

TECHNICAL SCIENCES

ПРОТИПОЖЕЖНИЙ ЗАХИСТ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА ЗА НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ, Україна), начальник науково-дослідного центру, доктор технічних наук, професор

Климась Р.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ, Україна), начальник відділу, кандидат технічних наук

Слуцька О.М.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ, Україна), начальник сектору, кандидат технічних наук, старший дослідник

Балло Я.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ, Україна), заступник начальника відділу, кандидат технічних наук, старший дослідник

Фещук Ю.Л.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ, Україна), заступник начальника науково-дослідного центру, кандидат технічних наук, старший дослідник

FIRE PROTECTION OF CONSTRUCTION WORKS WITH THE PRESENCE OF ELECTRIC VEHICLES

Nizhnyk V.,

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine), Head of the Research Center, Doct. of Sc. (Eng.), Professor

Klymas R.,

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine), Head of the Department, Cand. of Sc. (Eng.)

Slutska O.,

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine), Head of the Sector, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Research Fellow

Ballo Ya.,

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine), Deputy Head of the Department, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Research Fellow

Feschuk Yu.

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection (Kyiv, Ukraine), Deputy Head of the Research Centre, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Research Fellow

Анотація

Установлено, що зростаючі обсяги виробництва та продажу електромобілів загострюють проблеми, пов'язані з забезпеченням пожежної безпеки об'єктів з їх наявністю. Виявлено відсутність єдиних підходів і науково обґрунтованих вимог щодо протипожежного захисту автостоянок із зарядними пунктами, а також підземних паркінгів для зберігання електромобілів. З'ясовано, що горіння літій-іонних батарей відбувається переважно внаслідок виділення з них горючих газоподібних речовин через термічні витоки або розгерметизацію батарей унаслідок механічних впливів. Проведено моделювання температурних полів під час вільного горіння електромобіля «Tesla Model S» та визначено протипожежні відстані до прилеглих будівельних конструкцій і сусідніх припаркованих транспортних засобів, за яких поширювання пожежі від електромобіля стає практично неможливим. На основі результатів моделювання, а також аналізування наукових публікацій і нормативних документів, обґрунтовано положення національного стандарту щодо протипожежного захисту систем заряджання електромобілів.

Abstract

It was established that the growing amount of production and sales of electric vehicles aggravated the problems associated with ensuring fire safety of facilities with their presence. The lack of uniform approaches and scientifically substantiated requirements for fire protection of parking lots with charging points as well as underground parking lots for storing electric vehicles was revealed. It was found that the burning of lithium-ion batteries

occurred mainly as a result of the release of flammable gaseous substances from them due to thermal runaway or depressurization of the batteries as a result of mechanical impacts. Simulation of the temperature fields during the free burning of a "Tesla Model S" electric car was conducted and fire separation distances to adjacent building structures and adjacent parked vehicles were determined at which the spread of fire from the electric car became virtually impossible. Based on the results of the simulation as well as the analyzing some scientific publications and regulatory documents, the provisions of the national standard regarding fire protection of electric vehicle charging systems were substantiated.

Ключові слова: електромобіль, заряджання, літій-іонна акумуляторна батарея, пожежа, протипожежна відстань, температура, термічний витік.

Keywords: electric vehicle, charging, lithium-ion battery, fire, fire safety distance, temperature, thermal runaway.

Вступ

Як відомо, обсяги продажу електромобілів у світі постійно зростають. Так, за даними компанії Canalys [1], навіть 2020 року, коли мали місце економічна криза та зниження сумарних обсягів продажу легкових автомобілів у світі на 14 %, обсяги реалізації електромобілів зросли на 39 %. Прогнозується, що до 2030 року майже половину всіх легкових автомобілів, що продаються у світі, становитимуть саме вони. Навіть якщо ці дані занадто «оптимістичні», тенденція очевидна і це означає щонайменше необхідність створення розвиненої мережі автостоянок і зарядних станцій для електромобілів. Їх необхідно створювати з урахуванням специфіки пожежної небезпеки, притаманних таким транспортним засобам, і забезпечувати належний протипожежний захист. Не менш актуальною є необхідність розроблення тактичних прийомів гасіння пожеж на електромобілях, що можуть виникнути в будь-яких точках під час їх руху.

Загальновідомою [2] є тенденція до збільшення обсягів використання полімерів у виготовленні автомобілів. Водночас відомо, що електромобілі відрізняються від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння більшими обсягами використання електричних проводів і кабелів, а також (що головне) наявністю літій-іонних акумуляторних батарей. Вогнегасні речовини та тактичні прийоми гасіння пожеж, під час яких відбувається горіння твердих (у тому числі таких, що можуть розплавлятися) горючих матеріалів і горючих (легкозаймистих) рідин відомі та перевірені практикою. Це означає, що гасіння конструкційних елементів (пластмасові деталі, обшивка салону, електропроводка тощо) практично будь-яких колісних транспортних засобів, як правило, не пов'язане з особливими труднощами.

Натомість, горіння літєвих батарей зазвичай пов'язане з явищами, що значною мірою ускладнюють його ліквідацію. Наглядною ілюстрацією цього є той факт, що проект міжнародного стандарту щодо класифікації пожеж [3], розроблений на заміну чинним нормам ISO 3941:2007 [4], передбачає віднесення пожеж із горінням літєвих батарей до окремого класу. Варто зауважити, що подібний підхід традиційно застосовуваною практикою не є, оскільки основними класифікаційними ознаками є хімічна природа й агрегатний стан горючих матеріалів. Перша причина цього полягає в особливостях горіння літєвих батарей, про які йдеться нижче. Друга, і більш значима причина, – це той факт, що

в такому разі можливе одночасне горіння твердих (у тому числі металічного літію), рідких і газоподібних речовин. Їх гасіння може потребувати застосування вогнегасних речовин різних видів, що можуть бути несумісними як між собою, так і з горючими матеріалами, насамперед із літієм. Літій є лужним металом, взаємодія якого з водою (найширше застосовуваною вогнегасною речовиною) супроводжується утворенням водню. Змішування водню з повітрям, що містить кисень, може призводити до утворення вибухонебезпечних сумішей.

