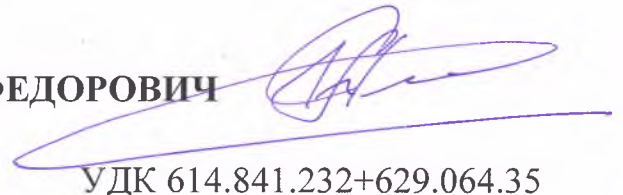


ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАВРИЛЮК АНДРІЙ ФЕДОРОВИЧ



УДК 614.841.232+629.064.35

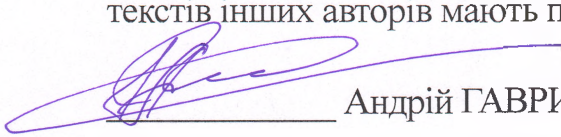
ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
(ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ)**

21.06.02 – пожежна безпека
(261 – пожежна безпека)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Андрій ГАВРИЛЮК

Науковий консультант ЯКОВЧУК Роман Святославович, доктор технічних наук,
доцент

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Гаврилюк А.Ф. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (261 – пожежна безпека). Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2025.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Дисертація присвячена розв’язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях в залежності від густини зовнішнього теплового потоку, який спричиняє виникнення пожежі, температури поверхні батареї, яка обумовлюється технічними характеристиками, конструктивними та експлуатаційними параметрами, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів.

Зростання кількості електричних колісних транспортних засобів (далі – електромобілів) у світі є однією з ключових тенденцій сучасної автомобільної індустрії. Це зумовлено з одного боку обмеженими запасами нафти та газу, а з іншого – колосальною кількістю викидів шкідливих речовин від колісних транспортних засобів, які обладнані двигунами внутрішнього згоряння, а також урядовими програмами провідних країн світу, які стимулюють придбання власне електромобілів. Згідно із даними міжнародного енергетичного агентства у 2023 році у світі кожен п’ятий проданий автомобіль був електричним. Загалом автопарк електромобілів станом на 2024 рік перейшов відмітку у 40 млн, що є у 8 разів більше у порівнянні із 2019 роком і за прогнозами до 2030 року їх налічуватиметься понад 150 млн. Така шалена динаміка створює нові виклики для інженерів та науковців з приводу безпечної експлуатації електромобілів.

Національна асоціація протипожежного захисту США наводить дані, що у світі впродовж 2024 року виникло близько 5 тис. пожеж електромобілів і до 2030 року їх кількість може подвоїтись. Тому пожежна небезпека електромобілів, а також системи їх протипожежного захисту є актуальною проблематикою, яка масштабується та обґрунтована викликами сьогодення.

Узагальнення результатів наукових досліджень вказав на відсутність комплексного підходу з розкриття особливостей пожеж електромобілів і впливу технічних характеристик та конструктивних параметрів LІВ на процеси їх горіння внаслідок впливу зовнішнього джерела тепла. Окрім цього немає механізму визначення часу виникнення горіння у силових LІВ електромобілів, які б враховували як технічні характеристики, конструктивні та експлуатаційні параметри самої батареї, так і характеристики джерела тепла.

Окреслено основні чинники, які впливають на пожежну небезпеку зазначених об'єктів. Виявлено, що ємність силової акумуляторної батареї (далі - АКБ), стан її заряду, а також матеріал виготовлення катодних елементів впливатимуть на особливості виникнення займання та розвиток пожеж електричних колісних транспортних засобів загалом.

Наведене обумовило здійснити аналіз та узагальнення основних методів оцінювання пожежної небезпеки силових АКБ та електричних колісних транспортних засобів в цілому. Встановлено, що існуючі методики є різнобічними та випробувальне обладнання, яке застосовується кардинально відрізняються, як за масштабом так і за конструктивним виконанням, що впливає на отриманні результати випробувань як силових АКБ так і електромобілів щодо пожежної небезпеки. Систематизовано вітчизняні та світові вимоги до систем забезпечення протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів. На основі аналізу та систематизації технічних характеристик компонентів літій-іонних батарей, які використовуються у сучасних електромобілях, прокласифіковано їх за рівнем пожежної небезпеки.

Узагальнено та систематизовано відомі теоретичні методи в контексті дослідження пожежної безпеки LІВ серед яких: метод кінцевих елементів,

об'ємів та різниць, еквівалентні схемні моделі, метод Монте-Карло, обчислювальна гідродинаміка, метод дискретних ординат а також їх адаптація для досліджень процесів виникнення та розвитку пожеж у силових батареях та електромобілях в цілому. Наведено їх переваги та недоліки а також можливість та зручність у використанні при дослідженні зазначених процесів. З використанням базових рівнянь термодинаміки та теплопередачі наведено математичні описи початкових та граничних умов, кількість енергії яка виділяється при внутрішньому та зовнішньому короткому замиканні у літій-іонних батареях, тепловиділення від протікання електричного струму, кількість енергії, яка виділяється при згорянні горючих матеріалів АКБ, а також кількість енергії, яка передається АКБ від зовнішнього джерела тепла, з врахуванням конвекційного та радіаційного теплообміну також рівняння нестационарної теплопровідності у циліндричній системі координат.

На підставі здійсненого комп'ютерного моделювання з використанням розробленої газо гідродинамічної моделі електромобіля на прикладі Tesla Model S, доведена гіпотеза про можливість розвитку пожежі електромобіля внаслідок виникнення термодеструктивних процесів у елементах силової АКБ. Встановлено, що при пожежі електромобіля, внаслідок дії теплового потоку потужністю 6-8 МВт, досягнення граничного значення температури 120°C на суміжній стіні, що знаходиться на відстані 3 м і досягається вже на 690-700 с від початку пожежі. Виходячи з цього рекомендована мінімальну протипожежна відстані до огорожуючих конструкцій стін будівель при пожежі електромобіля становить 3 м. Обґрунтовано та визначено температурні розподіли пожежі, внаслідок виникнення займань у силовій акумуляторні батареї та його поширення по електромобілі в найскладніших умовах – закритого паркінгу, а також визначено безпечні протипожежні відстані, які становлять по фронту електромобіля що горить 6 м, а по фланзі 10 м, за умови часу вільного розвитку пожежі 600 с.

Розроблено методику натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використання

електронагрівальної панелі та модельного вогнища класу В. Обґрунтовано критерії, які характеризують початок виникнення термодеструктивного процесу, перелік необхідних засобів вимірювальної техніки, їх розміщення, а також особливості використання електронагрівальної панелі. Науково обґрунтовано кількість та місця встановлення термопар у дослідному зразку для отримання максимально точних даних нагріву силових літій-іонних акумуляторних батарей під дією джерела тепла, а також розміщення дослідних взірців відносно джерела тепла, яка ініціює виникнення термодеструктивного процесу

За результатами експериментальних досліджень виявлено залежності зміни часу виникнення займання у літій-іонних елементах силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м^2 що лінійно зменшується з 1225 с до 1115 с для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального на горизонтальне; лінійно зростає з 1115 с до 1340 с для горизонтального просторового розміщення відносно джерела тепла розміщення при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 %, що дає інструмент прогнозування поширення температурних факторів пожежі.

Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що температура горіння літій-іонних елементів силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі дії зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м^2 може змінюватись: зростати з 690°C до 810°C для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального на горизонтальне; зменшуватись з 810°C до 450°C при горизонтальному просторовому розміщенні джерела тепла та зміні ступеня заряду з 100 % до 0 %. Зазначені результати дозволяють формувати вимоги пожежної безпеки електромобілів на стадії проектування.

З використанням сучасних статистичних методів забезпечено відтворюваність результатів та підтверджено загальну збіжність кожного

окремого експерименту, при яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій натурних експериментальних досліджень не перевищують 16,4 % у випадку використання модельного вогнища пожежі та 10,0 % при використанні електронагрівальної панелі.

Обґрунтовано та розроблено науково-методичний апарат, що дозволяє визначати час займання силових акумуляторних батарей електромобілів, які мають енергетичну ємність від 30 кВт·год до 100 кВт·год і в разі дії густини теплового потоку в діапазоні від 10 кВт/м² до 200 кВт/м², що дає підґрунтя формувати методологію прогнозування пожежної безпеки електромобілів.

З врахуванням отриманих комплексних результатів досліджень обґрунтовано та розроблено блок-схему алгоритму роботи максимально-динамічного давача температури із змінними параметрами спрацювання, а саме значеннями мінімальної статичної температури спрацювання і значення швидкості підвищення температури за якої він спрацює. З використанням пакету Simulink програмного середовища MATLAB досліджено та верифіковано його роботу, з можливістю розпізнавання зміни температури в силовій АКБ внаслідок впливу кліматичних умов, пожежі, експлуатації, або від внутрішнього короткого замикання чи несправності системи охолодження.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях в залежності від густини зовнішнього теплового потоку, який є джерелом займання, температури поверхні батареї, яка обумовлюється технічними характеристиками, конструктивними та експлуатаційними параметрами, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів реалізовано у розробленому ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення», а також проєкті змін до Постанови Кабінету Міністрів України №1128 «Про забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння».

Результати проведених досліджень впроваджені у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій під час розроблення рекомендації щодо заходів безпеки з використання акумуляторних літій-іонних батарей у житлових приміщеннях в умовах блекаутів (акт впровадження від 24.09.2024 року), а також у навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності з підготовки здобувачів за першим (бакалаврським) рівнем освіти, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Цивільний захист» при викладанні дисципліни «Організація ліквідації надзвичайних ситуацій та пожеж», а також при викладанні дисципліни «Транспортні засоби з електричним та гібридним приводом» за освітньо-професійною програмою «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» (акт впровадження від 16.12.2024 року); описані особливості виникнення та розвитку пожеж електричних колісних транспортних засобів використовуються у роботі акредитованого судового експерта Міністерства юстиції під час аналізу та встановлення ймовірної причини виникнення пожеж такого роду (акт впровадження від 26.07.2024 року).

У дисертації, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях в залежності від густини зовнішнього теплового потоку, який спричиняє виникнення пожежі, температури поверхні батареї, яка обумовлюється технічними характеристиками, конструктивними та експлуатаційними параметрами, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів.

Ключові слова: пожежна безпека, пожежа електромобіля, протипожежний захист електромобіля, літій-іонна батарея, термодеструктивний процес, катод, температура, тепловий потік, пожежа.

SUMMARY

Gavryliuk A.F. Development of Scientific Foundations for Fire Protection of Electric Wheeled Vehicles (Electric Cars). – Qualification scientific paper. Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – Fire Safety (261 – Fire safety) . Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2025.

The dissertation will be defended at the meeting of the Dissertation Council D 35.874.01 of the Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and applied problem in the field of fire safety - disclosure of the regularities of the dynamics of thermodestructive processes in power batteries depending on the density of the external heat flux that causes the fire, the temperature of the battery surface, which is determined by technical characteristics, design and operational parameters, as a scientific basis for ensuring fire protection of electric vehicles.

The growth in the number of electric wheeled vehicles (hereinafter referred to as electric vehicles) in the world is one of the key trends in the modern automotive industry. This is due, on the one hand, to limited oil and gas reserves, and, on the other hand, to the enormous amount of emissions from wheeled vehicles equipped with internal combustion engines, as well as government programs in the world's leading countries that encourage the purchase of electric vehicles. According to the International Energy Agency, in 2023, one in five cars sold worldwide was electric. In total, the fleet of electric vehicles as of 2024 passed the 40 million mark, which is 8 times more than in 2019, and according to forecasts, by 2030 there will be more than 150 million of them. This frantic dynamics creates new challenges for engineers and scientists regarding the safe operation of electric vehicles.

A generalization of the results of scientific research has indicated the lack of an integrated approach to disclosing the characteristics of electric vehicle fires and the impact of technical characteristics and design parameters of LIBs on their combustion

processes due to the influence of an external heat source. In addition, there is no mechanism for estimating the time of combustion in the power LIBs of electric vehicles, which would take into account both the technical characteristics, design and operational parameters of the battery itself and the characteristics of the heat source.

The main factors that influence the fire hazard of these objects are outlined. It is found that the capacity of the power battery (hereinafter referred to as the battery), the state of its charge, as well as the material of manufacture of the cathode cells will affect the peculiarities of the occurrence of ignition and the development of fires of electric wheeled vehicles in general.

The above has led to an analysis and generalization of the main methods for assessing the fire hazard of power batteries and electric wheeled vehicles in general. It has been established that the existing methods are diverse and the test equipment used is fundamentally different, both in scale and design, which affects the results of testing both power batteries and electric vehicles for fire hazard. Domestic and international requirements for fire protection systems for electric wheeled vehicles are systematized. Based on the analysis and systematization of the technical characteristics of lithium-ion battery components used in modern electric vehicles, they are classified according to the level of fire hazard.

The known theoretical methods, including the finite element method, volumes and differences, equivalent circuit models, Monte Carlo method, computational fluid dynamics, discrete ordinate method, and their adaptation for studying the processes of fire initiation and development in power batteries and electric vehicles in general, are generalized and systematized. Their advantages and disadvantages, as well as the possibility and convenience of using them in the study of these processes are presented. Using the basic equations of thermodynamics and heat transfer, mathematical descriptions of initial and boundary conditions, the amount of energy released during internal and external short circuits in lithium-ion batteries, and heat generation from the flow of electric current are given, the amount of energy released during the combustion of combustible materials in the battery, as well as the amount of energy transferred to the battery from an external heat source, taking into account

convection and radiation heat transfer, and the equation of unsteady-state thermal conductivity in a cylindrical coordinate system.

On the basis of computer modeling using the developed gas hydrodynamic model of an electric vehicle on the example of the Tesla Model S, the hypothesis about the possibility of an electric vehicle fire due to the occurrence of thermodestructive processes in the elements of the power battery is proved. It is established that in the event of an electric vehicle fire, due to the action of a heat flux of 6-8 MW, the temperature limit of 120°C on an adjacent wall located at a distance of 3 m is reached already at 690-700 s from the beginning of the fire. Based on this, the recommended minimum fire protection distance to the building envelope in the event of an electric vehicle fire is 3 m. The temperature distributions of the fire due to the occurrence of fires in the power battery and its spread through the electric vehicle in the most difficult conditions - a closed parking lot - are substantiated and determined, and safe fire protection distances are determined, which are 6 m along the front of the burning electric vehicle and 10 m along the flank, provided that the free development time of the fire is 600 s.

A methodology for full-scale fire studies of the combustion processes of electric vehicle power lithium-ion batteries using an electric heating panel has been developed. The criteria that characterize the onset of an irreversible exothermic reaction, the list of necessary measuring instruments, their placement, and the peculiarity of using an electric heating panel are substantiated. The procedure for conducting full-scale fire tests with ensuring labor safety conditions, as well as the procedure for processing the obtained research results, is described. The number and locations of thermocouples in the prototype are scientifically substantiated to obtain the most accurate data on the heating of power lithium-ion batteries under the influence of a heat source, as well as the placement of prototypes relative to the heat source that initiates the thermal destructive process.

