

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 Україні 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 ЛІВ на процеси їх горіння внаслідок впливу зовнішнього джерела тепла. Окрім цього немає механізму визначення часу виникнення горіння у силових ЛІВ 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 ЛІВ 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 $690 \text{ }^\circ\text{C}$ до $810 \text{ }^\circ\text{C}$ для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального на горизонтальне; зменшуватись з $810 \text{ }^\circ\text{C}$ до $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 датчика температури із змінними параметрами спрацювання, а саме значеннями мінімальної статичної температури спрацювання і значення швидкості підвищення температури за якої він спрацьовує. 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 thermdestructive 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 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 витoku 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. *Пожезна 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 економності 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.** Установа 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 ІХ 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 ХІ 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-технічна 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-практична конференція 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 конференція «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 силовій 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.

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

ЛМО – 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 – датчик 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/c .

P – тиск газу, Па.

M – молярна маса газу, г/моль.

t – час, с.

ρ – густина матеріалу, $кг/m^3$.

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

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

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 безпеки електромобілів, а також систем їх протипожежного захисту є актуальною проблематикою, яка масштабується та обґрунтована викликами сьогодення.

Дослідженнями щодо пожежної безпеки електромобілів займаються ряд вітчизняних та зарубіжних наукових установ та вчених. У значній кількості робіт ґрунтовно описано загальні підходи до забезпечення пожежної безпеки 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 LІВ внаслідок їх механічних пошкоджень.

Інші дослідження спрямовані на розкриття механізму впливу короткого замикання на виникнення займань LІВ 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 LІВ. Описано вплив надмірного струму заряду/розряду на пожежну безпеку та тривалість служби LІВ. 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 LІВ на процеси їх горіння внаслідок впливу зовнішнього джерела тепла. Окрім цього немає механізму оцінювання часу виникнення горіння у силових LІВ електромобілів,

які б враховували як технічні параметри самої батареї, так і характеристики джерела тепла.

Враховуючи вкладене, наукові дослідження спрямовані на розкриття механізму горіння силових літій-іонних акумуляторних батареях від їх температури нагріву, технічних характеристик та конструктивних параметрів для розвитку наукових основ прогнозування виникнення пожежі, як теоретична база забезпечення протипожежного захисту електромобілів, є актуальною науковою проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на підставі напрямку 3 з індексом проблеми 3.1 Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020-2025 роки; замовлення Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи які окреслені у плані наукової і науково-технічної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2024 рік; Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.11.2020 № 443; програм науково-дослідних робіт: «Підвищення ефективності забезпечення протипожежного захисту електромобілів» (номер державної реєстрації 0119U102482), «Особливості виникнення процесів займань у силових акумуляторних батареях електромобілів (на прикладі TESLA MODEL S)» (номер державної реєстрації 0124U002454), «Обґрунтування вимог пожежної безпеки до електрозаправних станцій» (номер державної реєстрації 0121U112129), «Обґрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів» (номер державної реєстрації 0123U100457) в яких здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Розкриття закономірностей динаміки теплових процесів у електромобілях в залежності від технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів акумуляторних батарей, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту зазначених об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз вітчизняних, зарубіжних теоретичних та експериментальних досліджень, а також відповідну нормативну базу щодо оцінки та особливостей горіння силових АКБ, а також пожеж електромобілів в цілому та виявити шляхи удосконалення систем запобігання і реагування на їх виникнення для підвищення ефективності протипожежного захисту зазначених об'єктів, а також навколо них;

- на основі аналізу обґрунтувати та узагальнити критерії (чинники), що характеризують небезпеки виникнення горіння силових акумуляторних батарей, які враховують їх технічні характеристики, конструктивні та експлуатаційні параметри, а також розвиток пожеж електромобілів в цілому.

- теоретично обґрунтувати механізм виникнення горіння у силових АКБ, а також пожеж електромобілів в цілому, шляхом використання існуючих математичних моделей, які описують такі процеси;

- з використанням комп'ютерного моделювання дослідити динаміку виникнення займань силових АКБ електромобілів на основі розробленої гідродинамічної моделі у середовищі FDS яка базується на адаптованих математичних моделях рівнянь теплообміну;

- обґрунтувати та розробити методики експериментальних досліджень процесів виникнення та розвитку горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів;

- здійснити експериментальні дослідження, процесів горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів, а також їх гасіння та на основі отриманих результатів виявити та проаналізувати залежності і здійснити їх кореляційний аналіз;

- встановити комплекс найбільш значущих взаємозв'язків та чинників (факторів), які впливають на виникнення та розвиток процесів горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів шляхом об'єднання отриманих теоретичних та експериментальних результатів, а також результатів комп'ютерного моделювання.

- на основі комплексу найбільш значущих взаємозв'язків та чинників (факторів), розробити науково-методичний апарат, для розрахункової оцінки часу виникнення займань у силових АКБ електромобілів, з метою розрахункової оцінки протипожежного захисту зазначених об'єктів;

- з врахуванням отриманих комплексних результатів досліджень обґрунтувати та розробити технічні рішення для підвищення протипожежного захисту електромобілів, а також ефективності гасіння пожеж за їх участі.

Об'єкт дослідження – механізм виникнення термодеструктивних процесів та розвиток горіння силових акумуляторних батарей електромобілів, як підґрунтя удосконалення систем їх протипожежного захисту.

Предмет дослідження – вплив технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних чинників на виникнення термодеструктивних процесів та розвиток горіння силових акумуляторних батарей електромобілів, а також ефективність систем їх протипожежного захисту.

Методи дослідження: під час виконання дисертаційної роботи застосовано експериментальні і теоретичні методи досліджень. В теоретичних методах використовувались комплексний аналіз, синтез та узагальнення опублікованих наукових праць щодо особливостей виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторних батареях, пожеж електричних колісних транспортних засобів; математичне моделювання процесів теплообміну між елементами силової батареї електричних колісних транспортних засобів з використання фундаментальних законів теплопередачі, а також використання емпіричних методів; спрощений метод, розрахунковий підхід із використанням рівнянь нестационарної теплопровідності, а також розрахунковий метод із застосуванням польових моделей для аналізу розвитку займань літій-іонних батарей; метод перевірки відповідності дисперсії результатів досліджень одній генеральній сукупності (метод Фішера); метод дихотомії для визначення оптимального розміру розрахункової сітки в комп'ютерних моделях; табличний метод;

Експериментальні дослідження ґрунтувались на розроблених здобувачем методиках з використанням метрологічного атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання; методи кінцевих об'ємів для розв'язання диференціальних рівнянь; метод Ейлера для розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса під час моделювання процесів виникнення та розвитку пожеж електричних колісних транспортних засобів.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях в залежності від їх технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів.

Здобувачем *уперше* отримані наступні наукові результати:

1. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що 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 дії зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м^2 час виникнення займання змінюється:

- при зміні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального (анодом до джерела тепла) на горизонтальне – нелінійно зменшується з 1225 с до 1115 с для 100 % заряджених літій-іонних елементів;

- для горизонтального просторового розміщення відносно джерела тепла при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – нелінійно зростає з 1115 с до 1340 с.

2. 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/м^2 може змінюватись:

- для 100 % заряджених літій-іонних елементів при зміні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального (анодом до джерела тепла) на горизонтальне – зростати з 690 °С до 810 °С;

- при горизонтальному просторовому розміщенні джерела тепла та зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – зменшуватись з 810 °С до 450 °С. Зазначені результати дозволяють формувати вимоги пожежної безпеки електромобілів на стадії проектування.

3. Розроблений та обґрунтований метод моделювання дає можливість прогнозувати час виникнення горіння АКБ з урахуванням найпоширеніших сучасних катодних матеріалів, ємності (с), заряду (к), та густини зовнішнього теплового потоку (q) від дії відкритого полум'ям (1) та без нього (2):

- 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):

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

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

4. Методами комп'ютерного моделювання виявлено закономірність зниження часу виникнення займання у АКБ електромобіля залежно від хімічного складу катодів, а саме час виникнення займання АКБ електромобіля з катодним матеріалом літій-нікель-манган-кобальт оксид ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) є на 9-16% менший порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-нікель-кобальт-алюміній оксид ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) і на 15-19% меншим порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-ферум фосфату (LiFePO_4), при однакових технічних характеристиках, конструктивних та експлуатаційних

параметрах, а також однаковій густині теплового потоку зовнішнього джерела тепла.

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

Удосконалено:

1. На основі досліджень наслідків реальних пожеж та аналізу технічних параметрів сучасних силових акумуляторних батарей електромобілів, обґрунтовано критеріальну базу, а саме: енергетичну ємність, ступінь заряду, просторове розміщення, катодний матеріал, параметри зовнішнього джерела тепла, що дозволяє прогнозувати умови виникнення горіння.

2. Науково-методичну та експериментальну базу дослідження процесів виникнення та розвитку процесів горіння у силових літій-іонних АКБ електромобілів в масштабах елемента, модуля та електромобіля в цілому, відмінною рисою якої є обґрунтування розміщення та використання мінімальної кількості термопар для забезпечення точності вимірювань.

Набули подальшого розвитку:

1. Підходи з оптимізації конструкції силових літій-іонних АКБ електромобілів на підставі експериментальних визначень часових та температурних параметрів виникнення процесів їх горіння.

2. Науково-прикладні засади, які базуються на інтеграції чисельного моделювання та експериментальних досліджень, щодо прогнозування та оцінювання можливості виникнення процесів горіння у силових літій-іонних АКБ, як підґрунтя удосконалення конструкції електромобілів.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає у обґрунтуванні та розробленні науково-методичного апарату, який об'єднує методики проведення натурних досліджень, табличний метод визначення часу виникнення термодеструктивних

процесів, що разом з обґрунтованими критеріями, які впливають на ефективність системи забезпечення протипожежного захисту, дозволяє визначити безпекові часові умови під час пожеж електричних колісних транспортних засобів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття особливостей пожеж електричних колісних транспортних засобів і механізму виникнення джерел займання внаслідок термодеструктивних процесів у їх силових літій-іонних акумуляторних батареях, реалізовано у розробленому державному стандарті України 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 надзвичайних 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 упровадження від 24.09.2024 року), а також у навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності при підготовці 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 упровадження від 16.12.2024 року);

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 упровадження від 26.07.2024 року).

Досліджені вогнегасні речовини та критичні інтенсивності їх подачі при гасінні пожеж електричних колісних транспортних засобів впроваджені у практичну діяльність оперативно-рятувальних підрозділів Головного управління ДСНС України у Львівській області (акт упровадження від 13.10.2024 року), а також у діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «Експертно-технічна компанія» м. Київ (акт упровадження від 10.12.2024 року).

Результати дисертаційного дослідження втілено в розробку двох патентів України на корисну модель (патент №134813 та патент №141239).

Особистий внесок здобувача є визначальним на всіх етапах досліджень та обумовлений обґрунтуванням актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, формулюванням мети та завдань дослідження, аналізі вітчизняних, закордонних наукових джерел, удосконаленні та розробленні методик дослідження, планування та проведення експерименту, оброблення отриманих результатів та їх узагальнення. Дисертація є самостійною роботою автора; усі положення, запропоновані до захисту, результати їх впровадження описано в працях [1 – 52].

Внесок здобувача в наукові роботи, опубліковані у співавторстві, полягає в наступному. У науковій праці [1] – проведено дослідження тривалості слідування та маршрутів руху спеціальних транспортних засобів (пожежних автомобілів) до місця виникнення пожеж електромобілів та розроблено імітаційну модель управління діями пожежно-рятувальних підрозділів, що дозволяє зменшити час вільного розвитку зазначених пожеж; у роботі [2] – проведено експериментальне дослідження алгоритму роботи максимально-динамічного теплового пожежного сповіщувача із змінними параметрами спрацювання для ефективного виявлення підвищення температури силових батарей електромобілів на початкових етапах виникнення термодеструктивного процесу; у праці [3] – отримано залежність зміни дисипативних властивостей

матеріалу внутрішнього гідроізолюючого шару пожежного рукава внутрішнім діаметром 77 мм при послідовних циклах деформацій від режиму навантаження під час гасіння та охолодження силових батарей електромобілів; у роботі [4] – проведено вогневі експериментальні дослідження впливу струмів короткого замикання на мікроструктуру силових провідників електромобілів; у праці [5] – шляхом математичного моделювання з використанням прикладного програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator здійснено моделювання температурних параметрів пожежі електромобіля на приладі автомобіля Tesla Model S та отримано значення безпечної мінімальної протипожежної відстані впродовж часу вільного розвитку 610 с, для пожежі електромобіля на закритому паркінгу; у праці [6] – отримано режим швидкості виділення тепла під час дослідження процесів горіння електромобілів, обладнаних силовими літій-іонними акумуляторами та побудовано відповідні графічні залежності; у роботі [7] – обґрунтовано застарілість діючих норм забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, установками гасіння та виявлення пожежі та розроблено зміни, які покликані підвищити протипожежний захист колісних транспортних засобів в тому числі і електромобілів; у праці [8] – окреслено передумови розвитку електромобілів, описано їх загальну класифікацію. Окреслено переваги та недоліки силових літій-іонних батарей; у роботі [9] – визначено та проаналізовано чинники впливу на пожежну безпеку електромобілів а також описано та проаналізовано пожежну небезпеку різних типів силових літій-іонних батарей, які використовуються у сучасних електромобілях; у праці [10] – досліджено та отримано вираз для визначення тривалості витікання водню з балонів електромобілів, які використовують паливні елементи; у роботі [12] – досліджено вітчизняні та міжнародні стандарти, які регламентують вимоги до випробувань силових батарей електромобілів, а також причини резонансних пожеж електромобілів у світі; у роботі [14] – розроблено, обґрунтовано та запропоновано методику експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів при дії відкритим полум'ям на предмет пожеоні

небезпеки; у науковій праці [15] – обробка, узагальнення та опис отриманих експериментальних даних при польовому дослідженні елементів силової батареї електромобіля відкритим полум'ям; у [18] – проведено експериментальні дослідження теплового впливу пропанового пальника на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model s, а також виявлено та описано особливості розвитку термодеструктивного процесу та особливості його горіння; у роботі [19] – розроблено та описано методику експериментальних досліджень модулів силових батарей електромобілів на предмет пожежної небезпеки; у [20] – проведено експериментальне дослідження впливу різних вогнегасних речовин найпоширеніших переносних вогнегасників в Україні на ефективність гасіння літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та узагальнення отриманих результатів; у [22] – розроблення принципової схеми реалізації установки автоматичного пожежогасіння електромобілів; у [23] – узагальнення результатів та формулювання реферату і формули корисної моделі автоматичної аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів; у науковій праці [24] – обґрунтовано проблемні аспекти забезпечення протипожежного захисту колісних транспортних засобів; у [25] – окреслено перспективні способи підвищення протипожежного захисту транспортних засобів; у роботі у [28] – окреслено сучасні тенденції автомобілебудування електромобілів та небезпеки до яких вони можуть привезти; у науковій роботі [30] – систематизовано наявну наукову інформацію щодо пожежної небезпеки літій-іонних батарей електромобілів; у роботі [32] – описано загальний алгоритм проведення мікроструктурного фазового аналізу електричних провідників колісних транспортних засобів при визначенні ймовірної причини їх загорянь; у науковій праці [33] – презентація результатів принципової схема аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів; у роботі [35] – систематизовано та узагальнено загальні підходи щодо забезпечення пожежної безпеки колісних транспортних засобів та розроблення технічних рішень для їх пожежогасіння; у роботі [36] – окреслено основні матеріали та

речовини, їх фізико-хімічні властивості, які беруть участь у виготовленні електромобілів; у [37] – визначено та оцінено передумови розвитку електромобілів в масштабі світового автопарку; у науковій праці [40] – охарактеризовано існуючі сучасні способи контролю температури при заряджанні тягових батарей електромобілів та надана їм оцінка з точки зору пожежної небезпеки; у роботі [41] – окреслено небезпеку гасіння пожеж за участю літій-іонних батарей та надано рекомендації особовому складу пожежно-рятувальним підрозділам; у [42] – узагальнена та оцінена динаміка кількості електричних і гібридних автомобілів в Україні; у науковій праці [43] – досліджено вплив різноманітних бортових систем колісних транспортних засобів на їх безпеку; у роботі у [46] – систематизовано та узагальнено проблемні питання та небезпеки до яких призводять використання електромобілів; у [47] – досліджено пожежну небезпеку електромобілів на водневому паливі; у науковій роботі [48] – оцінено еквівалентну витрату електроенергії електромобілів та її вплив на пожежну небезпеку; у праці [49] – систематизовано основні ідентифіковані причини виникнення пожеж електромобілів; у науковій праці [52] – досліджено паливну ощадність нийпоширеніших моделей електромобілів; у [53] – окреслено основні положення методики вогневих експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів; у роботі [54] – проведений опис адаптації програмного комплексу FDS для застосування під час досліджень пожежної небезпеки силових літій-іонних батарей електромобілів; у праці [55] – проведено експериментальне дослідження та здійснено опис отриманих результатів.