У результаті виконання науково-дослідної роботи [5] було з'ясовано, що лише під час заряджання електромобілів упродовж 2021-2022 років у світі сталося близько 1000 пожеж, а 2023 року їх кількість досягла 700. Причинами загоряння були несправності в акумуляторних батареях, зарядних станціях, а також короткі замикання в електропроводці транспортних засобів. Достовірних статистичних даних щодо загоряння електромобілів під час руху, а також унаслідок дорожньо-транспортних пригод знайдено не було, проте такі випадки також непоодинокі. Вочевидь, зростання кількості електромобілів у світі неодмінно супроводжуватиметься збільшенням кількості їх пожеж. Такі пожежі і надалі матимуть місце як під час заряджання, так і внаслідок нормальної експлуатації або дорожньо-транспортних пригод. Виключити інші причини виникнення пожеж на них (наприклад, підпали, запалювання під впливом зовнішніх джерел теплового випромінювання) також неможна.

Відтак, актуальними є питання як зниження рівня пожежної небезпечності самих електромобілів, так і обґрунтування вимог щодо забезпечення пожежної безпеки місць їх заряджання та зберігання. Розв'язання першої задачі може бути досягнуте першочергово удосконаленням конструкцій літій-іонних акумуляторних батарей та електропроводки; вони не є предметом цього дослідження. Те саме стосується обладнання зарядних стацій для електромобілів. Натомість, обґрунтування вимог щодо забезпечення пожежної безпеки місць заряджання та зберігання електромобілів має за мету першочергово недопущення перекидання вогню на інші об'єкти. Воно досягається, насамперед, забезпеченням обґрунтованих протипожежних відстаней. Не менш актуальними питаннями є гасіння пожеж на електромобілях. Воно в свою чергу може здійснюватися як первинними засобами пожежогасіння (переважно вогнегасниками), так і стаціонарними системами пожежогасіння.

Отже, мають місце принципи відмінності як пожежної небезпечності, так і перебігу пожеж між електромобілями й автомобілями, спорядженими двигунами внутрішнього згоряння [6]. Тому обґрунтування вимог щодо забезпечення пожежної безпеки місць заряджання та зберігання електромобілів, а також їх спорядження стаціонарними системами протипожежного захисту є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Враховуючи викладені вище факти, для обґрунтування заходів щодо забезпечення пожежної безпеки за наявності електромобілів першочергову увагу слід приділити літій-іонним акумуляторним батареям. Саме наявність цих пристроїв є принциповою відмінністю електромобілів і, відповідно, характеру їхньої пожежної небезпечності, від колісних транспортних засобів інших типів. Варто зауважити, що використання саме таких (літій-іонних) батарей зумовлене високою питомою щільністю енергії, зберігання якої вони можуть забезпечувати. Зокрема, автори роботи [7] вказують, що за показником щільності запасеної енергії вони поступаються лише ядерним джерелам. Чим більшими є геометричні розміри й ємність літій-іонних акумуляторних батарей, тим більшу пожежну небезпеку вони являють собою. Порівняно з свинцево-кислотними, нікель-кадмієвими й іншими акумуляторними батареями, літій-іонні відрізняються також відсутністю так званого ефекту пам'яті, швидкістю заряджання та тривалим терміном експлуатації [8, 9].

У роботі [10] зазначено, що незважаючи на низьку частоту випадків виходу літій-іонних батарей із ладу (приблизно один випадок на 40 млн. пристроїв), проблема виникнення аварійних ситуацій за їх наявності є значимою. Найпоширенішою причиною втрати герметичності, витоків, запалювання та, навіть, вибухання літій-іонних батарей, зумовлених унікальністю їхнього складу, названо їх неналежну експлуатацію [11, 12]. Це, зокрема, перегрівання, надмірне заряджання, занурення в воду (особливо морську), пробивання отворів у батареях, механічні удари та, навіть, їх стискання. Причиною короткого замикання, яке врешті решт може призвести до таких явищ, іноді є утворення дендритів літію під час нормального експлуатування батарей [13]. Окрім виникнення пожежі, можливі термічні та хімічні небезпеки [14], причому в міру збільшення щільності енергії завдяки технологічним досягненням вони зростають [15].

В усіх цих роботах, а також численних літературних джерелах, посилення на які подано в них, ідеться про термічний витік із літєвих батарей під впливом високої температури, для чого може бути достатньо декількох секунд [8]. У результаті розгерметизації можуть утворюватися та виходити назовні теплота, а також такі токсичні та/або горючі продукти як кисень (O_2), водню фторид (HF), вуглецю моно- та діоксид (CO та CO_2) і ряд вуглеводнів. Зрозуміло, що за певних умов можливі витoki

парів, рідкої фази органічного електроліту або, навіть, викидання фрагментів електродних матеріалів. Особливу небезпеку являють собою випадки, коли літій-іонні акумуляторні батареї підключені одна до одної у великій кількості, у результаті чого стає можливим їх каскадна (послідовна) розгерметизація [14].

Якісний і кількісний склад цих продуктів залежать як від типу літєвої акумуляторної батареї, тобто хімічного складу електродних матеріалів та електроліту, так і від умов термічного впливу на неї. Більше того, має місце залежність якісного та кількісного складу цих продуктів від ступеня зарядженості батареї. У будь-якому разі склад продуктів, що виділяються з літій-іонної батареї внаслідок її розгерметизації, цілком інший, ніж під час пожеж на транспортних засобах, споряджених традиційно використовуваними свинцево-кислотними акумуляторними батареями. Інтенсивний термічний витік із літій-іонних акумуляторних батарей можливий вже за їх температури $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, для чого достатньо внутрішнього короткого замикання. Струмені продуктів, що виходять з батареї, можуть займатися, а температура полум'я сягає $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Більше того, всі зусилля, спрямовані на удосконалення конструкцій літій-іонних батарей, до цього часу не дали змоги значною мірою послабити несприятливі явища, пов'язані з термічним витоком [16].