According to the results of experimental studies, the dependences of changes in the time of ignition in the lithium-ion cells of the power battery of electric vehicles with the cathode material NCA (lithium-nickel-cobalt aluminum oxide

LiNi_xCoyAlzO₂) under the influence of an external heat flux with a density of 30 kW/m², which linearly decreases from 1225 s to 1115 s for 100 % charged lithium-ion cells when the spatial location relative to the heat source is changed from vertical to horizontal; linearly increases from 1115 s to 1340 s for horizontal spatial placement relative to the heat source when the degree of charge changes from 100 % to 0 %.

It has been proved by the calculation method and experimentally confirmed that the combustion temperature of lithium-ion cells of the power battery of electric vehicles with the cathode material NCA (lithium-nickel-cobalt-aluminum oxide LiNi_xCoyAlzO₂) under the influence of an external heat flux with a density of 30 kW/m² can vary: increase from 690 °C to 810 °C for 100 % charged lithium-ion cells when the spatial location relative to the heat source is changed from vertical to horizontal; decrease from 810 °C to 450 °C when the heat source is horizontal and the degree of charge is changed from 100 % to 0 %.

Using modern statistical methods, the reproducibility of the results was ensured and the overall convergence of each individual experiment was confirmed, with absolute deviations between the averaged results of experimental studies and each of the series of full-scale experimental studies not exceeding 16.4 % in the case of using a model fire and 10.0 % in the case of using an electric heating panel.

A scientific and methodological apparatus has been developed that combines methods of conducting field studies and substantiated criteria characterizing the conditions for the occurrence of combustion, which makes it possible to determine the safety time conditions before the occurrence of combustion of electric vehicle power batteries, in the energy range from 30 kWh to 100 kWh with cathode materials lithium-nickel-cobalt-aluminum oxide, lithium-nickel-manganese-cobalt oxide, lithium-iron-phosphate under the influence of a heat flux with a density of 10 kW/m² to 200 kW/m² for heat sources with and without an open flame.

Taking into account the obtained comprehensive research results, a flowchart of the algorithm for the operation of a maximum-dynamic temperature sensor with variable operation parameters, namely the values of the minimum static temperature

of operation and the value of the temperature rise rate at which it is triggered, was substantiated and developed. Using the Simulink package of the MATLAB software environment, its operation was investigated and verified, with the ability to recognize temperature changes in the power battery due to climatic conditions, fire, operation, or from an internal short circuit or malfunction of the cooling system. Using the temperature sensor algorithm, a system for emergency shutdown of the electric vehicle power battery was developed, which will create access conditions in the context of its extinguishing.

The results of theoretical and experimental studies on the disclosure of the regularities of the dynamics of thermodestructive processes in power batteries depending on the density of the external heat flux that causes the occurrence of a fire, the temperature of the battery surface, which is determined by technical characteristics, design and operational parameters, as a scientific basis for ensuring fire protection of electric vehicles, are implemented in the developed state standard of Ukraine DSTU 9222:2023 “Fire Safety. Fire protection of electric vehicle charging systems. Basic Provisions”, as well as draft amendments to the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 128 ‘On Providing Wheeled Vehicles with Primary Fire Extinguishing Equipment’.

The results of the research have been implemented in: the activities of the Department of Emergency Prevention of the State Emergency Service of Ukraine in developing recommendations on safety measures for the use of rechargeable lithium-ion batteries in residential premises in blackouts

The dissertation, which is a completed scientific research, provides a solution to an urgent scientific and applied problem in the field of fire safety, which is to reveal the laws of the dynamics of thermodestructive processes in power batteries depending on the density of the external heat flux that causes the fire, the temperature of the battery surface, which is determined by technical characteristics, design and operational parameters, as a scientific basis for ensuring fire protection of electric vehicles.

Keywords: fire safety, electric vehicle fire, electric vehicle fire protection, lithium-ion battery, thermodestructive process, cathode, temperature, heat flux, fire.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, ЩО ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних виданнях,
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Pasnak I., Prydatko O., **Gavrilyk A.** Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, 3 (81). P. 22–28. (Scopus Q3).
2. Kushnir A., Kopchak B., **Gavryliuk A.** Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, 10 (111). P. 6–18. (Scopus Q3).
3. Nazarenko S., Kovalenko R., **Gavryliuk A.**, Vinogradov S., Kryvoshei B., Pavlenko S., Boikov I., Muzichuk V., Kalinin P. Determining the dissipative properties of a flexible pipeline's material at stretching in the transverse direction taking its structural elements into consideration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, 1 (110). P. 12–20. (Scopus Q3).
4. Gydym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., **Gavryliuk A.** The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 136, 106198. (Scopus Q1).
5. **Gavryliuk A.**, Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023. Vol. 11(3). P. 421–434. (Scopus Q3).
6. **Gavryliuk A.**, Yakovchuk R., Chalyy D., Lemishko M., Tur N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2 (10 (122)). P. 39–46. (Scopus Q3).

**Статті у наукових виданнях, включених до Переліку
наукових фахових видань України**

7. **Гаврилюк А. Ф.,** Лин А. С. Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*. 2017. №31. С. 11–17.
8. **Гаврилюк А. Ф.,** Лемішко М. В. Аналіз еквівалентної паливної ошадливості електромобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2019. №20. С. 85–89.
9. **Гаврилюк А. Ф.,** Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літєвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. №40. С. 31–39.
10. **Гаврилюк А. Ф.,** Яковчук Р. С., Субота А. В. Аналіз пожежної небезпеки витоку водню з електромобілів на паливних елементах. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 47–56.
11. **Гаврилюк А. Ф.** Визначення параметрів і дій при пожежах електромобілів на водневих паливних елементах. *Комунальне господарство міст*. 2023. №1 (175). С.118–124.
12. **Гаврилюк А. Ф.,** Васильєва О. Е. Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. *Пожежна безпека*. 2023. №42. С. 32–42.
13. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження показників, які описують процеси горіння електромобілів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2. С. 57–70.
14. **Гаврилюк А. Ф.,** Яковчук Р. С. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. №2 (16). С. 32–41.
15. **Гаврилюк А. Ф.,** Яковчук Р. С., Лемішко М. В. Експериментальні дослідження елементів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2023. №43. С. 50–62.

16. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування найбільш значущих критеріїв пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2023. №42. С. 81–90.

17. **Гаврилюк А.** Методика експериментальних досліджень пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів під дією нагрівальної панелі. *Комунальне господарство міст*. 2024. №1 (182). С. 180–186.

18. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Експериментальні дослідження модулів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 5–12.

19. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Методика експериментальних досліджень модулів силових батарей електромобілів на предмет пожежної небезпеки. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2024. №29. С. 100–109.

20. **Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С.** Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних батарей. *Комунальне господарство міст*. 2024. №4 (185). С.166–171.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

21. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження паливної та еквівалентної ощадливості автомобілів з традиційними та альтернативними видами пального. *Наукові праці ВНТУ*. Вінниця, 2019. №2. С. 1–8.

Патенти на корисну модель

22. **Гаврилюк А. Ф., Гащук П. М., Домінік А. М., Ренкас А. А., Руденко Д. В., Товарянський В. І., Оленюк Ю. Р., Підгородецький Я. І., Швець М. М.** Установка автоматичного пожежогасіння електромобілів. *Патент України на корисну модель №141239*, опубл. 25.03.2020, Бюл. №6.

23. **Гаврилюк А. Ф., Домінік А. М., Товарянський В. І., Лемішко М. В.** Автоматична аерозольна установка пожежогасіння транспортних засобів. *Патент України на корисну модель №134813*, опубл. 10.06.2019, Бюл. №11.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. **Гаврилюк А. Ф.,** Ганченко І. Ю. Шляхи підвищення протипожежного захисту колісних транспортних засобів *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2017. С. 19–20.

25. **Гаврилюк А. Ф.,** Паснак І. В., Ганченко І. Ю. Удосконалення протипожежного захисту транспортних засобів *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2017. С. 116–117.

26. **Гаврилюк А. Ф.** Моделювання іскрових розрядів бортових електромереж як чинників впливу на пожежну небезпеку транспортних засобів *Матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2017. С. 70–73.

27. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження внутрішнього опору акумуляторної батареї як чинника впливу на величину струму короткого замикання транспортних засобів *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2018. С. 243–244.

28. **Гаврилюк А. Ф.,** Тимошенко Ю. В. До питання тенденцій сучасних електромобілів *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2018. С. 69–70.

29. **Гаврилюк А. Ф.** Екологічна небезпека літій-іонних батарей транспортних засобів *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна небезпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та перспективи»*. Львів, 2018. С. 165.

30. **Гаврилюк А. Ф.,** Лемішко М. В. Пожежна небезпека літій-іонних батарей електромобілів *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної*

конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності». Львів, 2019. С. 33–34.

31. **Гаврилюк А. Ф.** Принципова схема реалізації технічних засобів для гасіння пожежі електромобілів *Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, 2019. С. 141–144.

32. **Гаврилюк А. Ф., Назаровець О. Б.** Застосування мікроструктурного фазового аналізу провідників бортової електромережі транспортних засобів при дослідженні їх загорянь *Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»*. Харків, 2019. С. 28–30.

33. **Гаврилюк А. Ф., Товарянський В. І.** Принципова схема аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів *21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (з міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2019. С. 61–63.

34. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз причин виникнення пожеж колісних транспортних засобів *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2020. С. 16–18.

35. **Gawryliuk A., Dubasiuk W.** Udoskonalenie metod ochrony przeciwpożarowej pojazdów. *III Międzynarodowa Konferencja «Bezpieczeństwo, zarządzanie, medycyna i kultura fizyczna»*. Gdańsk, 2020. С. 68–94.

36. **Гаврилюк А., Лемішко М.** Електромобілі: конструювання та експлуатація *Матеріали Другої Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем»*. Рівне, 2020. С. 116–118.

37. **Гаврилюк А., Лемішко М.** Електромобілі. Перспектива розвитку *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»*. Кременчук, 2020. С. 210–217.

38. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування та розроблення системи запобігання затоплення автомобілів *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами»*. Харків, 2020. С. 280–282.

39. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування та розроблення системи аварійного знеструмлення транспортного засобу *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти»*. Кривий Ріг, 2020. С. 76–77.

40. **Гаврилюк А. Ф.,** Лемішко М. В. Аналіз способів контролю температури при заряджанні тягових батарей електромобілів *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля»*. Львів, 2020. С. 71–75.

41. **Гаврилюк А.,** Лемішко М. Токсичні викиди фтористого газу від пожеж силових-літій-іонних акумуляторів електромобілів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2021. С. 67–69.

42. **Гаврилюк А.,** Лесюк Д. Аналіз динаміки електричних і гібридних автомобілів в Україні *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2021. С. 71–73.

43. Rudyk Y., Kuts V., **Gavryliuk A.,** Naumchuk N. Required safety component of automotive cyberphysical systems. *20 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2020. P. 338–342.

44. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз особливостей виникнення, розвитку та гасіння пожеж електричних та гібридних автомобілів *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації безпека та захист»*. Черкаси, 2021. С. 190–192.

45. **Гаврилюк А. Ф.** До питання встановлення причин пожеж транспортних засобів *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій»*. Київ, 2022. С. 103–106.

46. **Гаврилюк А., Дуда Ю.** Виклики використання електромобілів *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2022. С. 189–191.

47. **Гаврилюк А., Верхолук Ю.** Пожежна небезпека електромобілів на водневому паливі *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси, 2022. С. 16–17.

48. Rudyk Y., **Gavryliuk A.**, Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Estimations of Equivalent Fuel Savings of Electric Vehicles. 2022 *IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 - Proceedings*. 2022. P. 3877–390.

49. **Гаврилюк А., Гриньова А.** Аналіз пожеж електромобілів та причин їх виникнення *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси, 2022. С. 16–17.

50. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз проведення аварійно-рятувальних робіт при виникненні ДТП електромобілів *Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції «Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану»*. Кривий Ріг, 2022. С.34–35.

51. **Гаврилюк А. Ф.** Електромобілі. Тенденції та небезпеки *Матеріали XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2023. С. 131–135.

52. Rudyk Y., **Gavryliuk A.**, Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Comparative assessment of the efficiency of some car drives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. MCEME-2022, 1277*. 2023. P.1–6.

53. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Особливість проведення вогневих експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів. *Третя Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2024»*. Харків, 2024. С. 111–113.

54. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Особливості FDS моделювання при дослідженні пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2024. С. 840–843.

55. **Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С.** Аналіз ефективності використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. Львів, 2024. С. 144–145.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	27
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	47
1.1. Загальні положення.....	47
1.2. Аналіз статистичних даних пожеж електромобілів, причин їх виникнення та наслідків від них.....	49
1.2.1. Статистичні дані пожеж електромобілів в Україні та причини їх виникнення.....	51
1.2.2. Статистичні дані пожеж електромобілів в світі та причин їх виникнення.....	55
1.3. Пожежна небезпека електромобілів.....	61
1.3.1. Загальні положення.....	61
1.3.2. Пожежна небезпека електромобілів, які використовують силові акумуляторні батареї.....	63
1.3.3. Пожежна небезпека електромобілів, які використовують паливні елементи.....	75
1.4. Вітчизняні та світові вимоги до систем забезпечення протипожежного захисту електромобілів.....	77
1.5. Характеристика та особливості розвитку процесів горіння електромобілів.....	83
1.6. Узагальнення результатів огляду.....	87
1.7. Висновки до розділу 1.....	88
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МЕХАНІЗМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОТИПОЖЕЖНИЙ ЗАХИСТ ЗАЗНАЧЕНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	91

2.1. Теоретичні методи дослідження процесів розвитку пожеж у силових батареях електромобілів.....	91
2.2. Прогнозування та оцінка виникнення займань у літій-іонних батареях електромобілів із використанням методів комп'ютерної математики.....	107
2.3. Числова реалізація рівнянь математичних моделей що описують процеси виникнення займань у літій-іонних батареях електромобілів.....	119
2.4. Критерії розвитку та поширення пожежі по силівній батареї та електромобілі в цілому.....	129
2.5. Висновки до розділу 2.....	135
РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗОГІДРОДИНАМІКИ	137
3.1. Моделювання процесів виникнення та поширення пожежі електромобіля	137
3.1.1. Опис сценарію виникнення пожежі електромобіля та розрахункові параметри.....	137
3.1.2. Результати розрахунку моделі пожежі електромобіля	142
3.2. Моделювання процесів поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу.....	147
3.2.1. Опис сценарію поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу.....	147
3.2.2. Результати розрахунку поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу.....	148
3.3. Висновки до розділу 3.....	154
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ	

ГОРІННЯ СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	156
4.1. Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів з використанням модельного вогнища класу В.....	157
4.2. Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі.....	169
4.3. Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля.....	173
4.4. Методика натурних вогневих досліджень процесів гасіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля.....	182
4.5. Висновки до розділу 4.....	185
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ СИЛОВИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	188
5.1. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщені відносно модельного вогнища класу В.....	189
5.1.1. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння розряджених силових літій-іонних елементів акумуляторів.....	190
5.1.2. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 50%.....	197
5.1.3. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів	

електромобілів заряджених на 100 %	204
5.2 Результати натурних досліджень силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі.....	211
5.2.1. Результати натурних досліджень процесів горіння розряджених силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі...	212
5.2.2. Результати натурних досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 50 % з використанням електронагрівальної панелі.....	223
5.2.3. Результати натурних досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 100 % з використанням електронагрівальної панелі.....	234
5.3. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля.....	244
5.4. Результати експериментальних досліджень ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів з використанням переносних вогнегасників.....	251
5.5. Висновки до розділу 5.....	256
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ.....	258
6.1. Створення газогідродинамічної моделі для прогнозування виникнення займання у літій-іонних батареях електромобілів.....	258
6.2. Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому	

розміщенні відносно модельного вогнища класу В з використанням газогідродинамічної моделі.....	265
6.3. Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно електронагрівальної панелі з використанням газогідродинамічної моделі.....	287
6.4. Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних модулів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу С з використанням газогідродинамічної моделі.....	305
6.5. Висновки до розділу 6.....	307
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ЧАСУ ВИНИКНЕННЯ ТЕРМОДЕСТРУКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	310
7.1. Розрахунок часу виникнення необоротних електро-теплових процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів за спрощеним розрахунковим методом.....	310
7.2. Розрахунково-табличний метод оцінювання часу виникнення необоротних електро-теплових процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів.....	324
7.3. Алгоритм роботи максимально-динамічного давача контролю температури силових літій-іонних батарей електромобілів.....	330
7.4. Система аварійно відключення силової батареї електромобіля та ствол для її гасіння.....	339
7.5. Висновки до розділу 7.....	348
ВИСНОВКИ.....	351
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	355
ДОДАТКИ.....	396

ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	396
ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації.....	404
ДОДАТОК В Акти впровадження результатів дисертації.....	409
ДОДАТОК Г Патент на корисну модель №141239 «Установка автоматичного пожежогасіння електромобілів».....	414
ДОДАТОК Д Патент на корисну модель №134813 «Автоматична аерозольна установка пожежогасіння транспортних засобів».....	415

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Електричний колісний транспортний засіб (електромобіль, EV – electric vehicle) – автомобіль, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумулювання електричної енергії. Для акумулювання електричної енергії можуть використовуватись силові акумуляторні батареї, суперконденсатори чи паливні елементи.

