАКТИЧНИХ ПРИЙОМІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯХ**Боровиков В.О.**

ГО “Українська федерація спеціалістів безпеки” (м. Київ, Україна),
фахівець із стандартизації, сертифікації та якості,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Скоробагатько Т.М.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, (м. Київ, Україна),
заступник начальника кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення,
кандидат технічних наук,

Сукач Р.Ю.

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
(м. Львів, Україна), доцент кафедри пожежної тактики та
аварійно-рятувальних робіт,
кандидат технічних наук, доцент

Войтович Д.П.

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
(м. Львів, Україна), доцент кафедри пожежної тактики та
аварійно-рятувальних робіт,
кандидат технічних наук, доцент

Лазаренко О.В.

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
(м. Львів, Україна), професор кафедри пожежної тактики та
аварійно-рятувальних робіт,
кандидат технічних наук, доцент

AS TO THE SUBSTANTIATION OF TECHNIQUE OF FIGHTING FIRES INVOLVING ELECTRIC VEHICLES**Borovykov V.**

“Ukrainian Federation of Security Experts” NGO (Kyiv, Ukraine), Specialist in standardization,
certification and quality, Philosophy Doctor, Senior Researcher

Skorobahatko T.

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine),
Deputy Head of the Department of Fire Prevention and Life Safety,
Philosophy Doctor

Sukach R.

Lviv State University of Life Safety (Lviv, Ukraine),
Associate Professor of the Department of Fire Tactics and
Emergency Rescue Works, Philosophy Doctor, Docent

Voitovych D.

Lviv State University of Life Safety (Lviv, Ukraine),
Associate Professor of the Department of Fire Tactics and Emergency Rescue Works, Philosophy Doctor,
Docent

Lazarenko O.

Lviv State University of Life Safety (Lviv, Ukraine),
Professor of the Department of Fire Tactics and Emergency Rescue Works, Philosophy Doctor, Docent

DOI: [10.5281/zenodo.13679830](https://doi.org/10.5281/zenodo.13679830)**Анотація**

З'ясовано, що на сьогоднішній день відсутні науково обґрунтовані вимоги щодо систем пожежо-гасіння об'єктів будівництва з наявністю електромобілів, а також гасіння пожеж на електромобілях із застосуванням пересувної протипожежної техніки. Показано, що найбільшою проблемою, з якою пов'язано ліквідацію пожежі на електромобілі, є гасіння літій-іонної батареї. Виявлено сформульовані раніше вимоги і підтверджено, що ані вода, ані існуючі в теперішній час газові та порошкові вогнегасні речовини промислового виробництва повною мірою ним не задовольняють. Зроблено висновок, що гасіння пожеж літій-іонних батарей та електромобілів, на яких ці батареї встановлено, має розпочинатися у максимально короткі терміни з метою уникнення вибуху батареї з її повною розгерметизацією. Обґрунтовано необхідність тривалого та ефективного охолодження літій-іонних батарей для пригнічення термічних витоків з них, а також подальшого спостереження за ними після ліквідації пожежі з метою недопущення повторного

запалювання. Визначено, що перспективним напрямом розроблення вогнегасних речовин, спеціально призначених для гасіння літій-іонних батарей, є створення вогнегасних порошків з функціональними добавками охолоджувальної дії. Однією з таких добавок є амонію-алюмінію сульфату додекагідрат $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Abstract

It was found that today there were no scientifically substantiated requirements for fire-fighting systems of construction works with the presence of electric vehicles as well as fighting fires involving electric vehicles with the use of mobile fire fighting equipment. It was shown that the greatest problem associated with the elimination of the fire involving an electric vehicle was the quenching of the lithium-ion battery. The previously formulated requirements were identified and it was confirmed that neither water nor currently existing gas and powder commercially available fire extinguishing agents did not satisfy them in full. It was concluded that fighting fires involving lithium-ion batteries and electric vehicles on which these batteries were installed should be started as soon as possible in order to avoid any explosion of the battery with its complete depressurization. The need for long-term and effective cooling of lithium-ion batteries to suppress thermal runaway from them as well as their further monitoring after eliminating the fire in order to prevent re-ignition were substantiated. It was determined that a promising trend in the development of fire extinguishing agents specially designed for extinguishing lithium-ion batteries was the creation of powders containing some functional cooling additives. One of these additives is ammonium-aluminium sulphate dodecahydrate $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Ключові слова: електромобіль, літій-іонна батарея, заряджання, термічний витік, горіння, пожежа, гасіння пожеж, вогнегасна речовина.

Key words: electric vehicle, lithium-ion battery, charging, thermal runaway, burning, fire, fire-fighting, fire extinguishing agent.