У роботі [17] зазначено, що обсяги виділення теплової та хімічної енергії у разі розгерметизації та запалювання літій-іонної батареї можуть багаторазово перевищувати обсяги накопиченої в ній електроенергії. Водночас, інтенсивність тепловиділення під час горіння повністю зарядженої батареї майже дорівнює інтенсивності тепловиділення під час горіння автомобільного бензину. Додатковою проблемою є можливість повторного загорання акумуляторної батареї після припинення горіння [17]. Автори [18], посиляючись на ряд літературних джерел, зазначають, що температури кипіння більшості електролітів, використовуваних у таких батареях, не перевищують $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. З цієї причини їх скипання, спрацювання запобіжних клапанів і вихід назовні різноманітних хімічних речовин можливі вже за порівняно невисоких температур. Більше того, стає можливою окислювально-відновлювальна реакція між катодним та анодним матеріалами у разі підвищення температури до $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наслідком є утворення великих кількостей названих вище газоподібних речовин, що виходять із батарей у вигляді турбулентних потоків з надзвуковою швидкістю. За таких умов можливі як пожежі, так і вибухи, а також інтенсивне забруднення приміщень і прилеглих ділянок небезпечними хімічними речовинами [19]. У названій роботі зазначено, що компонентний склад газоподібних продуктів, що утворюються внаслідок термічного витоку з літій-іонних акумуляторних батарей, значною мірою залежить як від використовуваних електродних матеріалів, так і від ступеня їх зарядженості. Так, частка водню може становити 5-30 %, частка вуглецю

моно- та діоксиду – 5 %-30 % і 20 %-90 %, відповідно. На частку вуглеводнів (метану, етилену, пропену, етану, бутену, пропану, бутану) припадає від 0 % до 9 %. Водночас, докладної інформації щодо специфіки пожеж на самих електромобілях у доступній літературі не знайдено.

Підсумовуючи вищевикладене, залишається незрозумілим питання, яким чином забезпечувати пожежну безпеку об'єктів будівництва за наявності таких станцій і автостоянок, а також транспортних засобів на цих автостоянках. Це стосується першочергово обґрунтування й унормування протипожежних відстаней між зарядними станціями для електромобілів та іншим транспортними засобами та будівельними конструкціями. Також потребують унормування вимоги щодо спорядження таких об'єктів системами протипожежного захисту, зокрема, системами пожежогасіння.

Мета і задачі досліджень

Метою роботи було наукове обґрунтування підходів до протипожежного захисту об'єктів будівництва за наявності електромобілів, у тому числі місць з наявністю електрозарядних станцій для них. Її досягнення дало змогу:

- виявити прогалини в існуючих нормах, що не дають можливості їх ефективного застосування для протипожежного захисту об'єктів із наявністю електрозарядних станцій;
- змодельовати температурні поля під час вільного горіння електромобіля;
- обґрунтувати протипожежні відстані між зарядними станціями для електромобілів і будівельними конструкціями, а також між електромобілями, що заряджаються, й іншими транспортними засобами на автостоянках;
- унормувати вимоги щодо протипожежного захисту систем заряджання електромобілів.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження були процеси розвитку пожеж на електромобілях і температурні поля під час їх перебігу.

Для моделювання пожежі на електромобілі користувалися програмним забезпеченням FDS (Fire Dynamics Simulator), що моделює розвиток пожежі на основі обчислювальної гідродинамічної моделі тепломасопереносу під час горіння. Розглядали процеси вільного горіння окремо встановленого електромобіля після його загоряння від літій-іонної акумуляторної батареї.

Для обґрунтування вимог щодо забезпечення пожежної безпеки електрозарядних станцій для електромобілів проводили аналітичні дослідження з використанням результатів проведеного моделювання. Протипожежні відстані визначали розрахунком, керуючись національним стандартом [20] через брак аналогічних міжнародних та європейських норм. Цей документ було розроблено раніше за участю ряду авторів цієї роботи в результаті аналітичних досліджень.

Результати досліджень

Аналізування вимог існуючих норм щодо протипожежного захисту об'єктів з наявністю електрозарядних станцій та обґрунтування вимог національного стандарту щодо їх протипожежного захисту

З розвитком мережі зарядних станцій та автопарку електромобілів виникла необхідність у забезпеченні належного рівня пожежної безпеки під час процесу їх заряджання. Натомість, до останнього часу відповідних норм в Україні не існувало. Знайти нормативні документи, що б установлювали єдині вимоги на європейському або міжнародному рівні, також не вдалося. З огляду на це, виникла потреба в першочерговому унормуванні вимог щодо облаштування машино-місць для електромобілів.

На сьогоднішній день нормування розміщення електрозарядних станцій в Україні передбачене п. 10.8.33 будівельних норм [21], де встановлено вимоги до кількості електрозарядних станцій (ЕЗС), кількості електротранспорту на одне місце заряджання, наведено класифікацію ЕЗС. Водночас, вимоги щодо забезпечення пожежної безпеки до таких об'єктів не встановлено. Це означає відсутність нормування таких параметрів як клас вогнестійкості будівельних конструкцій, на яких може встановлюватися зарядний пристрій, а також мінімальна протипожежна відстань від ЕЗС до суміжних об'єктів. Більше того, не унормовано вимоги щодо улаштування протипожежних перешкод, застосування систем протипожежного захисту та первинних засобів пожежогасіння тощо. Відповіді на ці питання не дає навіть Зміна № 2 до будівельних норм [22], якою встановлено, що не менше ніж 5 % машино-місць від загальної кількості у гаражах та автостоянках слід виділяти для облаштування зарядними пристроями для припаркованих електромобілів.

Аналізування вимог [23] з урахуванням пожежної небезпечності літій-іонних акумуляторних батарей дає підстави стверджувати, що передбачена категорія надійності електропостачання не відповідає рівню пожежної безпеки ЕЗС. Не містять відповідних положень і такі основоположні документи як Правила улаштування електроустановок [24], Правила пожежної безпеки в Україні [25], Правила пожежної безпеки для підприємств і організацій автомобільного транспорту України [26]. Останнім документом встановлено лише вимоги щодо роботи з акумуляторними батареями без диференціації за їх типами.