Електромобіль з силовою акумуляторною батареєю (BEV – battery electric vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з силових АКБ.

Електромобіль з розширеним діапазоном дії (REEV – range-extended electric vehicle, or an E-REV extended-range electric vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху створюється виключно електричними двигунами, які живляться електроенергією з силових АКБ, а невеликий ДВЗ приводить в дію генератор для заряджання силових АКБ.

Електромобіль з водневими паливними елементами (FCEV Fuel Cell Electric Vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з водневих паливних елементів.

Гібридний електромобіль (HEV Hybrid Electric Vehicle) – це транспортний засіб у якому обертовий момент необхідний для забезпечення руху, може створюватись ДВЗ і електричними двигунами одночасно або окремо, а зарядження силових АКБ здійснюється лише штатним генератором автомобіля та завдяки рекуперації.

Гібридний електромобіль, що підключається (PHEV Plug in Hybrid Electric Vehicle) – це транспортний засіб у якому обертовий момент необхідний для забезпечення руху, може створюватись ДВЗ і електричними двигунами одночасно або окремо, а зарядження силових АКБ здійснюється штатним

генератором автомобіля, завдяки рекуперації, а також при підключення до зовнішнього джерела струму (електромережі).

Термодеструктивний процес АКБ – це низка реакцій і процесів розкладання, що відбуваються всередині елементів батареї під впливом підвищеної температури, яка стрімко зростає через екзотермічні реакції в електродах, електроліті та інших компонентах акумулятора.

АКБ – акумуляторна батарея.

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння.

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій.

NTSB – Національне управління безпеки на транспорті (National Transportation Safety Board).

NHTSA – агентство Міністерства транспорту США (National Highway Traffic Safety Administration), яке відповідає за забезпечення безпеки дорожнього руху та регулювання транспортних засобів.

NFPA – Національна асоціація протипожежного захисту (National Fire Protection Association) неприбуткова організація, що займається розробленням та впровадженням норм, правил та стандартів з пожежної безпеки у різноманітних галузях.

IEA – Міжнародне енергетичне агентство (IEA – International Energy Agency).

ДТП – дорожньо-транспортна пригода.

КЗ – коротке замкнення.

ВКЗ – внутрішнє коротке замкнення.

LSO – літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-кобальту (LiCoO_2).

LMO – Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-марганцю (LiMn_2O_4)

NMC – літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт марганцю (LiNiMnCoO_2).

LFP – літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-ферум-фосфат (LiFePO_4).

ISO – Міжнародна організація стандартизації (International Organization for Standardization).

SEA – Міжнародне товариство автомобільних інженерів (Society of Automotive Engineers).

HRR – потужність теплового потоку, (Heat Release Rate), кількість енергії, яка вивільняється під час горіння за одиницю часу, Вт.

МКЕ – метод кінцевих елементів.

МКР – метод кінцевих різниць.

МКО – метод кінцевих об'ємів.

ММК – метод Монте-Карло.

ЕСМ – еквівалентні схемні моделі.

ДТ – давач температури.

I – значення сили струму, що протікає, А.

J – густина електричного струму, А/м².

R – внутрішній опір контуру, Ом.

h – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/м²·К.

T – температура навколишнього середовища, К.

σ – електрична провідність матеріалу, См/м.

ϕ – електричний потенціал, В.

Q_{rea} – густина струму від електрохімічних реакцій, які протікають і літій-іонних реакціях, А/м³.

$\nabla\phi$ – градієнт електричного потенціалу, В/м.

C – концентрація хімічної речовини (реагенту) у системі, моль/м³).

E_r – сума енергій, що виділяються всіма реакціями, Дж.

T_0 – температура початку реакцій, К.

E_k – сумарна енергія, яка виділяється при короткому замиканні, Дж.

τ_k – час впродовж якого відбувається коротке замикання, с.

C – сумарна енергетична ємність акумуляторної батареї, Вт·с.

a – стан заряду (у частці від 1).

m'_g – витрата пального у пальнику, кг/с.

q_g – теплота згоряння пального, Дж/кг.

A – площа поверхні теплопередачі, m^2 .

T_1 – температура полум'я, К.

T_2 – температура поверхні, на яку передається тепло, К.

σ – стала Стефана-Больцмана, $Вт \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

ε – ступінь чорноти матеріалу, що опромінюється.

C_g – концентрація газу, моль/ m^3 .

D_g – коефіцієнт дифузії газу, m^2/s .

P – тиск газу, Па.

M – молярна маса газу, г/моль.

t – час, с.

ρ – густина матеріалу, $кг/м^3$.

c_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К).

λ – усереднений коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м \cdot ^\circ C$.

σ_{eff} – ефективна провідність твердого електроліту, с/м.

$\nabla \Phi_s$ – градієнт потенціалу у твердому електроліті, В/м.

κ_{eff} – ефективна провідність рідкого електроліту, с/м.

$\nabla \Phi_e$ – градієнт потенціалу у рідкому електроліті, В/м.

R_g – універсальна газова стала, Дж/моль·К.

F – стала Фарадея, Кл/моль⁻¹.

R_i – внутрішній еквівалентний опір одиниці об'єму, Ом·м⁻³.

ΔS – зміна ентропії, Дж.

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання кількості електричних колісних транспортних засобів (далі – електромобілів) у світі є однією з ключових тенденцій сучасної автомобільної індустрії. Це зумовлено з одного боку обмеженими запасами нафти та газу, а з іншого – колосальною кількістю викидів шкідливих речовин від колісних транспортних засобів, які обладнані двигунами внутрішнього згоряння, а також урядовими програмами провідних країн світу, які стимулюють придбання власне електромобілів. Згідно із даними міжнародного енергетичного агентства у 2023 році у світі кожен п'ятий проданий автомобіль був електричним. Загалом автопарк електромобілів станом на 2024 рік перейшов відмітку у 40 млн, що є у 8 разів більше у порівнянні із 2019 роком і за прогнозами до 2029 року їх налічуватиметься понад 100 млн. Така шалена динаміка створює нові виклики для інженерів та науковців з приводу безпечної експлуатації електромобілів.

Для живлення тягових двигунів в електромобілях використовують джерела електричної енергії – силові акумуляторні батареї (далі – АКБ). Серед різних типів АКБ: свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, натрієво-сульфатних, власне літій-іонні акумуляторні батареї (lithium-ion batteries, далі – LIB), знайшли своє використання у електромобілях через ряд технічних переваг: високу щільність енергії 150-250 Вт·год/кг і більше, великі струми розряду/заряду, термін служби понад 10 років, малу швидкість саморозряду тощо. Разом з тим вагомим недоліком використання LIB є їх здатність, при механічному пошкодженні, позаштатних умовах експлуатації, внутрішньому короткому замиканні (далі – КЗ), впливі зовнішнього джерела тепла самозайматись та інтенсивно горіти.

Відомо, що У Великобританії впродовж 2023 року зафіксовано 219 пожеж електромобілів, що на 83% більше порівняно з попереднім роком. Уряд Швеції повідомляє про випадки близько 20 пожеж електромобілів щорічно. У Норвегії у 2023 році було зафіксовано 239 пожеж електромобілів. В Україні за останні п'ять років було зареєстровано 173 пожежі електромобілів, внаслідок яких

завдано прямих збитків на суму 9 млн 53 тис. грн, побічних – 18 млн 450 тис. грн. Враховуючи статистику збільшення чисельності автопарку електромобілів і відповідно середнього їх віку не важко спрогнозувати і збільшення пожеж такого роду, як і абсолютному такі у відсотковому відношеннях.

Тому різнобічні дослідження пожежної небезпеки електромобілів, а також систем їх протипожежного захисту є актуальною проблематикою, яка масштабується та обґрунтована викликами сьогодення.

Дослідженнями щодо пожежної небезпеки електромобілів займаються ряд вітчизняних та зарубіжних наукових установ та вчених. У значній кількості робіт ґрунтовно описано загальні підходи до забезпечення пожежної небезпеки електромобілів, наведено ряд методів попередження виникнення пожеж та їх гасіння. Досліджено фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час загоряння батарей та запропоновано різні системи охолодження з метою зменшення ризиків вибуху та поширення пожеж електромобілів. В значній кількості робіт вказано на виникнення займань LIB внаслідок їх механічних пошкоджень.

Інші дослідження спрямовані на розкриття механізму впливу короткого замикання на виникнення займань LIB електромобілів, аналізі теплових і механічних ефектів, які виникають при цьому, а також розробленню стратегій запобігання загорянню шляхом оптимізації охолоджувальних систем і вибору безпечних матеріалів для LIB. Описано вплив надмірного струму заряду/розряду на пожежну небезпеку та тривалість служби LIB. Досліджено та описано механізми займання внаслідок позаштатних режимів роботи та ймовірні пошкодження батареї внаслідок цього. Всі ці роботи присвячені, як правило, розкриттю впливу окремих зовнішніх та внутрішніх чинників на проблему виникнення та розвитку горіння у електромобілі.

Узагальнення результатів наукових досліджень вказав на відсутність комплексного підходу з розкриття особливостей пожеж електромобілів і впливу технічних характеристик та конструктивних параметрів LIB на процеси їх горіння внаслідок впливу зовнішнього джерела тепла. Окрім цього немає механізму оцінювання часу виникнення горіння у силових LIB електромобілів,

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях залежно від густини зовнішнього теплового потоку, який спричиняє виникнення пожежі, температури поверхні батареї, яка обумовлюється технічними характеристиками, конструктивними та експлуатаційними параметрами, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів, при цьому одержано такі наукові і практичні результати:

1. На основі аналізу вітчизняних, зарубіжних статистичних даних, теоретичних та експериментальних досліджень, а також відповідної нормативної бази, обґрунтовано та систематизовано чинники та фактори, які можуть впливати на виникнення займання в акумуляторних батареях або бути причиною більш швидкого поширення пожежі електромобілів. Доведено необхідність проведення комплексного підходу щодо визначення часу виникнення горіння акумуляторних батарей та електромобілів в цілому.

2. Визначено критерії та якісно удосконалено механізм, що характеризують умови виникнення горіння акумуляторних батарей, які відрізняються врахуванням джерел тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього. Визначено найбільш значущі технічні характеристики, конструктивні та експлуатаційних чинники, які впливають на механізм виникнення та розвитку горіння силових акумуляторних батарей електромобілів, а саме: катодний матеріал, рівень заряду силових літій-іонних батарей, а також їх просторове розміщення відносно джерела.

3. Теоретично обґрунтовано механізм виникнення горіння в силових АКБ, а також пожеж електромобілів в цілому, шляхом використання та адаптації існуючих математичних моделей, які враховують не лише компоненти горючих матеріалів і їх екзотермічні реакції розкладу, але й акумулюючу

електричну енергію та енергію, яка утворюється внаслідок внутрішнього короткого замикання.

4. Обґрунтовано та визначено температурні розподіли пожежі, внаслідок виникнення займань у силовій акумуляторній батареї та його поширення по електромобілі в найскладніших умовах – закритого паркінгу, а також визначено безпечні протипожежні відстані, які становлять по фронту електромобіля, що горить, 6 м, а по фланзі – 10 м, за умови часу вільного розвитку пожежі 600 с.

5. Обґрунтовано та створено методики експериментальних досліджень механізму виникнення та розвитку горіння силових акумуляторних батарей електромобілів з використанням необхідної мінімальної кількості засобів вимірювальної техніки, для отримання точних та відтворювальних температурних параметрів.

6. За результатами експериментальних досліджень виявлено залежності зміни часу виникнення займання у літій-іонних елементах силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м²: лінійно зменшується з 1225 с до 1115 с для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального анодом до джерела тепла на горизонтальне, що дає інструмент прогнозування поширення температурних факторів пожежі; лінійно зростає з 1115 с до 1340 с для горизонтального просторового розміщення відносно джерела тепла розміщення при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 %, що визначає регламент функціонування електромобілів в закритих паркінгах.

7. Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що температура горіння літій-іонних елементів силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м² може змінюватись: зростати з 690 °С до 810 °С для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального анодом до джерела тепла на горизонтальне; зменшуватись з 810

°C до 450 °C при горизонтальному просторовому розміщенні джерела тепла та зміні ступеня заряду з 100 % до 0 %. Зазначені результати дозволяють формувати вимоги пожежної безпеки електромобілів на стадії проектування.

8. З використанням сучасних статистичних методів забезпечено відтворюваність результатів та підтверджено загальну збіжність кожного окремого експерименту, за яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій натурних експериментальних досліджень не перевищують 16,4 % у випадку використання модельного вогнища пожежі та 10,0 % – при використанні електронагрівальної панелі.

