



А. Ф. Гаврилюк, О. Е. Васильєва,

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950> – А. Ф. Гаврилюк

<https://orcid.org/0000-0003-2921-1760> – О. Е. Васильєва



gavrilyk3@ukr.net

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Постановка проблеми. Ряд проблематик, серед яких глобальне потепління та колосальне забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згоряння, створило підґрунтя до пошуку та розробки екологічно «чистіших» транспортних засобів. Такі процеси пришвидшила і зухвало розв'язана війна росії проти України, оскільки агресор володіє колосальними запасами нафтопродуктів, від яких залежало багато держав світу.

Наведені передумови створили імпульс для бурхливого розвитку ринку електромобілів. Більше того, ряд держав серед яких Швеція, Німеччина, Китай, Франція, реалізують привабливі урядові програми, тим самим, ще більше стимулюючи своїх громадян купувати електромобілі.

Таким чином, частка продажів електромобілів у 2021 році перейшла відмітку 10% від загальної кількості. Станом на кінець 2022 року, автопарк електромобілів становить майже 27 млн і продовжує зростати. Разом із зростанням їх кількості, зростають і пожежі таких транспортних засобів в абсолютному та відносному значеннях (останнє зумовлене старінням, тобто збільшенням середнього віку парку електромобілів). Пожежі електромобілів мають інший характер розвитку, що створює нові виклики для пожежно-рятувальних служб, інженерів-будівельників та власників таких транспортних засобів.

Мета дослідження полягає у аналізі чинних нормативно-правових актів забезпечення протипожежного захисту електромобілів під час виготовлення та експлуатації. Це створить підґрунтя для виявлення шляхів підвищення їх протипожежного захисту.

Опис матеріалу. Хоча пожежі електромобілів трапляються рідше, ніж пожежі автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, проте вони мають небезпечніший характер розвитку. Нерідко є важко ідентифікувати причину, яка ініціювала займання транспортного засобу. Такі пожежі можуть відбутись на закритих чи відкритих паркінгах, приватних гаражах, під час заряджання, руху, чи після дорожньо-транспортної пригоди. Акумуляторні батареї повинні пройти низку тестів та випробування перш ніж будуть використовуватись на електромобілі. Такі випробування регламентуються міжнародними стандартами, які розробляються відповідними організаціями і ґрунтуються на наукових дослідженнях. Дослідження акумуляторних батарей проводяться з метою виявлення слабких чи небезпечних місць, щоб запобігти виникненню несправності, займання, пожежі чи навіть вибуху.

За об'єктом випробування тести на випробування можна поділити на 4 рівні: випробування на одному елементі; випробування на комірці; випробування на акумуляторній батареї; випробування на електромобілі в цілому.

Останні зміни до норм обладнання колісних транспортних засобів, до яких відносяться і електромобілі, первинними засобами пожежогасіння було внесено ще у 2009 році, що вкрай не відповідає умовам сьогодення. Ці норми не враховують не лише класифікацію транспортних засобів, але й не відповідають сучасному стану автопарку України, який суттєво змінився за останні п'ятнадцять років. Зміни стосуються збільшення кількості електромобілів та гібридних транспортних засобів, які несуть інший характер розвитку пожежі. Тому дослідження, розроблення та прийняття на законодавчому рівні сучасних норм забезпечення протипожежними засобами колісних транспортних засобів, в тому числі для транспортних засобів, які працюють на альтернативних видах пального, дасть змогу підвищити рівень їх протипожежного захисту. А підвищення рівня протипожежного захисту зазначених об'єктів вплине на зменшення як матеріальних збитків, так і людських жертв.

Висновки. За результатами аналітичних досліджень визначено, що пожежі електромобілів мають місце у різних країнах світу і виникають на різних моделях електромобілів. Разом з тим, займання електромобілів відбувається за різних обставин: під час експлуатації, стоянки, заряджання, під час чи після дорожньо-транспортної пригоди. Причому такі автомобілі мають здатність до повторного займання, проміжок часу між якими може складати кілька днів чи навіть тижнів. Вимоги чинних міжнародних нормативно-правових актів забезпечення протипожежного захисту електромобілів стосуються випробувань силової АКБ і електромобіля в

цілому на предмет механічних, електричних, хімічних та експлуатаційних пошкоджень і застосовуються лише на етапі виготовлення. Підвищення протипожежного захисту електромобілів та інших транспортних засобів, що використовують альтернативні джерела енергії можна досягти завдяки удосконаленню нормативно-правової бази, щодо норм обладнання зазначених об'єктів системами протипожежного захисту. Для цього необхідно провести дослідження щодо застосування різних систем протипожежного захисту, в тому числі і переносних вогнегасників, на ефективність гасіння пожежі таких об'єктів.

Ключові слова: протипожежний захист, пожежа електромобіля, гасіння електромобіля.

A. F. Gavryliuk, O. E. Vasylieva
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF THE STATE OF FIRE PROTECTION OF ELECTRIC VEHICLES

Introduction. Some issues, including global warming and enormous air pollution by exhaust gases from internal combustion engines, have created the basis for the search and development of environmentally "cleaner" vehicles. These processes were accelerated by Russia's brazen war against Ukraine, as the aggressors possess enormous reserves of oil products on which many countries in the world depended.