Вступ

В Україні набув чинності національний стандарт ДСТУ 9222:2023 *Пожежна безпека. Проти-пожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення* [1]. Його розробники вказують [2] на відсутність єдиних підходів і науково обґрунтованих вимог щодо протипожежного захисту автостоянок з зарядними пунктами, а також підземних паркінгів для зберігання електромобілів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

З результатами проведених аналітичних досліджень в рамках звіту [2] встановлено, що основну небезпеку серед усіх складників електромобілів являють собою літій-іонні акумуляторні батареї, причому перебіг пожежі полягає першочергово в результаті горіння газоподібних продуктів, які виходять з акумуляторних батарей унаслідок термічного витоку після їх розгерметизації. Назовні, окрім теплоти, можуть виходити кисень (O_2), водню фторид (HF), вуглецю моно- та діоксид (CO та CO_2) і ряд вуглеводнів, також можливі витоки парів, рідкої фази органічного електроліту і викидання фрагментів електродних матеріалів.

Водночас, докладної інформації щодо специфіки пожеж на самих електромобілях у доступній літературі не знайдено, надаються здебільшого лише описи пожеж, які мали місце [2]. Виявлено опис лише одного випадку, коли пожежа сталася на поромі, спорядженому спринклерною системою пожежогасіння, що забезпечила її ліквідацію. У той же час виявлено непоодинокі випадки масового переходу пожежі на електромобілі на розташовані поруч транспортні засоби. Якщо бензин займається миттєво і спричиняє негайне запалювання автомобіля з двигуном внутрішнього згорання, то у випадку електромобілів ситуація цілком інша. Горіння на літій-іонній акумуляторній батареї зазвичай триває певний проміжок часу до досягнення критичної

температури, необхідної для запалювання електромобіля.

Опис дослідів з гасіння пожеж на електромобілях у дорожніх умовах, точніше, в дорожніх тунелях, знайдено лише в роботі [3]. Відповідно, відсутні дані щодо теплового режиму таких пожеж. Так само відсутня достовірна інформація щодо горіння самих акумуляторних батарей під час перебігу пожежі і, відповідно, щодо успішності їх гасіння. Наукові публікації [4-16] містять дані про спроби застосування вогнегасних речовин різних типів для гасіння літій-іонних батарей, проте конкретних рекомендацій у них не подано. Докладніше подану в них інформацію розглянуто нижче.

Тому питання щодо вибирання вогнегасних речовин і видів систем пожежогасіння для захисту об'єктів будівництва з наявністю електромобілів, а також тактичних прийомів гасіння пожеж на електромобілях у дорожніх умовах залишається відкритим.

Мета і задачі досліджень

З огляду на вищезазначене, метою даної роботи є обґрунтування рекомендацій щодо гасіння пожеж на транспортних засобах з наявністю тягових літій-іонних акумуляторних батарей.

Матеріали та методи досліджень

Для досягнення поставленої мети авторами проведено аналітичні дослідження наявних даних щодо гасіння пожеж на літій-іонних акумуляторних батареях.

Об'єктом дослідження були процеси припинення горіння літій-іонних акумуляторних батарей.

Результати досліджень

У роботах, проведених рядом авторів, досліджувалася ефективність вогнегасних речовин різних типів під час гасіння літій-іонних акумуляторних батарей. У [12] зазначено, що характеристики процесів горіння таких батарей складні і до цього часу залишаються неповною мірою зрозумілими, що ускладнює питання щодо пошуку

ефективних засобів їх гасіння. До того ж, подати вогнегасну речовину безпосередньо всередину батарейного відсіку зазвичай дуже складно. Автори дійшли висновку, що відповідні вогнегасні речовини повинні мати високі питому теплоємність і змочувальну здатність, а також низькі в'язкість та електропровідність. Варто зауважити, що такою сукупністю фізико-хімічних властивостей навряд чи можна охарактеризувати бодай одну відому в теперішній час вогнегасну речовину промислового виробництва. Тому викладені в доступній літературі дані відображають здебільшого результати досліджень ефективності окремих видів вогнегасних речовин під час гасіння літій-іонних батарей.

Так, дослідження, описані в [11], мали за мету вивчення ефективності озонобезпечної газової вогнегасної речовини FK-5-1-12 (додекафтор-2-метилпентан-3-ону) під час гасіння літій-іонних батарей. Цю вогнегасну речовину, відому під торговою маркою "Novac 1230", було вибрано завдяки ряду переваг, забезпечуваних нею. До них належать озонобезпечність (нульовий озоноруйнівний потенціал ODP), надзвичайно низький потенціал глобального потепління (GWP), а також аномально низька (близько 4 % [17]) мінімальна вогнегасна концентрація під час гасіння більшості речовин і матеріалів. Випробування проводили з пропусканням сумішей FK-5-1-12 з повітрям через аеродинамічну трубу, в яку поміщували палаючі літій-іонні батареї. Було з'ясовано, що лише за концентрації газової вогнегасної речовини 15,2 % досягалося суттєве зниження інтенсивності полуменевого горіння, проте термічні вибоки не припинялися. Аналогічні дані наведено в роботі [14]. У роботі [18] рекомендоване навіть занурення літій-іонних батарей у середовище газових вогнегасних речовин, які за звичайних умов перебувають у рідкому стані (в тому числі й FK-5-1-12). Проте слід зазначити, що на практиці це навряд чи можливе, принаймні під час гасіння електромобілів, і, до того ж, обмежене через високу вартість таких вогнегасних речовин. На останній факт вказують також автори [19], хоча й вважають FK-5-1-12 перспективною вогнегасною речовиною для гасіння літій-іонних батарей через її високу питому теплоту випаровування.