Наукові праці [11; 13; 16; 17; 21; 26; 27; 29; 31; 34; 38; 39; 44 ;45 ;50, 51] підготовлені самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: XII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи

розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2017 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2018 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна небезпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та перспективи» (м. Львів, 2018 р.); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2019 р.); IX Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2019 р.); Круглому столі «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (м. Харків, 2019 р.); 21-й Всеукраїнській науково-практичній конференції (з міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 2019 р.); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2020 р.); III Międzynarodowa Konferencja «Bezpieczeństwo, zarządzanie, medycyna i kultura fizyczna» (м. Гданськ, Польща, 2020 р.); 20 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology, PIC S&T'2020 (м. Харків 2020 р.); II Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне, 2020 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 2020 р.); 20 IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (м. Львів, 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» (м. Харків, 2020 р.); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти» (м. Кривий Ріг, 2020 р.); 16th IEEE International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, «MEMSTECH 2020» (м. Львів 2020 р.); Всеукраїнській науково-

практичній конференції «Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля» (м. Львів, 2020 р.) ; XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2021 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції "Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи" (м. Львів, 2021 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Розвиток науки і техніки: проблеми та перспективи" (м. Київ, 2021 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю "Надзвичайні ситуації: безпека та захист" (м. Черкаси, 2021 р.); XVI Міжнародна науково-практична конференція "Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності" (м. Львів, 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції "Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених" (м. Черкаси, 2022 р.); IEEE 9th International Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022» (м. Львів, 2022р); Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції "Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану" (м. Кривий Ріг, 2022 р.); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених "Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності" (м. Львів, 2023 р.); 3-ті Міжнародні науково-практичні конференції "Проблеми пожежної безпеки 2024" (м. Черкаси, 2024 р.); XIX Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених "Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності" (м. Львів, 2024 р.).

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертації увійшли до 55 опублікованих робіт, серед яких: 6 статей, проіндексовані у науково-метричних базах даних Scopus; 14 статей, що входять до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття додатково відображає результати досліджень; 2 патенти України на корисну модель; 32 матеріали конференцій різного рівня та наукової специфіки.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 391 найменувань, містить 415 сторінок друкованого тексту (з них 313 сторінок основного тексту), 30 таблиць, 200 рисунків, 5 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1. Загальні положення

Згідно з [1], електромобіль (електричний колісний транспортний засіб) – автомобіль, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумуляування електричної енергії. Для акумуляування електричної енергії можуть використовуватись силові акумуляторні батареї (АКБ), суперконденсатори чи паливні елементи [2].

Хоча ідея створення електромобіля бере свій початок у 1800-х роках [3], а перший його прототип було створено у 1829 році, задовго до створення автомобіля із двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), популярності вони набули лише за останнє десятиліття. На це вплинула проблема з глобальним потеплінням та колосальне забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згоряння. Також ці процеси пришвидшила зухвало розв'язана війна росії проти України. Оскільки агресор володіє колосальними запасами нафтопродуктів, від яких залежало багато держав світу.

За даними [4] частка електромобілів у 2021 році перейшла відмітку 10% світових продажів автомобілів і продовжує зростати. Загальна кількість електромобілів, станом на кінець 2022 року становить понад 27 млн (рис 1.1).

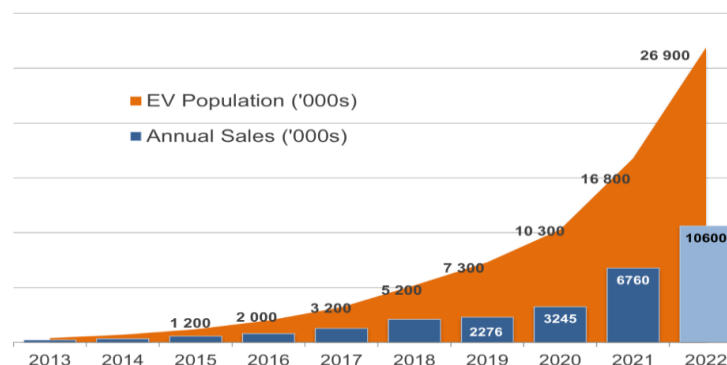


Рисунок 1.1 – Динаміка кількості електромобілів у світі [4]

Лише 2022 році було продано понад 10,5 млн таких автомобілів (що склало 10 % від загальної чисельності проданих автомобілів), що на 55 % більше ніж у 2021 році [5]. Модельний ряд електромобілів представлений представлений 450-ма різноманітними моделями, що у 5 раз більше ніж у 2015 році. Разом з тим ряд країн до 2030 року відмовляються від виробництва автомобілів з ДВЗ [6, 7, 368]. Всі ці факти підкреслюють передумови бурхливого розвитку електромобілів. На рис. 1.2 наведено динаміку розвитку електромобілів за регіонами.

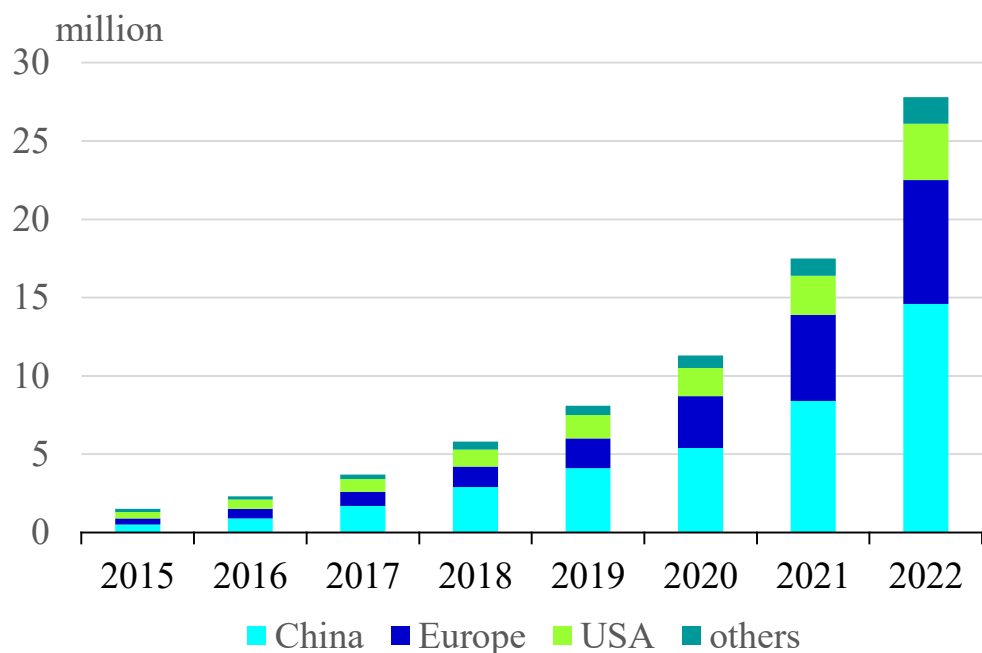


Рисунок 1.2 – Динаміка кількості електромобілів за регіонами світу

Найбільше таких автотранспортних засобів зосереджено у Китаї, Європі та США, а серед них найбільш поширеними є легкові пасажирські автомобілі та автобуси.

Згідно із дослідженнями [8, 9] кількість продажів електромобілів у Євросоюзі до 2030 року зросте до 7 млн щорічно, а світовий автопарк перевищить 120 млн таких авто [5]. Це призведе до збільшення не лише кількості зон паркування та закритих паркінгів, але й до збільшення кількості пожеж електромобілів та таких об'єктах. Для забезпечення живлення електричних двигунів електромобілів використовується джерело електричної енергії. На сьогодні найбільшого поширення набули літій-іонні батареї, широко

визнані передовими системами накопичення енергії завдяки їх підвищеній потужності, високій ефективності заряджання-розряджання та збільшеному терміну служби. Разом з тим, хімічні та електрохімічні процеси можуть спричинити неконтрольований термодеструктивний процес. Такі процеси призводять до викиду шкідливих і небезпечних газів [2, 10], займань, вибухів та завдають не лише матеріальних збитків, але й людських жертв [11–13]. Окрім цього, особливу увагу, з точки зору пожежної безпеки, заслуговують електромобілі, які використовують для живлення паливних елементів водень. Особливості пожежної безпеки таких транспортних засобів наведено у праці [14]. Пожежі та вибухи електромобілів [15–19] викликають серйозне занепокоєння у громадськості та створюють нові виклики для наукової спільноти.

1.2. Аналіз статистичних даних пожеж електромобілів, причин їх виникнення та наслідків від них

Кількість пожеж електромобілів є меншою в порівнянні з пожежами автомобілів, які обладнані ДВЗ, проте вони мають небезпечніший характер розвитку [20]. Порівняно мала кількість таких пожеж пов'язано із значно меншою часткою електромобілів у загальному парку, а також із незначним середнім їх віком (так як парк електромобілів бурхливо почав розвиватись за останнє десятиліття). Доволі часто важко ідентифікувати причину, яка ініціювала займання транспортного засобу [21]. Пожежі електромобілів можуть відбутись на закритих чи відкритих паркінгах, у приватних гаражах, під час заряджання, руху, чи після ДТП (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Огляд випадків пожеж електромобілів та причин їх виникнення

Рік	Країна	Марка авто	Обставини
2023	США	Tesla Model S	Автомобіль загорівся під час транспортування на евакуаторі з місця ДТП після того як був погашений попередньо [22].

Продовження таблиці 1.1.

2023	США	Tesla Model S	Автомобіль загорівся під час руху по шосе [23].
2022	Великобританія	Jaguar I-Pace	Пожежа виникла на автовозі під час руху. Згоріло 6 автомобілів з 7 [24].
2022	США	Tesla Model S	Автомобіль зайнявся перебуваючи на аварійному майданчику після ДТП, яка трапилась за три тижні до займання. Пожежа повністю знищила автомобіль [25].
2022	США	Jaguar I-Pace	Автомобіль спалахнув і був швидко охоплений полум'ям, горіння супроводжувалось вибухами [26].
2021	Південна Корея	Hyundai Kona	Автомобіль спалахнув перебуваючи на підземному паркінгу [27].
2021	Франція	Renault zoe	Автомобіль раптово спалахнув, внаслідок чого постраждали двоє людей, одна з яких отримала значні опіки [28].
2020	США	Porsche Taycan	Автомобіль повністю згорів під час стоянки у приватному гаражі.
2019	Португалія	Porsche Panamera E-Hybrid	Пожежа виникла внаслідок зіткнення автомобіля з опорою моста [29].
2019	Південна Корея	Hyundai Kona	Автомобіль загорівся внаслідок вибуху під час заряджання [30].
2019	Канада	Hyundai Kona	Автомобіль загорівся під час паркування в житловому гаражі в Монреалі. Вибух був настільки потужний, що ворота гаража вирвало [31].
2019	Китай	Tesla Model S	Пожежа виникла під час паркування [32].
2019	Китай	Tesla Model S	Пожежа виникла на підземному паркінгу, що призвело до займання інших автомобілів, що були припарковані поруч. Причому місце перед тим це же автомобіль також займався [33].
2019	США	Tesla Model S	Автомобіль самовільно загорівся і гасіння тривало близько чотирьох годин [34].
2019	Канада	Tesla Model X	Автомобіль повністю згорів і було помічено численні невеликі вибухи під час горіння [35].

Продовження таблиці 1.1.

2018	Швейцарія	Tesla Model 3	Пожежа виникла на шосе внаслідок дорожньо-транспортної пригоди [36].
2018	Швейцарія	Tesla Model 3	Пожежа виникла на шосе під час руху, ймовірною причиною займання стало займання силової акумуляторної батареї [37].
2018	Тайланд	Porsche Panamera	Пожежа трапилась під час заряджання автомобіля [38].

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

Проаналізуємо статистику пожеж електромобілів в Україні та у світі.

1.2.1. Статистичні дані пожеж електромобілів в Україні та причини їх виникнення

У впродовж 2021 – 2022 років на території України підрозділами Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) зареєстровано 7759 пожеж транспортних засобів, що становить 4,7 % від їх загальної кількості, унаслідок яких загинула 37 людей (1,0 % від загальної кількості загиблих) і 138 людей отримали травми (5,1 % від загальної кількості травмованих). У тому числі зареєстровано 6273 пожеж легкових автомобілів, що становить 76,3 % від кількості пожеж транспортних засобів, унаслідок яких загинула 21 особа (69,2 % від кількості загиблих унаслідок пожеж транспортних засобів) і 117 осіб отримали травми (70 % від кількості травмованих на пожежах транспортних засобів).

Станом на кінець 2022 року в Україні сталось 9 пожеж, які були ініційовані електромобілями. Дана ситуація складається у тому випадку із-за незначного терміну експлуатації, а також у зв'язку із незначною часткою даних транспортних засобів у загальній кількості автотранспорту.

Наведемо деякі пожежі електромобілів, що зазначені нижче. 1 жовтня 2019 року на АЗС ОККО у Києві під час зарядки на зарядній станції ТОКА, виникло загоряння електричного автомобіля Renault ZOE. Фотографії наслідків даної пожежі представлено на рисунках 1.3 та 1.4.



Рисунок 1.3 – Загоряння автомобіля Renault ZOE під час зарядання.

Загоряння сталося під капотним простором і вогонь не розповсюдився до батареї електрокара, в тому числі завдячуючи оперативним діям співробітників АЗС, які швидко ліквідували осередок загоряння. Причина пожежі – загоряння інвертора.



Рисунок 1.4 – Загоряння автомобіля Renault ZOE під час зарядання.

6 липня 2021 року на паркувальній зоні ТРЦ «Оазис» у Хмельницькому загорівся електромобіль Nissan Leaf, що зображено на рисунку 1.5. Загоряння транспортного засобу сталося під час його зарядання на електростанції. Пожежу вдалося загасити силами працівників торговельного центру та водіїв, які були поруч. За результатом пожежі повністю вигорів батарейний відсік і автомобіль не підлягає відновленню.



Рисунок 1.5 – Загорання автомобіля Nissan Leaf під час заряджання.

25 вересня 2019 року в Києві відбулася пожежа під час зарядки електромобіля марки Chevrolet Bolt, який загорівся після повної зарядки, але залишався підключеним до станції. Інцидент стався на бульварі Марії Примаченко в Києві. На момент прибуття пожежних підрозділів полум'я повністю охопило автомобіль і поширилося на одноповерхову прибудову громадської будівлі. Ліквідація пожежі тривала протягом 40 хв проте електромобіль зберегти не вдалося. За словами очевидців, займання почалося під лівим заднім колесом, що вказує на те, що причиною пожежі стала батарея.. На рисунку 1.6 наведено фото з місця пожежі.