These prerequisites created an impetus for the rapid development of the electric vehicle market. Moreover, some countries, including Sweden, Germany, China, and France, are implementing attractive government programs, thereby further encouraging their citizens to buy electric vehicles.

Thus, the share of sales of electric vehicles in 2021 crossed the 10% mark of the total, and as of the end of 2022, the fleet of electric vehicles amounted to almost 27 million and continues to grow. Along with the growth in their number, fires of such vehicles are also increasing in absolute and relative terms (the latter is due to ageing, i.e., an increase in the average age of the electric vehicle fleet). Electric vehicle fires have a different development pattern, which creates new challenges for fire and rescue services, structural engineers, and owners of such vehicles.

The purpose of the study is to analyse the current regulatory and legal acts on fire protection of electric vehicles during manufacture and operation. This will create the basis for identifying ways to improve fire protection.

Results. Although there are fewer fires in electric vehicles compared to fires in vehicles equipped with internal combustion engines, they have a different and more dangerous development. It is often difficult to identify the cause that initiated the vehicle fire. Such fires can occur in closed or open parking lots, private garages, while charging, driving, or after a traffic accident. Batteries must undergo some tests and trials before they can be used in an electric vehicle. These tests are regulated by international standards. These standards are developed by relevant organisations and are based on scientific research. Battery tests are conducted to identify weaknesses or hazards to prevent a malfunction, fire, explosion or even explosion.

According to the object of testing, testing can be divided into 4 levels: testing on a single cell; testing on a cell; testing on a battery; testing on an electric vehicle as a whole.

The last changes to the standards for equipping wheeled vehicles, which include electric vehicles, with primary fire extinguishing equipment were made back in 2009, which is extremely inadequate for today's conditions. These rules do not take into account not only the classification of vehicles but also do not correspond to the current state of the Ukrainian vehicle fleet, which has changed significantly over the past fifteen years. The changes relate to the increasing number of electric vehicles and hybrid vehicles, which have different fire behaviour. Therefore, the research, development and adoption of modern standards for wheeled vehicles, including vehicles operating on alternative types of fire extinguishing agents, will increase the level of their fire protection. Moreover, increasing the level of fire protection in these facilities will reduce both material damage and human casualties.

Conclusion. Analytical studies have shown that electric vehicle fires occur in different countries around the world and occur on different models of electric vehicles. At the same time, electric vehicles catch fire under different circumstances: during operation, parking, charging, during or after a traffic accident. Moreover, such vehicles can reignite, with a time interval of several days or even weeks between them. The requirements of current international regulations for fire protection of electric vehicles relate to testing the power battery and the electric vehicle as a whole for mechanical, electrical, chemical and operational damage and are applied only at the manufacturing stage. Improving the fire protection of electric vehicles and other vehicles using alternative energy sources can be achieved by improving the regulatory framework regarding the standards for equipping these objects with fire protection systems. To do this, it is necessary to conduct research on the use of various fire protection systems, including portable fire extinguishers, on the effectiveness of extinguishing fires in such facilities.

Keywords: fire protection, electric vehicle fire, extinguishing an electric vehicle.

Вступ. Згідно з [1], електромобіль (електричний колісний транспортний засіб) – автомобіль, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумуляування електричної енергії. Для акумуляування електричної енергії можуть

використовуватись силові акумуляторні батареї (АКБ), суперконденсатори чи паливні елементи [2].

Хоча ідея створення електромобіля бере свій початок у 1800-х роках [3] (а перший його прототип було створено у 1829 році, задовго до створення автомобіля із двигуном внутрішнього згорання

(ДВЗ)), популярності вони набули лише за останнє десятиліття. На це вплинула проблема з глобальним потеплінням та колосальне забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згоряння. Також ці процеси пришвидшила зухвало розв'язана війна росії проти України. Оскільки агресор володіє колосальними

запасами нафтопродуктів, від яких залежало багато держав світу.

За даними [4] частка електромобілів у 2021 році перейшла відмітку 10% світових продажів автомобілів і продовжує зростати. Загальна кількість електромобілів, станом на кінець 2022 року становить майже 27 млн.

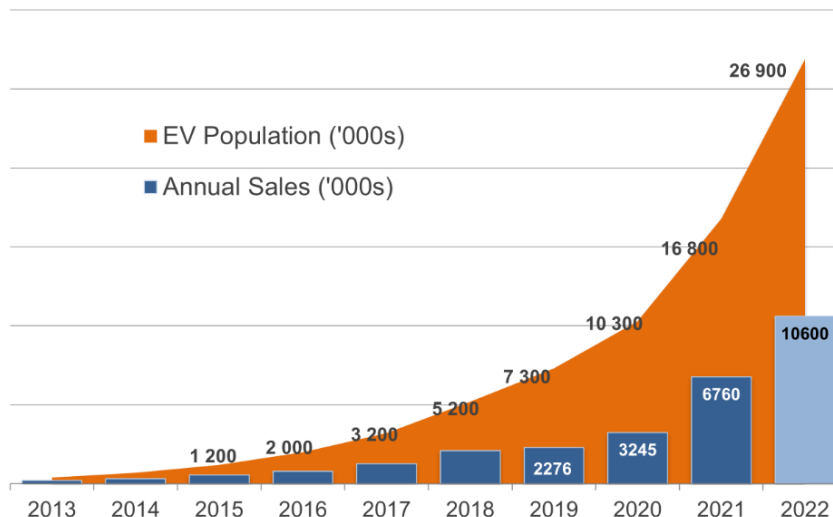


Рисунок 1 – Динаміка кількості електромобілів у світі [4]

Для забезпечення живлення електричних двигунів електромобілів використовується джерело електричної енергії. На сьогодні найбільшого поширення набули літій-іонні батареї, широко визнані передовими системами накопичення енергії завдяки їх підвищеній потужності, високій ефективності заряджання-розряджання та збільшеному терміну служби.