В Європі чинні ряд стандартів щодо елементів електрозарядних станцій для електромобілів, проте загальноєвропейських норм щодо забезпечення їхньої пожежної безпеки також не виявлено. Це не виглядає дивно, зважаючи на велику кількість європейських країн і розмаїття вимог національних нормативних документів. Водночас, у Великобританії, яку, на нашу думку, можна вражати лідером у сфері передових підходів щодо забезпечення пожежної безпеки та протипожежного захисту, чинні настанови [27], що регламентують низку важливих моментів. Вони містять рекомендації щодо оціню-

вання ризиків від систем заряджання електромобілів, а також необхідність передбачення достатньої площі для безпечного паркування транспортних засобів у визначеній зоні для заряджання та підключення до зарядного обладнання. Крім того, вони передбачають необхідність урахування ряду інших чинників, а також обмеження, метою яких є гарантування умов для безпечного заряджання літій-іонних акумуляторних батарей залежно від місця розташування ЕЗС. На додаток, рекомендовано розглянути питання щодо доцільності передбачення стаціонарних спринклерних систем пожежогасіння для захисту місць заряджання електромобілів. У

проектуванні таких систем слід враховувати той факт, що горіння літій-іонних акумуляторних батарей може тривати кілька годин, упродовж яких має бути забезпечене живлення спринклерної системи водою. Для випадків, коли спринклерні системи з тих чи інших міркувань можуть бути непридатними, рекомендовано використання систем пожежогасіння інших типів.

Інформацію щодо ризику виникнення пожежі залежно від місць розташування пунктів заряджання електромобілів згідно з [27] наведено в таблиці 1 (термінологію змінено для приведення відповідно до стандартизованої).

Табл. 1.

Ризик виникнення пожежі на електрзарядних пунктах для електромобілів залежно від місць їх розташування

Розташування	Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки і протипожежного захисту	Рівень ризику
Підземні паркінги	- улаштування автоматичної системи пожежогасіння - улаштування системи димовидалення - забезпечення доступу для пожежно-рятувальних підрозділів - відведення води, використовуваної для пожежогасіння	
Відкриті території загального користування	- передбачення механічного захисту (бордюри, тумби або бильця) для електрзарядних пунктів - кріплення зарядного кабелю - улаштування системи відеоспостереження	
Внутрішні простори будівлі (перший поверх і вище)	- передбачення автоматичної системи пожежної сигналізації з мультисенсорними пожежними сповісниками - улаштування автоматичної системи пожежогасіння - улаштування системи димовидалення - спорядження вогнегасниками - поділ на протипожежні відсіки	
Покриття будівлі	- спорядження вогнегасниками - відведення води, використовуваної для пожежогасіння	
Відокремлені спеціалізовані будівлі	- передбачення автоматичної системи пожежної сигналізації - спорядження вогнегасниками - передбачення легкоскридних конструкцій (у т.ч. покриття будівлі) - улаштування системи димовидалення - дотримання протипожежних відстаней до інших будівель	
Відкриті площі з охороною	- передбачення механічного захисту (бордюри, тумби або бильця) для електрзарядних пунктів - кріплення зарядного кабелю - спорядження вогнегасниками	

У результаті аналізування положень вищезазначених, а також інших норм, правил і рекомендацій зроблено висновок [5], що національний стандарт щодо протипожежного захисту систем заряджання електромобілів має містити науково обґрунтовані вимоги щодо:

- розміщення систем заряджання електромобілів в інфраструктурі населених пунктів, зокрема в гаражах, на автостоянках, електрзарядних станціях, у тому числі суміщених з автозаправними станціями;
- улаштування протипожежних перешкод між машино-місцями з зарядними станціями для елект-

ромобілів або електрзарядними пунктами та суміжними об'єктами, зокрема, суміжними транспортними засобами під час процесу заряджання електромобілів;

- протипожежних відстаней;
- застосування систем протипожежного захисту та первинних засобів пожежогасіння в гаражах з машино-місцями із зарядними станціями для електромобілів, на автостоянках та електрзарядних станціях з електрзарядними пунктами;
- будівельних конструкцій, на яких встановлюються зарядні станції для електромобілів.

Модельовання температурних полів під час горіння електромобіля

Як відомо, дотримання належних протипожежних відстаней між суміжними об'єктами – основний захід щодо недопущення поширювання пожежі між ними. Натомість, як вже відзначалося, існуючі документи протипожежні відстані між ЕЗС і суміжними об'єктами будівництва, а також іншими транспортними засобами, що заряджаються, – не регламентують. Для їх обґрунтування обрано параметричний метод, який згідно з українським законодавством є пріоритетним і передбачає можливість досягнення необхідного рівня безпеки з урахуванням усіх суттєвих характеристик об'єкта. Його, як правило, реалізують аналізуванням сценаріїв можливої пожежі в кожному із суміжних об'єктів за найнебезпечнішим сценарієм її розвитку з математичними розрахунками за допомогою відповідних програмних комплексів (у цьому випадку – FDS) або фізичним моделюванням і подальшою верифікацією.

У цій роботі протипожежні відстані між системами заряджання електромобілів та суміжними об'єктами для автостоянок і закритих гаражів проводили моделюванням теплового впливу на суміжні об'єкти під час пожежі на електромобілі під час його заряджання. Зокрема, визначали можливий температурний вплив від пожежі електромобіля на місці його заряджання на автостоянці до суміжної будівлі (перший сценарій). За другий сценарій пожежі прийнято займання електромобіля в закритому паркінгу.

FDS-моделювання теплового впливу на суміжні об'єкти під час пожежі передбачало такі етапи:

1) опис розрахункового методу формування математичної моделі розвитку пожежі;

2) загальні положення й опис вихідних даних, що включало:

– опис фізичних характеристик суміжних об'єктів;

– вибір місцеположення початкового осередку пожежі та закономірностей її розвитку;

– задавання параметрів навколишнього середовища та початкових значень параметрів як усередині приміщень, так і на відкритих ділянках;

– моделювання динаміки розвитку пожежі;

– задавання критеріїв для оцінювання;

3) аналізування одержаних результатів і формулювання висновків.