9. Визначено функціональні залежності часу виникнення горіння (τ) літій-іонних батарей ємністю (c) від заряду (k), та густини зовнішнього теплового потоку (q) від дії відкритого полум'я (1) та без нього (2) для АКБ:

- з катодним матеріалом NCM (літій-нікель-манган-кобальт оксид $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$):

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

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

- з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$):

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

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

- з катодним матеріалом LFP (літій-ферум-фосфат, LiFePO_4):

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

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

10. Розроблено науково-методичний апарат, який об'єднує методики проведення натурних досліджень та обґрунтовані критерії, які характеризують умови виникнення горіння, що дозволяє визначати безпекові часові умови до виникнення горіння силових акумуляторних батарей електромобілів, в енергетичному діапазоні від 30 кВт·год до 100 кВт·год з катодними

матеріалами літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, літій-нікель-манган-кобальт оксид, літій-залізо-фосфат при дії теплового потоку густиною від 10 кВт/м^2 до 200 кВт/м^2 для джерел тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього.

11. З врахуванням отриманих комплексних результатів досліджень обґрунтовано та розроблено блок-схему алгоритму роботи максимально-динамічного датчика температури із змінними параметрами спрацювання, а саме значеннями мінімальної статичної температури спрацювання і значенням швидкості підвищення температури, за якої він спрацює. З використанням пакету Simulink програмного середовища MATLAB досліджено та верифіковано його роботу, з можливістю розпізнавання зміни температури в силовій АКБ внаслідок впливу кліматичних умов, пожежі, експлуатації або від внутрішнього короткого замикання чи несправності системи охолодження. Із використанням алгоритму роботи датчика температури розроблено систему аварійного відключення силової батареї електромобіля, що створить умови доступу в контексті її гасіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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: Закон України від 24.02.2023 р. № 2956-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. 15 С.

2. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літєвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. №40. С. 31 – 39.

3. The history of the electric car. In: Department of Energy. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>.

4. International Energy Agency Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future; 2022 IIS 2380-S43. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.

5. Bloomberg NEF. Electric Vehicle Outlook. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>.

6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ipcc.ch/sr15>.

7. Creutzig F., Jochem P., Edelenbosch O., Mattauch L., Vuuren P., McCollum D., Minx. J. Towards demand-side solutions for mitigating climate change. *Nature Climate Change*. 2018. 8(4). P. 268 – 271.

8. Woodward M., Walton B., Hamilton J., Electric vehicles - setting a course for 2030. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www2.deloitte.com/us/en/insig>

hts/focus/future of obility/electric-vehicle-trends-2030.html.

9. Electric Surge: Carmakers' Electric Car Plans across Europe 2019-2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.transportenvironment.org/articles/electric-surge-carmakers-electric-car-plans-across-europe-2019-2025>.

10. Willstrand O., Bisschop R., Blomqvist P., Temple A., Anderson J. Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles. *Safety transport safety research*. 2020. P. 2-55.

11. Zhang Z., Ramadass P., Fang, W. Safety of lithium-ion batteries. *In Lithium-ion batteries*. 2014. P. 409-435.

12. Fire A. P. U. B. Japan Airlines Boeing 787–8, JA829J, Boston, Massachusetts. NTSB/AIR-14/01. *National Transportation Safety Board*. 2014. P. 10-15.

13. N. Goto. Aircraft serious incident investigation report: all Nippon airways Co. Ltd. JA804A. *Japan Transport Safety Board*. 2014. P. 10- 15.

14. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С., Субота А. В. Аналіз пожежної небезпеки витoku водню з електромобілів на паливних елементах. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 47–56.

15. Schmidt A., Oehler D., Weber A., Wetzel T., Ivers-Tiffée, E. A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2021. 393. pp. 10-85

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

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

18. Abada S., Marlair G, Lecocq A., Petit M., Sauvante-Moynot V., Huet F. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*. 2016. Vol. 306. P. 178-192.

19. Anderson J., Larsson F., Andersson P., Mellander B. 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. 2015. P. 8-11.

20. Kushnir A., Kopchak B., Gavryliuk A. Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 3(10(111)). P. 6–18.

21. Gydym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., Gavryliuk A. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 136.

22. Crashed Tesla catches fire twice - second fire during transport on tow truck CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ctif.org/news/crashed-tesla-catches-fire-twice-second-fire-during-transport-tow-truck/>.

23. Electric vehicle spontaneously caught fire while driving on the highway.. CTIF - International Association of Fire Services for Safer Citizens through Skilled Firefighters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ctif.org/news/electric-vehicle-spontaneously-caught-fire-while-driving-highway>.

24. What's Nastier Than an Electric Car on Fire? How About Seven Electric Cars on Fire - FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. FirefighterNation: Fire Rescue - Firefighting News and Community. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.firefighternation.com/news/video-whats-nastier-than-an-electric-car-on-fire-how-about-seven-electric-cars-on-fire/#gref>.

25. A tesla was in a junkyard for three weeks. then it burst into flames. Washington Post . [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.washingtonpost.com/nation/2022/06/22/tesla-fire-sacramento>.

26. Jaguar I-Pace catches on fire again – is this another Bolt EV battery fire situation? [Электронный ресурс]. – Режим

доступу: <https://www.electrek.com/2022/08/01/jaguar-i-pace-catches-fire-another-bolt-ev-battery-fire-situation>.

27. Kim Joo-hwan. A car fire occurred in the underground parking lot of an apartment in Saesaem Village, Sodam-dong, Sejong-si www.naewoeilbo.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.naewoeilbo.com/news/articleView.html?idxno=365492/>.

28. L. Writing. A Zoé electric car suddenly caught fire in the Hérault, two burned, one seriously. www.nicematin.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nicematin.com/faits-divers/une-voiture-electrique-zoe-prend-subitement-feu-dans-lherault-deux-brules-dont-un-grievement-695037>.

29. Porsche embate em ponte móvel de Matosinhos e faz dois mortos e quatro feridos. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jn.pt/local/noticias/porto/matosinhos/dois-mortos-e-quatro-feridos-apos-carro-embater-em-ponte-movel-em-leca-10851084.html/>.

30. All fires in electric vehicles in S. Korea this year involved Hyundai's Kona Electric. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/912588.html.

31. Electric car catches fire and explodes in Île-Bizard garage. CBC News. CBC. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/electric-car-catches-fire-and-explodes-in-ile-bizard-garage-1.5227665/>.

32. Staff R. Tesla car catches fire in Hong Kong parking lot: media. U.S. www.reuters.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-china-hongkong-idUSKCN1SK0G1/>.

33. Zhong R. Tesla to Investigate Car That Appeared to Burst Into Flames in Shanghai. The New York Times. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nytimes.com/2019/04/22/technology/tesla-explosion-shanghai.html>.

34. Tesla vehicle bursts into flames, burns for hours in monroeville. (2019). CBS News - Breaking news, 24/7 live streaming news & top stories. [Электронный

ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cbsnews.com/pittsburgh/news/monroeville-tesla-fire/>.

35. Burlington Free Press. Tesla Model X burned on frozen Lake Champlain: What happened and what's coming next. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.burlingtonfreepress.com/story/news/local/2019/03/01/tesla-model-x-burned-lake-champlain-what-next-steps-fire/3026364002>.

36. Staff, R. Tesla crash may have triggered battery fire: Swiss firefighters. U.S. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.reuters.com/article/us-swiss-tesla-crash/tesla-crash-may-have-triggered-battery-fire-swiss-firefighters-idUSKCN1IF2WN/>.

37. Tesla-Unfall im Tessin: Akku als mögliche Brandursache. Neue Zürcher Zeitung. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nzz.ch/panorama/tesla-unfall-im-tessin-akku-als-moegliche-brandursache-ld.1385766?reduced=true>.

38. Porsche catches fire while charging. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bangkokpost.com>. <https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1429518/porsche-catches-fire-while-charging>.

39. National Transportation Safety Board. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nts.gov/Pages/home.aspx>.

40. International Energy Agency. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/>.

41. Zhu, J. Standardizing mechanical tests on li-ion batteries to develop a useful cell-level model under extreme mechanical loads. *Journal of Energy Storage*. 65, 107320. 2023. pp. 38-43.

42. Air Quality News.com. Electric Vehicle Fires—Should We Be Concerned? airqualitynews.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://airqualitynews.com/2020/10/09/electric-vehicle-fires-should-we-be-concerned/>.

43. EV FireSafe www.evfiresafe.com. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.evfiresafe.com/ev-battery-fire-overview>.
44. Гаврилюк А. Ф. Визначення параметрів і дій при пожежах електромобілів на водневих паливних елементах. *Комунальне господарство міст*. Харків, 2023. №1 (175). С.118 – 124.
45. Hoffmann L., Sturk D. E-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse. 2013. P. 48 – 63.
- 46 Zhang Z, Ramadass P., Fan, W. Safety of lithium-ion batteries. *In Lithium-ion batteries*. 2014. P. 409 – 435.
47. Chen S., Wang Z., Wang J., Tong X., Yan W. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. 63, 103992. P. 48 – 63.
48. Swart J., Arora A., Megerle M., Nilsson S. Product Safety Engineering Society Symposium, 2006 IEEE. 2006. P. 1 – 4.
49. Hammami A., Raymond N., Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003. 424(6949). P. 55 – 68.
50. Santhanagopalan S., Ramadass P., Zhang J. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell. *Power Sources*. 2024. 524(65949) P. 550 – 557.
51. Duh Y., Tsai M., Kao C. Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 127(1). 2017. P. 983 – 993.
52. Lei B., Zhao W., Ziebert C., Uhlmann N., Rohde M., Seifert H. Experimental analysis of thermal runaway in 18650 cylindrical Li-ion cells using an accelerating rate calorimeter. *Batteries*. 3(2). 2017. P. 14.
53. Duh Y., Tsai M., Kao C. Thermal runaway on 18650 lithium-ion batteries containing cathode materials with and without the coating of self-terminated oligomers with hyper-branched architecture (STOBA) used in electric vehicles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 129(3). 2017. P. 1935 – 1948.
54. Duh Y., Tsai, M., Kao C. Characterization on the thermal runaway of

commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 127 (1). 2017, P. 983 – 993.

55. Lin C., Wu C, Pan P., Su C., Wang T., Sheu H., Wu N. Investigation on suppressed thermal runaway of Li-ion battery by hyper-branched polymer coated on cathode. *Electrochim.* 2013. P. 11 – 17.

56. Wang Q., Mao B., Stoliarov S., Sun J. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 73. 2019. P. 95 – 131.

57. Diaz L., He X., Hu Z., Restuccia F., Marinescu M., Barreras J., Rein G. Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. 167(9), 090559. P. 85–106.

58. Casals L., García, B., Canal C. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of environmental management*. 232. 2019. P. 354 – 363.

59. Chen S., Wang Z., Wang J., Tong X., Yan W. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 63, 103992. P. 154 – 163.

60. Hudym V., Gavryliuk A. Analiz system ta ahrehativ avtotransportnykh zasobiv za rivnem pozhezhnoi nebezpeky. *Pozhezhna bezpeka*, 23. 2013. P., 58 – 63.

61. Wang Q., Mao B., Stoliarov S., Sun J. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science* . Vol. 112. 2019. P. 95 – 131.

62. Liu Z., Yu Q., Zhao Y., He R., Xu M., Feng S., Mai L. Silicon oxides: a promising family of anode materials for lithium-ion batteries. *Chemical Society Reviews*. 2019. 48(1). P. 285–309.

63. Yao X., Xie S., Chen C., Wang Q., Sun J., Li Y., Lu S. Comparisons of graphite and spinel $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*. 2005. 50 (20). P. 4076–4081.

64. Nayak P., Erickson E., Schipper F., Penki T., Munichandraiah N., Adelhelm P., Aurbach D. Review on challenges and recent advances in the electrochemical performance of high capacity Li- and Mn-rich cathode materials for Li-ion batteries. *Advanced Energy Materials*. 2018. 8(8). 1702397.
65. Chen R., Zhang H., Xie J., Lin Y., Yu J., Chen L. Preparation, lithium storage performance and thermal stability of nickel-rich layered $\text{LiNi}_{0.815}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.035}\text{O}_2/\text{RGO}$ composites. *ChemElectroChem*. 2018. 5(21). P. 3176–3182.
66. Jang S., Jung K., Yim T. Silyl-group functionalized organic additive for high voltage Ni-rich cathode material. *Current Applied Physics*. 2018. 18(11). P. 1345–1351.
67. Li X., Qiao Y., Guo S., Jiang K., Ishida M., Zhou H. A new type of Li-rich rock-salt oxide $\text{Li}_2\text{Ni}_{1/3}\text{Ru}_{2/3}\text{O}_3$ with reversible anionic redox chemistry. *Advanced Materials*. 2019. 31(11). 1807825.
68. Shi J., Xiao D., Ge M., Yu X., Chu Y., Huang X., Wan L. High-capacity cathode material with high voltage for Li-ion batteries. *Advanced Materials*. 2018. 30(9). 1705575.
69. Fu Y., Lu S., Shi L., Cheng X., Zhang H. Combustion characteristics of electrolyte pool fires for lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2016. 163(9). P. A2022.
70. Eshetu G., Grugeon S., Laruelle S., Boyanov S., Lecocq A., Bertrand J., Marlair G. In-depth safety-focused analysis of solvents used in electrolytes for large scale lithium ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2013. 15 (23). P. 9145–9155.
71. Orendorff C. The role of separators in lithium-ion cell safety. *The Electrochemical Society Interface*. 2012. 21(2). P. 61.
72. Herle S., Gordon J. U.S. Patent No. 10,193,116. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2019.
73. Shi C., Zhang P., Chen L., Yang P., Zhao J. Effect of a thin ceramic-coating

layer on thermal and electrochemical properties of polyethylene separator for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2014. 270. P. 547–553.

74. Li Z., Xiong Y., Sun S., Zhang L., Li S., Liu X., Xu S. Tri-layer nonwoven membrane with shutdown property and high robustness as a high-safety lithium ion battery separator. *Journal of Membrane Science*. 2018. 565. P. 50 – 60.

75. Гаврилюк А. Ф. Моделювання іскрових розрядів бортових електромереж як чинників впливу на пожежну небезпеку транспортних засобів. *Матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2017. С. 70–73.

76. Yang N., Zhang X., Li G., Hua D. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*. 2015. 80. P. 55–65.

77. Yu K., Yang X., Cheng Y., Li C. Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack. *Journal of Power Sources*. 2014. 270. P. 193–200.

78. Zhao J., Rao Z., Li Y. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*. 2015. 103. P. 157–165.

79. Karimi G., Dehghan A. Thermal analysis of high-power lithium-ion battery packs using flow network approach. *International Journal of Energy Research*. 2014. 38(14). P. 1793–1811.

80. Kizilel R., Sabbah R., Selman J., Al-Hallaj S. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*. 2009. 194 (2). P. 1105–1112.

81. Tarascon J., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 2001. 414 (6861). P. 359–367.

82. Jiang Z., Qu Z., Zhang J., Rao Z. Rapid prediction method for thermal

runaway propagation in battery pack based on lumped thermal resistance network and electric circuit analogy. *Applied Energy*. 2020. 268. 115007.

83. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y., Li B. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. 59. P. 83 – 99.

84. Sahraei E., Campbell J., Wierzbicki T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions. *Journal of Power Sources*. 2012. 220. P. 360 – 372.