Рисунок 1.6 – Загорання автомобіля Chevrolet Bolt під час заряджання в Києві

Одна із версій причини займань є те, що електромобіль не був належно відремонтований після ушкоджень, враховуючи що він потрапив в Україну вже

після аварії і був відновленим із Сполучених штатів. Зазначений факт є причиною відсутності офіційного заключення та розслідування причини пожежі, через відсутність залучення офіційного представника виробника електромобіля, який не продається офіційно в Україні.

24 вересня 2021 року в Одесі на проспекті Небесної Сотні, 4в, під час зарядки на парковці загорівся автомобіль Chevrolet Volt. Пожежні встигли загасити автомобіль до його повного вигорання. Машина стояла припаркованою перед станцією технічного огляду на зарядці. За словами очевидців, спочатку із під неї пішов дим, працівники станції одразу зрозуміли, що ймовірно, виникло коротке замикання після чого вони викликали пожежно-рятувальну службу. Завдяки оперативному прибуттю пожежних підрозділів вдалося швидко локалізувати та ліквідувати пожежу, а автомобіль не вигорів повністю. На рисунку 1.7 наведено фото з місця пожежі.



Рисунок 1.7 – Загоряння автомобіля Chevrolet Volt в Одесі

Наступний випадок пожежі відбувся 22.05.2019 року в Одесі через неправильне заряджання електромобіля Ford Focus Electro власником. За словами власника електромобіля Ford, його фірмовий зарядний кабель вийшов з ладу і він придбав неофіційний і, як виявилось, без захисту від перегріву. На рисунку 1.8 наведено фото з місця пожежі.



Рисунок 1.8 – Загоряння автомобіля Ford Focus Electro в Одесі

Також з'ясувалося, що провідник електричного подовжувача був зістикований за допомогою скрутки, що заборонено правилами пожежої безпеки. Відповідно це спричинило коротке замикання [350]. Одночасно замикання виникло в автомобілі також в результаті чого електромобіль вигорів повністю.

1.2.2. Статистичні дані пожеж електромобілів в світі та причин їх виникнення

Через незначну частку електромобілів у парку транспортних засобів, статистика пожеж є неоднозначною та не об'єктивною [136].

Згідно із даними Національного управління безпеки на транспорті США (NTSB – National Transportation Safety Board) [39] ймовірність займання електромобілів становить лише 0,03% у порівнянні з автомобілями які обладнанні ДВЗ, цей показник складає 1,5%, а для гібридних транспортних засобів аж 3,4%.

За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA – International Energy Agency) [40] з 2021 року у світі щороку трапляється 2,5-3 тис пожеж електромобілів.

Натомість згідно із дослідженням авторів наукових праць [41, 132, 133, 143, 385] у світі щороку відбувається за різних причин та обставин лише близько 100 пожеж. Динаміка їх кількості наведена на рисунку 1.9

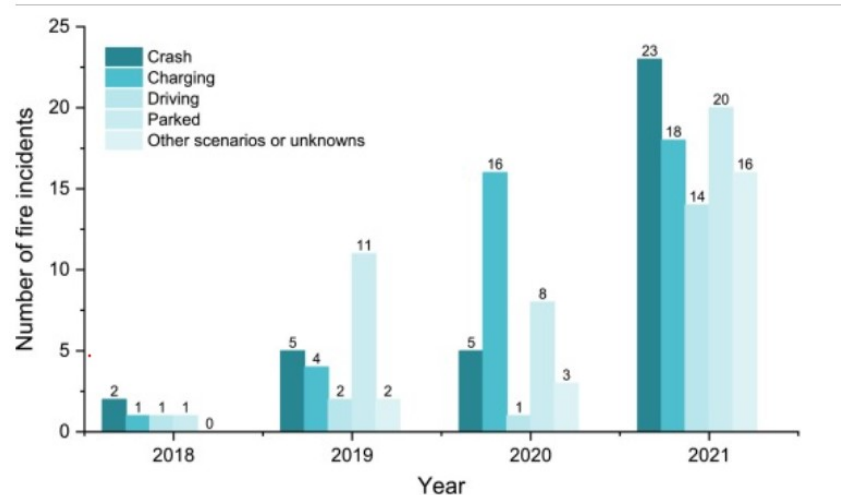


Рисунок 1.9 Динаміка кількості пожеж електромобілів у світі за даними [22]

У 2019 році Пожежна бригада Лондона повідомила про 54 пожежі електромобілів порівняно з 1898 пожежами на бензині та дизельному паливі, а в 2020 році лише про 27 пожеж на електромобілів порівняно з 1021 пожежею бензину та дизеля [42, 138-139].

За даними [43] починаючи з 2010 року у світі виникло близько 500 пожеж електромобілів. Причому 24 % від усіх пожеж виникало у закритих паркінгах та гаражах, 31% на відкритих паркінгах і 29% під час руху. Разом з тим близько 5% всіх пожеж супроводжувались вибухом чи вибухами. Однак, ми вважаємо, що дана статистика далеко не відображає реальну кількість пожеж електромобілів, які відбуваються у світовому масштабі.

Міністерство транспорту США проводило дослідження щодо встановлення, чи створюють силові літій-іонні акумулятори електромобілів пожежну небезпеку. Окрім цього, було досліджено можуть літій-іонні акумулятори бути джерелом займання. Зокрема, на сьогоднішній день зафіксовано 6 пожеж через ці причини.

Щодо кореляції ризиків виникнення пожеж, і вибухів від випадкового займання легкозаймистих електролітичних розчинників, що використовуються в літій-іонних акумуляторних системах, то вони є дещо меншими ніж для бензинових або дизельних автомобілів через значно меншу кількість горючих речовин.

Під час проведення аналізу пожеж виділено наступні найбільш поширені марки електромобілів, які були учасниками пожеж: Zotye M300 EV, Chevrolet Volt , Fisker Karma , Dodge Ram, Toyota Prius Plug-в гібридних , Mitsubishi I-MiEV і Outlander P-HEV, Tesla Model S.

Перша зафіксована пожежа під час заряджання автомобіля відбулася близько шостої години ранку 17 листопада 2010 року на палубі для автомобілів «MS Pearl of Scandinavia» на шляху з Осло до Копенгагена.

Слід відзначити, пожежа була ліквідована системою спринклерного пожежогасіння порому. Травмовані та загиблі під час даного інциденту відсутні. Встановлено, що причиною пожежі стало коротке замикання в штепселі подовжувача, що використовується для зарядки Nissan Qashqai, який конструктивно був трансформований у електромобіль. Власник даного транспортного засобу використав подовжувач для зарядки автомобіля від розетки загального призначення на поромі.

У квітні 2011 року в м. Гуанчжоу (Китай), сталась пожежа автомобіля Zotye M300 EV, який знаходився на зарядці. Через інцидент міська влада вирішила зупинити всі електричні таксі з міркувань безпеки, 15 з яких були електромобілями M300 із парку в 30 електричних таксі. Офіційна слідча група міста виявила, що причиною пожежі став несправний акумулятор автомобіля через відсутність контролю якості під час виробництва.

Дві пожежі трапились на транспортних засобах, які отримали нове програмне забезпечення та були перевірені дилером. Під час подальших випробувань акумуляторів Volt, проведених NHTSA у листопаді 2011 року, два з трьох випробувань призвели до теплових подій, включаючи пожежу. Тому NHTSA 25 листопада 2011 року відкрила офіційне розслідування дефектів

безпеки, щоб вивчити потенційні ризики, пов'язані з пошкодженням акумулятора від Chevrolet Volt. Окрім цього, NHTSA оголосила в листопаді 2011 року, що співпрацює з усіма автовиробниками над розробкою процедур дій в разі пожежі, щоб забезпечити безпеку пасажирів електромобілів та персоналу аварійної служби, які реагують на аварію та пожежу. На рисунку 1.10 наведено фото автомобіля Chevrolet Volt під час проведення досліджень.



Рисунок 1.10 – Автомобіль Chevrolet Volt під час проведення досліджень безпеки акумуляторів.

У березні 2013 року компанія Mitsubishi Motors повідомила про два окремі інциденти з використанням літій-іонних акумуляторів, що використовувались у електричних автомобілях, один з електричним автомобілем Mitsubishi i-MiEV, а інший з плагін-гібридом Outlander P-HEV. Літій-іонна батарея i-MiEV загорілася на заводі збору акумуляторних батарей Мізусіма 18 березня під час підключення до випробувального обладнання для розряду. Через три дні акумуляторний блок Outlander P-HEV в дилерському центрі в Йокогамі перегрівся і розтопив деякі акумуляторні елементи, після того як автомобіль був повністю заряджений. Ні в одному інциденті ніхто не постраждав.

В Норвегії 1 січня 2016 року пожежа сталася під час зарядки Tesla Model S на зарядному пристрої Tesla (рисунок 1.11). Пожежа розвивалась не інтенсивно і власник встиг відключити машину від мережі та забрати речі. Розслідування, проведене Норвезькою комісією з розслідування нещасних випадків (AIBN), показало, що пожежа виникла внаслідок перегріву тягового

аккумулятора. У березні 2016 року Tesla заявила, що їхнє власне розслідування інциденту прийшло до висновку, що пожежа була викликана коротким замиканням у розподільній коробці автомобіля, а саме програмне забезпечення виявило коротке замикання та вимкнуло заряджаючий пристрій. Майбутнє оновлення програмного забезпечення моделі S автоматично зупинило зарядку автомобіля при КЗ.



Рисунок 1.11 – Автомобіль Tesla Model S згорів під час заряджання у Норвегії.

21 квітня 2019 року в підземному гаражі в Шанхаї (Китай), під час заряджання вибухнув Tesla Model S. Внаслідок пожежі пошкоджено п'ять автомобілів (рисунок 1.12)



Рисунок 1.12 – Автомобіль Tesla Model S згорів під час заряджання у Шанхаї.

13 травня 2019 року Tesla Model S загорівся під час заряджання на стоянці в Гонконгу. 1 червня 2019 року в Бельгії під час заряджання загорілась Tesla Model S (рисунок 1.13 та рисунок 1.14).



Рисунок 1.13 – Автомобіль Tesla Model S згорів під час заряджання у Бельгії.



Рисунок 1.14 – Термічний вплив від пожежі Tesla Model S на зарядну станцію.

12 листопада 2019 року у Честері, Англія Tesla Model X спалахнула під час заряджання. В результаті пожежі автомобіль був повністю знищений вогнем.

19 січня 2021 року Tesla Model 3 вибухнула у надземному гаражі в Норвегії, місто Стравангер. В результаті інциденту повністю згоріла частина автостоянки. Були евакуйовані тисячі людей. Пожежу гасили більш як 70 пожежних. В наслідок пожежі згоріло понад 300 автомобілів, а матеріальні збитки склали п'ятдесят шість мільйонів доларів.

Історично ризик поширення пожеж між транспортними засобами вважався обмеженим. Передбачалось, що більшість пожеж у гаражах або автостоянках буде зачіпати один або максимум два автомобілі. Кілька пожеж за останні роки показали, що це далеко не так, і що пожежа може поширитися і потенційно знищити всі автомобілі, які знаходяться на паркінгу. Один із останніх

прикладів – пожежа охопила більш як 1200 автомобілів на семи поверхах на автостоянці King's Dock в Ліверпулі, Англія, у грудні 2016 року (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Пожежа на автостоянці King's Dock в Ліверпулі, Англія.

Існує кілька причин, чому сьогодні потенціал розповсюдження вогню більший, ніж був у 1960 - ті та 1970 - ті роки. Це зумовлено збільшення питомої маси пластикових деталей та виробів і композитних матеріалів в електромобілях. Згідно із дослідженнями, сумарна маса пластикових деталей електромобілях складає до 350 кг, що у 1,5 рази більше у порівнянні з 2014 рокомі. Було підраховано, що у 85% нових автомобілів паливні баки виготовляються з пластику, що може вплинути на швидкість поширення вогню, якщо паливний бак розплавиться, як це сталося під час пожежі на автостоянці King's Dock. Крім того, існує світова тенденція до збільшення загальної кількості позашляховиків, що призводить до збільшення кількості електромобілів, які мають значно більшу енергетичну ємність батареї у порівнянні із електромобілями з іншими типами кузовів.

1.3. Пожежна небезпека електромобілів

1.3.1. Загальні положення

Для забезпечення живлення електричних двигунів електромобілів можуть використовуватись різні джерела електричної енергії: АКБ, паливні елементи, генератори тощо. В залежності від цього існує класифікація електромобілів, яку приведено нижче.

Електричний транспортний засіб з силовою акумуляторною батареєю (АКБ) (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 електричними двигунами, які живляться електроенергією з силових АКБ, а невеликий ДВЗ приводить в дію генератор для заряджання силових АКБ. Загальна класифікація наведено на рис 1.16.

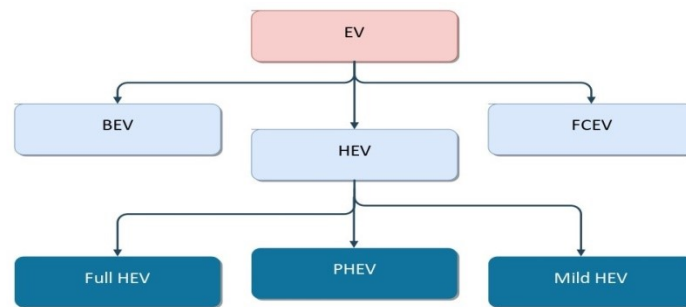


Рисунок 1.16 – Класифікація електромобілів

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 транспортний засіб (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. Залежно від останнього гібридні електричні транспортні засоби за ступенем «гібридизації» поділяються на: повні гібриди (full hybrid) – електричний двигун може забезпечувати рух транспортного засобу без участі ДВЗ; неповні гібриди (mild hybrid) – електричний двигун не може самостійно забезпечувати рух

транспортного засобу без участі ДВЗ. При маркуванні гібридних електричних транспортних засобів вживається префікс «Р» (Plug in), що вказує на те, що силові АКБ можуть підзаряджтися від зовнішньої електричної мережі, наприклад – побутової розетки. Тому доцільно проаналізувати пожежу небезпеку електромобілів, які використовують силові АКБ та паливні елементи [145, 146, 286].

1.3.2. Пожежна небезпека електромобілів, які використовують силові акумуляторні батареї

Для живлення електричних двигунів використовуються джерела електрохімічного накопичення. Серед усіх типів АКБ, а це свинцево-кислотні, нікель-металгідридні, нікель-кадмієві найбільшого поширення у електромобілях набули літій-іонні батареї (завдяки ряду технічних переваг). Батарея в загальному випадку складається з анода, катода та електроліту. Анод найчастіше вготовляється із графіту, а катод на основі літій-кобальт-оксиду (LiCoO_2), літій-манган оксиду (LiMn_2O_4), літій-титан оксиду ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) тощо.

Електроліт складається з розчинника та солі, завдяки чому забезпечується рух іонів. У літій-іонних батареях у якості розчинників використовують діетилкарбонат, диметилкарбонат, пропілкарбонат тощо [2]. Маса силовой АКБ може становити від 20 до 60 % від загальної маси автомобіля. У таблиці 1.2 наведено орієнтовну масу силових АКБ для різних типів автотранспортних засобів.

Таблиця 1.2 – Орієнтовна маса та ємність силовой АКБ для різних типів автотранспортних засобів

	Маса АКБ (кг)	Ємність АКБ (кВт·год)
Легковий автомобіль	200-600	16-160
Автобус	900-2500	150-320
Вантажівка	800-4500	120-1000

Масовий відсоток горючого електроліту становить в межах 10-15 % від загальної маси силової АКБ. При перегріванні силової АКБ з неї може виділятися ряд токсичних, легкозаймистих і вибухонебезпечних газів, серед яких водень, метан та етан. Відсоткове об'ємне виділення (від об'єму АКБ) таких газів наведено у таблиці 1.3. Залежно від типу силової батареї, відсоткове відношення таких газів може змінюватись в незначних межах [45, 46, 349].