Програма FDS моделює [28, 29] сценарії пожежі з використанням обчислювальної гідродинамічної моделі (CFD), оптимізованої для температурно-залежних потоків, що рухаються з невисокими швидкостями. Такий підхід чисельно розв'язує рівняння Нав'є-Стокса для таких потоків з приділенням основної уваги поширюванню диму, а також теплопередачі під час пожежі. Основним алгоритмом є схема методу «пре диктор-коректора» другого порядку точності за координатами та часом. Пряме чисельне моделювання (DNS) можна виконувати, якщо закладена в основі розрахункова сітка досить точна. У більшості випадків у FDS застосовується одноступінчаста хімічна реакція, результати якої передають через двопараметричну модель «частки в суміші». «Частки в суміші» відповідають масовій частці одного або більше компонентів газу в певній точці потоку. За замовчуванням розраховуються два компоненти суміші: масова частка незгорілих речовин і продуктів згоряння.

Модель урахує променистий теплообмін розв'язанням рівняння переносу випромінювання для газоподібних речовин і, для деяких обмежених випадків, з використанням широкодіапазонної моделі. Коефіцієнти поглинання випромінювання сажею та димом розраховуються за допомогою вузькосмугової моделі RADCAL. Геометрія FDS розв'язує основні рівняння на прямокутній сітці.

На всіх твердих поверхнях задаються теплові граничні умови, у тому числі дані щодо горючості матеріалів. Тепло- і масоперенесення із поверхні й назад розраховується за допомогою емпіричних співвідношень. Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується спеціальна програма SmokeView.

Під час формування математичної моделі динаміки розвитку пожежі використовують систему рівнянь Нав'є-Стокса [29], що складається з двох рівнянь:

– рівняння руху;

– рівняння нерозривності потоку.

У векторному вигляді для нестисливого середовища їх записують у такий спосіб (формули 1-4):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q_{rad} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_k \quad (4)$$

де: t – час;
 ρ – густина;
 V – вектор відносної швидкості;
 p – парціальний тиск;
 μ – молекулярна динамічна в'язкість;
 μ_t – турбулентна динамічна в'язкість;
 λ – коефіцієнт теплопровідності суміші;
 Pr_t – турбулентне число Прандтля;
 S – початковий член рівняння;
 Sc – число Шмідта;
 Sc_t – турбулентне число Шмідта;
 C_p – теплоємність суміші за постійного тиску;
 h – статична ентальпія;
 Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння;
 Q_{rad} – член рівняння, що описує зміну енергії за рахунок дії теплового випромінювання.

Під час моделювання температурних полів у цій роботі виходили з припущення, що пожежа вільно розвивається впродовж усього проміжку часу моделювання (720 с). Цей проміжок часу відповідає сумі унормованого в Україні проміжку часу до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на місце пожежі (до 600 с) і розгортання сил та засобів (до 120 с). Початкову температуру повітря і конструкційних матеріалів приймали за 20 °С, а температуру полум'я в будь-який момент часу вважали однаковою для всієї поверхні конструкцій електромобіля. Швидкість повітряних потоків поблизу електромобіля приймали нульовою. Ступінь чорноти полум'я приймали за 1, а ступінь чорноти конструкційних матеріалів суміжного об'єкта будівництва – за 0,8.

Під час створення комп'ютерної моделі електромобіля за основу взято «Tesla Model S», параметри якого приймали згідно з [30]. Параметри процесів горіння літій-іонного акумулятора такого автомобіля приймали згідно з [31]. У цій роботі зазначено, що максимальна температура під час вільного горіння батареї становить 850 °С-1200 °С, а загальна тривалість вільного горіння зазвичай

більша за 80 хв. Найвищі значення температури й інтенсивності тепловиділення відповідають проміжку часу приблизно від 10-ї до 22-ї хвилини, і саме цей проміжок часу обрали за основу під час моделювання. Під час створення розрахункової моделі враховано дослідження [32], де було доведено, що сумарне тепловиділення в результаті пожежі, як правило, у 18-20 разів більше за фактичну енергетичну ємність акумуляторної батареї. Відповідно, для досліджуваної моделі електромобіля сумарні обсяги тепловиділення в результаті пожежі можуть досягати 3 ГДж. Саме на це значення орієнтувалися під час створення моделі. Нижчу теплоту згоряння конструкційних матеріалів автомобіля приймали згідно з [33], а характеристики конструкційних матеріалів будівель і споруд – згідно з [34]. За температуру займання матеріалів електромобіля прийнято температуру самозаймання синтетичних тканин, що дорівнює приблизно 160 °С.

За критерій неможливості поширювання пожежі на прилеглі об'єкти будівництва (перший сценарій) приймали граничну температуру на середині висоти вікна над поверхом пожежі 450 °С [35] для глухих стін і 120 °С [36] для вікон із рамами, виконаними з полімерних матеріалів.

Для моделювання температурних полів під час пожежі електромобіля в закритому паркінгу його стіни та перекриття приймали виконаними з монолітного залізобетону. Вважали, що прорізи в стінах відсутні, системи протипожежного захисту не передбачені або вони не спрацьовують. За критерій відсутності поширювання пожежі на сусідні транспортні засоби (другий сценарій) приймали неможливість перевищення температурою їхніх пластикових елементів значення 220 °С. За таких умов їх запалювання не відбувається [37].

Фрагмент створеної моделі з кутовою стіною та вимірювачами теплового потоку в чотирьох напрямках показано на рисунку 1. Моделювання температурних полів проводили для всього проміжку часу вільного горіння (720 с).