85. Zhu J. Standardizing mechanical tests on li-ion batteries to develop a useful cell-level model under extreme mechanical loads. *Journal of Energy Storage*. 2023. 65. 107320.

86. Flannagin M., Barnes B., O'Donoghue W., Mayeur J., Hazeli K., Nelson G. Electrochemical response of Alkaline Batteries Subject to Quasi-Static and Dynamic Loading. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. P. 103 – 119.

87. Tancogne-Dejean T., Mohr D. Indentation of small format Lithium-ion pouch cells: Experiments and modeling. *International Journal of Solids and Structures*. 2022. 257. 111900.

88. Zhang X., Wierzbicki T. Characterization of plasticity and fracture of shell casing of lithium-ion cylindrical battery. *Journal of Power Sources*. 2015. 280. P. 47 –56.

89. Lai W., Ali M., Pan J. Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions. *Journal of Power Sources*. 2014. 245. P. 609–623.

90. Ali M., Lai W., Pan J. Computational models for simulation of a lithium-ion battery module specimen under punch indentation. *Journal of Power Sources*. 2015. 273. P. 448–459.

91. Kang Y., Deng C., Liu X., Liang Z., Li T., Hu Q., Zhao Y. Binder-free electrode based on electrospun-fiber for Li ion batteries via a simple rolling formation. *Nanoscale Research Letters*. 2020. 15(1). P. 1 – 5.

92. Koch S., Fill A., Birke K. Comprehensive gas analysis on large scale automotive lithium-ion cells in thermal runaway. *Journal of Power Sources*. 2018. 398. P. 106 – 112.
93. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*. 2012. 5(1). P. 5271 – 5280.
94. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D., Chen C. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*. 2015. 285. P. 80 – 89.
95. Kong D., Wen R., Ping P., Peng R., Zhang J., Chen G. Study on degradation behavior of commercial 18650 LiAlNiCoO₂ cells in over-charge conditions. *International Journal of Energy Research*. 2019. 43 (1). P. 552 – 567.
96. Wu W., Qiu X., Wang S. Low-temperature reversible capacity loss and aging mechanism in lithium-ion batteries for different discharge profiles. *International Journal of Energy Research*. 2019. 43 (1). P. 243 – 253.
97. Ouyang D., Chen M., Huang Q., Weng J., Wang Z., Wang J. A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. *Applied Sciences*. 2019. 9 (12). 2483.
98. Ouyang D., Liu J., Chen M., Weng J., Wang J. Thermal failure propagation in lithium-ion battery modules with various shapes. *Applied Sciences*. 2018. 8 (8). 1263.
99. Feng X., Lu L., Ouyang M., Li J., He X. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module. *Energy*. 2016. 115. P. 194 – 208.
100. Coman P., Darcy E., Veje T., White R. Numerical analysis of heat propagation in a battery pack using a novel technology for triggering thermal runaway. *Applied Energy*. 2017. 203. P. 189 – 200.
101. Coman P., Rayman S., White R. A lumped model of venting during thermal runaway in a cylindrical Lithium Cobalt Oxide lithium-ion cell. *Journal of Power Sources*, 2016. 307. P. 56-62.

102. Fu Y., Lu S., Shi L., Cheng X., Zhang H. Ignition and combustion characteristics of lithium ion batteries under low atmospheric pressure. *Energy*. 2018. 161. P. 38-45.
103. Chen M., Liu J., Lin X., Huang Q., Yuen R., Wang J. Combustion characteristics of primary lithium battery at two altitudes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016, 124. P. 865-870.
104. Alvarez-Meaza I., Zarrabeitia-Bilbao E., Rio-Belver M., Garechana-Anacabe G. Fuel-Cell Electric Vehicles: Plotting a Scientific and Technological Knowledge Map. *Sustainability*. 2020. 12 (6):2334.
105. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. FCH Hydrogen Roadmap Europe; Bietlot: Charleroi, Belgium, 2019.
106. Xiong R., Duan Y., Cao J., Yu Q. Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle. *Energy*. 2018. 217. P. 153–165.
107. Itani K., De Bernardinis A., Khatir Z., Jammal A. A comparative analysis of two hybrid energy storage systems used in a two front wheel driven electric vehicle during extreme start-up and regenerative braking operations. *Energy Convers.* 2017. 144. P. 69–87.
108. Iqbal M., Becherif M., Ramadan H., Badji A. Dual-layer approach for systematic sizing and online energy management of fuel cell hybrid vehicles. *Energy*. 2021. 300. 117345.
109. Pan R., Yang D., Wang Y., Chen Z. Performance degradation prediction of proton exchange membrane fuel cell using a hybrid prognostic approach. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. 45. P. 30994–31008.
110. Tarkowski R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. 105. P. 86–94.
111. De Stefano M., Rocourt X., Sochet I., Daudey N. Hydrogen dispersion in a closed environment. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. 44. P. 9031–9040.

112. Prasad K. High-pressure release and dispersion of hydrogen in a partially enclosed compartment: Effect of natural and forced ventilation. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2014. 39. P. 6518–6532.

113. Hajji Y., Bouteraa M., Elcafsi A., Belghith A., Bournot P., Kallel F. Natural ventilation of hydrogen during a leak in a residential garage. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2015. 50. P. 810–818.

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

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

116. Гаврилюк А. Ф., Лин А. С. Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*. 2017, 31. С. 11-16.

117. Про приєднання України до Угоди про прийняття єдиних технічних приписів для колісних транспортних засобів, предметів обладнання та частин, які можуть бути встановлені та/або використані на колісних транспортних засобах, і про умови взаємного визнання офіційних затверджень, виданих на основі цих приписів, 1958 року з поправками 1995 року. Закон України «від 10.02.2000.

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

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

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

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

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

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

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

125. SAEJ2464:2; Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storages. SAE: Warrendale, PA, USA, 2021.

126. SAEJ240_201212: Life Test for Automotive Storage Batteries. SAE: Warrendale, PA, USA, 2020.

127. SAE J2380_201312: Vibration Testing of Electric Vehicle . SAE: Warrendale, PA, USA, 2013.

128. SAE J2464_202108 Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing. SAE: Warrendale, PA, USA, 2021.

129. SAE J2344_202010 Guidelines for Electric Vehicle Safety. SAE: Warrendale, PA, USA, 2020.

130. Гаврилюк А. Ф., Товарянський В. І. Принципова схема аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів. *21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (з міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2019. С. 61–63.

131. Гаврилюк А. Ф. Дослідження внутрішнього опору акумуляторної батареї як чинника впливу на величину струму короткого замикання транспортних засобів. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2018. С. 243–244.

132. Гаврилюк А. Ф., Тимошенко Ю. В. До питання тенденцій сучасних електромобілів. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2018. С. 69–70.

133. Гаврилюк А. Ф. Екологічна небезпека літій-іонних батарей транспортних засобів. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна небезпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та преспективи»*. Львів, 2018. С. 165–166.

134. Гаврилюк А. Ф., Лемішко М. В. Пожежна небезпека літій-іонних батарей електромобілів. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2019. С. 33–34.

135. Гаврилюк А. Ф. Принципова схема реалізації технічних засобів для гасіння пожежі електромобілів. *Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, 2019. С. 141–144.

136. Гаврилюк А. Ф. Аналіз причин виникнення пожеж колісних транспортних засобів. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2020. С. 16–18.

137. Gawryliuk A., Dubasiuk W. Udoskonalenie metod ochrony przeciwpożarowej pojazdów. *III Międzynarodowa Konferencja «Bezpieczeństwo, zarządzanie, medycyna i kultura fizyczna»*. Gdańsk. 2020. С. 68–94.

138. Гаврилюк А., Лемішко М. Електромобілі: конструювання та експлуатація. *Матеріали Другої Всеукраїнської науково-технічна інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем»*. Рівне, 2020. С. 116–118.

139. Гаврилюк А., Лемішко М. Електромобілі. Перспектива розвитку Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту», м. Кременчук, 2020. С. 210–217.

140. Гаврилюк А. Ф. Обґрунтування та розроблення системи запобігання затоплення автомобілів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами». Харків, 2020. С. 280–282.

141. Rudyk Y., Gavryliuk A., Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Comparative assessment of the efficiency of some car drives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. MCEME-2022, 1277, 2023. P.1–6.

142. Гаврилюк А. Ф. До питання встановлення причин пожеж транспортних засобів. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій». Київ, 2022. С. 103–106.

143. Гаврилюк А., Дуда Ю. Виклики використання електромобілів. Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». Львів, 2022. С. 189–191.

144. Гаврилюк А., Верхолюк Ю. Пожежна небезпека електромобілів на водневому паливі. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених». Черкаси, 2022. С. 16–17.

145. Rudyk Y., Gavryliuk A., Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Estimations of Equivalent Fuel Savings of Electric Vehicles. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 - Proceedings. 2022. P.3877–390.

146. Гаврилюк А., Гриньова А. Аналіз пожеж електромобілів та причин їх виникнення. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених». Черкаси, 2022. С. 16–17.

147. Swart A., Arora M., Megerle S. Nilsson Product Safety Engineering Society Symposium. *IEEE* 2006. pp. 1-4.
148. Mali V., Saxena R., Kumar K., Kalam A., Tripathi, B. Review on battery thermal management systems for energy-efficient electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. 151, 111611.
149. Ouyang D., Chen M., Huang Q., Weng J., Wang Z., & Wang J. A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. *Applied Sciences*, 2019. 9(12), 2483.
150. Duh Y., Tsai M., Kao C. Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. 127(1). P. 983-993.
151. Lei B., Zhao W., Ziebert C., Uhlmann N., Rohde M., Seifert H. Experimental analysis of thermal runaway in 18650 cylindrical Li-ion cells using an accelerating rate calorimeter. *Batteries*. 2017. 3(2). P. 14.
152. Duh Y., Tsai M., Kao C. Thermal runaway on 18650 lithium-ion batteries containing cathode materials with and without the coating of self-terminated oligomers with hyper-branched architecture (STOBA) used in electric vehicles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. 129(3). P. 1935–1948.
153. Duh S., Tsai T., Kao S. Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. 127(1). P. 983–993.
154. Wen Y., Jhu Y., Wang W., Chiang C., Shu M. Thermal runaway features of 18650 lithium-ion batteries for LiFePO₄ cathode material by DSC and VSP2. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. 109(3). P. 1297–1302.
155. Lin C., Wu H., Pan J., Su C., Wang T., Sheu H., Wu N. Investigation on suppressed thermal runaway of Li-ion battery by hyper-branched polymer coated on cathode. *Electrochimica Acta*. 2013. 101. P. 11–17.
156. Wang Q., Mao B., Stolarov S., Sun J. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and*

Combustion Science. 2019. 73. P. 95–131.

157. Diaz L., He X., Hu Z., Restuccia F., Marinescu M., Barreras J.V., ... Rein G. Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. 167(9). 090559.

158. Casals L., García B., Canal C. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*. 2019. 232. P. 354–363.

159. Chen S., Wang Z., Wang J., Tong X., Yan W. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. 63. 103992.

160. Гудим В., Гаврилюк А. Аналіз систем та агрегатів автотранспортних засобів за рівнем пожежної небезпеки. *Пожарна безпека*. 2013. 23. С. 58–63.

161. Mao B., Liu C., Yang K., Li S., Liu P., Zhang M., Sun J. Thermal runaway and fire behaviors of a 300 Ah lithium ion battery with LiFePO₄ as cathode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. 139. 110717.

162. Wang C., Zhu Y., Gao F., Qi C., Zhao P., Meng Q., Wu Q. Thermal runaway behavior and features of LiFePO₄/graphite aged batteries under overcharge. *International Journal of Energy Research*. 2020. 44(7). P. 5477–5487.

163. Gavryliuk A., Kushnir A. Analysis of fire danger of electric vehicles according to thermal stability of powerful lithium battery. *Fire Safety*. 2022. 40. P. 31–39.

164. Kang S., Kwon M., Choi J., Choi S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*. 2023. 332. 120497.

165. Sturm P., Föbtleitner P., Fruhwirt D., Galler R., Wenighofer R., Heindl S., Heger O. Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Safety Journal*. 2022. 134. 103695.

166. Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. V: *Proceedings of the International Conference on Fires in Vehicles—FIVE 2012*,

Chicago, IL, USA, 27–28 September 2012. P. 183–194.

167. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures. *Energies*. 2022. 15(1). P. 11.

168. Yang F., Chen C.H., Wang C. Porous electrode theory for modeling lithium-ion battery electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2006. 153(4). A713–A722.

169. Santhanagopalan S., Smith K., Pesaran A., Kim G. A three-dimensional thermal-electrochemical model of lithium-ion battery performance. *Journal of Power Sources*. 2008. 194(1). P. 328–340.

170. Christensen J., Newman J. Stress generation and fracture in lithium insertion materials. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2006. 10(5). P. 293–319.

171. Cai L., White R. Reduction of Model Order Based on Proper Orthogonal Decomposition for Lithium-Ion Battery Simulations. *Journal of The Electrochemical Society*. 2009. 156(3). A154–A161.

172. Northrop P., Ramadesigan V., Subramanian V. Coordinate transformation and model reformulation for efficient simulation of transport in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. 158(12). A1461–A1477.

173. Safari M., Delacourt C. Modeling of a Commercial Graphite/LiFePO₄ Cell using the Finite Volume Method. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. 158(12). A1436–A1447.

174. Qi Y., Hector L. Atomistic simulations of mechanical and transport properties of Li-Si alloys: A Monte Carlo study. *Journal of The Electrochemical Society*. 2014. 161(11). F3010–F3018.

175. Li W., Song B., Manthiram A. High-voltage positive electrode materials for lithium-ion batteries. *Chemical Society Reviews*. 2017. 46(10). P. 3006–3059.

176. Zhang X., Hu M., Guo X. Monte Carlo simulation of grain boundary effects on ionic conductivity in polycrystalline solid electrolytes. *Solid State Ionics*. 2019. 335. P. 35–41.

177. Shin J., Cho W. Monte Carlo simulations of lithium dendrite growth

influenced by surface roughness in lithium metal batteries. *Electrochimica Acta*. 2020. 354. 136744.

178. Saw L., Ye Y., Tay A. Electro-thermal characterization of Lithium Iron Phosphate cell with equivalent circuit modeling. *Energy Conversion and Management*. 2014. 87. P. 367–377.

179. Guo L., Wang X., Gao S., Zhao Y. Electro-thermal coupled modeling and parametric analysis of large format lithium-ion battery in electric vehicles. *Applied Energy*. 2014. 134. P. 414–429.

180. Lin X., Perez H., Siegel J., Li Y., Anderson R., Stefanopoulou A. Online parameterization of lumped thermal dynamics in cylindrical lithium-ion batteries for core temperature estimation and health monitoring. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014. 22(5). P. 1862–1875.

181. Tran M., Mathew M., Janhunnen S., Panchal S., Raahemifar K., Fraser R., Fowler M. A comprehensive equivalent circuit model for lithium-ion batteries, incorporating the effects of state of health, state of charge, and temperature on model parameters. *Journal of Energy Storage*. 2021. 43. 103252.