Разом з тим, хімічні та електрохімічні процеси можуть спричинити неконтрольовану екзотермічну реакцію. Такі реакції призводять до викиду шкідливих і небезпечних газів [2, 5], займань, вибухів та завдають не лише матеріальних збитків, але й людських жертв [6, 7, 8].

Окрім цього, особливу увагу, з точки зору пожежної безпеки, заслуговують електромобілі, які використовують для живлення паливних елементів водень. Особливості пожежної безпеки таких транспортних засобів наведено у праці [9].

Пожежі та вибухи електромобілів [10–14] викликають серйозне занепокоєння у громадськості та створюють нові виклики для наукової спільноти.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. У роботі [15] наведено шляхи підвищення протипожежного захисту колісних транспортних засобів. Однак до уваги не брались електромобілі. У праці [2] ґрунтовно проаналізовано чинники впливу на пожежну безпеку електромобілів. Разом з тим у роботі не приділена увага засобам

пожежогасіння таких автомобілів. Автори робіт [16, 17] провели серію експериментів на літій-іонних джерелах живлення на предмет пожежної безпеки. Однак не розглядалась пожежна безпека електромобіля в цілому, як об'єкта.

У роботі [18] проведено експериментальне дослідження з визначення поширення у розвитку пожежі від електромобіля на інші транспортні засоби, що розміщені паралельно. Встановлено, що реактивне полум'я від електромобіля що горів, поширювалось на відстань до 2,5 м. І вже через 94 хв від початку вогневого випробування відбулося займання паралельно припаркованого автомобіля. Такий великий час займання сусіднього автомобіля можна пояснити тим, що експеримент проводився на відкритій місцевості, і багато тепла розсіювалось у навколишнє середовище.

У праці [19] були досліджені фактори, що впливають на пішоходів під час пожежі електромобіля на відкритій стоянці. Однак у даному дослідженні приймалось, що тепловий потік становив лише 1/3 від можливого теплового потоку при повністю зарядженій батареї електромобіля. Тому безпечна відстань для пішоходів становить лише 2,8 м від палаючого електромобіля при швидкості повітряних потоків у 2,2 м/с.

Автори робіт [20, 21] пропонують підвищувати протипожежний захист електромобіля завдяки зменшенню концентрації кисню у блоці силової АКБ. Однак такий спосіб є дороговартісним.

На підставі аналізу встановлено, що у науковій літературі недостатньо приділено увагу забезпеченню протипожежного захисту електромобілів. Це дає підстави стверджувати на доцільності проведення досліджень такого роду.

Мета і задачі дослідження. Метою нашого дослідження є у аналіз чинних нормативно-правових актів стосовно забезпечення протипожежного захисту електромобілів під час виготовлення та експлуатації. Це створить підґрунтя для виявлення шляхів підвищення їх протипожежного захисту.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

–провести аналіз пожеж електромобілів та причин їх виникнення;

–описати вимоги чинних нормативно-правових актів забезпечення протипожежного

захисту електромобілів під час виготовлення та експлуатації;

–виявити шляхи підвищення протипожежного захисту електромобілів під час виготовлення та експлуатації.

Результати досліджень. Пожеж електромобілів є менше порівнянно з пожежами автомобілів, обладнаних ДВЗ, проте вони мають небезпечніший характер розвитку [22].

Доволі часто важко ідентифікувати причину, яка ініціювала займання транспортного засобу [23].

Такі пожежі можуть відбутись на закритих чи відкритих паркінгах, у приватних гаражах, під час заряджання, руху, чи після дорожньо-транспортної пригоди (табл. 1).