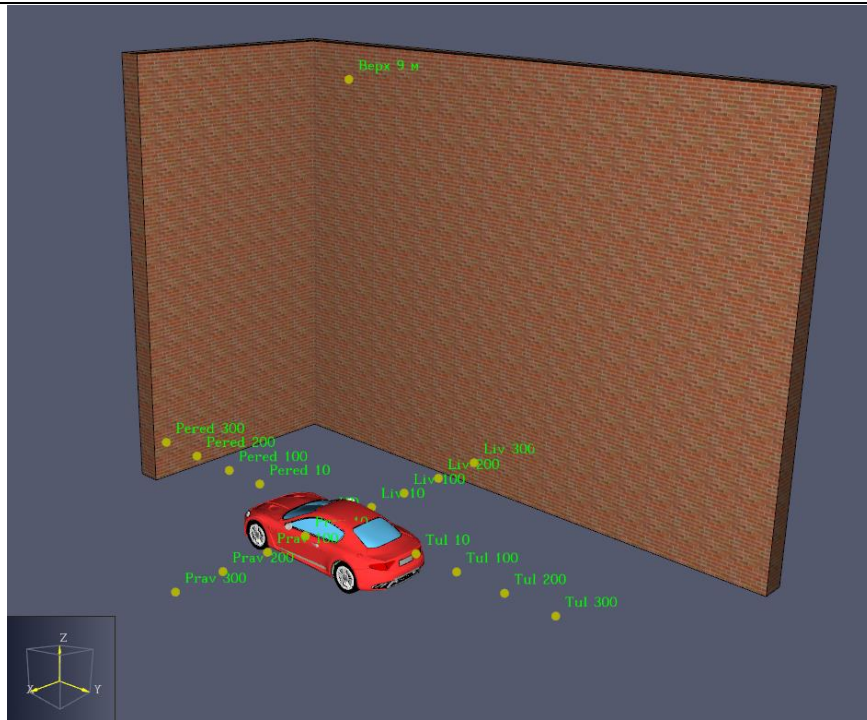


Рис. 1. Фрагмент створеної моделі відкритої автостоянки із кутовою стіною та вимірювачами теплового потоку

На рисунку 2 для прикладу показано результати моделювання температурного розподілу на 600-й секунді вільного горіння електромобіля.

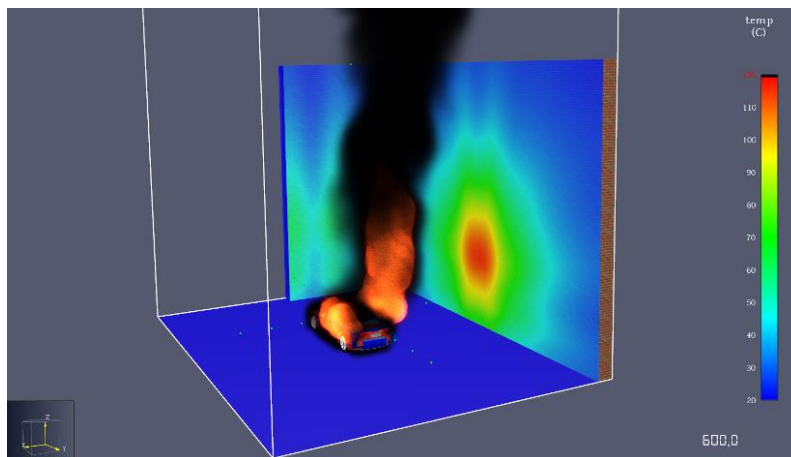


Рис. 2.

Фрагмент моделювання розвитку пожежі електромобіля на відкритій автостоянці на 600-й секунді

За результатами першого етапу моделювання визначено, що мінімальна протипожежна відстань від електрозарядного пункту й електромобіля до стіни будівель різного функціонального призначення повинна становити не менше ніж 3 м. Це дає змогу запобігти поширюванню пожежі від електромобіля як фасадною системою будівлі, так і всередині її приміщень у разі проникнення крізь світлові прорізи.

На другому етапі моделювання створено модель закритого паркінгу, в об'ємі якого розташовано електромобіль, що є осередком пожежі, а також розміщено інші транспортні засоби. Фрагмент моделювання температурних полів для прикладу показано на рисунку 3 для 610-ї секунди вільного горіння.

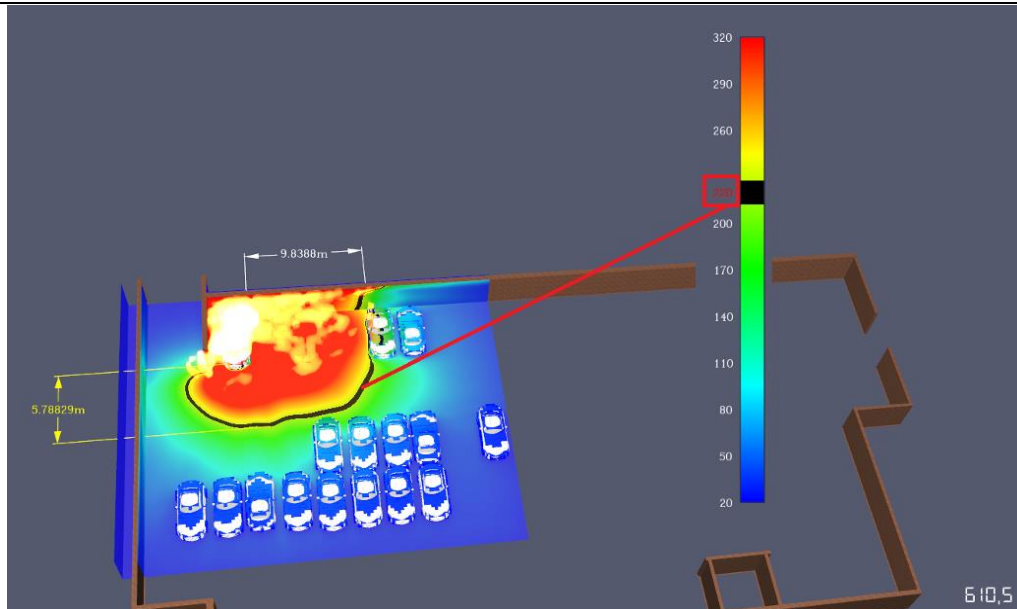
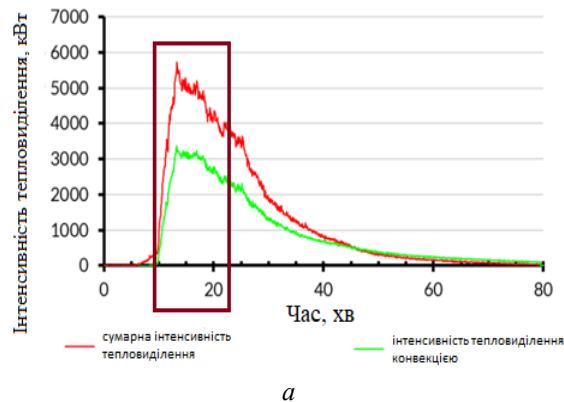


Рис. 3. Тепловий розподіл від пожежі електромобіля в закритому паркінгу на 610-й секунді

За результатами проведеного моделювання встановлено, що бокове поширювання критичної температури величиною 220°C в результаті пожежі електромобіля за таких умов моделювання відбувається на відстань до 10 м, а фронтальне поширювання температурних розподілів у межах до 220°C досягає 6 м. Враховуючи можливість поздовжнього та поперечного паркування автомобіля, прийнято найбільше значення протипожежної відстані, а саме 10 м.