Роботу [4] присвячено розгляду застосування поверхнево-активних речовин як добавок до води під час гасіння літій-іонних акумуляторних батарей. Дослідження проводили аналізуванням існуючих патентів щодо вогнегасних речовин і засобів їх подавання. Зокрема, розглядали застосування з цією метою рідких, твердих вогнегасних речовин, їхніх комбінацій, а також вогнегасних речовин з вмістом інкапсуляторів. Автори установили, що ефективність дії поверхнево-активних речовин може залежати від їхньої хімічної природи і застосовуваних тактичних прийомів гасіння пожежі. Водночас, "ідеальними" вони вважають вогнегасні речовини, що являють собою термочутливі гідрогелі.

Докладніше це питання розглянуте в роботі [5], автори якої вивчали механізм припинення горіння літій-іонних батарей з використанням 3 %

водного розчину міцелярного інкапсулятора F-500. Як підґрунтя для його вибору використано результати раніше проведених досліджень. В оглянутих авторами роботах зазначено здатність вогнегасних порошків припинити полуменеве горіння батарей та їх непридатність для зниження температури. Цей факт означає, що термічні вибоки з батарей не припиняться і небезпека пожежі не зникне. Того самого висновку дійшли дослідники в роботі [6]. З аналогічних причин неефективне їх гасіння діоксидом вуглецю, а також окремими озонобезпечними синтетичними газовими вогнегасними речовинами. Більшу ефективність має вода, в тому числі тонкорозпилена, яка діє переважно за рахунок охолодження і до якої можна додавати функціональні добавки. Саме з цієї причини вони рекомендують використання міцелярного інкапсулятора, здатного поглинати горючі речовини, як добавки до води під час гасіння літій-іонних акумуляторів.

У роботі [20] здійснено ряд спроб усунути недоліки тонкорозпиленої води як вогнегасної речовини додаванням до неї функціональних добавок, здатних чинити як фізичний, так і хімічний вплив на осередок горіння. Ефективність вогнегасних речовин під час гасіння визначали за такими показниками як тривалість гасіння, максимальна температура й інтенсивність тепловиділення. Підтверджено можливість підвищення вогнегасної ефективності тонкорозпиленої води додаванням функціональних добавок, зокрема, завдяки інтенсифікації охолодження та зниженню концентрації кисню в зоні горіння. Ці ефекти досягаються у разі додавання поверхнево-активних речовин, які завдяки зниженню поверхневого натягу води сприяють зменшенню розмірів утворюваних краплин. Додавання інших добавок (вочевидь, неорганічних солей) забезпечує інгібування реакцій горіння нейтралізацією вільних радикалів. Зазначено можливість досягнення синергізму у разі комбінованого застосування деяких добавок.

Деяку іншу точку зору стосовно ефективності тонкорозпиленої води як засобу гасіння літій-іонних батарей мають автори статті [8]. Вони зазначають, що вирішальне значення для їх гасіння має охолоджувальна здатність вогнегасних речовин, у зв'язку з чим ефективніша вода грубого розпилу. Більше того, більш активному контактуванню води з поверхнями батарей та інтенсифікації теплообміну сприяє її подавання на ці поверхні під надлишковим тиском. Установлено, що подавання води навіть у невеликих кількостях подовжує проміжок часу до початку термічного вибоку. Водночас, охолодження акумуляторних батарей водою сприяло збільшенню обсягів виділення водню, вуглецю монооксиду і водню фториду, послаблюючи виділення вуглецю діоксиду.

Ефективність розпиленої води під час гасіння літій-іонних батарей досліджували також у роботі [13]. Особливістю цих досліджень було те, що подавали розпилену воду переривчасто, що дало змогу підвищити ефективність охолодження літій-іонних батарей.

Здатність вогнегасних порошків швидко “збивати” полум’я, безперечно, є суттєвою їх перевагою як вогнегасних речовин. Намаганню реалізувати її зі спробою усунути такий недолік вогнегасних порошків як низька охолоджувальна здатність присвячено дослідження, описані в [21]. Вибиранню напряму досліджень передувало ретельне аналізування авторами літературних даних щодо ефективності вогнегасних речовин різних типів під час гасіння літій-іонних батарей. За його результатами вони також дійшли висновку, що використо-

вувані з цією метою речовини повинні характеризуватися як високою вогнегасною ефективністю, так і потужною охолоджувальною здатністю. Саме у названій роботі переваги та недоліки вогнегасних речовин під час застосування з цією метою викладено чи не найбільш повно і водночас стисло із зазначенням першоджерел. Зокрема, зазначено, що до теперішнього часу ефективність вогнегасних речовин під час гасіння літій-іонних батарей досліджували для чотирьох їх типів. Зведену інформацію представлено в таблиці 1. Подані дані в цілому збігаються з даними, поданими в огляді [12].