Таблиця 1.3 – Відсоткове об'ємне виділення газів від силової АКБ [3]

Вид газу	Відсоткове об'ємне виділення (від об'єму силової АКБ)
H ₂	30
CO	40
CO ₂	10
CH ₄	7
C ₂ H ₄	3
C ₂ H ₆	1
Інші гази	9

Незважаючи на те, що в сучасному електромобілі, передбачено систему керування (BSM) силовою АКБ, (контроль заряду/розряду (SOC), контроль за ємністю (SOH) і температурою (SOT) АКБ), використання термозапобіжників, а також запобіжних вентиляційних отворів для стравлення надлишкового тиску з комірки АКБ [47], виникають несправності, які викликають термодеструктивний процес, що закінчується пожежою чи навіть вибухом. Власне контроль та управління температурою силової АКБ є визначальним чинником безпеки електромобіля в цілому.

До основних причин виникнення термодеструктивних процесів силових АКБ відносять порушення правил експлуатації. До порушень правил експлуатації можна віднести: надмірну зарядку АКБ, механічне пошкодження, в тому числі внаслідок дорожньо-транспортна пригода (ДТП), перевантаження

силової установки електромобіля, що призводить до протікання по провідниках струмів перевантаження. Порушення правил експлуатації призводять до перегрівання АКБ, що ініціює термодеструктивний процес з подальшим займанням чи вибухом. Механічне пошкодження призводить до короткого замкнення АКБ, що також ініціює термодеструктивний процес.

Вже при досягненні температури 80 °С в силовій АКБ можуть виникнути незворотні теплові процеси [48], а при досягненні 130 °С відбувається плавлення сепаратора, що призводить до короткого замкнення (КЗ) АКБ [49]. При повністю зарядженій батареї температура, яка утворюється одній комірці АКБ при короткому замкненні (КЗ) може сягати 700 °С і більше [50, 134].

Розглянемо та проаналізуємо поширені види літій-іонних батарей, які використовуються на електромобілях.

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-кобальту (LiCoO_2) – LCO, і вуглецевого анода з графіту. Недоліком таких АКБ є відносно короткий термін експлуатації, низька термічна стабільність та питома енергетична ємність (240 Вт·год/кг). При досягненні температури 160-180 °С відбувається термодеструктивний процес, внаслідок чого що створюється температура 650-750 °С і тиском до 18-105 бар [51].

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-марганцю (LiMn_2O_4) – LMO. Недоліком таких АКБ є низька питома потужність (150 Вт·год/кг), однак у них краща термічна стійкість порівнянно з LCO. При досягненні температури 190-220 °С відбувається термодеструктивний процес, з максимальною температурою одного компонента АКБ 580-600 °С і тиском до 17 бар [52].

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт марганцю (LiNiMnCoO_2) – NMC. При досягненні температури 210 °С відбувається термодеструктивний процес, з максимальною температурою одного компонента 650-720 і тиском 18-20 бар [53].

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт-алюмінію (LiNiCoAlO_2) – NCA. Власне такий тип АКБ

використовує компанія Tesla у всіх свої електромобілях (виробник АКБ – Panasonic) і характеризується найвищою питомою енергетичною ємністю – 300 Вт·год/кг. При досягненні температури 170-220 °С відбувається термодеструктивний процес, при якому досягається температура одного компонента АКБ 500-1000 °С і тиск до 25-35 бар [54].

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-ферум-фосфат (LiFePO_4) – LFP є відносно безпечною, тобто демонструє найвищу термічну стабільність, а тиск у корпусі не перевищує 5 бар [22].

Аналізуючи характеристики, які наведено вище, можна так класифікувати за рівнем пожежної небезпеки літій-іонні батареї, які використовуються у сучасних електромобілях (рис 1.17):

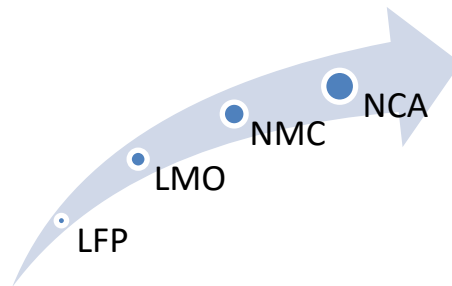


Рисунок 1.17 – Пожежна небезпека різних типів силових АКБ, які використовуються у EV

Серед усіх типів наведених батарей NCA створює найбільшу пожежну небезпеку. В той же час NCA має найкращі характеристики, за питомою енергетичною ємністю.

Меншу пожежну небезпеку створює літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-кобальту (LCO), після неї слідує літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт марганцю (NMC) і літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-марганцю (LMO) Найбільш небезпечною є літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-ферум-фосфату (LFP).

У таблиці наведено електромобілі, які використовують різні типи силових акумуляторних батарей.

Таблиця 1.4 – Електромобілі, які використовують різні типи силових АКБ

Тип АКБ	Марка електромобіля
LCO	Daimler Smart Fortwo
NMC	Chevrolet Bolt EV, VW(e-Golf, e-up), Nissan Leaf, Hyundai Ioniq Electric, Ford Focus Electric, Fiat 500e, BMW i3, Kia Soul EV, Renault Zoe, Mitsubishi i-MiEV
NCA	Tesla Model S (75D, 90D,100D, p100D), Mercedes-Benz B-class E Drive
LFP	BYD E6

Для захисту від термодеструктивних процесів силових АКБ використовують термозапобіжник та запобіжний вентиляційний отвір. Термозапобіжник для всіх видів літій-іонних батарей спрацьовує при температурі 90-130 °C залежно від матеріалів, з яких виготовленні катод та анод, а запобіжний вентиляційний отвір відкривається при тиску 5-25 psi (34.5-125 кПа) [55]. Загалом тиск при термодеструктивному процесі може сягати 10-35 бар.

Пожежна небезпека таких автомобілів обумовлюється і складністю гасіння через неможливість отримати доступ до джерела займання – силової АКБ. Такі пожежі супроводжуються тривалим горінням і мають здатність до повторного займання впродовж годин чи навіть днів від початкової пожежі [56, 57].

За даними [58] при зменшенні ємності (SON) АКБ до 80% вона стає непридатною для тягових цілей (хоча ємності ще цілком достатньо для експлуатації електромобіля). Цей чинник також потрібно враховувати, як такий, що впливає на безпеку.

Ще одним дуже важливим фактором безпеки є виділення внаслідок термічної реакції чадного газу. Відтак займання літій-іонної батареї ємністю 0,2 Квт·год у приміщенні об'ємом 50 м³ здатне створити смертельну концентрацію СО впродовж 5 хв. Газ СО може надходити і в салон автомобіля, де перебувають пасажери, і з врахуванням об'єму салону та ємності силової АКБ

смертельна концентрація CO може бути досягнута вже за кілька секунд!

У праці [59] досліджено небезпеку вибуху горючих газів, які виділяються при незворотній тепловій реакції літій-іоного акумулятора залежно від рівня заряду. За результатами експериментів встановлено, що найбільша небезпека вибуху таких газів існує при заряді батареї 50-60%.

Разом з тим, у електромобілях є також різного роду оздоблювальні матеріали які використовуються і у автомобілях з ДВЗ і які є горючими. Масова частка таких матеріалів може становити близько 10 % [60, 341] від зальної маси автомобіля, що і складає пожеже навантаження під час пожежі.

Аналізуючи дані, можна виділити основні групи чинників, які впливають на пожежну безпеку електромобілів (рис. 1.18).

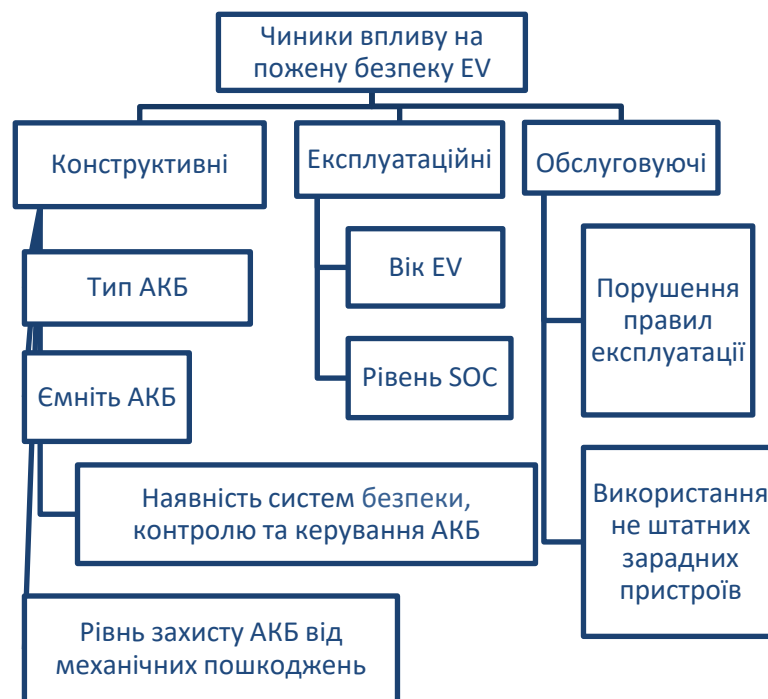


Рисунок 1.18 – Чинники впливу на пожежну небезпеку електромобілів

До конструктивних чинників можна віднести: тип силової АКБ (NCA, LCO, NMC, LMO, LFP), наявність систем безпеки, керування та контролю за силовою АКБ, захищеність АКБ від механічного пошкодження, ємність АКБ. До експлуатаційних чинників відносяться: вік електромобіля та рівень SOC. До обслуговуваних чинників відносяться: недотримання чи порушення правил

технічного обслуговування, використання нештатних зарядних пристроїв.

Як вже було описано вище, пожежна небезпека електромобілів криється у їх силовій АКБ. Тобто причиною займання стаються власне аварійні ситуації які виникають у ній, а саме неконтрольований термодеструктивний процес, який призводить до різкого підвищення температури силової АКБ, її руйнування, що і стає джерелом займання електромобіля.

Тому доцільно навести літературний огляд сучасного стану методів дослідження літій-йонних батарей, які набули найбільшого поширення у електромобілях.

Розглянемо загальну будову літій-іонної батареї електромобіля. Зазвичай елементи літій-йонних батарей мають циліндричну або призматичну форму (рис. 1.19). Елементи батарей формують модуль, а кілька модулів в залежності від потреб споживача формують АКБ.



Рисунок 1.19 – Загальна будова силової АКБ електромобіля

Вперше літій-іонна батарея була розроблена і серійно випущена у 1991 році компанією Sony [61]. Загалом до літій-іонної батареї входять чотири компоненти: катод, анод, сепаратор, який їх розділяє та електроліт. На аноді накопичуються іони літію під час заряджання батареї і переміщуються до катода під час розряджання, коли йде живлення споживачів електричного струму. Сепаратор є діалектиком, який розділяє катод та анод.

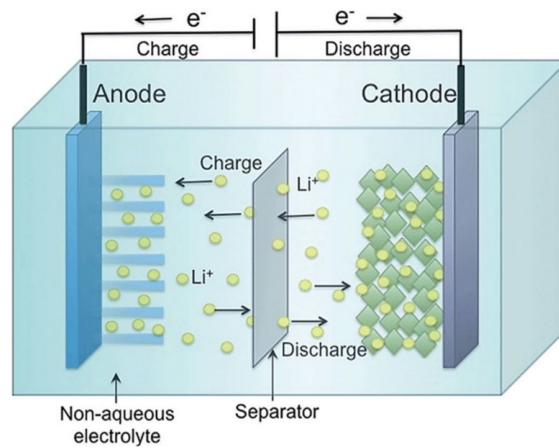


Рисунок 1.20 – Загальний принцип роботи літій-іонного елемента [62]

Аноди літій-іонних батарей зазвичай виготовляються з графіту. За даними [62] електрична ємність для графіту складає близько 372 мАгод/г. Однак анод на основі $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ за даними дослідження [63] має кращу термічну стабільність у порівнянні із графітовим анодом. Тому аноди на основі $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ також використовуються у літій-іонних батареях. Ведуться дослідження із застосування нових катодних матеріалів таких як Fe_3O_4 , Si тощо але через утворення дендритів, низьку ємність вини не набули промислового виробництва.

Катодні матеріали виготовляються на основі оксидів металів, а саме LCO, LiMn_2O_4 . Також ведуться розробки нових катодних матеріалів, які збагачені Mn [64], Ni [65, 66], Li [67, 68]. Збільшення кількості таких металів дозволяє збільшити питому енергетичну ємність, але разом з тим призводить до термічної нестабільності батареї. Багатшарові катоди $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ при високих температурах виділяють кисень, який здатен активно підтримувати горіння та тим самим підвищувати пожежну небезпеку електромобіля в цілому.

Електроліт забезпечує рух іонів від катода до анода під час заряджання АКБ і в зворотному порядку під час його розряджання. Тому електроліти повинні забезпечувати швидкий рух іонів, а також бути хімічно інертними до матеріалів з яких виготовлений катод і анод.

У більшості випадків електроліти містять солі такі як перхлорат літію (LiClO_4) і тетрафторборат літію (LiBF_4), які розчиненні у розчинниках на основі діетилкарбонату, диметилкарбонату тощо.

В залежності від природи електроліту температура спалаху може коливатись у межах від $18\text{ }^\circ\text{C}$ для диметилкарбонату та $23\text{ }^\circ\text{C}$ етилкарбонату і до $455\text{ }^\circ\text{C}$ для пропіленкарбонату [69]. Електроліт, який містить LiPF_6 володіє найкращими електрохімічними характеристиками, має найнижчу вартість, але разом з тим є найбільш пожежонебезпечним.

Хоча сепаратор виступає роздільником між катодом та анодом та не бере безпосередньої участі, однак відаграє важливу роль у забезпеченні безпеки АКБ.

Сепаратор повин бути термічно і хімічно стійким та бути хорошим діелектриком.

Загалом сепаратори за матеріалом виготовлення можна розділити на такі групи: на основі композитних матеріалів, на основі полімерних матеріалів, та на основі матеріалу із флюзеліну. Товщина сепараторів зазвичай становить у мажах 25 мкм , а температура плавлення коливається в межах від 130 до $220\text{ }^\circ\text{C}$ [70].

Для забезпечення термічної стабільності сепаратора його виконують багатошаровим [71], та покривають керамікою [72, 73]. Керамічне покриття покращує також і механічні властивості. Багатошарові сепаратори, мають різну температуру плавлення кожного із шару. При підвищенні температури, перший шар сепаратора розплавляється, заповнюючи електроліт і тим самим перешкоджаючи руху іонів [74].

Оптимальна робота літій-іонних батарей при температурі $30\text{ }^\circ\text{C}$. Ця температура може змінюватись в залежності від наванатження на АКБ, тобто стиль їзди, заряджання, а також від температури навколишнього середовища. Тому для підтримання цієї температури використовують систему управління температурою.

Найбільшого поширення набули системи повітряного охолодження [75, 76]. Повітряне охолодження є найдоступнішою системою охолодження, але

разом з тим ефективність її є незначною. Рідинне охолодження [77, 78] та охолодження матеріалу зі зміною фази є більш ефективними методами охолодження [79]. Але дані системи використовують багато складових компонентів і внаслідок виходу з ладу одного компонента ціла система може не працювати.

Проаналізуємо сучасні наукові дослідження пожежної небезпеки, які стосуються електромобілів. Загалом усі дослідження можна розділити на три рівні: дослідження пожежної небезпеки одно чи декількох елементів; дослідження пожежної небезпеки модуля, кількох модулів чи силової АКБ вцілому та дослідження пожежної небезпеки електромобіля.