182. Lai X., Gao W., Zheng Y., Ouyang M., Li J., Han X., Zhou L. A comparative study of global optimization methods for parameter identification of different equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*. 2019. 295. P. 1057–1066.

183. Xia Z., Qahouq J. Evaluation of parameter variations of equivalent circuit model of lithium-ion battery under different SOH conditions. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020. P. 1519–1523.

184. Kriston A., Podias A., Adanouj I., Pfrang A. Analysis of the effect of thermal runaway initiation conditions on the severity of thermal runaway—numerical simulation and machine learning study. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. 167(9). 090555.

185. Yiding L., Wenwei W., Cheng L., Xiaoguang Y., Fenghao Z. Multi-physics safety model based on structure damage for lithium-ion battery under mechanical

abuse. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 277. 124094.

186. Panchal S., Dincer I., Agelin-Chaab M., Fraser R., Fowler M. Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO_4 battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. 101. P. 1093–1102.

187. Ye Y., Saw L., Shi Y., Tay A. Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering*. 2015. 86. P. 281–291.

188. Feng X., He X., Ouyang M., Lu L. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ large format lithium-ion batteries. *Applied Energy*. 2014. 154. P. 74–91.

189. Park H. A design of air flow configuration for cooling lithium-ion battery in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013. 239. P. 30–36.

190. Feng X., He X., Ouyang M., Lu L., Wang H. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*. 2015. 10. P. 246–267.

191. Zhang X., Kong X., Li W., Ge X. Numerical simulation of thermal runaway propagation in lithium-ion battery pack with different cooling conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2018. 132. P. 508–520.

192. Feng X., Sun J., Ouyang M., He X. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module. *Journal of Power Sources*. 2014. 255. P. 294–301.

193. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*. 2018. 10. P. 246–267.

194. Liu Y., Wu X., Guo Q., Jiang C. Experiments and numerical simulations of thermal shock crack patterns in thin circular ceramic specimens. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. 35(15). P. 4123–4131.

195. Barroso A., Matias J., Morandotti M., Owen D. Explicit formulas for relaxed disarrangement densities arising from structured deformations. *Mathematics*

and Mechanics of Complex Systems. 2017. 5(2). P. 163–189.

196. Arora P., White R., Doyle M. Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 1998. 145(10). P. 3647–3667.

197. Newman J., Thomas-Alyea K. *Electrochemical Systems*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2004. P. 647.

198. Newman J., Thomas-Alyea K. *Electrochemical Systems*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2004. P. 647.

199. Bazant M. Theory of chemical kinetics and charge transfer based on nonequilibrium thermodynamics. *Accounts of Chemical Research*. 2012. 46(5). P. 1144–1160.

200. Voigt S., Sträubig F., Kwade A., Zehfuß J., Knaust C. An empirical model for lithium-ion battery fires for CFD applications. *Fire Safety Journal*. 2023. 135. 103725.

201. Zhang X., Weng C. A coupled electrochemical-thermal model incorporating thermal runaway for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*. 2018. 380. P. 61–74.

202. Bandhauer T., Garimella S., Fuller T. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. 158(3). R1–R25.

203. Нерубацький В. Аналіз математичних моделей акумуляторних батарей системи пуску тепловозних дизелів. *Збірник наукових праць Дніпровського національного університету залізничного транспорту*. 2022. 18(2). P. 123–130.

204. Feng X., He X., Ouyang M., Lu L. Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review. *Energy Storage Materials*. 2018. 10. P. 246–267.

205. Botte G., Subramanian V., White R. Mathematical Modeling of Secondary Lithium Batteries. *Electrochimica Acta*. 2000. 45(15–16). P. 2595–2609.

206. Newman J., Thomas-Alyea K. *Electrochemical Systems*. 3rd ed. Wiley-Interscience. 2012.

207. Smith J., Van Ness H. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 7th ed. McGraw-Hill Education. 2005.
208. Величко Л. Д., Лозинський Р. Я., Семерак М. М. Термодинаміка та теплопередача в пожежній справі: Навчальний посібник. Львів: Вид-во «СПОЛОМ». 2011. 504 С.
209. Liu H., Wei Z., He W., Zhao J. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*. 2017. 150. P. 304–330.
210. Chen S., Wan C., Wang Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2005. 140(1). P. 111–124.
211. Guo J., Guo Q., Liu J., Wang H. The Polarization and Heat Generation Characteristics of Lithium-Ion Battery with Electric–Thermal Coupled Modeling. *Batteries*. 2023. 9(11). P. 529.
212. Tan Y., Li Y., Gu Y., Liu W., Fang J., Pan C. Numerical Study on Heat Generation Characteristics of Charge and Discharge Cycle of the Lithium-Ion Battery. *Energies*. 2024. 17(1). P. 178.
213. Bernardi D., Pawlikowski E., Newman J. A general energy balance for battery systems. *Journal of the Electrochemical Society*. 1985. 132(1). P. 5.
214. Karimi G., Li X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*. 2013. 37(1). P. 13–24.
215. McGrattan K. та ін. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. *NIST Special Publication 1018-5*. 2009. P. 94.
216. McGrattan K. та ін. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. *NIST Special Publication 1019-5*. 2009. P. 176.
217. Forney G.P. Smokeview (Version 5): A Tool for Vizualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume 1: User's Guide. *NIST Special Publication 1017-1*. 2008. P.142.
218. Sun P., Bisschop R., Niu H., Huang X. A review of battery fires in electric

vehicles. *Fire Technology*. 2020. 56. P. 1361–1410.

219. Brzezinska D., Bryant P. Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions. *Energies*. 2022. 15(2). P. 649.

220. Jung H., Moom B., Lee S., Bae J. Study on thermal energy at fire resistance test for REESS. *Y: 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. Detroit, MI, USA. 2017.

221. Deckers X., Haga S., Tilley N., Merci B. Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*. 2013. 57. P. 22–34.

222. Li L., Liu B., Zheng W., Wu X., Song L., Dong W. Investigation and numerical reconstruction of a full-scale electric bicycle fire experiment in high-rise residential building. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. 37. 102304.

223. Krol M., Krol A. The Threats Related to Parking Electric Vehicle in Underground Car Parks. *Y: Intelligent Solutions for Cities and Mobility of the Future* 2022. 17. P. 72–81.

224. Voigt S., Sträubig F., Kwade A., Zehfuß J., Knaust C. An empirical model for lithium-ion battery fires for CFD applications. *Fire Safety Journal*. 2023. 135(135). P. 1–12.

225. Voigt S., Sträubig F., Palis S., Kwade A., Knaust C. CFD-analysis of Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion batteries. *Fire Safety Journal*. 2020. 114. P. 1–14.

226. McGrattan K. та ін. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. *NIST Special Publication 1019-5*. 2009. P. 176.

227. Сохацький А. В. Порівняння нових та відомих методик розв'язку рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії в криволінійній неортогональній системі координат. *Придніпровський науковий вісник. Дніпропетровський державний університет*. 1996. № 4. P. 20.

228. Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Philadelphia, PA: Hemisphere Publishing Corporation. 1984.

229. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Рівняння Нав'є – Стокса: навч. посіб. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2016. С. 221.
230. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Модельні задачі. Київ: ВПЦ «Київський університет». 2011. С. 198.
232. Griebel M., Dornseifer T., Neunhoefffer T. Numerical simulation in fluid dynamics: a practical introduction. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1998. P. 14.
233. Pozrikidis C. Fluid dynamics: theory, computation, and numerical simulation. USA: Kluwer Academic Publishers. 2001. P. 557.
234. Lam C., MacNeil D., Kroeker R., Loughed G., Lalime G. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. *4th International Conference on Fire in Vehicles*, Baltimore. 2016.
235. Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. Y: *International Conference on Fires in Vehicles – FIVE*. 2012. Vol. 2. P. 183–94.
236. Kang S., Kwon M., Choi J., Choi S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*. 2023. 332. 120497.
237. Huggett C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*. 1980. 4(2). P. 61–65.
238. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*. 2012. 5(1). P. 5271–5280.
239. Zhang Q., Niu J., Zhao Z., Wang Q. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*. 2022. 45. 103759.
240. Golubkov A., Scheikl S., Planteu R., Voitic G., Wilsche H., Stangl C., Hacker V. Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes – impact of state of charge and overcharge. *RSC Advances*. 2015.

5(70). P. 57171–57186.

241. Doughty D. Vehicle battery safety roadmap guidance (No. NREL/SR-5400-54404). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). 2012.

242. Zhang S., Zhang X. A multi time-scale framework for state-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery under optimal operating temperature range. *Journal of Energy Storage*. 2021. 35. 102325.

243. Román-Ramírez L., Marco J. Design of experiments applied to lithium-ion batteries: A literature review. *Applied Energy*. 2022. 320. 119305.

244. Chen J., Ren D., Hsu H., Wang L., He X., Zhang C., Ouyang M. Investigating the thermal runaway features of lithium-ion batteries using a thermal resistance network model. *Applied Energy*. 2021. 295. 117038.

245. Du Y., Fujita K., Shironita S., Sone Y., Hosono E., Asakura D., Umeda M. Capacity fade characteristics of nickel-based lithium-ion secondary battery after calendar deterioration at 80 °C. *Journal of Power Sources*. 2021. 501. 230005.

246. Chen L., Zhang M., Ding Y., Wu S., Li Y., Liang G., Pan H. Estimation the internal resistance of lithium-ion battery using a multi-factor dynamic internal resistance model with an error compensation strategy. *Energy Reports*. 2021. 7. P. 3050–3059.

247. Zheng Y., Shi Z., Ren D., Chen J., Liu X., Feng X., Ouyang M. In-depth investigation of the exothermic reactions between lithiated graphite and electrolyte in lithium-ion battery. *Journal of Energy Chemistry*. 2022. 69. P. 593–600.

248. Mei W., Li H., Zhao C., Sun J., Wang Q. Numerical study on thermal characteristics comparison between charge and discharge process for lithium ion battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. 162. 120319.

249. Osmani K., Alkhedher M., Ramadan M., Choi D., Li L., Doranehgard M., Olabi A. Recent progress in the thermal management of lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*. 2023. 136024.

250. Pan S., Ji C., Wang S., Wang B. Study on the performance of parallel air-cooled structure and optimized design for lithium-ion battery module. *Fire*

Technology. 2020. 56. P. 2623–2647.

251 Akbarzadeh M., Kalogiannis T., Jaguemont J., Jin L., Behi H., Karimi D., Berecibar M. A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for a high-energy lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*. 2021. 198, 117503

252. Zhang Z., Fu L., Sheng L., Ye W., Sun Y. Method of liquid-cooled thermal control for a large-scale pouch lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 2022. 211, 118417.

253. Sharma M., Jayagopal A., Ramesha D., Murali K., Tiwari P. Exploring the efficacy of using various coolants on lithium-ion 18650 cell employing conjugate heat transfer simulation. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 20. P. 222-227

254. Feng X., Sun J., Ouyang M., He X., Lu L., Han X., & Peng H. Characterization of large format lithium ion battery exposed to extremely high temperature. *Journal of Power Sources*. 2014. 272. P. 457-467.

255. Kleiner J., Singh R., Schmid M., Komsiyiska L., Elger G., Endisch C. Influence of heat pipe assisted terminal cooling on the thermal behavior of a large prismatic lithium-ion cell during fast charging in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2021. 188, 116328.

256 Ling Z., Wang F., Fang X., Gao X., Zhang Z. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling. *Applied energy*. 2015. 148. P. 403-409.

257. Ling Z., Cao J., Zhang W., Zhang Z., Fang X., Gao X. Compact liquid cooling strategy with phase change materials for Li-ion batteries optimized using response surface methodology. *Applied Energy*. 2018. 228. P. 777-788.

258. Feng X., Lu L., Ouyang M., Li J., & He X. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module. *Energy*. 2016. 115, pp. 194-208.

259. Lin S., Ling Z., Li S., Cai C., Zhang Z., & Fang X. Mitigation of lithium-ion battery thermal runaway and inhibition of thermal runaway propagation using

inorganic salt hydrate with integrated latent heat and thermochemical storage. *Energy*. 2023. 266, 126481

260. Xu K., Ding M., Zhang S., Allen J., & Jow T. An attempt to formulate nonflammable lithium ion electrolytes with alkyl phosphates and phosphazenes. *Journal of the Electrochemical Society*, 2002. 149(5), A622.

261. Xu K., Zhang S., Allen, J., & Jow T. Evaluation of fluorinated alkyl phosphates as flame retardants in electrolytes for Li-ion batteries: II. Performance in cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003. 150(2), A170.

262. Zhang S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of power sources*, 2007. 164(1). P. 351-364.

263. Kim K., Park N., Ryu K., Chang S. Characteristics of PVdF-HFP/TiO₂ composite membrane electrolytes prepared by phase inversion and conventional casting methods. *Electrochimica Acta*. 2006. 51(26). P. 5636–5644.

264. Augustin S., Hennige V., Hörpel G., Hying C. Ceramic but flexible: new ceramic membrane foils for fuel cells and batteries. *Desalination*. 2002. 146(1–3). P. 23–28.

265. Chen G., Richardson T. Thermal instability of Olivine-type LiMnPO₄ cathodes. *Journal of Power Sources*. 2010. 195(4). P. 1221–1224.

266. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*. 2012. 5(1). P. 5271–5280.

267. Li J., Cheng Y., Jia M., Tang Y., Lin Y., Zhang Z., Liu Y. An electrochemical–thermal model based on dynamic responses for lithium iron phosphate battery. *Journal of Power Sources*. 2014. 255. P. 130–143.

268. Abraham K. How comparable are sodium-ion batteries to lithium-ion counterparts?. *ACS Energy Letters*. 2020. 5(11). P. 3544–3547.

269. Broux T., Fauth F., Hall N., Chatillon Y., Bianchini M., Bamine T., Croguennec L. High rate performance for carbon-coated Na₃V₂(PO₄)₂F₃ in Na-ion batteries. *Small Methods*. 2019. 3(4). 180021.

270. Liu Y., Wu X., Guo Q., Jiang C. Experiments and numerical simulations of thermal shock crack patterns in thin circular ceramic specimens. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. 35(15). P. 4123–4131.

271. Barroso A., Matias J., Morandotti M., Owen D. Explicit formulas for relaxed disarrangement densities arising from structured deformations. *Mathematics and Mechanics of Complex Systems*. 2017. 5(2). P. 163–189.

272. Arora P., White R.E., Doyle M. Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 1998. 145(10). P. 3647–3667.

273. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Chalyy D., Lemishko M., Tur N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 2(10)(122). P. 39–46.

274. Tesla says Model S fire in France was due to ‘electrical connection improperly tightened’ by a human instead of robots. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrek.co/2016/09/09/tesla-fire-france-electrical-connectionimproperly-tightened-human-robot/>.

275. Accessed 5 February 2019; 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>.

276. Kang S., Kwon M., Choi Y., Choi S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*. 2023. 332. 120497.

277. Bisschop R., Willstrand O., Amon F., Rosengren M. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. *RISE Research Institutes of Sweden*. 2019.

278. Long, T., Wang, L., Kan, D. Experimental and modeling approaches for electric vehicle battery safety: a technical review. *Engineering Research Express*. 2024. P. 49–56.