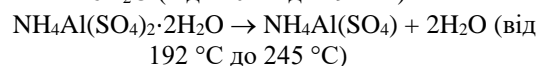
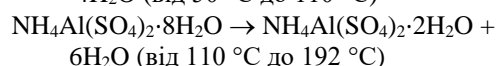
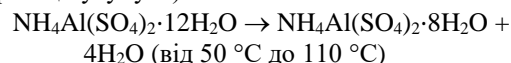
Табл. 1.

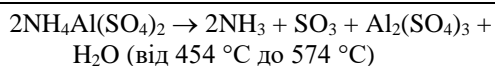
Переваги та недоліки вогнегасних речовин під час гасіння літій-іонних батарей за даними [21]

Клас вогнегасних речовин	Різновиди вогнегасних речовин	Переваги	Недоліки
Водні вогнегасні речовини	Компактні струмені води, розпилена вода, тонкорозпилена вода, повітряно-механічна піна	– Висока охолоджувальна здатність – Екологічна безпечність – Невисока вартість	– Висока електропровідність – Сприяння утворенню літійу гексафторфосфату, який розкладається з утворенням водню фториду
Газові вогнегасні речовини на основі хімічно малоактивних речовин	Вуглецю діоксид, азот	– Низька електропровідність – Відсутність нелеткого залишку	– Низька охолоджувальна здатність – Низька вогнегасна ефективність
Газові вогнегасні речовини на основі галогенопохідних органічних речовин	НFC-227ea (1, 1, 1, 2, 3, 3-гептафторпропан), FK-5-1-12 (додекафтор-2-метилпентан-3-он)	– Низька електропровідність – Висока вогнегасна ефективність – Відсутність нелеткого залишку – Помірна охолоджувальна дія	– Утворення корозійно-активних і токсичних газоподібних продуктів розкладання вогнегасної речовини (як-от водню фторид)
Вогнегасні порошки, призначені для гасіння:	твердих, рідких і газоподібних горючих речовин	– Висока вогнегасна ефективність – Невисока вартість	– Низька охолоджувальна здатність
	рідких і газоподібних горючих речовин	– Невисока вартість	
	горючих металів	– Низька електропровідність – Екологічна безпечність	

Автори дійшли висновку, що всі традиційно використовувані вогнегасні речовини не є повною мірою придатними для гасіння літій-іонних батарей, у зв’язку з чим необхідні певні інноваційні рішення. З цією метою запропоновано використовувати як один з компонентів вогнегасних порошків добавки, що зазнають під час гасіння вогню фазових перетворень, які супроводжуються інтенсивним поглинанням теплоти. Такі вогнегасні порошки, названі авторами композитними, здатні зберегти усі переваги, притаманні звичайним вогнегасним порошкам, включно з екологічною безпечністю. Водночас, фазові переходи з поглинанням теплоти дають змогу значною мірою підвищити охолоджувальну здатність вогнегасної речовини.

У ролі такої добавки авторами [21] запропоновано використання амонію-алюмінію сульфату додекагідрату ($\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (AASD), який відомий також як алюмоамонійний галун. Проведені ними термогравіметричні дослідження показали, що цей кристалогідрат у міру нагрівання втрачає воду в три стадії, після чого розкладається сама сіль (допущено авторами помилку у рівнянні останньої реакції усунуто):





теплоти під час нагрівання одного з вогнегасних порошоків серійного виробництва.

Теплові ефекти цих реакцій проілюстровано на рисунку 1, де показано також криву поглинання

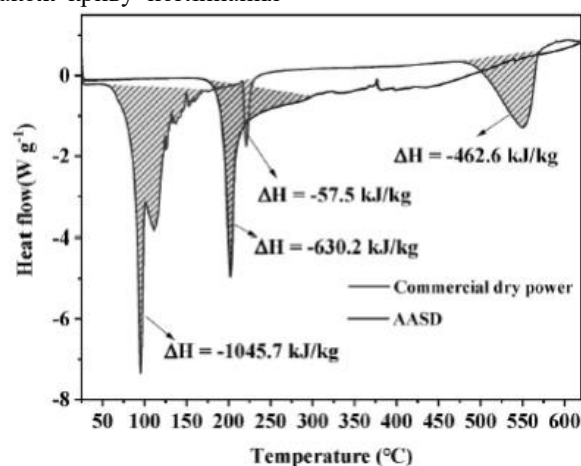


Рис. 1. Поглинання теплоти під час нагрівання амонію-алюмінію сульфату додекагідрату (AASD) і вогнегасного порошку серійного виробництва за даними [21]

Автори [21] підкреслюють, що з підвищенням температури кристалогідрат $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ поступово перетворюється на рідину, а потім, у міру втрачання води, утворює тверду корку. Як видно з рисунка 1, перший пік поглинання теплоти припадає на температуру всього лише близько 100°C . Також зазначено, що сумарні обсяги поглинання теплоти вогнегасним порошком з добавкою цього галуна хоч і менші за обсяги її поглинання водою, перевищують відповідний показник для газової вогнегасної речовини FK-5-1-12 приблизно удесятеро.