Для аналізу адекватності одержаних результатів проводили моделювання процесів тепловиділення під час горіння літій-іонної акумуляторної батареї та їх порівняння з експериментальними даними [31]. Установлено, що відхил значень температури, визначених моделюванням, для кожного моменту часу не перевищував 16 %, що вказує на задовільну збіжність (рисунок 4).

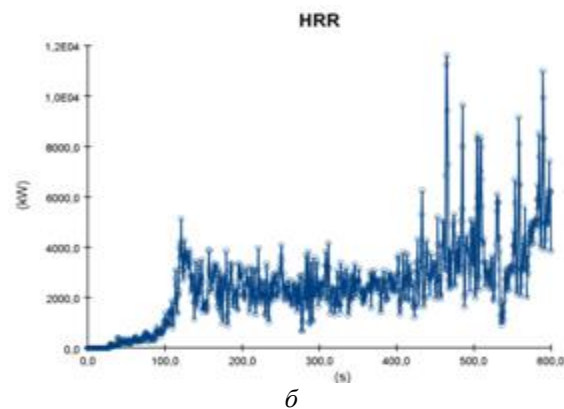


Рис. 4. Інтенсивність тепловиділення горіння тягової літій-іонної батареї електромобіля:
а – експериментальні дані [31]; б – результати моделювання

Одержані залежності та значення температурних впливів стали підґрунтям для розроблення вимог щодо забезпечення пожежної безпеки. Зокрема, ці дані використано під час розроблення національного стандарту ДСТУ 9222:2023 [38]. Стандартом передбачено, що в гаражах (паркінгах) електрозарядні пункти необхідно об'єднувати в групи (з вільним заїздом) та відокремлювати від суміжних машино-місць для паркування автомобілів. З цією метою передбачене використання протипожежних перегородок 1-го типу згідно з [39] або забезпечення вищезазначеної протипожежної відстані. В її межах заборонене улаштування машино-місць для інших механічних транспортних засобів і зберігання горючих матеріалів. Для протилежно

розташованих машино-місць така відстань має бути не меншою за 6 м. Для відкритих автостоянок визначено, що мінімальна протипожежна відстань від електрозарядного пункту й електромобіля до стін будівель має становити не менше ніж 3 м.

Обговорення результатів досліджень

Отже, у світі стрімко збільшуються обсяги продажу електромобілів. Особливості пожежної небезпечності їхнього силового блока (тягової літій-іонної акумуляторної батареї) принципово відрізняють електромобілі від транспортних засобів, споряджених двигунами внутрішнього згоряння, що споживають вуглеводневе паливо. Це означає, що підходить до протипожежного захисту

об'єктів із наявністю електромобілів можуть значною мірою відрізнитися від підходів, застосовуваних у випадку автомобілів традиційних конструкцій.

За результатами аналізування літературних даних виявлено, що пожежну небезпечність літій-іонних акумуляторних батарей зумовлено насамперед можливістю вивільнення газоподібних горючих речовин в умовах термічного впливу на них. Це може мати місце як унаслідок короткого замикання в самих батареях, так і через зовнішні термічні впливи. Втрата герметичності та, навіть, руйнування батарей можливі також унаслідок впливумеханічних чинників, у тому числі через механічні удари під час дорожньо-транспортних пригод. Під час пожежі має місце, насамперед, горіння газоподібних речовин, що вивільнюються з акумуляторних батарей. Більш небезпечним випадком може бути повна розгерметизація (вибух) літій-іонної батареї, внаслідок якої можливі горіння не тільки цих речовин, але й органічного електроліту та металічного літію. У стані спокою запалювання таких батарей малоімовірне, натомість під час заряджання можливе виникнення короткого замикання, що в свою чергу може спричинити пожежу.

Першочерговим заходом щодо ліквідації будь-яких пожеж є їх локалізація. У випадку електромобілів, як і в інших випадках, першочерговим кроком є просторове ізолювання джерела пожежної небезпеки від інших об'єктів, тобто передбачення належних протипожежних відстаней. В результаті проведених досліджень, зокрема, моделювання процесів розвитку пожежі на електромобілі, обґрунтовано величини протипожежних відстаней між електромобілем, який заряджається, та будівельними конструкціями. Їх дотримання дасть змогу якщо не усунути, то знизити до мінімуму небезпеку перекидання пожежі з палаючого електромобіля на інші транспортні засоби й об'єкти будівництва. Ці значення використано під час розроблення національного стандарту ДСТУ 9222:2023 [38], яким можна користуватися під час проектування електрзарядних станцій, а також наземних автостоянок і підземних гаражів (паркінгів) для зберігання електромобілів. З одержаних результатів стає зрозумілим, що повсюдне улаштування електрзарядних станцій з примиканням безпосередньо до будинків і споруд та навішуванням електрообладнання на їхні стіни є неприпустимим.

Іншим важливим заходом щодо недопущення перекидання пожежі з первинного осередку горіння (у цьому випадку – електромобіля) на інші об'єкти є передбачення засобів пасивного й активного протипожежного захисту. Тому розробленим стандартом передбачене улаштування протипожежних перешкод із нормованими класами вогнестійкості, а також застосування систем пожежної сигналізації та систем пожежогасіння. Дотримуючись загальноприйнятого європейського підходу, а також зважаючи на обмеженість даних щодо ефективності систем протипожежного захисту в умовах перебігу пожеж на електромобілях, названим стандартом окреслено загальні вимоги. Прийняття конкретних

проектних рішень щодо систем протипожежного захисту покладене на проектувальників залежно від умов, що мають місце на конкретному об'єкті.

Висновки

Таким чином, у результаті проведених аналітичних досліджень і моделювання процесів розвитку пожежі на електромобілі дійшли до наступних висновків.