Як вже було зазначено, літій-іонні елементи, які використовуються у електромобілях, зазвичай мають циліндричну чи призматичну форму [80] і складаються із анода, катода, сепаратора, електроліту та струмоприймача. Загальний вигляд елементів зображено на рисунку 1.21.

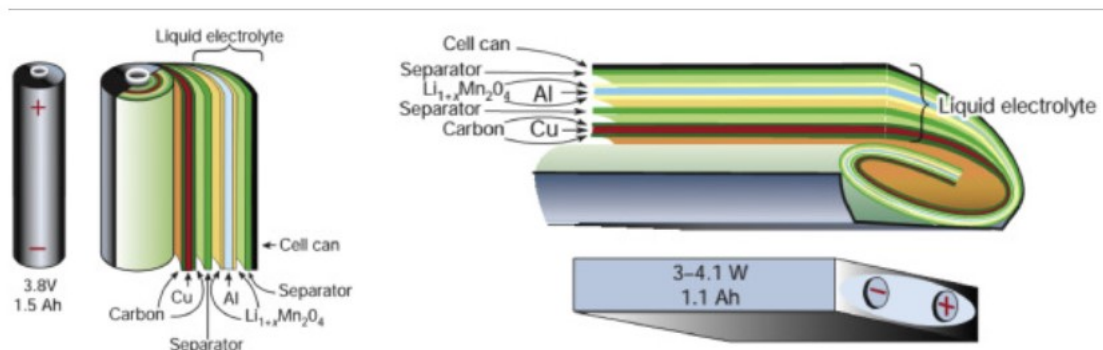


Рисунок 1.21 – Будова елементів літій-іонних елементів циліндричної та призматичної форми [80].

Циліндричні комірки зазвичай використовують малої ємності, а сумарну ємність збільшують за рахунок їх кількості. Наприклад електромобіль Tesla S3 містить близько 7 тис. циліндричних елементів, які забезпечують сумарну ємність 85 кВт·год. при напрузі 400 В [81].

У роботі [82] зазначено, що призматичні елементи мають більший ризик виникнення термодеструктивного процесу ніж циліндричні, а значить є більш

пожежонебезпечними. Це зумовлено кращою тепловіддачею власне у циліндричних елементів порівнянні із призматичними.

Автори наукової роботи [83] досліджували механічний вплив на літій-іонних елемент типу 18650. Було проведено експериментальне дослідження і чисельне моделювання за допомогою програмного комплексу LS Dyna. Встановлено, що при тиску у 10 МПа виникає внутрішнє КЗ (далі - ВКЗ).

У праці [84] описано та запропоновану стандартизовану методику на різні види механічних випробувань літій-іонних батарей, так як не існує стандарту, який би визначав комплексний підхід.

У роботах [85, 86] досліджено вплив навантаженні на літій-іонних батарей на зміну напруги в них та виникнення ВКЗ. Опис процесу нагрівання літій-іонних елементу внаслідок механічного проникнення у них сторонніх предметів описано у працях [87, 88, 89]. ВКЗ спричинене нестабільністю електротехнічної системи літій-іонного елемента наведено у [90].

У роботі [91] за допомогою автоклава було проведено дослідження із визначення шкідливих газів, які виділяються при термодеструктивному процесі літій-іонного елемента. Встановлено, що такі гази як (CO_2 , CO , H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6 і C_3H_6) як найпоширеніші серед вентиляційного газу. Крім того, встановлено, що щільність енергії та ємність елементу є факторами, що впливають на об'єм вентиляційного газу, температуру початку термічного витікання та втрату маси елемента.

Якщо підсумувати, то внаслідок механічної дії чи проникнення стороннього предмету катод та анод вступають у контакт. Внаслідок цього виникає внутрішнє коротке замкнення (ВКЗ) яке генерує багато теплової енергії. Дане енергія не встигає розсіюватись, поширюється на інші сусідні елементи та відбувається термодеструктивний процес.

У дослідженні Ріб'єра було визначено, що максимальна ефективна теплота згоряння становить одного літій-іонного елемента $4,03 \pm 0,34$ МДж/кг, де на електроліт припадає до 1,92 МДж/кг. Маса сепаратора становить приблизно 3%, він може вивільнити до 33% тепла в процесі згоряння, що вказує на те, що

характеристики згоряння сепаратора безпосередньо впливають на ризик пожежі ЛІВ [92].

Автори роботи [93] провели повномасштабне випробування силової АКБ ємністю 50 А·год. Встановлено, що батарея запалювалась при температурі 175–180 °С. Ця критична температура пов'язана з внутрішнім коротким замиканням батареї, яке є результатом плавлення сепаратора. Максимальна температура полум'я сягала 1500 °С. Швидкість виділення тепла складала близько 50 кВт, а сумарне виділення енергії понад 18 МДж. Разом з тим встановлено, що стан заряду батареї має значний вплив на максимальну HRR, загальне теплоутворення та втрату маси батареї. Важливим є те, що при старінні літій-іонні батареї ймовірність виникнення термодеструктивного процесу зростає [94, 95]. Це зумовлено втратою літію та інших активних матеріалів.

У роботах [96, 97] досліджено вплив способу підключення на поширення тепла внаслідок термодеструктивного процесу. Встановлено, що розгалужений стиль з'єднання (рис 1.22) елементів забезпечував краще розсіювання тепла у порівнянні із змієподібним.

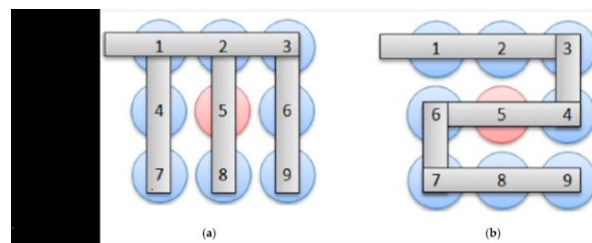


Рисунок 1.22 – Способи з'єднання елементів [37]

а) паралельне б) послідовне

Для дослідження пожежної небезпеки літій-іонних батарей використовують методи чисельного моделювання на підставі рівнянь енергетичного балансу [98–100]. Встановлено, що підвищення теплового розсіювання та зменшення заряду батареї впливають на зменшення теплової енергії, що акумулюється у літій-іонні батареї.

Дослідники Чен та інші [101, 102] досліджували горіння літій-іонних батарей при різних тисках. Було встановлено, що зменшення тиску в

середовищі де відбувалось горіння елемента швидкість виділення тепла і загальна кількість тепла були значно менші ніж при звичайних умовах, тобто при низьких тиску батареї є більш пожежно безпечними ніж при атмосферному.

1.3.3. Пожежна небезпека електромобілів, які використовують паливні елементи

Особливу увагу привертають електромобілі на водневих паливних елементах. Електромобіль з водневими паливними елементами (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з водневих паливних елементів. За даними [103] академічна зацікавленість до FCEV різко зростає. Приміром якщо у 1999 році було лише 13 наукових праць, а вже у 2018 їх кількість зросла до 171.

Особливість даних автомобілів (FCEV) із нульовим викидом шкідливих речовин під час експлуатації полягає у швидкому відновленні запасу пробігу, тобто заправлені воднем. Час заправлення воднем, орієнтовно такий самий, як час заправлення автомобілів з двигунами внутрішнього згорання. Це створює FCEV значну перевагу, з позиції відновлення запасу ходу у порівнянні із електричними транспортними засобами, що обладнанні силовою акумуляторною батареєю (АКБ) (BEV-battery electric vehicle). Час відновлення 60% заряду якої може складати 45-60 хв. Крім цього у Європейському стратегічному плані енергетичних технологій технології використання водню та паливних елементів визначено як ключові технології для досягнення цілей скорочення викидів парникових газів до 2050 року [104, 105].

Загалом усі FCEV класифікують в залежності від поєднання (або непоєднання) паливного елемента із іншим джерелом енергії. Такими джерелами енергії можуть бути силові батареї (B - batteries), ультраконденсатори (UC - ultracapacitors), сонячні фотоелектричні панелі (SPV - solar photovoltaics), накопичувачі магнітної енергії (SMES - superconducting magnetic energy storage) та маховики (рис. 1.23). Найчастіше використовують

силові акумуляторні батареї та ультраконденсатори у поєднанні з паливними елементами [106, 107].

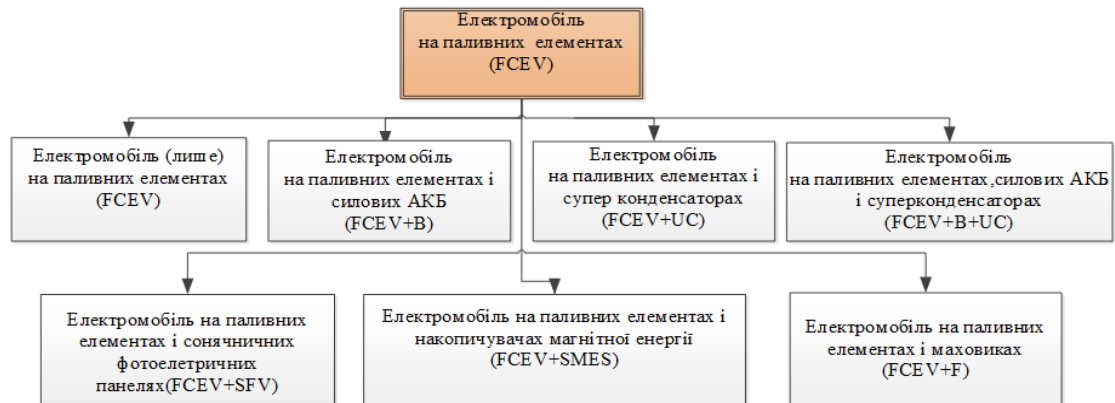


Рисунок 1.23 – Класифікація електромобілів на паливних елементах

Інші види джерел енергії використовуються рідше [108]. Це зумовлено рядом переваг силових акумуляторних батарей та суперконденсаторів у порівнянні з іншими видами джерел енергії.

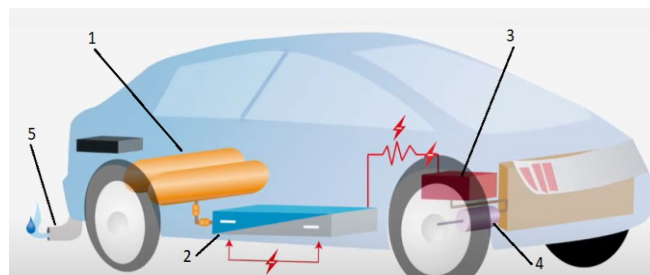


Рисунок 1.24 – Схематичне зображення будови та принципу роботи FCEV
1-балони, 2-паливний елемент, 3- інвертор, 4- електродвигун, 5- трубопровід

Паливний елемент 2 у своїй найпростішій формі складається катода і анода, які розділені мембраною, що покрита певним каталізатором. Використовуючи водень з балонів 1, та кисень з навколишнього середовища в наслідок хімічної реакції, яка відбувається у паливному елементі, генерується постійний електричний струм, який подається на інвертор 3. Інвертор 3 трансформує постійний струм у змінний і живить асинхронний двигун (двигуни), який і створює (створюють) обертовий момент необхідний для руху автомобіля. Вода, яка утворюється внаслідок хімічної реакції викидається через трубопровід 5 у

навколишнє середовище. Дослідження безпеки водню охоплюють вивчення його характеристик [110], механізму дифузії, горіння та можливість вибуху [111, 112]. У науковій праці [113] узагальнено дослідження небезпеки водню. Серед основних пожежонебезпечних властивостей водню можна виділити (при нормальних умовах): концентраційна межа вибуху – 12-19 % об., широкий діапазон займистості – 4-75 % об., мала густина 0,09 кг/м³ (у 14 разів менша ніж повітря), велика температура горіння близько 2000 °С. Такі фізико-хімічні властивості створюють умови для швидкого викиду водню з резервуару чи ємності де він знаходиться, розсіювання та можливістю горіти чи вибухати при наявності джерела займання [144]. Власне опираючись на фізико-хімічні властивості речовин та матеріалів, які використовують FCEV у науковій праці [44], описано алгоритм дій пожежно-рятувальних підрозділів при пожежах такого роду.

1.4 Вітчизняні та світові вимоги до систем забезпечення протипожежного захисту електромобілів

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

В Україні норми обладнання колісних транспортних засобів вогнегасниками наведено у [114], останні зміни в якій було внесено ще у 2009 році! Цей чинний нормативно правовий акт не враховує не лише класифікації транспортних засобів згідно, з [115, 347-348], але й не відповідає сучасному стану автопарку України, який суттєво змінився за останні п'ятнадцять років. Зміни стосуються збільшення кількості електромобілів та гібридних транспортних засобів, які несуть інший характер розвитку пожежі (детальніше про це у п.1.5). Зрештою, ця проблематика була піднята та описана у праці [116]. Згідно з [117], усі легкові автомобілі не залежно від силового агрегату (ДВЗ дизельний чи бензиновий чи електродвигун) повинні бути обладнанні не менше ніж одним порошковим вогнегасником із зарядом вогнегасної речовини не менше ніж 2 кг (табл.1.5).

Таблиця 1.5 – Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, установками гасіння та виявлення пожежі

Категорія	Підкатегорія	Характеристика	Технічні засоби протипожежного захисту		
			Первинні засоби пожежогасіння	Автоматичні системи виявлення пожежі	Автоматичні системи пожежогасіння
			Згідно норм	Згідно норм	Згідно норм
L	L ₁ , L ₂	КТЗ з двома (трьома) колесами, робочий об'єм двигуна якого – не більше 50 см ³ , а максимальна швидкість – не більше 50 км/год	в і д с у т н і	відсутні	відсутні
	L ₃ , L ₄	КТЗ з двома (трьома) колесами, робочий об'єм двигуна якого – перевищує 50 см ³ , а максимальна швидкість – перевищує 50 км/год		відсутні	відсутні
	L ₅ , L ₆	КТЗ з трьома колесами, робочий об'єм двигуна якого – понад 50 см ³ , а максимальна швидкість – понад 50 км/год, маса не більше 400 кілограмів		відсутні	відсутні
	L ₇	КТЗ з чотирма колесами, інші, ніж ті, що належать до категорії L ₆ , маса якого не перевищує 400 кілограмів.		відсутні	відсутні

Продовження таблиці 1.5

М	М ₁	КТЗ, призначений для перевезення пасажирів, у якому кількість місць для сидіння, не більше восьми	ВП-2	відсутні	відсутні
	М ₂	КТЗ, призначений для перевезення пасажирів, у якому кількість місць для сидіння більше восьми, повною масою – не більш як 5 тонн	ВП-3	відсутні	відсутні
	М ₃	КТЗ, призначений для перевезення пасажирів, у якому кількість місць для сидіння, не враховуючи місця водія, більше восьми, повною масою більше 5 тонн	ВП-5	відсутні	відсутні
N	N ₁	КТЗ, призначений для перевезення вантажів, повна маса якого не більш як 3,5 тонни	ВП-3	відсутні	відсутні
	N ₂	КТЗ, призначений для перевезення вантажів, повна маса якого більш від 3,5 тонни до 12 тонн	ВП-5	відсутні	відсутні
	N ₃	КТЗ, призначений для перевезення вантажів, повна маса якого понад 12 тонн	ВП-9	відсутні	відсутні
О	О ₁ , О ₂ , О ₃ , О ₄	причіпні транспортні засоби повною масою не більш як 0,75 тонни, 3,5 тонни, 10 тонн та понад 10 тонн відповідно	відсутні	відсутні	відсутні

Очевидно, що розвиток пожежі однакових за типом транспортних засобів, але різних за силовим агрегатом, будуть мати різний характер. Однак вимоги до обладнання первинними засобами пожежогасіння є однакові.