Як вже зазначалося, будь-який вогнегасний порошок інгібує реакції горіння завдяки нейтралізації вільних радикалів. Це відбувається завдяки термічному розкладанню фосфатів амонію (як правило, амонію дігідрофосфату) – активного компонента таких порошоків. Для випадку вогнегасного порошку з добавкою $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ результативну взаємодію з полум'ям можна проілюструвати такою схемою [21]:

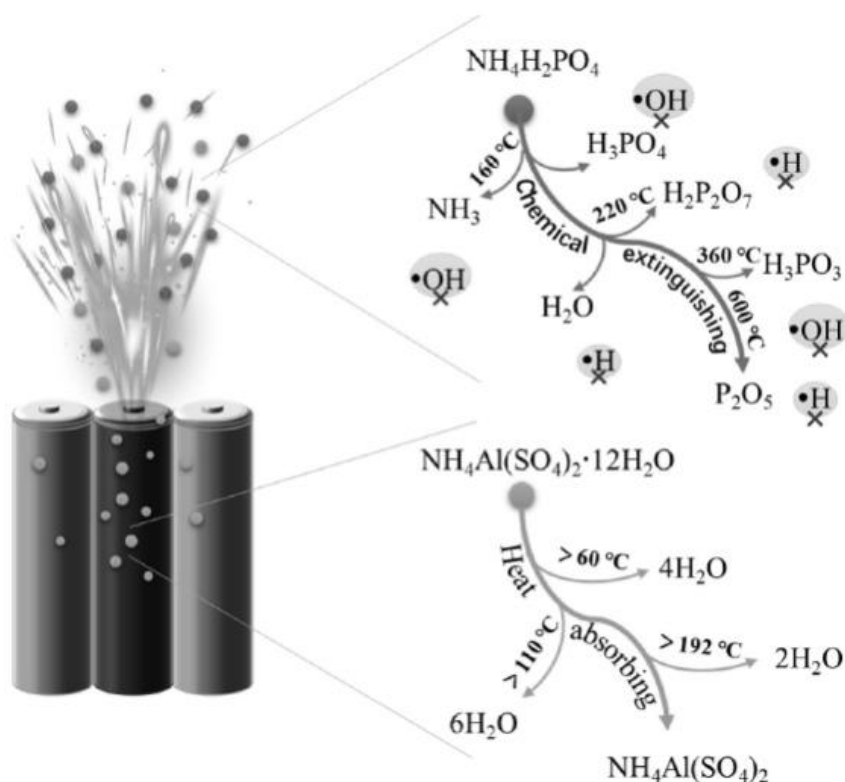


Рисунок 2 – Хімічні та фізико-хімічні перетворення під час гасіння вогню вогнегасним порошком на основі амонію дігідрофосфату з добавкою амонію-алюмінію сульфату додекагідрату

Як недолік вогнегасних порошоків з добавкою амонію-алюмінію сульфату додекагідрату вказано неможливість їх зберігання за температур понад 50 °С через початок втрачання ним гідратної води.

Роботу [22], на відміну від інших, присвячено дослідженню процесів гасіння пожеж не на окремих літій-іонних батареях, а на складі для їх зберігання. Встановлено, що термічні витoki збільшуються у міру підвищення ступеня зарядженості акумуляторних батарей. Як вогнегасну речовину для гасіння таких пожеж рекомендовано використовувати воду, а як засіб її подавання – спринклерні системи пожежогасіння. Через особливо високу пожежну небезпечність батарей із ступенем зарядженості 70-100 %, для захисту складських приміщень для їх зберігання рекомендовано використовувати системи пожежогасіння із швидкодіючими спринклерами для гасіння пожеж на початкових стадіях (ESFR).

Автори [23] також рекомендують використовувати воду для гасіння літій-іонних батарей зважаючи на низьку охолоджувальну здатність вогнегасних речовин інших типів. Водночас зазначено, що через певний час (декілька годин, одна доба і більше) після припинення подавання води можливе повторне запалювання батарей. Аби уникнути цього, автори рекомендують створювати “оболонки”, заповнені водою, для подальшого охолодження літій-іонних батарей після припинення горіння.

Нарешті, у вже згаданій роботі [3] подано результати натурних вогневих випробувань з гасіння електромобілів у дорожніх тунелях і зазначено, що такі випробування проводяться вперше. У випробуваннях використано пасажирські електромобілі 2020 року випуску, споряджені літій-іонними батареями ємністю 80 кВт·год. Зазначено, що повне охоплення батарей полум'ям відбувається на 850-ї секунді від початку пожежі, що може супроводжуватися значним посиленням тепловиділення. Дослідники встановили, що подавання струменів води з пожежних стволів безпосередньо в батарейний блок забезпечує швидке зниження температури з 420 °С до 100 °С. Такий спосіб гасіння, на відміну від використання пожежних покривал, визнано ефективним.