Таблиця 1

Огляд випадків пожеж електромобілів та причин їх виникнення

Рік	Країна	Марка авто	Обставини
2023	США	Tesla Model S	Автомобіль загорівся під час транспортування на евакуаторі з місця ДТП після того як був погашений попередньо [24].
2023	США	Tesla Model S	Автомобіль загорівся під час руху по шосе [25].
2022	Великобританія	Jaguar I-Pace	Пожежа виникла на автовозі під час руху. Згоріло 6 автомобілів з 7 [26].
2022	США	Tesla Model S	Автомобіль зайнявся перебуваючи на аварійному майданчику після ДТП, яка трапилась за три тижні до займання. Пожежа повністю знищила автомобіль [27].
2022	США	Jaguar I-Pace	Автомобіль спалахнув і був швидко охоплений полум'ям, горіння супроводжувалось вибухами [28].
2021	Південна Корея	Hyundai Kona	Автомобіль спалахнув перебуваючи на підземному паркінгу [29].
2021	Франція	Renault zoe	Автомобіль раптово спалахнув, внаслідок чого постраждали двоє людей, одна з яких отримала значні опіки [30].
2020	США	Porsche Taycan	Автомобіль повністю згорів під час стоянки у приватному гаражі.
2019	Португалія	Porsche Panamera E-Hybrid	Пожежа виникла внаслідок зіткнення автомобіля з опорою моста [31].
2019	Південна Корея	Hyundai Kona	Автомобіль загорівся внаслідок вибуху під час заряджання [32].
2019	Канада	Hyundai Kona	Автомобіль загорівся під час паркування в житловому гаражі в Монреалі. Вибух був настільки потужний, що ворота гаража вирвало [33].
2019	Китай	Tesla Model S	Пожежа виникла під час паркування [34].
2019	Китай	Tesla Model S	Пожежа виникла на підземному паркінгу, що призвело до займання інших автомобілів, що були припарковані поруч. Причому місь перед тим це же автомобіль також займався [35].
2019	США	Tesla Model S	Автомобіль самовільно загорівся і гасіння тривало близько чотирьох годин [36].
2019	Канада	Tesla Model X	Автомобіль повністю згорів і було помічено численні невеликі вибухи під час горіння [37].
2018	Швейцарія	Tesla Model 3	Пожежа виникла на шосе внаслідок дорожньо-транспортної пригоди [38].
2018	Швейцарія	Tesla Model 3	Пожежа виникла на шосе під час руху, ймовірною причиною займання стало займання силової акумуляторної батареї [39].
2018	Тайланд	Porsche Panamera	Пожежа трапилась під час заряджання автомобіля [40].

Таким чином огляд пожеж показав, що такі події трапляються у багатьох кранах і виникають на різних моделях електромобілів. Разом з тим огляд не говорить про здатність до займання тієї чи іншої марки автомобіля, а лише описує події, які відбулись.

Акумуляторні батареї повинні пройти низку тестів та випробувань перш ніж будуть використовуватись на електромобілях. Такі випробування регламентуються міжнародними стандартами, які розробляються відповідними організаціями і ґрунтуються на наукових

дослідженнях. Дослідження акумуляторних батарей проводяться з метою виявлення слабких чи небезпечних місць, щоб запобігти виникненню несправності, займання, пожежі чи навіть вибуху.

За об'єктом випробування тести на випробування можна поділити на 4 рівні (рис. 2): випробування на одному елементі; випробування на комірці; випробування на акумуляторній батареї; випробування на електромобілі в цілому.

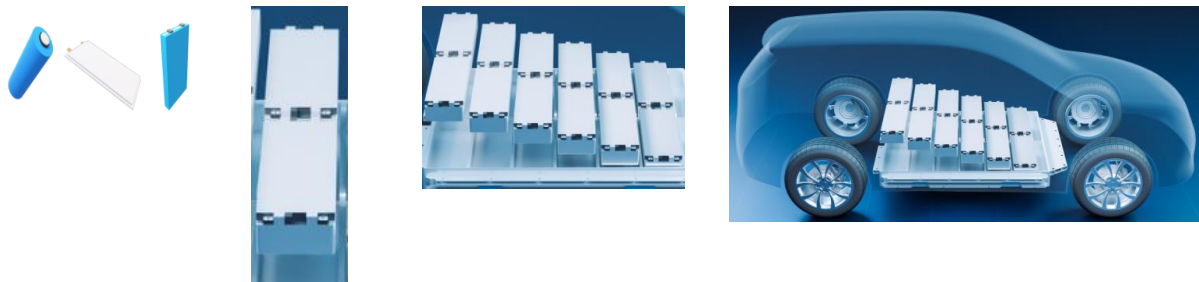


Рисунок 2 – Класифікація випробувань за об'єктом випробування: а – елемент; б – комірка; с – модуль d – електромобіль

Усі стандарти, які регламентують випробування акумуляторних батарей та електромобілів у цілому, класифікують їх на механічні, електричні та хімічні випробування, а також та випробування на екологічність.

Загалом існує велике різноманіття стандартів і норм, які чинні в різних частинах світу. Це зумовлено діяльністю різних організацій, а саме: Міжнародна організація стандартизації (ISO), Європейський комітет стандартизації (SEN),

Міжнародне товариство автомобільних інженерів (SEA) тощо. У Європі для транспортних засобів, в тому числі електромобілів, діють норми, ухвалені Європейською економічною комісією ООН. У США законодавчим органом виступає Національна адміністрація безпеки дорожнього руху (NHTSA).

У табл. 2 наведено основні стандарти, які регламентують вищенаведені випробування, які стосуються електромобілів та їхніх батарей.