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

Тому дослідження, розроблення та впровадження на законодавчому рівні систем протипожежного захисту електромобілів та інших транспортних засобів, які працюють на альтернативних видах пального, дасть змогу підвищити рівень їх протипожежного захисту. А підвищення рівня протипожежного захисту

зазначених об'єктів вплине на зменшення як матеріальних збитків, так і людських жертв.

Згідно з [117] Україна стала договірною стороною Женевської Угоди 1958 року, тим і зобов'язалась застосовувати правила Європейської економічної комісії ООН. Зокрема і в контексті забезпечення пожежної безпеки колісних транспортних засобів, до яких відносяться електромобілі.

Загалом існує велике різноманіття стандартів і норм, які чинні в різних частинах світу. Це зумовлено діяльністю різних організацій. А саме таких як: Міжнародна організацією стандартизації (ISO), Європейським комітетом стандартизації (CEN), Міжнародне товариство автомобільних інженерів (SAE) тощо. У Європі для транспортних засобів, в тому числі електромобілів, діють норми, що ухвалені Європейською економічною комісією ООН.

У США законодавчим органом виступає Національна адміністрація безпеки дорожнього руху (NHTSA) та Національної асоціація протипожежного захисту (NFPA), яка керується такими нормативними документами як NFPA 1 Fire Code, NFPA 1192 Recreational Vehicles. Міжнародна організація стандартизації (ISO) керується нормативним документом ISO 6469-1:2019 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 1: Rechargeable energy storage system.

Загалом стандарти регламентують проходження або не проходження того чи іншого випробування. Європейська рада з автомобільних досліджень (EUCAR) встановила сім рівнів небезпеки для акумуляторних батарей електромобілів [125]. Де рівень 0 є найбезпечний, а рівень 7 – характеризується пожежною із вибухом, тобто найнебезпечніший рівень.

У таблиці 1.6 наведено основні стандарти, які регламентують вищенаведені випробування, які стосуються електромобілів та їхніх батарей.

Таблиця 1.6 – Стандарти, які обумовлюють випробування батарей та електромобілів

Вид випробування	Підвид випробування	Нормативні документи						
		Міжнародні			ЄС		США	Китай
		SAE J2929 [118]	SO 1240 5-3 [119]	IEC 6266 0-3 [120]	UN/ECE-R100.02 [121]	UL 2580 [122]	FreedomCAR [123]	QC/T 743 [124]
Механічне	Механічний удар	+	+	+	+	+	+	-
	Падіння	+	-	+	+	+	-	-
	пробій стороннім предметом	-	-	+	+	-	+	+
	Занурення у воду	+	-	+	+	+	+	+
	дія надмірним тиском	+	-	+	+		+	-
	прекидання	+	-	+	+	+	+	+
	вібрація	+	+	+	+	+	+	-

Продовження таблиці 1.6

Елект- ричне	Зовнішня коротке замикання (КЗ)	+	+	+	+	+	+	+
	Внутрішнє коротке замикання (КЗ)	-	-	-	-	-	-	-
	Перерозряд / перезаряд	+	+	+	+	+	+	+
Хімічне	Шкідливість компонентів	-	-	-	-	-	+	-
	Займистість компонентів	-	-	-	-	-	+	-
Експ- Луатаці -йне	Термічна стабільність	-	-	+	-	+	+	+
	Циклічність заряд-розряд	+	+	+	+	+	+	
	Перегрів	+	-	-	+	-	-	-
	Переохолодж ення	-	-	-	-	-	-	-
	Вплив полум'я	+	-	-	-	-	-	-

Міжнародне товариство автомобільних інженерів (SAE) розробило і керується цілою низкою стандартів [126-127,128-129], що обумовлюють механічну конструкцію блоків для силових АКБ електромобілів. Відтак стандарт SAE J2929 регламентує безпеку електричних та гібридних транспортних засобів, а саме висуває критерії до елементів з'єднання силової АКБ.

Аналіз закордонної нормативно-правової бази показав, що не існує єдиного документу, який би обумовлював забезпечення протипожежного захисту електромобілів. ???

1.5. Характеристика та особливості розвитку процесів горіння електромобілів

Очевидно, що пожежі електромобілів несуть інших характер ніж пожежі автомобілів із двигунами внутрішнього згорання. Це зумовлено відсутністю пально-мастильних матеріалів таких, як бензин, дизель, чи LPG, а також різного роду горючих мастильних та інших матеріалів. Незважаючи на те, що в сучасному електромобілі, передбачено систему керування (BSM) силовою АКБ, (контроль заряду/розряду (SOC), контроль за ємністю (SOH) і температурою (SOT) АКБ), використання термозапобіжників, а також запобіжних вентиляційних отворів для стравлення надлишкового тиску з комірки АКБ [147, 341], виникають несправності, які викликають термодеструктивний процес, що закінчується пожежою чи навіть вибухом. Основі причини [142], які здатні викликати термодеструктивний процес на рис.1.25



Рисунок 1.25 – Основні причини виникнення термодеструктивного процесу

Загалом такі причини можна розділити на експлуатаційні, до яких відносяться перегрів, переохолодження чи використання нештатних зарядних пристроїв (обведено зеленою лінією). До електричних причин відноситься ВКЗ і

ЗКЗ, перезаряд, перерозряд тощо (обведено червоною лінією) та механічне пошкодження, яке може виникнути через ряд причин (дорожньо-транспортна пригода чи наїзд на перешкоду).

На рисунку 1.26 зображено розвиток термодеструктивного процесу, яка виникає у силових АКБ електромобілів.

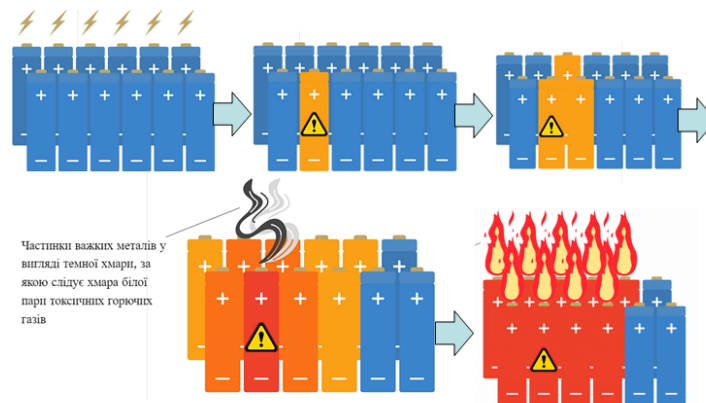


Рисунок 1.26 – Розвиток термодеструктивного процесу, який виникає у силових АКБ електромобілів.

Оптимальною для літій-іонних батарей, за даними [148], вважається температура 30 °С. При низьких температурах відбувається сповільнення руху іонів, а отже зменшення вихідної потужності батареї і втрату ємності [149]. Якщо робоча температура перевищує 50 °С це різко скорочує термін служби батареї, а при перевищенні 70 °С викає загроза виникнення термодеструктивного процесу.

Власне контроль та управління температурою силової АКБ є визначальним чинником безпеки електромобіля в цілому.

Вже при досягненні температури 80 °С в силовій АКБ можуть виникнути незворотні теплові процеси, а при досягненні 130 °С відбувається плавлення сепаратора, що призводить до КЗ АКБ. При повністю зарядженій батареї температура, яка утворюється одній комірці АКБ при КЗ може сягати 700 °С і більше.

Ще одним дуже важливим фактором небезпеки є виділення внаслідок

термічної реакції чадного газу. Відтак займання літій-іонної батареї ємністю 0,2 КВт·год у приміщенні об'ємом 50 м³ здатне створити смертельну концентрацію СО впродовж 5 хв.

СО може надходити і в салон автомобіля, де перебувають пасажирів, і з врахуванням об'єму салону та ємності силової АКБ смертельна концентрація СО може бути досягнута вже за кілька секунд!

У праці [160] досліджено небезпеку вибуху горючих газів, які виділяються при незворотній тепловій реакції літій-іонного акумулятора залежно від рівня заряду. За результатами експериментів встановлено, що найбільша небезпека вибуху таких газів існує при заряді батареї 50-60%.

Під час проходження термодеструктивний процесу виділяється велика кількість тепла, диму та шкідливих і легкозаймистих газів, серед яких метан, етан та водень [161–163].

На рисунку 1.27 схематично приведено основні етапи розвитку пожежі електромобіля.



Рисунок 1.27 – Основні етапи розвитку пожежі електромобіля.

Автори Sungwook Kang та інші [164] провели повномасштабні вогневі випробування електромобілів та автомобілів із ДВЗ (ICEV). EV були обладнані літій-іонними батареями 39 і 64 кВт·год кожний і повністю заряджені. Автори встановили, що потужність тепловиділення для EV складало близько 7,25 МВт а

сумарна енергія тепловиділення - 9 ГДж. Для ICEV потужність тепловиділення становила 7,66 МВт і сумарна 8 ГДж. Пікова потужність теплового випромінювання для EV складала в діапазоні 40-60 кВт/м² на висоті 227 см над EV впродовж часу 30-40 хв від початку вогневого випробування, а температура перевищували 900 °С. Разом з тим автори встановили, що питома теплота згоряння для EV складає понад 30 МДж/кг, а власне для літій іонних батарей цей показник складає 45,9 МДж /кг, що прирівнюється до теплоти згоряння легкозаймистих рідини таких як бензин та дизпаливо.

Дослідники Sturm, P та інші [165] проводили повномасштабні вогневі випробування для EV та ICEV у тунелях. І для двох ідентичних позашляховиків, один з яких приводився в рух двигуном ICE, що працює на дизельному пальному, а інших від акумулятора NMC ємністю 80 кВт /год при 100% SOC потужність теплового потоку (HRR) суттєво відрізнявся. Для ICEV максимальна HRR становив майже 5 МВт на 1100 с від початку вогневого випробування, а для EV понад 10 МВт на 900 с від початку випробування, що підтверджує більш динамічний розвиток пожежі.

Автори роботи [166] провели експериментальне вогневе дослідження для двох електромобілів вагою 1122 і 1501 кг. Електромобілі були оснащені зарядженими батареями ємністю 16,5 та 23,5 кВт·год відповідно. Загальна теплота згоряння склала для першого атомобіля 6,3 ГДж при потужності теплового випромінювання 4,2 МВт та 8,54 при 4,7 МВт. Відповідно питома теплота згоряння становила 29,8 МВт/кг та 30,7 МВт/кг.

На рисунку 1.28 представлено криві розподілу теплового випромінювання від вогневих випробувань електромобілів проведених за різних умов різними науковцями.

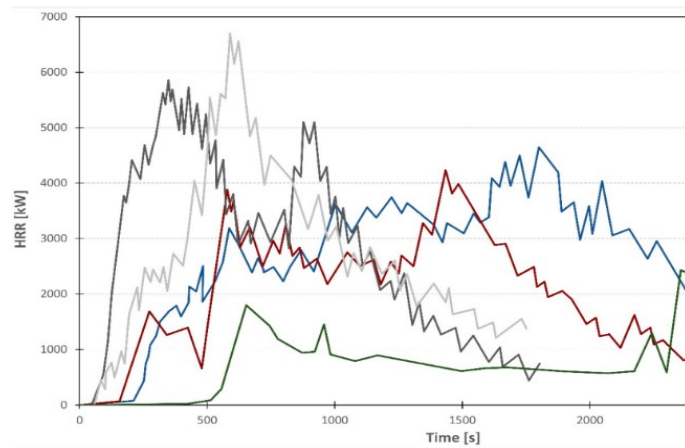


Рисунок 1.28 – Зміна теплового випромінювання від часу при вогневих випробуваннях електромобілів [167]

Різниця значень пояснюється різною ємністю та зарядом силових АКБ, які були влаштовані та електромобілі, що випробовувались.

1.6. Узагальнення результатів огляду

Кількість електромобілів продовжує стрімко зростати у всіх розвинутих регіонах світу. Така тенденція призводить до збільшення різного роду небезпек, серед яких, вагоме місце займають пожежі електромобілів. На підставі аналізу пожеж сучасних електромобілів у різних країнах світу встановлено, що такі пожежі виникають на різних моделях електромобілів. Разом з тим займання електромобілів відбувається за різних обставин: під час експлуатації, стоянки, заряджання, під час чи після дорожньо-транспортної пригоди. Причому такі автомобілі мають здатність до повторного займання, проміжок часу між якими може становити кілька днів чи навіть тижнів.

Пожежна небезпека електромобілів обумовлюється безпекою силової АКБ, маса якої коливається в межах 200-600 кг і становить найбільшу пожежну небезпеку. Вже при досягненні 80 °C у літій-іонних батареях можуть виникати термодеструктивні процеси, які спричиняють різке підвищення температури АКБ з наступним займанням та/або вибухом. При виникненні термодеструктивного процесу з АКБ виділяються (з наступним горінням чи вибухом) легкозаймисті і

токсичні гази, серед яких: водень, метан, етан, чадний, вуглекислий та ряд інших. АКБ електромобіля у результаті термодеструктивного процесу здатна створити смертельну концентрацію СО у салоні електромобіля за кілька секунд. Гасіння пожеж електромобіля ускладнюється через труднощі доступу до силової АКБ, небезпеку ураження електричними струмом, а також здатність до повторного самозаймання АКБ після повної ліквідації пожежі. Проміжок повторного займання може становити дні чи навіть тижні.

Особливу небезпеку створюють електромобілі, які працюють на паливних елементах, використовуючи водень. Окреслено передумови, тенденції розвитку та зацікавленість наукової спільноти дослідженням електромобілів на паливних елементах, які використовують водень

Окреслення та розуміння чинників впливу на пожежну небезпеку створить підґрунтя для її зниження, а також розробку нових, ефективних та безпечних способів гасіння пожеж такого роду.

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

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

1.7. Висновки до розділу 1

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

Враховуючи вкладене, наукові дослідження спрямовані на розкриття механізму горіння силових літій-іонних акумуляторних батареях від їх температури нагріву, технічних характеристик та конструктивних параметрів для розвитку наукових основ прогнозування виникнення пожежі, як теоретична база забезпечення протипожежного захисту електромобілів, є актуальною науковою проблемою.

Мета дослідження: розкриття закономірностей динаміки теплових процесів у електромобілях в залежності від технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів акумуляторних батарей, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту зазначених об'єктів.

Задачі дослідження:

- провести аналіз вітчизняних, зарубіжних теоретичних та експериментальних досліджень, а також відповідну нормативну базу щодо оцінки та особливостей горіння силових АКБ, а також пожеж електромобілів в цілому та виявити шляхи удосконалення систем запобігання і реагування на їх виникнення для підвищення ефективності протипожежного захисту зазначених об'єктів, а також навколо них;

- на основі аналізу обґрунтувати та узагальнити критерії (чинники), що характеризують небезпеки виникнення горіння силових акумуляторних батарей, які враховують їх технічні характеристики, конструктивні та експлуатаційні параметри, а також розвиток пожеж електромобілів в цілому.

- теоретично обґрунтувати механізм виникнення горіння у силових АКБ, а також пожеж електромобілів в цілому, шляхом використання існуючих математичних моделей, які описують такі процеси;

- з використанням комп'ютерного моделювання дослідити динаміку виникнення займань силових АКБ електромобілів на основі розробленої гідродинамічної моделі у середовищі FDS яка базується на адаптованих математичних моделях рівнянь теплообміну;

- обґрунтувати та розробити методики експериментальних досліджень процесів виникнення та розвитку горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів;

- здійснити експериментальні дослідження, процесів горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів, а також їх гасіння та на основі отриманих результатів виявити та проаналізувати залежності і здійснити їх кореляційний аналіз;

- встановити комплекс найбільш значущих взаємозв'язків та чинників (факторів), які впливають на виникнення та розвиток процесів горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів шляхом об'єднання отриманих теоретичних та експериментальних результатів, а також результатів комп'ютерного моделювання.