Обговорення результатів досліджень

Отже, підходи до протипожежного захисту об'єктів з наявністю електромобілів стаціонарними системами пожежогасіння можуть значною мірою відрізнятися від підходів, застосовуваних у випадку автомобілів традиційних конструкцій.

З викладеної вище інформації стає зрозумілим, що гасіння пожеж на електромобілях можна умовно поділити на два процеси: гасіння конструкційних елементів та електропроводки самого транспортного засобу і гасіння літій-іонної акумуляторної батареї. Для гасіння конструкційних елементів та електропроводки придатні традиційно застосовувані вогнегасні речовини і тактичні прийоми. Що стосується літій-іонних акумуляторних батарей, то найважливішим складником

ліквідації пожеж на них є пригнічення витоків горючих речовин. З цією метою необхідне ефективне і довготривале охолодження, метою якого є пригнічення термічних витоків. Температура, до якої батареї необхідно охолодити, залежить фізичних та хімічних властивостей використовуваних електролітів і катодних матеріалів. Водночас, можна з упевненістю стверджувати, що вона має бути суттєво нижчою за температуру кипіння електроліту. В першому наближенні її можна прийняти такою, що не перевищує 100 °С, але це питання потребує докладнішого вивчення для батарей кожного типу.

Серед усіх типів вогнегасних речовин, які традиційно використовуються для гасіння пожеж стаціонарними системами пожежогасіння, найбільш придатними для гасіння літій-іонних батарей і самих електромобілів є водні вогнегасні речовини. Відповідно, для захисту автостоянок закритого типу (паркінгів), насамперед місць заряджання електромобілів, за інших однакових умов найбільш придатні спринклерні системи. Як відомо, їх першочергове призначення – обмеження розвитку пожежі і недопущення збільшення її площі. За таких умов остаточна ліквідація горіння зазвичай здійснюється первинними засобами пожежогасіння (насамперед вогнегасниками) або пересувною протипожежною технікою (пожежними автомобілями).

Спонукальними елементами спринклерних систем, які є основним видом систем водяного пожежогасіння, є самі спринклери, які спрацьовують над осередком пожежі під його тепловим впливом. Їх необхідно проектувати згідно з EN 12845 [24], беручи до уваги взаємодію з системами протидимного захисту, як це вказано в CEN/TS 12101-11 [25]. Використовувати швидкодіючі спринклери для гасіння пожеж на початкових стадіях, рекомендованих для захисту складів літій-іонних акумуляторних батарей, у випадку паркінгів, на нашу думку, недоцільно. Таку недоцільність зумовлено тим, що надходження води, яка подається спринклерами, всередину салону і, тим більше, під капот електромобіля малоімовірно, принаймні на початкових стадіях пожежі. Зважаючи на це, а також беручи до уваги фактичну неефективність газових вогнегасних речовин і звичайних вогнегасних порошоків під час гасіння літій-іонних акумуляторних батарей, завершувати гасіння пожежі у разі займання останніх необхідно із застосуванням первинних засобів пожежогасіння. З викладених вище даних стає зрозумілим, що з цієї метою обов'язково забезпечити охолодження батарей до температур, за яких припиняються витoki газоподібних продуктів з них. Якомога швидше охолодження важливе також для того, щоб не допустити вибухання батарей і займання органічного електроліту і, головне, металічного літію.

Зважаючи на високу токсичність газоподібних продуктів згоряння, що виділяються з літій-іонних батарей під час термічних витоків, під час гасіння пожеж на електромобілях пересувною протипожежною технікою потрібно дотримуватися

відповідних вимог щодо забезпечення безпеки. Зокрема, залежно від обставин можуть знадобитися засоби індивідуального захисту органів дихання аж до ізолювальних протигазів.

На сьогоднішній день серед усієї номенклатури використовуваних вогнегасних речовин найбільш придатними є засоби на водній основі. Додавання до води функціональних добавок, які уповільнюють її спливання з поверхонь, може підвищити ефективність гасіння пожежі. Це можуть бути згадані вище гелеутворювальні композиції, також, на нашу думку, можуть бути ефективні розчини водорозчинних полімерів, наприклад, натрійкарбоксиметилцелюлози. Водночас, використання подібних вогнегасних речовин обмежується як технічною складністю їх приготування, так і вкрай обмеженими строками зберігання.

Гасіння пожежі (на автостоянках або в дорожніх умовах) необхідно розпочинати якомога швидше задля уникнення вибуху літій-іонної батареї. В усіх випадках після гасіння пожежі потрібне спостереження за електромобілем, на якому вона сталася, через можливість повторного запалювання цієї батареї. З цією метою можна було б користуватися такими прийомами як контролювання температури, вимірюваної дистанційно. Пропонований спосіб охолодження тягової літій-іонної батареї електромобіля зануренням у вогнегасну речовину видається практично нездійсненним з точки зору технічної складності і небезпечності, а в окремих випадках також через надзвичайно високу вартість такого рішення.