Таблиця 2

Стандарти, які обумовлюють випробування батарей та електромобілів

Вид випробування	Підвид випробування	Нормативні документи						
		Міжнародні			ЄС		США	Китай
		SAE J2929 [41]	ISO 12405-3 [42]	IEC 62660-3 [43]	UN/ECE –R100.02 [44]	UL 2580 [45]	Freedom CAR [46]	QC/T 743 [47]
Механічне	Механічний удар	+	+	+	+	+	+	–
	Падіння	+	–	+	+	+	–	–
	Пробій стороннім предметом	–	–	+	+	–	+	+
	Занурення у воду	+	–	+	+	+	+	+
	Дія надмірним тиском	+	–	+	+		+	–
	Прекидання	+	–	+	+	+	+	+
	Вібрація	+	+	+	+	+	+	–
Електричне	Зовнішня коротке замикання (КЗ)	+	+	+	+	+	+	+
	Внутрішнє коротке замикання (КЗ)	–	–	–	–	–	–	–
	Перерозряд / перезаряд	+	+	+	+	+	+	+
Хімічне	Шкідливість компонентів	–	–	–	–	–	+	–
	Займистість компонентів	–	–	–	–	–	+	–
Експлуатаційне	Термічна стабільність	–	–	+	–	+	+	+

Вид випробування	Підвид випробування	Нормативні документи						
		Міжнародні			ЄС		США	Китай
		SAE J2929 [41]	SO 12405-3 [42]	IEC 62660-3 [43]	UN/ECE -R100.02 [44]	UL 2580 [45]	Freedom CAR [46]	QC/T 743 [47]
	Циклічність заряд-розряд	+	+	+	+	+	+	
	Перегрів	+	-	-	+	-	-	-
	Переохолодження	-	-	-	-	-	-	-
	Вплив полум'я	+	-	-	-	-	-	-

Загалом стандарти регламентують проходження або не проходження того чи іншого випробування.

Європейська рада з автомобільних досліджень (EUCAR) встановила сім рівнів небезпеки для акумуляторних батарей електромобілів [48]. Де рівень 0 є найбезпечніший, а рівень 7 – характеризується пожежею із вибухом, тобто найнебезпечніший рівень.

Відомо, що на величину наслідків від пожеж (загибель та травмування людей, матеріальні збитки) впливає ефективність системи протипожежного захисту. Найбільшого розповсюдження у системах протипожежного захисту транспортних засобів набули переносні вогнегасники (далі – вогнегасники).

Норми обладнання колісних транспортних засобів вогнегасниками наведено у [49], останні зміни в який було внесено ще у 2009 році! Цей чинний нормативно правовий акт не враховує не лише класифікації транспортних засобів згідно, з [50], але й не відповідає сучасному стану автопарку України, який суттєво змінився за останні п'ятнадцять років. Зміни стосуються збільшення кількості електромобілів та гібридних транспортних засобів, які несуть інший характер розвитку пожежі. Зрештою, ця проблематика була піднята та детально описана у праці [15].

Таким чином, норми обладнання системами протипожежного захисту електромобілів не забезпечують належного рівня пожежної безпеки пасажирів, самих транспортних засобів та об'єктів навколо них.

Тому дослідження, розроблення та впровадження на законодавчому рівні систем протипожежного захисту електромобілів та інших транспортних засобів, які працюють на альтернативних видах пального, дасть змогу підвищити рівень їх протипожежного захисту. А підвищення рівня протипожежного захисту зазначених об'єктів вплине на зменшення як матеріальних збитків, так і людських жертв.

Висновки

1. На підставі аналізу пожеж сучасних електромобілів у різних країнах світу (табл 1) встановлено, що такі пожежі виникають на різних

моделях електромобілів. Разом з тим займання електромобілів відбувається за різних обставин: під час експлуатації, стоянки, заряджання, під час чи після дорожньо-транспортної пригоди. Причому такі автомобілі мають здатність до повторного займання, проміжок часу між якими може становити кілька днів чи навіть тижнів.

2. Вимоги чинних міжнародних нормативно-правових актів забезпечення протипожежного захисту електромобілів стосуються випробувань силової АКБ і електромобіля в цілому на предмет механічних, електричних, хімічних та експлуатаційних пошкоджень і застосовуються на етапі виготовлення.

3. На величину наслідків від пожеж електромобілів (загибель та травмування людей, матеріальні збитки) впливає ефективність системи протипожежного захисту. Діючі норми щодо забезпечення системи протипожежного захисту електромобілів не відповідають умовам сьогодення і не забезпечують належного рівня захисту як пасажирів, так і транспортних засобів в цілому. Підвищення протипожежного захисту електромобілів та інших транспортних засобів, що використовують альтернативні джерела енергії можна досягти завдяки удосконаленню нормативно-правової бази, щодо норм обладнання зазначених об'єктів системами протипожежного захисту. Для цього необхідно провести дослідження щодо застосування різних систем протипожежного захисту, в тому числі і переносних вогнегасників, на ефективність гасіння пожеж таких об'єктів.

Список літератури

1. Закон України № 2956-IX від 24.02.2023 р. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів. Верховна Рада України. Офіц. вид. К. : Парлам. вид-во., 2023. 15 с. (Бібліотека офіційних видань).