- на основі комплексу найбільш значущих взаємозв'язків та чинників (факторів), розробити науково-методичний апарат, для розрахункової оцінки часу виникнення займань у силових АКБ електромобілів, з метою розрахункової оцінки протипожежного захисту зазначених об'єктів;

- з врахуванням отриманих комплексних результатів досліджень обґрунтувати та розробити технічні рішення для підвищення протипожежного захисту електромобілів, а також ефективності гасіння пожеж за їх участі.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МЕХАНІЗМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОТИПОЖЕЖНИЙ ЗАХИСТ ЗАЗНАЧЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1. Теоретичні методи дослідження процесів розвитку пожеж у силових батареях електромобілів

Розвиток сучасних методів комп'ютерної математики створив підґрунтя для створення альтернативних способів дослідження фізичних процесів, які виникають у силових акумуляторних батареях електромобілів. До таких методів відносять методи чисельного та комп'ютерного моделювання.

Один із таких перспективних методів є метод кінцевих елементів (далі - МКЕ), що є найпоширенішою технікою для чисельного аналізу складних систем, таких як літій-іонні батареї. Даний метод дозволяє розбити геометрію об'єкта на малі елементи та обчислювати фізичні процеси в кожному елементі окремо. Кожен елемент повинен мати геометрію, що дозволяє наближено описати властивості матеріалів батареї, таких як електроди, сепаратори, оболонка тощо. Це особливо цінно для батарей, де необхідно враховувати неоднорідний розподіл температури, а також складну шарувату структуру батарейних комірок, яка може впливати на теплові градієнти. При використанні даного методу моделювання включає такі етапи:

- розбиття (дискретизація) досліджуваного акумулятора на малі елементи, для яких спрощується розв'язання рівнянь;
- формулювання рівнянь для кожного елемента, зазвичай це алгебраїчні рівняння, що описують фізичний процес (наприклад, теплопровідність);
- збір системи рівнянь для усіх елементів, що поєднує всі кінцеві елементи в єдину систему, яка описує поведінку всього об'єкта;
- задання граничних та початкових умов для розрахункової області;

- розв'язання системи рівнянь, що забезпечує розподіл фізичних величин (температури, напруги) у кожній частині об'єкта за допомогою числових методів, наприклад методу Гауса;

Метод кінцевих елементів дозволяє моделювати критичні фактори, які впливають на безпеку батареї з врахуванням їх електро-хімічних процесів. Даний метод дозволяє моделювати теплопровідність всередині батареї, враховуючи неоднорідність матеріалів, складну геометрію та багатошарову структуру електродів і сепараторів. За допомогою МКЕ можна побудувати тривимірну модель осередку, яка враховує теплові властивості анода, катода, електроліту та сепаратора. Це дозволяє визначити місця локального перегріву та оцінити ризик виникнення термодеструктивного процесу.

При дослідженні літій-іонних батарей МКЕ використовується для моделювання різних фізичних процесів, що відбуваються в батареї, а саме: Електрохімічні процеси: МКЕ дозволяє моделювати перенесення іонів літію через електроліт, реакції на поверхні електродів та розподіл електричного потенціалу. Теплові процеси: Враховуючи генерування тепла під час зарядки та розрядки, МКЕ допомагає аналізувати розподіл температури та теплове управління батареєю. Механічні напруження: Через циклічне розширення та стиснення матеріалів електродів можуть виникати механічні напруження, які впливають на довговічність батареї.

МКЕ є гнучкий при створенні моделювання що дозволяє ефективно розбивати складні геометричні області на кінцеві елементи, що є особливо важливим для моделювання реальної структури батарей з неоднорідними матеріалами та мікроструктурою. Разом з тим МКЕ може одночасно враховувати декілька фізичних явищ, що взаємодіють між собою, наприклад, електрохімічні, теплові та механічні процеси, забезпечуючи більш точну картину поведінки батареї. Завдяки детальному розбиттю області дослідження, МКЕ забезпечує високу точність розрахунків, особливо в областях з високими градієнтами фізичних величин. Незважаючи на зручність використання МКЕ він має і певні недоліки, серед яких для складних моделей з великою кількістю

елементів потрібні значні обчислювальні ресурси та час, що може бути обмежувальним фактором. Розробка моделей МКЕ вимагає високої кваліфікації та досвіду, особливо при мультифізичному аналізі та побудові сіток для складних геометрій. Точність результатів МКЕ залежить від наявності достовірних матеріальних параметрів та граничних умов, що не завжди доступні.

Так у науковій праці [168] представлено моделювання пористих електродів літій-іонних батарей за допомогою методу кінцевих різниць. Модель враховує транспорт маси та заряду в пористій структурі, що важливо для покращення будови електродів.

Автори [169] розробляють тривимірну модель літій-іонної батареї з використанням методу кінцевих елементів для аналізу електрохімічних та теплових процесів. Модель допомагає дослідити вплив температурних градієнтів на продуктивність батареї.

З розвитком обчислювальної техніки та програмного забезпечення перспективи використання МКЕ у дослідженні літій-іонних батарей значно зростають. Нові алгоритми та моделі дозволяють більш ефективно використовувати ресурси та отримувати детальніші результати. Це відкриває можливості для моделювати різних варіантів конструкції та матеріалів, щоб покращити характеристики батарей. Моделювання деградаційних процесів дозволяє передбачати термін служби батарей та розробляти стратегії для його подовження. Аналіз теплових та механічних явищ допомагає запобігати небезпечним станам, таким як перегрів або механічні пошкодження.

Метод кінцевих різниць (МКР). МКР є одним із найпоширеніших числових підходів для вирішення задач тепло- і масообміну, механіки суцільного середовища та електрохімічних процесів у складних системах, таких як літій-іонні батареї. Цей метод базується на апроксимації диференціальних рівнянь частинних похідних їхніми дискретними аналогами, що дозволяє замінити аналітичний розв'язок числовими обчисленнями. МКР широко

застосовується у моделюванні термічної поведінки ЛБ, аналізі деградації матеріалів та прогнозуванні їх довговічності.

Основна ідея методу полягає в тому, щоб замінити просторові та часові похідні скінченними різницями на розрахунковій сітці. Наприклад, у задачах теплообміну рівняння теплопровідності перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь, яку можна розв'язати числовими методами. Важливою особливістю МКР є його відносна простота та зручність реалізації, особливо для задач з прямокутною геометрією.

Для літій-іонних батарей цей метод дозволяє моделювати такі явища:

Розподіл температури у батареї: Аналіз локального нагріву під час зарядки, розрядки або короткого замикання.

Деградація матеріалів електродів: Визначення температурних впливів на структуру електродів.

Електрохімічні процеси: Врахування розподілу концентрацій іонів у рідких і твердих фазах.

До основних переваг зазначеного методу можна віднести інтеграцію в комп'ютерні програми та інженерні симулятори, можливість адаптації до різних геометрій та фізичних параметрів системи. Широке використання: Наявність великої кількості стандартних підходів для різних типів рівнянь, включаючи лінійні та нелінійні. Висока точність: При використанні малих кроків сітки метод забезпечує високу точність розрахунків.

Разом з тим МКР менш ефективний для складних геометричних конфігурацій порівняно з методом скінченних елементів. Висока обчислювальна складність: Зі зменшенням розміру сіткового кроку значно зростає кількість обчислень. Проблеми стійкості: Для задач з великими градієнтами або нелінійностями виникає ризик нестабільності числового розв'язку.

Незважаючи на недоліки, метод кінцевих різниць має великий потенціал у дослідженнях літій-іонних батарей. Зокрема у оптимізації конструкції ЛБ, моделювання термічного стану та хімічних процесів дозволяє знаходити

оптимальні матеріали та компонування, аналіз безпеки: МКР використовується для моделювання теплових розгонів та оцінки ризику пожежі.

Зокрема, автори статті [170] використовують метод кінцевих елементів для моделювання механічних напружень, що виникають у матеріалах електродів літій-іонних батарей під час циклів зарядки та розрядки. Дослідження спрямоване на розуміння процесів деградації електродних матеріалів та прогнозування їх довговічності. У науковій праці [171] автори застосовують метод кінцевих елементів для розробки детальної моделі комерційної літій-іонної комірки з графітовим анодом та катодом LiFePO_4 . Модель враховує електрохімічні, теплові та механічні процеси, що дозволяє точно прогнозувати поведінку батареї під різними умовами експлуатації.

Загалом, метод кінцевих різниць залишається важливим інструментом для дослідників та інженерів, які працюють над удосконаленням літій-іонних батарей, сприяючи їхньому ефективнішому, безпечнішому та довговічнішому використанню.

Метод кінцевих об'ємів (МКО). МКО є числовим методом, широко використовуваним для розв'язання диференціальних рівнянь, особливо в задачах теплопереносу та механіки рідин. У контексті дослідження літій-іонних батарей МКО набуває все більшої популярності завдяки своїй здатності ефективно моделювати складні фізичні процеси, що відбуваються всередині батареї.

При застосуванні МКО до моделювання літій-іонних батарей враховуються такі аспекти: електрохімічні процеси: МКО дозволяє моделювати транспорт іонів літію та електронів, реакції на електродах і розподіл концентрацій активних речовин; теплові процеси: Завдяки генерації тепла під час зарядки та розрядки, МКО використовується для аналізу теплових полів і прогнозування температурного режиму батареї; масообмін: МКО ефективно моделює процеси дифузії та конвекції всередині батареї, що впливають на її ефективність і довговічність.

МКО базується на інтегруванні диференціальних рівнянь над контрольними об'ємами, що забезпечує точне збереження маси, енергії та кількості руху.

Ефективність при моделях з конвекцією: МКО особливо ефективний при розв'язанні задач, де домінують конвективні процеси, що є актуальним для теплового та масообмінного аналізу батарей. МКО забезпечує високу числову стійкість і точність при розв'язанні нелінійних задач, що важливо для складних моделей літій-іонних батарей. [172, 173]

Порівняно з методом кінцевих елементів, МКО може мати труднощі при моделюванні складних геометрій та неоднорідних матеріалів. МКО зазвичай використовує регулярні сітки, і застосування його на нерегулярних або адаптивних сітках може бути складним. Хоча МКО може бути ефективним, складні тривимірні моделі літій-іонних батарей все ще потребують значних обчислювальних ресурсів.

У праці [174] автори використовують МКО для моделювання поведінки комерційної літій-іонної комірки з графітовим анодом і катодом LiFePO_4 , що дозволяє точно прогнозувати її електрохімічну реакцію.

Метод кінцевих об'ємів є потужним інструментом для моделювання теплових та електрохімічних процесів у літій-іонних батареях. Його здатність точно зберігати фізичні закони робить його привабливим для задач, де це критично важливо. Незважаючи на певні обмеження в гнучкості геометрії та складності реалізації на нерегулярних сітках, МКО забезпечує високу точність та стабільність розрахунків. Порівняно з методами кінцевих елементів та кінцевих різниць, МКО пропонує збалансований підхід для моделювання складних мультифізичних процесів у літій-іонних батареях. Подальший розвиток методів та обчислювальних технологій сприятиме більш широкому застосуванню МКО в цій галузі, що, у свою чергу, сприятиме вдосконаленню технологій зберігання енергії.

Підсумовуючи наведені методи можна зробити наступні висновки, а саме враховуючи геометрію літій-іонних батарей МКЕ перевершує МКО та МКР у

можливості моделювати складні геометричні форми та неоднорідні матеріали. Разом з тим МКЕ більш придатний для комплексних задач, де взаємодіють різні фізичні процеси. Зважаючи на це МКЕ потребує більше ресурсів, у порівнянні із МКО та МКР але забезпечує вищу точність. Таким чином метод кінцевих елементів є потужним та універсальним інструментом для дослідження літій-іонних батарей, особливо коли необхідно враховувати складні геометрії та мультифізичні процеси. Хоча МКЕ має певні недоліки, пов'язані з обчислювальними витратами та складністю реалізації, його переваги в точності та гнучкості роблять його незамінним у сучасних дослідженнях. Порівняно з методами кінцевих об'ємів та кінцевих різниць, МКЕ забезпечує більш детальний та точний аналіз, що є критичним для оптимізації та покращення характеристик літій-іонних батарей. Подальший розвиток обчислювальних технологій та алгоритмів сприятиме більш широкому застосуванню МКЕ в цій галузі.

Метод Монте-Карло (ММК) ММК виступає потужним інструментом для моделювання складних систем, де традиційні аналітичні методи є непридатними або обмеженими. Метод Монте-Карло базується на використанні статистичних випробувань та випадкових чисел для розв'язання фізичних та математичних задач. У дослідженні літій-іонних батарей ММК застосовується для моделювання дифузії іонів літію, відстеження траєкторій руху іонів у електродних матеріалах та електролітах на атомарному рівні; аналізу фазових переходів, дослідження процесів інтеркаляції/деінтеркаляції літію та пов'язаних з ними структурних змін у матеріалах електродів. Симуляції росту дендритів, а саме моделювання утворення та розвитку літійових дендритів, що є критичним для безпеки батарей; Вивчення та оцінки впливу мікроструктурних особливостей матеріалів впливають на їх електрохімічні властивості тощо. Перевагами використання ММК є те, що він може бути адаптований для широкого спектра задач, включаючи складні системи з багатьма ступенями свободи та нелінійними взаємодіями. Метод дозволяє враховувати атомарні та

молекулярні процеси, що є важливими для розуміння механізмів роботи батарей.

У праці [175] автори використовують метод Монте-Карло для моделювання атомарної структури та властивостей сплавів літію з кремнієм, які є перспективними анодними матеріалами для літій-іонних батарей. Дослідження дозволяє зрозуміти механічні та транспортні характеристики матеріалів на атомарному рівні.

У оглядових статтях [176, 177] розглядаються сучасні катодні матеріали для літій-іонних батарей з високою напругою. Автори обговорюють використання методу Монте-Карло для моделювання електронної структури та прогнозування властивостей нових матеріалів.

У роботі [178] автори застосовують метод Монте-Карло для моделювання росту дендритів літію в літій-металевих батареях. Дослідження фокусується на впливі шорсткості поверхні анода на формування дендритів, що має ключове значення для безпеки та довговічності батарей. Наведені наукові праці демонструють його застосування в дослідженні матеріальних властивостей, транспортних процесів та механізмів деградації, що сприяє розвитку нових матеріалів та підвищенню ефективності батарей.

Таким чином ММК є потужним інструментом для дослідження складних фізико-хімічних процесів у літій-іонних батареях. Його застосування дозволяє глибше зрозуміти механізми роботи та деградації батарей, що є критичним для розробки більш ефективних та безпечних енергетичних систем. Незважаючи на обчислювальні виклики, розвиток апаратних засобів та оптимізація алгоритмів роблять ММК перспективним для подальших досліджень у галузі пожеонії безпеки літій-іонних батарей.

Еквівалентні схемні моделі (ЕСМ). ЕСМ є одним із найпоширеніших підходів для моделювання літій-іонних батарей, завдяки своїй простоті та здатності відображати основні електрохімічні процеси за допомогою електричних компонентів. ЕСМ представляють батарею у вигляді електричної

схеми, що складається з елементів, які відповідають різним фізичним та електрохімічним процесам. Основні компоненти ЕСМ включають:

- напругу електричного кола, що відображає залежність напруги батареї від стану заряду (SoC);
- омичний опір, що моделює внутрішній опір батареї, зумовлений провідністю електроліту та електродів;
- ємність що відповідає за динаміку накопичення заряду на електродах;
- константи часу моделюють повільні та швидкі динамічні процеси, такі як поляризація та дифузія іонів.