Розроблення нових видів вогнегасних речовин для гасіння літєвих батарей, безумовно, є перспективним напрямком робіт, спрямованих на пошук способів швидкої та ефективної ліквідації пожеж на електромобілях. Одними з них є вогнегасні порошки з добавками на зразок кристалогідратів, які втрачають воду за відносно невисоких температур. Вважаємо, що пропозиція авторів роботи [21] щодо використання з цією метою амонію-алюмінію сульфату додекагідрату є цілком перспективним, хоча й не єдиним, варіантом. Температура 50 °C, за якої розпочинається втрата ним кристалізаційної води, характерна для обмеженої кількості регіонів планети і, зокрема, практично ніколи не досягається в більшості європейських країн. Це означає, що у разі зберігання із забезпеченням належних умов мікроклімату вогнегасні порошки з його вмістом можна розглядати як цілком перспективні засоби гасіння літій-іонних батарей. Водночас, для цього потрібно провести окремі прикладні дослідження з розроблення рецептур і довести виробництво таких вогнегасних порошоків до промислових масштабів.

Як вже зазначалося, амонію-алюмінію сульфату додекагідрат з підвищенням температури поступово перетворюється на рідину, яка в міру втрати води трансформується в суху корку. Відповідно, вогнегасний порошок з його вмістом може забезпечити припинення полуменевого горіння і, завдяки прилипанню, утворення “захис-

ної оболонки” на літій-іонній батареї, здатної забезпечувати певну охолоджувальну дію. Реалізація цих переваг разом з низькою електропровідністю вогнегасного порошку можуть зумовити доцільність застосування саме таких вогнегасних речовин у разі гасіння пожеж на електромобілях пересувною протипожежною технікою. Те саме стосується вогнегасників, проте для цього потрібно не тільки розробити вогнегасні порошки, але й обґрунтувати та унормувати вимоги до самих вогнегасників відповідного призначення.

Висновки

За результатами проведених аналітичних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Вогнегасні речовини, використовувані для гасіння пожеж на літій-іонних батареях, повинні мати високі питому теплоємність і змочувальну здатність, а також низькі в'язкість та електропровідність. Установлено, що вода, а також усі види сучасних вогнегасних речовин серійного виробництва повною мірою таким вимогам не відповідають. З'ясовано перспективність застосування з цією метою водних вогнегасних речовин, які характеризуються підвищеною адгезією до поверхонь корпусів літій-іонних батарей. Цього можна досягти додаванням відповідних гелеутворювальних добавок або водорозчинних полімерів. Також виявлено практичну відсутність результатів досліджень або натурних випробувань з гасіння пожеж на електромобілях.

2. Виходячи з даних літературних джерел, а також логічних міркувань, для гасіння більшості конструкційних матеріалів електромобілів придатні ті самі вогнегасні речовини і тактичні прийоми, що й для гасіння пожеж на транспортних засобах з двигунами внутрішнього згорання. Відсутність рідкого або газоподібного палива може бути чинником, який полегшує виконання цієї задачі. Разом з тим, для гасіння літій-іонної батареї потрібно забезпечити якомога більш швидке та ефективне її охолодження, а також спостереження за батареєю до моменту, коли внаслідок охолодження термічні витрати уповільняться або припиняться і повторне її запалювання стане неможливим.

3. Обґрунтовано перспективність розроблення вогнегасних порошоків з функціональними добавками, які надають ним охолоджувальну здатність і забезпечують адгезію до відповідних поверхонь. Такі вогнегасні речовини можуть поєднати в собі переваги, притаманні звичайним вогнегасним порошкам (насамперед здатність інгібувати ланцюгові реакції горіння) і засобам охолоджувальної дії. Подібною добавкою може бути в тому числі амонію-алюмінію сульфату додекагідрат, досліджений в одній з наукових робіт, або інші кристалогідрати, які втрачають воду за порівняно низьких температур. Зважаючи на кліматичні умови більшості регіонів світу, вогнегасні порошки з добавкою названої хімічної речовини можуть зберігатися на складах тривалий час і застосовуватися у пожежогасінні.