2. Гаврилюк А. Ф. & Кушнір А. П. (2022). Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за

- термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. Пожежна безпека, 40, 31-39. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.
- 3.R. Matulka, The history of the electric car. In: Department of Energy, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, Assessed on 23 Mar 2022.
- 4.International Energy Agency (2022a) Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future;2022 IIS 2380-S43. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/ppresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.
- 5.Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles.
- 6.Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In *Lithium-ion batteries* (pp. 409-435).
- 7.Fire, A. P. U. B. (2014). Japan Airlines Boeing 787-8, JA829J, Boston, Massachusetts. NTSB/AIR-14/01. National Transportation Safety Board.,
- 8.N. Goto, Aircraft serious incident investigation report: all Nippon airways Co. Ltd. JA804A. Japan Transport Safety Board, Tokyo, Japan, Rep. No. AI2014-4, Sep. 25, 2014
- 9.Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., & Subota, A. (2022). Аналіз пожежної небезпеки витoku водню з електромобілів на паливних елементах. Пожежна безпека, 41, 47-56. <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.06>
- 10.Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzl, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
- 11.Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500.
- 12.Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240.
- 13.Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.
- 14.Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11).
- 15.Гаврилюк А.Ф., Лин А. С. (2017). Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. Пожежна безпека, 31, 11-16. Retrieved із: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/98>
- 16.O. V. Lazarenko, O. Yu. Pazen, R. Yu. Sukach, V. I. Pospolitak (2022) Experimental evaluation of fire hazard of lithium-ion battery during its mechanical damage. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, pp. 68-73.
- 17.Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 67-75. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
- 18.Cui, Y., Liu, J., Cong, B., Han, X., & Yin, S. (2022). Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 524-534.)
- 19.Zhang, D., Huang, G., Li, H., Deng, Q., & Gao, X. (2023). A study of the factors influencing the thermal radiation received by pedestrians from the electric vehicle fire in roadside parking based on PHRR. *Applied Sciences*, 13(1), 609
- 20.Barelli, L., Bidini, G., Ottaviano, P. A., Pelosi, D., Perla, M., Trombetti, L., ... & Serangeli, M. (2021). Electric vehicles fire protection during charge operation through Vanadium-air flow battery technology. *Heliyon*, 7(9), e08064.
- 21.Anderson, J., Sjöström, J., Andersson, P., Amon, F., & Albrektsson, J. (2014). Experimental and numerical characterization of an electrically propelled vehicles battery casing including battery module. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6(4), 041015.
- 22.Kushnir, A., Kopchak, B., & Gavryliuk, A. (2021). Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(111)), 6-18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231894>
- 23.Mykhalichko, B., Nazarovets, O., & Gavryliuk, A. (2022). The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106198. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106198>.
- 24.Crashed Tesla catches fire twice - second fire during transport on tow truck (2023). CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. Available at: <https://www.ctif.org/news/crashed-tesla-catches-fire-twice-second-fire-during-transport-tow-truck>
- 25.Electric vehicle spontaneously caught fire while driving on the highway. (2023). CTIF -

- International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. . Available at: <https://www.ctif.org/news/electric-vehicle-spontaneously-caught-fire-while-driving-highway>
26. What's Nastier Than an Electric Car on Fire? How About Seven Electric Cars on Fire - FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. (2022). FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. . Available at: <https://www.firefighternation.com/news/video-whats-nastier-than-an-electric-car-on-fire-how-about-seven-electric-cars-on-fire/#gref>
27. Mark, J. (2022, June 22). A tesla was in a junkyard for three weeks. then it burst into flames. Washington Post. Available at: <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/06/22/tesla-fire-sacramento/>
28. Jaguar I-Pace catches on fire again – is this another Bolt EV battery fire situation? (2022). Electrek. Available at: <https://electrek.co/2022/08/01/jaguar-i-pace-catches-fire-another-bolt-ev-battery-fire-situation/>
29. Kim Joo-hwan. A car fire occurred in the underground parking lot of an apartment in Saesaem Village, Sodam-dong, Sejong-si. Available at: <http://www.naewoeilbo.com/news/articleView.html?idxno=365492>
30. L. Writing A Zoé electric car suddenly caught fire in the Hérault, two burned, one seriously. Available at: <https://www.nicematin.com/faits-divers/une-voiture-electrique-zoe-prend-subitement-feu-dans-lherault-deux-brules-dont-un-grievement-695037>
31. Porsche embate em ponte móvel de Matosinhos e faz dois mortos e quatro feridos. Available at: <https://www.jn.pt/local/noticias/porto/matosinhos/dois-mortos-e-quatro-feridos-apos-carro-embater-em-ponte-movel-em-leca-10851084.html> (date of access: 22.03.2023).
32. All fires in electric vehicles in S. Korea this year involved Hyundai's Kona Electric.(2019a) . Available at: http://www.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/912588.html
33. Electric car catches fire and explodes in Île-Bizard garage | CBC News. (2019). CBC. Available at: <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/electric-car-catches-fire-and-explodes-in-île-bizard-garage-1.5227665>
34. Staff, R. (2019). Tesla car catches fire in Hong Kong parking lot: media. U.S. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-china-hongkong-idUSKCN1SK0G1>
35. Zhong, R. (2019). Tesla to Investigate Car That Appeared to Burst Into Flames in Shanghai (Published 2019). The New York Times . Available at: <https://www.nytimes.com/2019/04/22/technology/tesla-explosion-shanghai.html>
36. Tesla vehicle bursts into flames, burns for hours in monroeville. (2019). CBS News - Breaking news, 24/7 live streaming news & top stories. Available at: <https://www.cbsnews.com/pittsburgh/news/monroeville-tesla-fire/>
37. Burlington Free Press. Tesla Model X burned on frozen Lake Champlain: What happened and what's coming next. (2019). Available at: <https://www.burlingtonfreepress.com/story/news/local/2019/03/01/tesla-model-x-burned-lake-champlain-what-next-steps-fire/3026364002/>
38. Staff, R. (2018). Tesla crash may have triggered battery fire: Swiss firefighters. U.S. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-swiss-tesla-crash/tesla-crash-may-have-triggered-battery-fire-swiss-firefighters-idUSKCN1IF2WN>
39. Tesla-Unfall im Tessin: Akku als mögliche Brandursache. Neue Zürcher Zeitung. . Available at: <https://www.nzz.ch/panorama/tesla-unfall-im-tessin-akku-als-moegliche-brandursache-ld.1385766?reduced=true>
40. Porsche catches fire while charging. (2018). Available at: <https://www.bangkokpost.com>. <https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1429518/porsche-catches-fire-while-charging>
41. SAE J2929. Safety standards for electric and hybrid vehicle propulsion battery systems utilizing lithium-based rechargeable cells; 2013.
42. ISO 12405-3. Electrically propelled road vehicles – test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 3: Safety performance requirements; 2014.
43. IEC/(CD) 62660-3. Rechargeable cells standards publication secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 3: safety requirements of cells and modules; 2013.
44. UN/ECE Regulation No. 10002. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train; 2013.
45. UL 2580. Batteries for use in electric vehicles; 2013.
46. Doughty DH, Crafts CC. SAND 2005–3123: freeDomCAR electrical energy storage systems abuse test manual for electric and hybrid electric vehicle applications; 2005.