279. McGrattan K. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model. *NIST Special Publication 1018-5*. 2009. P. 94.
280. Denise H., Louis L., Anco H. Safety and electric passenger cars. *Netherlands Enterprise Agency*. 2020. P.101.
281. Zhou B., Yoshioka H., Noguchi T., Wang K. 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. P. 153–188.
282. Van P. Semi-natural fire test for façades and curtain walling systems. *SP AR 2000:39*, SP Technical Research Institute of Sweden. 2000.
283. Борисова А. С. Удосконалення розрахункового методу прогнозування поширювання пожежі на сусідні об'єкти з урахуванням вітрового впливу. Дис. канд. техн. наук (д-ра філософії) за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека). Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України; Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів. 2021.
284. Кононенко Л. В., Дубініна А. А., Безуглий В. Д. Ідентифікація пластмас: Навчальний посібник. Харків: ХДАТОХ. 2002. С 198.
285. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023. 11(3). P. 421–434.
286. Rudyk Y., Kuts V., Gavryliuk A., Naumchuk N. Required safety component of automotive cyberphysical systems. *20 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2021. P.338–342.
287. Deckers X., Haga S., Tilley N., Merci B. Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*. 2013. 57. P. 22–34.

288. Cai L., Zhang J., Wang H., Li C., Li L. Experimental study on the dynamic fire behavior of large format lithium-ion batteries with $\text{Li}(\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2})\text{O}_2$ cathodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2018. 353. P. 9–17.
289. Chen M., Wang C. A direct experimental study on short-circuit temperature and internal short circuit in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2019. 435. 126684.
290. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y. The significance of battery mass loss on thermal runaway of Li-ion battery: An experimental study. *Applied Energy*. 2018. 226. P. 38–49.
291. Feng X., Ren D., He X., Wang L., Liu L., Ouyang M. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries by internal cooling: An experimental study. *Energy Storage Materials*. 2018. 12. P. 128–136.
292. Ku J., Chon M., Park S., Heo J. Experimental study on fire hazard analysis of 21700 cylindrical lithium-ion batteries using the cone calorimeter. *Fire Technology*. 2020. 56. P. 2237–2254.
293. Liu L., Wang S., He X., Wang L., Ouyang M., Wang Q. Experimental study on the correlation between internal short circuit and external short circuit test for Li-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. 2020. 27. 101067.
294. Tao X., Huang Q., Liu R., Wu Y., Zhou X. Experimental and numerical investigation on the safety of lithium-ion power battery under abusive conditions. *Applied Energy*. 2019. 249. P. 154–163.
295. Wang Q., Ping P., Zhao X., Chu G., Sun J., Chen C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*. 2018. 397. P. 310–321.
296. Xiao Z., Ren D., Feng X., Liu L., Ouyang M. Experimental investigations on the effects of different fault conditions on the safety performance of large-format lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. 2019. 21. P. 511–521.
297. Yao X., Du J., Li L., Wu Z., Hu J., Zhang H., Yin H. Experimental study on the fire behavior of prismatic lithium-ion batteries under different states of charge. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. 143. P. 1535–1544.

298. ДСТУ 3675-98 Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. Зі зміною № 1.

299. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. №2(16). С. 32–41.

300. Методика натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню. undicz.dsns.gov.ua. URL: https://undicz.dsns.gov.ua/files/docs/Metod_TOS.pdf. (дата звернення 15.05.2022).

301. Гаврилюк А. Методика експериментальних досліджень пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів під дією нагрівальної панелі. *Комунальне господарство міст*. 2024. №1 (182). С. 180–186.

302. Гаврилюк А. Обґрунтування найбільш значущих критеріїв пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2023. №42. С. 81–90.

303. ДСТУ EN 589:2017 Палива автомобільні. Газ нафтовий скраплений. Технічні вимоги та методи контролювання (EN 589:2008+A1:2012, IDT).

304. Zivenko O. LPG accounting specificity during its storage and transportation. *Measuring Equipment and Metrology*. 2019. 80(3). P. 21–27. DOI: 10.23939/istcmmtm2019.03.021.

305. Гаврилюк А., Яковчук Р. Експериментальні дослідження модулів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2024. №44. С. 5–12.

306. Гаврилюк А., Яковчук Р. Методика експериментальних досліджень модулів силових батарей електромобілів на предмет пожежної небезпеки. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2024. №29. С. 100–109.

307. Raslavičius L., Keršys A., Mockus S., Keršienė N., Starevičius M. Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to

sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. 32. P. 513–525.

308. Zhang X. та ін. Recent Advances in Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. *Energy Storage Materials*. 2022. 45. P. 284–306.

309. Li Y. та ін. Optimization of Heating Strategies for Lithium-Ion Batteries in Cold Environments. *Journal of Power Sources*. 2023. 560. 232582.

310. Feng X. Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*. 2018. 10. P. 246–267.

311. Larsson F. та ін. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports*. 2017. 7. 10018.

312. Wang Q., et al. Fire Behaviors of Lithium-Ion Batteries at Different SoC. *Journal of The Electrochemical Society*. 2019. 166(8). A1797–A1807.

313. Wang S., Gong X., Shao R., Xu L., Li Y., He F., Feng X. Suppression Effects of Different Extinguishing Agents on Vent Gases Fires from Lithium-ion Batteries after Thermal Runaway: A comprehensive experimental and numerical study. *Fire Safety Journal*. 2024. 104227.

314. Bolshova T., Shvartsberg V., Shmakov A. Synergism of trimethylphosphate and carbon dioxide in extinguishing premixed flames. *Fire Safety Journal*. 2021. 125. 103406.

315. Zhang Y., Wang Z., Liu J., Li Q., Pan R., Zhou X. Alkaline potassium aluminum carbonate: A novel high-efficiency dry powder extinguishing agent with high heat-resistant. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023. 173. 106038.

316. Zhang L., Li Y., Duan Q., Chen M., Xu J., Zhao C., Wang Q. Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires. *Journal of Energy Storage*. 2020. 32. 101801.

317. Jiang L., Wang Q., Li K., Ping P., Jiang L., Sun J. A self-cooling and flame-retardant electrolyte for safer lithium ion batteries. *Sustainable Energy & Fuels*. 2018. 2 (6). P. 1323–1331.

318. Zhou X., Lu D., Chao M., Chen W. Experimental and theoretical studies on the thermal decomposition of 1,1,2,2,3,3,4-heptafluorocyclopentane. *Journal of Fluorine Chemistry*. 2014. 164. P. 70–77.
319. Hu J., Tang X., Zhu X., Liu T., Wang X. Suppression of thermal runaway induced by thermal abuse in large-capacity lithium-ion batteries with water mist. *Energy*. 2024. 286. 129669.
320. Liu T., Liu Y., Wang X., Kong X., Li G. Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18650 lithium ion battery with water mist. *Energy Conversion and Management*. 2019. 199. 111969.
321. Ping P., Gao X., Kong D., Gao W., Feng Z., Yang C., Dai X. Experimental study on the synergistic strategy of liquid nitrogen and water mist for fire extinguishing and cooling of lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. 188. P. 713–725.
322. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire. *Fire Technology*. 2024. 60(2). P. 817–858.
323. Yang K., Zhang M., Gao F., Liu Y., Duan Q., Wang Q. Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate battery. *Journal of Energy Storage*. 2020. 30. 101532.
324. Zhang Y., Wang H., Wang Y., Li C., Liu Y., Ouyang M. Thermal abusive experimental research on the large-format lithium-ion battery using a buried dual-sensor. *Journal of Energy Storage*. 2021. 33. 102156.
325. Xu J., Zhang L., Liu Y., Duan Q., Jin K., Wang Q. Electrochemical performance and thermal stability of 18650 lithium-ion battery with water mist after high-temperature impact. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. 166. P. 589–599.
326. Liu T., Tao C., Wang X. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied Energy*. 2020. 267. 115087.

327. Гаврилюк А., Ковалишин В., Яковчук Р. Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних батарей. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 4 (185). С. 166–171.

328. Гаврилюк А., Яковчук Р. Особливість проведення вогневих експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів. У: *Третя Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2024»*, м. Харків, 2024. С. 111–113.

329. Гаврилюк А., Ковалишин В., Яковчук Р. Аналіз ефективності використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*, м. Львів, 2024. С. 144–145.

330. Гаврилюк А. Дослідження показників, які описують процеси горіння електромобілів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. №2. С. 57–70.

331. Гаврилюк А., Яковчук Р., Лемішко М. Експериментальні дослідження елементів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2023. №43. С. 50–62.

332. Єременко В., Куц Ю., Мокійчук В., Самойліченко О. Статистичний аналіз даних вимірювань. 2013.

333. Капцов І. І., Ромашко О. В., Гапонова Л. В. Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень. Харків: ХНАМГ. 2009. 59 с.

334. Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. УкрНІЦЗ. Київ. 2007.

335. Мірошник Ю. І. Математична статистика з елементами теорії ймовірностей: Підручник для ВНЗ. Київ: Видавничий дім «Слово». 2017.

336. Zhang S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2007. 164(1). P. 351–364.

337. McGrattan K. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model. *NIST Special Publication 1018-5*. 2009. P. 94.

338. Griebel M., Dornseifer T., Neunhoeffler T. Numerical simulation in fluid dynamics: a practical introduction. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1998. P. 14.

339. Forney G., McGrattan K. User's Guide for Smokeview Version 4: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Washington, DC: US Department of Commerce, *National Institute of Standards and Technology*. 2004.

340. Forney G., McGrattan K. User's Guide for Smokeview Version 1.0: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data (NISTIR 6513). 2000. 39 p.

341. Гаврилюк А., Васильєва О. Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. *Пожежна безпека*. 2023. №42. С. 32–42.

342. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J. та ін. Fire Dynamics Simulator User's Guide (NIST Special Publication 1019). National Institute of Standards and Technology. 2019.

343. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J. та ін. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide: Volume 1: Mathematical Model (NIST Special Publication 1018). *National Institute of Standards and Technology*. 2019.

344. Meunders A., Baker G., Arnold L., Schroeder B., Spearpoint M., Pau D. Parameter optimization and sensitivity analysis for fire spread modelling with FDS. *Y: 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design*. 2014. P. 11.

345. Nguyen H., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of façade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022. 130. 103591.

346. Nazarenko S., Kovalenko R., Gavryliuk A., Vinogradov S., Kryvoshei B., Pavlenko S., Boikov I., Muzichuk V., Kalinin P. Determining the dissipative properties of a flexible pipeline's material at stretching in the transverse direction

taking its structural elements into consideration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2(1)(110). P. 12–20.

347. Гаврилюк А., Ганченко І. Шляхи підвищення протипожежного захисту колісних транспортних засобів. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2017. С. 19–20.

348. Гаврилюк А., Паснак І., Ганченко І. Удосконалення протипожежного захисту транспортних засобів. *VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2017. С. 116–117.

349. Гаврилюк А., Лемішко М. Токсичні викиди фтористого газу від пожеж силових літій-іонних акумуляторів електромобілів. *XVI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2021. С. 67–69.

350. Гаврилюк А., Назаровець О. Застосування мікроструктурного фазового аналізу провідників бортової електромережі транспортних засобів при дослідженні їх загорянь. *Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»*. Харків, 2019. С. 28–30.

351. Yang H., Bang H., Amine K., Prakash J. Investigation on the thermal stability of LiFePO₄ cathode material. *Electrochimica Acta*. 2005. 50(26). P. 5658–5665.

352. Hurley M., Gottuk D., Hall Jr J., Harada K., Kuligowski E., Puchovsky M., Wiecek C., eds. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer. 2015.

353. Feng X., Ouyang M., Liu X., Wang L. Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*. 2018. 10. P. 246–267.

354. Wang Q., Ping P., Zhao X., Chu G., Sun J., Chen C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*. 2012. 208. P. 210–224.

355. Chen Z., Wang Q. Thermophysical Properties and Decomposition Kinetics of LiFePO₄ Cathode Materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. 139(2). P. 1419–1432.

356. Kopp K., Lintz H. Thermal Analysis and Modelling of Lithium Ion Cells as a Function of Chemistry, Design and State of Charge. *ECS Transactions*. 2019. 89(1). P. 213–224.

357. Zhang S., Li C., Wang Y. Comparative Study on the Thermophysical Characteristics and Safety Evaluation of Layered Oxide (NMC) and Olivine (LFP) Cathode Materials. *Energy Reports*. 2022. 8. P. 356–367.

358. Nguyen H., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of façade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022. 130. 103591.

359. Maleki H., Howard G. Thermal stability studies of Li-ion cells using DSC and accelerating rate calorimetry. *Journal of Power Sources*. 2009. 154(2). P. 299–310.

360. Yang H., Bang H., Amine K., Prakash J. Investigation on the thermal stability of LiFePO₄ cathode material. *Electrochimica Acta*. 2005. 50(26). P. 5658–5665.

361. Ren D., Feng S., Ouyang J. та ін. Experimental and Numerical Study on the Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. *Energy & Fuels*. 2020. 34(12). P. 16139–16151.

362. Smith K., Wang C. Thermal Management of Li-Ion Batteries. *Journal of the Electrochemical Society*. 2006. 153(3). A527–A532.

363. NIST Fire Dynamics Simulator (FDS). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-tools-software/fds-smokeview>.

364. Кузик А., Меньшикова О., Чмир О. Теорія ймовірностей та математична статистика: Навчальний посібник. Львів: СПОЛОМ. 2012. 192 с.

365. Liu X., Stoliarov S., Denlinger M., Masias A., Snyder K. Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium ion battery. *Journal of Power Sources*. 2015. 280. P. 516–525.

366. Пріщенко О., Черемська Н., Черногор Т. Побудова математичних моделей за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2021. (2). С. 29–36.

367. Овсієнко Ю., Флегантов Л. Методика вивчення алгоритму побудови нелінійних математичних моделей методом найменших квадратів із використанням комп'ютерної техніки. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2011. 21(1). С. 21.

368. Karlberg J., Engström I., Karlberg P., Fryer J. Analysis of linear growth using a mathematical model: I. From birth to three years. *Acta Paediatrica*. 1987. 76(3). P. 478–488.

369. Швидкий М. Методи регресійного аналізу та їх застосування: Навчальний посібник. Київ: Наукова думка. 2018.

370. Соловйов В. Цифрова обробка сигналів та зображень у середовищі MATLAB: Навчальний посібник. Львів: Видавництво ЛНУ. 2020.

371. Пекар А., Тарко Я. Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у MATLAB: Методичні вказівки. Львів: Видавничий центр Львівського національного університету. 2019.

372. MathWorks. MATLAB Documentation (Release 2023). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>.

373. Гаврилюк А., Лемішко М. Аналіз еквівалентної паливноїощадливості електромобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2019. № 20. С. 85–89.

374. Гаврилюк А., Лемішко М. Аналіз способів контролю температури при заряджанні тягових батарей електромобілів. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля»*. Львів, 2020. С. 71–75.

375. Einsatz von Löschdecken an der Feuerwehrrakademie in Hamburg. Kreisfeuerwehrverband Segeberg. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kfv-segeberg.org/infothek/braende-von-elektro-fahrzeugen/>.