1. Виявлено, що найбільшу складність під час гасіння пожеж на електромобілях пов'язано з припиненням горіння їхніх тягових літій-іонних батарей. Такі пожежі можуть виникати здебільшого під час заряджання цих батарей через перебіг електрохімічних процесів усередині них або через механічні впливи (наприклад, удари під час дорожньо-транспортних пригод). Перебіг пожеж відбувається переважно в режимі горіння газоподібних продуктів, що утворюються внаслідок термічних витоків або механічної розгерметизації, температура полум'я може досягати 850 °C-1200 °C і більше. Головною передумовою припинення горіння за інших однакових умов є охолодження літій-іонних батарей до температур, за яких термічні витoki припиняються або стають недостатніми для виникнення пожежі.

2. Встановлено, що на світовому, європейському та вітчизняному рівні відсутні єдині науково обґрунтовані підходи до забезпечення пожежної безпеки зарядних станцій, а також автостоянок і підземних паркінгів для зберігання електромобілів. Зокрема, не унормовано протипожежні відстані, класи вогнестійкості будівельних конструкцій, а також порядок улаштування протипожежних перешкод і оснащення таких об'єктів стаціонарними системами протипожежного захисту.

3. Із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення проведено моделювання температурних полів під час вільного горіння електромобіля «Tesla Model S». У результаті його проведення виявлено розподіл температур у навколишньому просторі, прилеглих будівельних конструкціях, а також на припаркованих поблизу автомобілях з плином часу. З використанням літературних даних щодо теплофізичних характеристик і показників пожежної небезпечності ряду конструкційних матеріалів визначено протипожежні відстані від місця заряджання електромобіля до прилеглих будівельних конструкцій та інших транспортних засобів. Зазначені результати використано під час розроблення національного стандарту ДСТУ 9222:2023 *Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів*, що у майбутньому може бути взятий за основу у розробленні європейських норм. Крім того, вони стали науковим підґрунтям для унормування ним розміщення систем заряджання електромобілів в інфраструктурі населених пунктів, зокрема в гаражах, на автостоянках, електрзарядних станціях, у тому числі суміщених із автозаправними станціями, а також улаштування протипожежних перешкод. Решту вимог стандарту викладено, виходячи з вимог чинних норм щодо систем заряджання

електромобілів, правил улаштування електроустановок та інших існуючих нормативних документів. Зважаючи на масогабаритні параметри електро-мобіля «Tesla Model S» та високу ємність тягової літій-іонної батареї, вимоги стандарту застосовні до існуючих у теперішній час легковиків на електричній тязі. Водночас, вони незастосовні до електробусів або електричних вантажівок.

4. Зважаючи на можливі відмінності в обсягах димоутворення під час горіння автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння й електромобілями, в подальшому доцільно провести дослідження з метою уточнення порядку розрахунку систем імпульсного димовидалення для захисту паркінгів для електромобілів.

Список літератури

1. <https://mind.ua/news/20221905-svitovi-prodazhi-elektromobiliv-virosli-na-39-v-2020-roci-canalis>.
2. CEN/TS 12101-11:2022 Smoke and heat control systems – Part 11: Horizontal flow powered ventilation systems for enclosed car parks.
3. <https://www.iso.org/standard/88174.html#lifecycle>.
4. ISO 3941:2007 Classification of fires.
5. 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.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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.
15. 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>.
16. 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>.
17. 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>.
18. 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>.
19. M. Held, M. Tuchs Schmidt, M. Zennega, R. Figi, C. Schreiner, L.D. Meller, U. Welte, M. Kompatscher, M. Hermann, L. Nacheff. Thermal rynaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. 165, 112474.
20. ДСТУ 9058:2020 “Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об’єктами розрахунковими методами. Основні положення”.
21. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій.
22. ДБН В.2.3-15:2007 Споруди транспорту. Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів.
23. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення.
24. Про затвердження Правил улаштування електроустановок: наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476.
25. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні.
26. НАПБ В.01.054-2015/510 Правила пожежної безпеки для підприємств і організацій автомобільного транспорту України.

27. RC59 Recommendations for fire safety when charging electric vehicles (2021). – Режим доступу: <https://www.thefpa.co.uk/advice-and-guidance/free-documents?=%20Medium-sized%20Businesses,%20MAINTENANCE%20CHECKLISTS%20-%20APPENDIX%20TEMPLATE%20FORMS,%20CONTROL%20OF%20DUST%20EXPLOSIONS&q=RC59%20FIRE%20SAFETY%20WHEN%20CHARGING%20ELECTRIC%20VEHICLES>.
28. Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical model / K. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1018-5. 2009. – 94 p.
29. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide / K. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1019-5. 2009. – 176 p.
30. https://uk.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S.
31. RISE Rapport 2020:90, "Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles" / [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1522149/FULLTEXT01.pdf>.
32. R. Bisschop, O. Willstrand, F. Amon, M. Rosengren. "Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles". RISE Research Institutes of Sweden, RISE Report 2019:50, Borås, Sweden, 2019 // – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/336640117_Fire_Safety_of_Lithium-Ion_Batteries_in_Road_Vehicles.
33. Y. Park, J. Ryu, H.S. Ryu. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter. *Energies*. 2019. 12, 1465. <https://doi.org/10.3390/en12081465>.
34. Дворкін Л.Й. Властивості мінеральних будівельних матеріалів: Навчальний посібник. Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування, 2019. – 418 с.
35. K.Cho, J.Park. BS 8414-1 fire safety tests for external cladding systems using insulating materials of different fire ratings. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2018. 18, No. 2. – pp. 185-191. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.2.185>.
36. B. Zhou, H. Yoshioka, T. Noguchi, K. Wang. Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite systems masonry façade fire according to JIS A 1310 method. *Fire and Materials*. 2020. <https://doi.org/10.1002/fam.2880>.
37. Кононенко Л.В., Дубініна А.А., Безуглий В.Д. Ідентифікація пластмас: Навчальний посібник. – Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2012. – 64 с.
38. ДСТУ 9222:2023 Пожежна безпека. Проти-пожежний захист систем зарядки електромобілів.
39. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.