47. QC/T 743. Lithium-ion batteries for electric vehicles Chinese voluntary standards for automobiles; 2006.

48. SAEJ2464:2; Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storages. SAE: Warrendale, PA, USA, 2011.

49. Постанова Кабінету Міністрів України № 934 від 03.09.2009р. «Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 1997 р. № 1128 і від 10 жовтня 2001 р. № 1306».

50. Постанова Кабінету Міністрів України №1166 від 22.12.2010р. «Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються».

References

1. Zakon Ukrainy № 2956-ІKh від 24.02.2023 р. Pro deiaiki pytannia vykorystannia transportnykh zasobiv, osnashchenykh elektrychnymu dvyhunamy, ta vnesennia zmin do deiaikykh zakoniv Ukrainy shchodo podolannia palyvnoi zalezhnosti i rozvytku elektrozariadnoi infrastruktury ta elektrychnykh transportnykh zasobiv. Verkhovna Rada Ukrainy. – Ofits. vyd. – K. : Parlam. vyd-vo., 2023. – 15 s. – (Biblioteka ofitsiinykh vydan).

2. Gavryliuk A. F. & Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoi stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoї batarei. Pozhezhna bezpeka, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.

3. R. Matulka, The history of the electric car. In: Department of Energy, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, Assessed on 23 Mar 2022.

4. International Energy Agency (2022a) Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future; 2022 IIS 2380-S43. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.

5. Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles.

6. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In Lithium-ion batteries (pp. 409-435).

7. Fire, A. P. U. B. (2014). Japan Airlines Boeing 787-8, JA829J, Boston, Massachusetts. NTSB/AIR-14/01. National Transportation Safety Board.,

8. N. Goto, Aircraft serious incident investigation report: all Nippon airways Co. Ltd. JA804A. Japan Transport Safety Board, Tokyo, Japan, Rep. No. AI2014-4, Sep. 25, 2014

9. Gavrilyuk, A., Yakovchuk, R., & Subota, A. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky vyvodu vodniu

z elektromobiliv na palyvnykh elementakh. Pozhezhna bezpeka, 41, 47-56.

<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.06>

10. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.

11. Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500.

12. Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240.

13. Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.

14. Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11).

15. Gavrilyuk A., & LynA. (2017). Prototypozhezhnyi zakhyst kolisnykh transportnykh zasobiv ta shliakhy yoho pidvyshchennia. *Pozhezhna bezpeka*, 31, 11-16. Retrieved iz <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/98>

16. O. V. Lazarenko, O. Yu. Pazen, R. Yu. Sukach, V. I. Pospolitak (2022) Experimental evaluation of fire hazard of lithium-ion battery during its mechanical damage. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, pp. 68-73.

17. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 67-75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>

18. Cui, Y., Liu, J., Cong, B., Han, X., & Yin, S. (2022). Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 524-534.)

19. Zhang, D., Huang, G., Li, H., Deng, Q., & Gao, X. (2023). A study of the factors influencing the thermal radiation received by pedestrians from the electric vehicle fire in roadside parking based on PHRR. *Applied Sciences*, 13(1), 609