376. Stöbich technology GmbH. E-MOBILITY PROTECTOR. Das textile Schutzsystem für Elektrofahrzeuge. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.stoebich-technology.de/en/produkte/e-mobilityprotector-1>.

377. Andersen M.K. Container puts out inextinguishable fires in electric cars. *CFPA EUROPE*. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cfpa-e.eu/container-puts-out-inextinguishable-fires-in-electric-cars/>.

378. Trewe A. Li-Ion Battery Pack Extinguishing Tests. Kungsbacka, Sweden: Cold Cut Systems. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.coldcutsystems.com/news/joint-forces-against-li-ion-battery-fires/>.

379. Гаврилюк А. Аналіз проведення аварійно-рятувальних робіт при виникненні ДТП електромобілів. *Всеукраїнська науково-практична онлайн-конференція «Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану»*. Кривий Ріг, 2022. С. 34–35.

380. Гаврилюк А. Аналіз особливостей виникнення, розвитку та гасіння пожеж електричних та гібридних автомобілів. *XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації – безпека та захист»*. Черкаси, 2021. С. 190–192.

381. Гаврилюк А. Обґрунтування та розроблення системи аварійного знеструмлення транспортного засобу. *XV Міжнародна науково-практична конференція «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти»*. Кривий Ріг, 2020. С. 76–77.

382. Гаврилюк А., Домінік А., Товарянський В., Лемішко М. Автоматична аерозольна установка пожежогасіння транспортних засобів. Патент України на корисну модель №134813. Опубл. 10.06.2019, Бюл. №11.

383. Гаврилюк А., Гащук П., Домінік А., Ренкас А., Руденко Д., Товарянський В., Оленюк Ю., Підгородецький Я., Швець М. Установка

автоматичного пожежогасіння електромобілів. Патент України на корисну модель №141239. Опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.

384. Ковалишин В. В., Сукач Р. Ю., Антонов А. В. Спеціальний пожежний ствол для гасіння підземних пожеж. Патент України на корисну модель №133683, МПК А62С 3/02. Власник: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. №u201807685; заяв. 09.07.2018; опубл. 25.04.2019.

385. Попович В. В. Ручний пожежний ствол для гасіння палаючого сміття. Патент України на корисну модель №76636, МПК А62С 3/07. Власник: Попович В. В. №u 201207786; заяв. 25.06.2012; опубл. 10.01.2013.

386. Лісняк А. А., Дубінін Д. П., Грицина І. М., Аветісян В. Г., Остапов К. М. Ствол-пробійник для гасіння пожеж. Патент України на корисну модель №136162, МПК А62С 31/00. Власник: Національний університет цивільного захисту України. № u 201901333786; заяв. 11.02.2019; опубл. 12.08.2019.

387. HOLMATRO. Mastering power lifting bag HLB 85. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.holmatro.com/en/rescue/lifting-bag-hlb>.

388. Гаврилюк А. Дослідження паливної та еквівалентноїощадливості автомобілів з традиційними та альтернативними видами пального. *Наукові праці ВНТУ*. 2019. №2. С. 1–8.

389. Гаврилюк А., Яковчук Р. Особливості FDS-моделювання при дослідженні пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2024. С. 840–843.

390. Гаврилюк А. Електромобілі. Тенденції та небезпеки. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2023. С. 131–135.

391. Pasnak I., Prydatko O., Gavrilyk A. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 3(3) (81). P. 22–28.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у періодичних виданнях,
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

1. Pasnak I., Prydatko O., **Gavrilyk A.** Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, 3 (81). P. 22–28. (Scopus Q3).

2. Kushnir A., Kopchak B., **Gavryliuk A.** Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, 10 (111). P. 6–18. (Scopus Q3).

3. Nazarenko S., Kovalenko R., **Gavryliuk A.**, Vinogradov S., Kryvoshei B., Pavlenko S., Boikov I., Muzichuk V., Kalinin P. Determining the dissipative properties of a flexible pipeline's material at stretching in the transverse direction taking its structural elements into consideration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, 1 (110). P. 12–20. (Scopus Q3).

4. Gydym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., **Gavryliuk A.** The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 136, 106198. (Scopus Q1).

5. **Gavryliuk A.**, Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023. Vol. 11(3). P. 421–434. (Scopus Q3).

6. **Gavryliuk A.**, Yakovchuk R., Chalyy D., Lemishko M., Tur N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2 (10 (122)). P. 39–46. (Scopus Q3).

**Статті у наукових виданнях, включених до Переліку
наукових фахових видань України**

7. Гаврилюк А. Ф., Лин А. С. Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*. 2017. №31. С. 11–17.
8. Гаврилюк А. Ф., Лемішко М. В. Аналіз еквівалентної паливної ощадливості електромобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2019. №20. С. 85–89.
9. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літєвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. №40. С. 31–39.
10. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С., Субота А. В. Аналіз пожежної небезпеки витоку водню з електромобілів на паливних елементах. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 47–56.
11. Гаврилюк А. Ф. Визначення параметрів і дій при пожежах електромобілів на водневих паливних елементах. *Комунальне господарство міст*. 2023. №1 (175). С. 118–124.
12. Гаврилюк А. Ф., Васильєва О. Е. Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. *Пожежна безпека*. 2023. №42. С. 32–42.
13. Гаврилюк А. Ф. Дослідження показників, які описують процеси горіння електромобілів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2. С. 57–70.
14. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. №2 (16). С. 32–41.
15. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С., Лемішко М. В. Експериментальні дослідження елементів силової батареї tesla model s на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2023. №43. С. 50–62.

16. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування найбільш значущих критеріїв пожежної безпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2023. №42. С. 81–90.

17. **Гаврилюк А.** Методика експериментальних досліджень пожежної безпеки силових літій-іонних батарей електромобілів під дією нагрівальної панелі. *Комунальне господарство міст*. 2024. №1 (182). С. 180–186.

18. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Експериментальні дослідження модулів силової батареї tesla model s на предмет пожежної безпеки. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 5–12.

19. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Методика експериментальних досліджень модулів силових батарей електромобілів на предмет пожежної безпеки. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2024. №29. С. 100–109.

20. **Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С.** Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних батарей. *Комунальне господарство міст*. 2024. №4 (185). С.166–171.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

21. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження паливної та еквівалентної ощадливості автомобілів з традиційними та альтернативними видами пального. *Наукові праці ВНТУ*. 2019. №2. С. 1–8.

Патенти на корисну модель

22. **Гаврилюк А. Ф., Гащук П. М., Домінік А. М., Ренкас А. А., Руденко Д. В., Товарянський В. І., Оленюк Ю. Р., Підгородецький Я. І., Швець М. М.** Установка автоматичного пожежогасіння електромобілів. *Патент України на корисну модель №141239*, опубл. 25.03.2020, Бюл. №6.

23. **Гаврилюк А. Ф., Домінік А. М., Товарянський В. І., Лемішко М. В.** Автоматична аерозольна установка пожежогасіння транспортних засобів. *Патент України на корисну модель №134813*, опубл. 10.06.2019, Бюл. №11.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. **Гаврилюк А. Ф.**, Ганченко І. Ю. Шляхи підвищення протипожежного захисту колісних транспортних засобів. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2017. С. 19–20.

25. **Гаврилюк А. Ф.**, Паснак І. В., Ганченко І. Ю. Удосконалення протипожежного захисту транспортних засобів. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2017. С. 116–117.

26. **Гаврилюк А. Ф.** Моделювання іскрових розрядів бортових електромереж як чинників впливу на пожежну небезпеку транспортних засобів. *Матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2017. С. 70–73.

27. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження внутрішнього опору акумуляторної батареї як чинника впливу на величину струму короткого замикання транспортних засобів. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2018. С. 243–244.

28. **Гаврилюк А. Ф.**, Тимошенко Ю. В. До питання тенденцій сучасних електромобілів. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2018. С. 69–70.

29. **Гаврилюк А. Ф.** Екологічна небезпека літій-іонних батарей транспортних засобів. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна небезпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та перспективи»*. Львів, 2018. С. 165.

30. **Гаврилюк А. Ф.**, Лемішко М. В. Пожежна небезпека літій-іонних батарей електромобілів. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної*

конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності». Львів, 2019. С. 33–34.

31. **Гаврилюк А. Ф.** Принципова схема реалізації технічних засобів для гасіння пожежі електромобілів. *Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, 2019. С. 141–144.

32. **Гаврилюк А. Ф., Назаровець О. Б.** Застосування мікроструктурного фазового аналізу провідників бортової електромережі транспортних засобів при дослідженні їх загорянь. *Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»*. Харків, 2019. С. 28–30.

33. **Гаврилюк А. Ф., Товарянський В. І.** Принципова схема аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів. *21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (з міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ, 2019. С. 61–63.

34. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз причин виникнення пожеж колісних транспортних засобів. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2020. С. 16–18.

35. **Gawryliuk A., Dubasiuk W.** Udoskonalenie metod ochrony przeciwpożarowej pojazdów. *III Międzynarodowa Konferencja «Bezpieczeństwo, zarządzanie, medycyna i kultura fizyczna»*. Gdańsk, 2020. С. 68–94.

36. **Гаврилюк А., Лемішко М.** Електромобілі: конструювання та експлуатація. *Матеріали Другої Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем»*. Рівне, 2020. С. 116–118.

37. **Гаврилюк А., Лемішко М.** Електромобілі. Перспектива розвитку. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»*. Кременчук, 2020. С. 210–217.

38. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування та розроблення системи запобігання затоплення автомобілів. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами»*. Харків, 2020. С. 280–282.

39. **Гаврилюк А. Ф.** Обґрунтування та розроблення системи аварійного знеструмлення транспортного засобу. *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти»*. Кривий Ріг, 2020. С. 76–77.

40. **Гаврилюк А. Ф.,** Лемішко М. В. Аналіз способів контролю температури при заряджанні тягових батарей електромобілів *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля»*. Львів, 2020. С. 71–75.

41. **Гаврилюк А.,** Лемішко М. Токсичні викиди фтористого газу від пожеж силових-літій-іонних акумуляторів електромобілів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2021. С. 67–69.

42. **Гаврилюк А.,** Лесюк Д. Аналіз динаміки електричних і гібридних автомобілів в Україні. *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2021. С. 71–73.

43. Rudyk Y., Kuts V., **Gavryliuk A.,** Naumchuk N. Required safety component of automotive cyberphysical systems. *20 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2020. P. 338–342.

44. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз особливостей виникнення, розвитку та гасіння пожеж електричних та гібридних автомобілів *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації безпека та захист»*. Черкаси, 2021. С. 190–192.

45. **Гаврилюк А. Ф.** До питання встановлення причин пожеж транспортних засобів *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій»*. Київ, 2022. С. 103–106.

46. **Гаврилюк А., Дуда Ю.** Виклики використання електромобілів *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2022. С. 189–191.

47. **Гаврилюк А., Верхолук Ю.** Пожежна небезпека електромобілів на водневому паливі. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси, 2022. С. 16–17.

48. Rudyk Y., **Gavryliuk A.**, Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Estimations of Equivalent Fuel Savings of Electric Vehicles. 2022 *IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 - Proceedings*. 2022. P. 3877–390.

49. **Гаврилюк А., Гриньова А.** Аналіз пожеж електромобілів та причин їх виникнення *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси, 2022. С. 16–17.

50. **Гаврилюк А. Ф.** Аналіз проведення аварійно-рятувальних робіт при виникненні ДТП електромобілів *Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції «Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану»*. Кривий Ріг, 2022. С.34–35.

51. **Гаврилюк А. Ф.** Електромобілі. Тенденції та небезпеки *Матеріали XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2023. С. 131–135.

52. Rudyk Y., **Gavryliuk A.**, Kuts V., Yatsuk, V., Vinogradov, S. Comparative assessment of the efficiency of some car drives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. MCEME-2022, 1277*. 2023. P.1–6.

53. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Особливість проведення вогневих експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів. *Третя Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2024»*. Харків, 2024. С. 111–113.

54. **Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С.** Особливості FDS моделювання при дослідженні пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів. *Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. Львів, 2024. С. 840–843.

55. **Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С.** Аналіз ефективності використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. Львів, 2024. С. 144–145.

ДОДАТОК Б

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. XII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 21 березня 2017 р., форма участі – заочна.

2. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 24–25 жовтня 2017 р., форма участі – заочна.

3. XIX Всеукраїнська науково-практична конференція (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»

м. Київ: Інститут державного управління у сфері цивільного захисту, 19–20 квітня 2017 р., форма участі – заочна.

4. IX Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 24–25 жовтня 2018 р., форма участі – заочна.

5. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 21 березня 2018 р., форма участі – заочна.

6. III Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та перспективи»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 7–8 червня 2018 р., форма участі – очна.

7. XIV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 21 березня 2019 р., форма участі – очна.

8. IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 24–25 жовтня 2019 р., форма участі – заочна.

9. Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»

м. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 24–25 жовтня 2019 р., форма участі – заочна.

10. 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (з міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»

м. Київ: Інституту державного управління у сфері цивільного захисту, 08 жовтня 2019 р., форма участі – очна.

11. XI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 09–10 квітня 2020 р., форма участі – заочна.

12. III Międzynarodowa Konferencja «Bezpieczeństwo, zarządzanie, medycyna i kultura fizyczna»

Gdańsk: Akademii Wychowania Fizycznego i Sportu im. Jędrzeja Śniadeckiego, 20 вересня 2020 р., форма участі – заочна.

13. Друга Всеукраїнська науково-технічна інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем»

м. Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 09-11 листопада 2020 р., форма участі – заочна.

14. VII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»

м. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 11-13 листопада 2020 р., форма участі – заочна.

15. Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами»

м. Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 17 листопада 2020 р., форма участі – заочна.

16. XV Міжнародна науково-практична конференція «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти»

м. Кривий Ріг: Донецький юридичний інститут МВС України, 13 листопада 2020 р., форма участі – очна.

17. Всеукраїнська науково-практична конференція «Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 12 листопада 2020 р., форма участі – очна.

18. XVI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»

м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 23 березня 2021 р., форма участі – очна.

20. IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology

м. Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки, 06–09 жовтня 2020 р., форма участі – заочна.

21. XI Всеукраїнська науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації безпека та захист»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 28-29 жовтня 2021 р., форма участі – заочна.

22. Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій»

м. Київ: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 11-15 квітня 2022 р., форма участі – заочна.

23. XVI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 18 березня 2022 р., форма участі – очна.

24. Всеукраїнська науково-практична конференція «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 26 травня 2022 р., форма участі – заочна.

25. IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology

м. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 07–09 жовтня 2022 р., форма участі – заочна.

26. Всеукраїнська науково-практична онлайн-конференція «Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану»

м. Кривий Ріг: Донецький державний університет внутрішніх справ, 27 травня 2022 р., форма участі – заочна.

27. XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 25 березня 2023 р., форма участі – очна.

28. Третя Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2024»

м. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 18 квітня 2024 р., форма участі – заочна.

29. XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 28–29 березня 2024 р., форма участі – очна.

30. Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»

м. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 12 грудня 2024 р., форма участі – очна.