Список літератури

1. ДСТУ 9222:2023 “Пожежна безпека. Проти-пожежний захист систем зарядки електромобілів” / [Чинний від 2023-11-01.] // Наказ від 15.05.2023 №104 // ДП “УкрНДНЦ” – 2023 р. – 16 с.
2. Звіт про науково-дослідну роботу “Обґрунтування вимог пожежної безпеки до електрозаправних станцій (ЕЗС)”. Кер. Фещук Ю.Л. К., ІДУ НД ЦЗ ДСНС України, 2022. – 311 с. – Реєстр. №0121U112129.
3. P.Sturm, P.Föbleitner, D.Fruhwirt, R.Galler, R.Wenighofer, S.Franz Heindl, S.Krausbar, O.Heger. Fire tests with lithium-ion battery vehicles in road tunnels. *Fire Safety Journal*. 2022. 134, 103695. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103695>.
4. J.Zhang, T.Fan, C.Chang, K.Wang, Z.Song, X.Qian. Patent-based technological developemts and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent. *Journal of Energy Chemistry*. 2024. 88. pp. 39-63. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.037>.
5. S.Yuan, C.Chang, Y.Zhou, R.Zhang, J.Xhang, Y.Liu, X.Qian. The extinguishing mechanisms of a micelle encapsulator F-500 on lithium-ion battery fires. *Journal of Energy Storage*. 2022. 55, Part A, 105186. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105186>.
6. X.Meng, K.Yang, M.Zhang, F.Gao, Y.Liu, Q.Duan, Q.Wang. Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate battery. *Journal of Energy Storage*. 2020. 30, 101532. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101532>.
7. J.Sun, B.Mao, Q.Wang Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery. *Fire Safety Journal*. 2021. 120, 103119. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103119>.
8. L.Zhang, Q.Duan, Y.Liu, J.Xu, J.Sun, H.Xiao, Q.Wang. Experimental investigation of water spray on suppressing lithium-ion battery fires. *Fire safety Journal*. 2021. 20, 103117. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103117>.
9. P.Ping, Q.Wang, P.Huang, J.Sun, D.Kong, C.Chen. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*. 2015. 285. pp. 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.035>.
10. J.Xie, S.Qiao, Y.Wang, J.Sui, L.Bao, H.Zou, T.Li, J.Wang. Three-in-one fire-retardant poly(phosphate)-based fast ion-conductor for all-solid-state lithium batteries. *Journal of Energy Chemistry*. 2023. 80. pp. 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.12.053>.
11. A.O.Said, S.I.Stoliarov. Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent. *Fire Safety Journal*. 2021. 121, 103296.
12. S.Yuan, C.Chang, S.Yan, P.Zhou, X.Qian, M.Yuan, K.Liu. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. 62. pp. 262-280. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.031>.
13. X.Meng, S.Li, W.Fu, Y.Chen, Q.Duan, Q.Wang. Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires. *Transportation*. 2022. 11, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100142>.
14. Y.Liu, K.Yang, S.Li, F.Gao, Q.Duan, J.Sun, Q.Wang. The efficiency and toxicity of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one in suppressing lithium-ion battery fire. *Journal of Energy Chemistry*. 2022. 65. pp. 532-540. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.05.043>.
15. H.Wang, H.Xu, Z.Zhang, Q.Wang, C.Jin, C.Wu, C.Hu, J.Hao, L.Sun, Z.Du, Y.Li, X.Feng. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway: A comparative study. *eTransportation*. 13, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100190>.
16. M.Held, M.Tuchs Schmidt, M.Zennega, R.Figi, C.Schreiner, L.D.Meller, U.Welte, M.Kompatscher, M.Hermann, L.Nachef. Thermal rynaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. 165, 112474.
17. EN 15004-2:2020 Fixed firefighting systems – Gas extinguishing systems – Part 2: Physical properties and system design of gas extinguishing systems for FK-5-1-12 extinguishant (ISO 14520-5:2019, modified).
18. F.Liu, Q.Hu, C.Jiang, Y.Xu, P.Yan, X.Sui. The suppression performance of fluorinated cooling agents on the Lithium-ion Batteries fire based on the Accelerating Rate Calorimeter (ARC). *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. 42, 101877. <https://doi:10.1016/j.tsep.2023.101877>.
19. X.Li, K.Du, Y.Zhu, Z.Zhou, X.Zhou. Dry water: Toward an ideal extinguishant for lithium-ion battery fire. *Journal of Energy Storage*. 2024. 80, 110204. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110204>.
20. W.Wang, S.He, T.He, T.You, T.Parker, Q.Wang. Suppression behavior of water mist containing compound additives on lithium-ion batteries fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. 161. – pp. 476-487. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.062>.
21. X.Li, M.Zhang, Z.Zhou, Y.Zhu, K.Du. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium ion battery fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. 42, 102756. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102756>.
22. J.Xie, J.Li, J.Wang, J.Jiang. Fire protection design of a lithium-ion battery warehouse based on numerical simulation results. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2022. 80, 104885.
23. Y.Cui, J.Liu, X.Han, S.Sun, B.Cong. Full-scale experimental study on suppressing lithium-ion battery pack fires from electric vehicles. *Fire Safety Journal*. 2022. 129, 103562.
24. EN 12845:2015+A1:2019 Fixed firefighting systems – Automatic sprinkler systems – Design, installation and maintenance.
25. CEN/TS 12101-11:2022 Smoke and heat control systems – Part 11: Horizontal flow powered ventilation systems for enclosed car parks.