20. Barelli, L., Bidini, G., Ottaviano, P. A., Pelosi, D., Perla, M., Trombetti, L., ... & Serangeli, M. (2021). Electric vehicles fire protection during charge operation through Vanadium-air flow battery technology. *Heliyon*, 7(9), e08064.
21. Anderson, J., Sjöström, J., Andersson, P., Amon, F., & Albrektsson, J. (2014). Experimental and numerical characterization of an electrically propelled vehicles battery casing including battery module. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6(4), 041015.
22. Kushnir, A., Kopchak, B., & Gavryliuk, A. (2021). Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(111)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231894>
23. Mykhalichko, B., Nazarovets, O., & Gavryliuk, A. (2022). The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106198. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106198>.
24. Crashed Tesla catches fire twice - second fire during transport on tow truck (2023). CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. Available at: <https://www.ctif.org/news/crashed-tesla-catches-fire-twice-second-fire-during-transport-tow-truck>
25. Electric vehicle spontaneously caught fire while driving on the highway. (2023). CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. . Available at: <https://www.ctif.org/news/electric-vehicle-spontaneously-caught-fire-while-driving-highway>
26. What's Nastier Than an Electric Car on Fire? How About Seven Electric Cars on Fire - FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. (2022). FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. . Available at: <https://www.firefighternation.com/news/video-whats-nastier-than-an-electric-car-on-fire-how-about-seven-electric-cars-on-fire/#gref>
27. Mark, J. (2022, June 22). A tesla was in a junkyard for three weeks. then it burst into flames. *Washington Post*. Available at: <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/06/22/tesla-fire-sacramento/>
28. Jaguar I-Pace catches on fire again – is this another Bolt EV battery fire situation? (2022). *Electrek*. Available at: <https://electrek.co/2022/08/01/jaguar-i-pace-catches-fire-another-bolt-ev-battery-fire-situation/>
29. Kim Joo-hwan. A car fire occurred in the underground parking lot of an apartment in Saesaem Village, Sodam-dong, Sejong-si. Available at: <http://www.naewoeilbo.com/news/articleView.html?idxno=365492>
30. L. Writing A Zoé electric car suddenly caught fire in the Hérault, two burned, one seriously. Available at: <https://www.nicematin.com/faits-divers/une-voiture-electrique-zoe-prend-subitement-feu-dans-lherault-deux-brules-dont-un-grievement-695037>
31. Porsche embate em ponte móvel de Matosinhos e faz dois mortos e quatro feridos. Available at: <https://www.jn.pt/local/noticias/porto/matosinhos/do-is-mortos-e-quatro-feridos-apos-carro-embater-em-ponte-movel-em-leca-10851084.html> (date of access: 22.03.2023).
32. All fires in electric vehicles in S. Korea this year involved Hyundai's Kona Electric. (2019a) . Available at: www.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/912588.html
33. Electric car catches fire and explodes in Île-Bizard garage | CBC News. (2019). CBC. Available at: <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/electric-car-catches-fire-and-explodes-in-île-bizard-garage-1.5227665>
34. Staff, R. (2019). Tesla car catches fire in Hong Kong parking lot: media. U.S. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-china-hongkong-idUSKCN1SK0G1>
35. Zhong, R. (2019). Tesla to Investigate Car That Appeared to Burst Into Flames in Shanghai (Published 2019). *The New York Times* . Available at: <https://www.nytimes.com/2019/04/22/technology/tesla-explosion-shanghai.html>
36. Tesla vehicle bursts into flames, burns for hours in monroeville. (2019). *CBS News - Breaking news, 24/7 live streaming news & top stories*. Available at: <https://www.cbsnews.com/pittsburgh/news/monroeville-tesla-fire/>
37. Burlington Free Press. Tesla Model X burned on frozen Lake Champlain: What happened and what's coming next. (2019). Available at: <https://www.burlingtonfreepress.com/story/news/local/2019/03/01/tesla-model-x-burned-lake-champlain-what-next-steps-fire/3026364002/>
38. Staff, R. (2018). Tesla crash may have triggered battery fire: Swiss firefighters. U.S. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-swiss-tesla-crash/tesla-crash-may-have-triggered-battery-fire-swiss-firefighters-idUSKCN1IF2WN>
39. Tesla-Unfall im Tessin: Akku als mögliche Brandursache. *Neue Zürcher Zeitung*. . Available at: <https://www.nzz.ch/panorama/tesla-unfall-im-tessin-akku-als-moegliche-brandursache-ld.1385766?reduced=true>

40.Porsche catches fire while charging. (2018). Available at:
<https://www.bangkokpost.com>.
<https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1429518/porsche-catches-fire-while-charging>

41.SAE J2929. Safety standards for electric and hybrid vehicle propulsion battery systems utilizing lithium-based rechargeable cells; 2013.

42.ISO 12405-3. Electrically propelled road vehicles – test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 3: Safety performance requirements; 2014.

43.IEC/(CD) 62660-3. Rechargeable cells standards publication secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 3: safety requirements of cells and modules; 2013.

44.UN/ECE Regulation No. 10002. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train; 2013.

45.UL 2580. Batteries for use in electric vehicles; 2013.

46.Doughty DH, Crafts CC. SAND 2005–3123: freeDomCAR electrical energy storage systems abuse test manual for electric and hybrid electric vehicle applications; 2005.

47.QC/T 743. Lithium-ion batteries for electric vehicles Chinese voluntary standards for automobiles; 2006.

48.SAEJ2464:2; Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storages. SAE: Warrendale, PA, USA, 2011.

49.Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy № 934 vid 03.09.2009r. «Pro vnesennia zmin do postanov Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8 zhovtnia 1997 r. № 1128 i vid 10 zhovtnia 2001 r. № 1306».

50.Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy №1166 vid 22.12.2010r. «Pro yedyni vymohy do konstruksii ta tekhnichnoho stanu kolisnykh transportnykh zasobiv, shcho ekspluatuiutsia».

© А. Ф. Гаврилюк, О. Е. Васильева, 2023

Оглядова.

Надійшла до редакції 20.04.2023

Прийнято до публікації 16.05.2023