Перевагою використання ЕСМ є відносно простими для побудови та налаштування, що дозволяє швидко отримати результати без глибокого занурення в складні електрохімічні процеси. Завдяки невеликій кількості параметрів та простій структурі, ЕСМ можуть працювати в режимі реального часу, що є критичним для систем керування батареями (Battery Management Systems, BMS). Моделі можуть бути легко адаптовані до різних типів батарей та умов експлуатації шляхом налаштування параметрів на основі експериментальних даних. До недоліків можна віднести спрощення, закладені в ЕСМ, що можуть призвести до втрати деталей у моделюванні складних електрохімічних процесів, особливо при екстремальних умовах експлуатації. Виникає необхідність регулярного калібрування. Параметри моделі можуть змінюватися з часом через деградацію батареї, що вимагає періодичного оновлення для підтримання точності. Також ЕСМ недостатньо ефективні для моделювання довгострокових процесів деградації та прогнозування терміну служби батареї.

У науковій праці [179] автори розробили електро-теплову модель літій-залізо-фосфатної (LiFePO_4) комірки, використовуючи еквівалентну схемну модель. Модель враховує залежність внутрішнього опору та тепловиділення від температури та стану заряду. Результати моделювання були підтверджені експериментальними даними, що свідчить про високу точність моделі для застосування в електромобілях. Автори роботи [180] розробили електро-

теплову сполучену модель великоформатної літій-іонної батареї, використовуючи еквівалентну схемну модель для електричної підсистеми. Модель дозволяє проводити параметричний аналіз та оптимізацію конструкції батареї з метою покращення її теплової поведінки та ефективності в умовах експлуатації електромобілів. Дослідження інших параметрів літій-іонних батарей, які впливають на їх пожежну безпеку приведено у наукових працях [181-186].

Таким чином ЕСМ є важливим інструментом для моделювання та аналізу літій-іонних батарей завдяки їхній простоті та ефективності. Вони широко застосовуються в системах керування батареями для оцінки стану заряду та здоров'я. Незважаючи на обмеження у точності та потребу в регулярному калібруванні, ЕСМ мають значні перспективи розвитку, особливо в контексті інтеграції з більш детальними моделями та розширення їх функціональності. Подальші дослідження та вдосконалення цих моделей сприятимуть підвищенню ефективності та надійності літій-іонних батарей у різних галузях застосування.

Метод обчислювальної гідродинаміки дозволяє чисельно розв'язувати рівняння Нав'є–Стокса, які описують рух рідин та газів, а також пов'язані з ними процеси теплопереносу та масопереносу. При дослідженні літій-іонних батарей CFD застосовується для:

- моделювання теплової поведінки батарей: Аналіз розподілу температури всередині окремих комірок та батарейних модулів під час зарядки та розрядки, що допомагає запобігти перегріву та термічному розгону.

- проектування систем охолодження: CFD використовується для оптимізації конструкції повітряних або рідинних систем охолодження, забезпечуючи ефективне відведення тепла та рівномірний температурний розподіл.

- Аналізу потоків електроліту: У деяких конструкціях батарей, особливо з проточною архітектурою, CFD дозволяє моделювати рух електроліту та пов'язані з ним електрохімічні процеси.

- Оцінка безпеки та довговічності: Моделювання термічних явищ сприяє виявленню потенційних ризиків та розробці стратегій для підвищення надійності батарей.

Метод обчислювальної гідродинаміки забезпечує можливість моделювання багатофізичних процесів, враховуючи взаємодію теплових, гідродинамічних та електрохімічних явищ та дозволяє моделювати реальні конструкції батарей та систем охолодження з урахуванням усіх деталей. Разом з тим CFD сприяє оптимізації дизайну батарей та систем теплового управління, що може зменшити витрати на експерименти та інші натурні дослідження.

При застосуванні даного методу створюються тривимірні моделі, що вимагають значних обчислювальних ресурсів та часу для розрахунків, особливо при моделюванні великих систем або тривалих процесів. Також при застосуванні даного методу створюються труднощі і виникає потреба у знань у ґрунтовних знаннях з галузі термодинаміки, гідродинаміки та електрохімії, а також досвіду роботи з спеціалізованим програмним забезпеченням. А також для отримання достовірних результатів потрібні детальні дані про матеріальні властивості, граничні умови та інші параметри, які не завжди легко доступні.

Даний метод широко використовується науковцями при дослідженні пожежної небезпеки батарей електромобілів. Зокрема у роботі [187] автори використовують CFD для моделювання та оптимізації системи тепловідведення на основі теплових трубок для літій-іонних батарей під час швидкого заряджання. Дослідження показує, що оптимізована система може ефективно знижувати температуру батареї та забезпечувати рівномірний розподіл тепла, підвищуючи її безпеку та довговічність.

Науковці Feng та інші [188] розробили CFD-модель для аналізу поширення термічного розгону в батарейному пакеті з великими літій-іонними комітками. Результати моделювання допомагають визначити критичні умови та розробити конструктивні рішення для запобігання катастрофічним відмовам батарей.

У статті [189] представлено CFD-моделювання системи повітряного охолодження літій-іонних батарей у гібридних електромобілях. Автор

досліджує різні конфігурації повітряних потоків та їх вплив на ефективність тепловідведення, що дозволяє оптимізувати систему охолодження для покращення продуктивності батарей. Підсумовуючи, метод обчислювальної гідродинаміки є потужним інструментом для моделювання та аналізу теплових та гідродинамічних процесів у літій-іонних батареях. Він дозволяє детально досліджувати складні багатофізичні явища, оптимізувати конструкцію батарей та систем охолодження, а також підвищувати їхню безпеку та ефективність. Незважаючи на обчислювальні витрати та складність моделювання, перспективи застосування CFD у цій галузі є значними, особливо з урахуванням розвитку електромобільності та вимог до надійності енергетичних систем.

Метод дискретних ординат. Метод дискретних ординат (Discrete Ordinates Method, DOM) є числовим підходом для розв'язання рівняння переносу випромінювання (Radiative Transfer Equation, RTE). Цей метод перетворює RTE на набір рівнянь у частинних похідних, що дозволяє чисельно моделювати процеси випромінювального теплообміну в складних середовищах. DOM широко використовується в інженерних задачах, зокрема при моделюванні пожеж, горіння та теплових процесів, де випромінювання відіграє значну роль. Як приклад, DOM реалізовано в програмному забезпеченні FireFOAM, яке базується на платформі OpenFOAM та призначене для моделювання пожеж. DOM дискретизує кутовий простір, розбиваючи його на скінченну кількість напрямків (ординат). Уздовж цих напрямків рівняння переносу випромінювання розв'язується як система диференціальних рівнянь у частинних похідних. Це дозволяє враховувати анізотропне розсіювання, поглинання та емісію випромінювання в середовищах зі складними оптичними властивостями. У контексті літій-іонних батарей DOM може бути використаний для моделювання теплових процесів, особливо в умовах, коли випромінювальний теплообмін стає значущим. Наприклад, під час термічного розгону або пожежі випромінювання може істотно впливати на розподіл температури всередині батареї та її оточення. DOM дозволяє точно моделювати

ці процеси, що є критичним для оцінки безпеки та розробки заходів запобігання аварійним ситуаціям. DOM ефективний для моделювання випромінювального теплообміну в середовищах з анізотропним розсіюванням та складною геометрією. Метод може бути застосований до різних типів середовищ і умов, включаючи напівпрозорі та оптично товсті матеріали. Суттєвою перевагою є Сумісність з CFD-кодами: DOM часто інтегрується в програмне забезпечення для обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє проводити мультифізичні моделювання. Даний метод використовують ряд науковців, зокрема у роботі [190] аналізуються механізми термічного розгону літій-іонних батарей в електромобілях. Автори роботи [191] провели числове моделювання розповсюдження термічного розгону в батарейному пакеті за різних умов охолодження. Метод дискретних ординат застосовано для моделювання випромінювального теплообміну, що дозволило оцінити його вплив на безпеку батареї. У науковій праці [192] автори дослідили процес розповсюдження термічного розгону, спричиненого механічним пошкодженням.

Таким чином метод дискретних ординат є ефективним інструментом для моделювання випромінювального теплообміну в літій-іонних батареях, особливо в умовах високих температур та термічного розгону. Його застосування сприяє підвищенню точності моделей, що є критичним для забезпечення безпеки та надійності батарей. Незважаючи на деякі обмеження, такі як високі обчислювальні витрати та складність налаштування, перспективи використання DOM у дослідженнях літій-іонних батарей є значними. Подальший розвиток методів та обчислювальних ресурсів сприятиме більш широкому застосуванню DOM у цій галузі. Підсумовуючи наведені методи дослідження у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Переваги та недоліки теоретичних методів дослідження процесів розвитку пожеж у силових батареях електромобілів

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування
Метод кінцевих елементів	<p>Гнучкість у моделюванні складних геометрій: Ефективний для складних форм та неоднорідних матеріалів.</p> <p>-Мультифізичний аналіз: Дозволяє одночасно моделювати електрохімічні, теплові та механічні процеси.</p> <p>- Висока точність розрахунків: Забезпечує детальний розподіл фізичних величин у просторі.</p>	<p>Високі обчислювальні витрати: Потребує значних ресурсів для тривимірних моделей.</p> <p>- Складність реалізації: Вимагає спеціалізованих знань та досвіду.</p> <p>- Потреба в якісних вхідних даних: Залежність від достовірності параметрів матеріалів та граничних умов.</p>	<p>Широко використовується для аналізу внутрішніх процесів у батареях, прогнозування деградації матеріалів, механічних напружень та довговічності батарей.</p>
Метод кінцевих об'ємів	<p>- Збереження законів збереження: Точно зберігає масу, енергію та імпульс.</p> <p>- Ефективність при конвективних потоках: Підходить для задач з домінуючим конвективним теплообміном.</p> <p>- Обчислювальна ефективність: Часто швидший за FEM для моделей середньої складності.</p>	<p>Обмеження у моделюванні складних геометрій: Менш гнучкий порівняно з FEM.</p> <p>- Зниження точності на нерегулярних сітках: Може впливати на результати.</p> <p>- Складність інтеграції мультифізичних процесів: Вимагає додаткових зусиль.</p>	<p>Використовується для моделювання теплових процесів та систем охолодження, аналізу розподілу температури в батарейних модулях під час роботи.</p>

Продовження таблиці 2.1

<p>Метод Монте-Карло</p>	<p>- Моделювання на мікроскопічному рівні: Враховує випадкові процеси та статистичні флуктуації.</p> <p>- Універсальність застосування: Підходить для широкого спектра задач.</p>	<p>Високі обчислювальні витрати: Потребує великої кількості симуляцій.</p> <p>- Тривалий час розрахунків: Не завжди підходить для оперативних розрахунків.</p> <p>- Складність масштабування до великих систем: Обмежує застосування.</p>	<p>Використовується для дослідження процесів на атомарному рівні, таких як дифузія іонів та формування дендритів, що впливають на безпеку та довговічність батарей.</p>
<p>Еквівалентні схемні моделі (ЕСМ)</p>	<p>- Простота та швидкодія: Підходять для реального часу в системах керування.</p> <p>- Легкість калібрування параметрів: Параметри визначаються експериментально.</p> <p>- Інтеграція в BMS: Широко використовуються в комерційних застосуваннях.</p>	<p>- Обмежена точність: Не відображають детальні фізико-хімічні процеси.</p> <p>- Необхідність регулярного калібрування: Параметри змінюються через деградацію.</p> <p>- Нездатність моделювати внутрішні явища: Не підходять для глибокого аналізу.</p>	<p>Широко використовуються для розробки алгоритмів оцінки стану заряду та здоров'я батареї, моделювання динамічної поведінки в електромобілях.</p>

Продовження таблиці 2.1

<p>Обчислювальна гідродинаміка (CFD)</p>	<p>- Детальний аналіз теплових процесів: Моделює конвекцію, кондукцію та радіацію.</p> <p>- Гнучкість у моделюванні складних геометрій: Може моделювати реальні конструкції та системи охолодження.</p> <p>- Мультифізичність: Інтеграція з іншими фізичними процесами.</p>	<p>Високі обчислювальні витрати: Ресурсоємний для тривимірних моделей. Складність моделювання: Потребує спеціалізованих знань.</p> <p>- Необхідність точних вхідних даних: Залежить від достовірності параметрів.</p>	<p>Широко застосовується для аналізу теплового управління, проектування систем охолодження, дослідження термічних явищ у батареях.</p>
<p>Метод дискретних ординат (DOM)</p>	<p>Ефективний для моделювання випромінювального теплообміну: Враховує складні радіаційні процеси.</p> <p>-Врахування анізотропного розсіювання та поглинання: Підходить для складних середовищ.</p> <p>- Сумісність з CFD-кодами: Легко інтегрується для мультифізичного моделювання.</p>	<p>Високі обчислювальні витрати: Потребує великої кількості напрямків для точності.</p> <p>- Числові артефакти: Можливий "ефект променів" при недостатній дискретизації.</p> <p>- Складність налаштування: Вимагає ретельного вибору параметрів.</p>	<p>Застосовується для моделювання випромінювального теплообміну при дослідженні термічного розгону та безпеки батарей, особливо в умовах високих температур.</p>

Підсумовуючи наведене, кожен із наведених методів має свої особливості при дослідженні термодеструктивних процесів, які можуть виникати у літій-іонних батареях. Зокрема метод кінцевих елементів ефективний при аналізі внутрішніх механічних напружень, які виникають у корпусі батарей при термодеструктивному процесі. Метод кінцевих об'ємів ефективний для моделювання концентрації вентиляційних газів, які викидаються при термодеструктивному процесі. Метод Монте-Карло доцільно використовувати при визначенні ймовірності виникнення тих чи інших теплових процесів у літій-іонних батареях. Еквівалентні схемні моделі застосовуються для моделювання електричних характеристик батарей, таких як напруга, струм та внутрішній опір і дозволяють прогнозувати поведінку батарей під час перегріву. Метод дискретних ординат дозволяє аналізувати вплив теплового випромінювання на поширення пожежі, однак є складний у реалізації. Натомість обчислювальна гідродинаміка (FDS) створює можливість детального аналізу теплових процесів, є гнучким при виборі різних геометрій, а також набула чи не найбільшого поширення у науковій спільноті, зокрема при дослідженні термодеструктивних процесів у літій-іонних батареях. Таким чином, для подальших досліджень, нами обрано власне метод обчислювальної гідродинаміки, завдяки його хорошій відтворюваності результатів моделювання та зручності у використанні.

2.2. Прогнозування та оцінка виникнення займань у літій-іонних батареях електромобілів із використанням методів комп'ютерної математики

Під час заряджання/розряджання силових батарей електромобілів та впливу зовнішніх чинників таких як використання нештатних зарядних пристроїв, порушення правил експлуатації, механічний вплив або несправність здатні призвести до генерації внутрішньої енергії. Потужність генерації внутрішньої енергії буде залежати від зовнішнього джерела, технічних характеристик силової батареї та тепловіддачі в навколишнє середовище [193].

Загалом це можна виразити рівнянням (2.1):

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) \quad 2.1.$$

де $Q(t)$ – загальна кількість тепла, яку отримує силова батарея; $Q_1(t)$ – виділення тепла в результаті екзотермічних реакцій розкладання компонентів батареї; $Q_2(t)$ – вивільнення накопиченої електричної енергії від внутрішнього короткого замикання згідно закону Ленца–Джоуля; $Q_3(t)$ – енергія, що виділяється при згорянні горючих матеріалів батареї.

Якщо взяти до уваги, що незворотній електро-тепловий процес ініціюється зовнішнім джерелом тепла, скажімо газовим пальником, то до рівності 2.1. додається ще один компонент, який характеризує джерело тепла. Тому у цьому випадку рівність 2.1. матиме вигляд 2.2:

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_4(t) \quad 2.2.$$

де $Q_4(t)$ – кількість теплової енергії, що передається силовій батареї від джерела тепла.

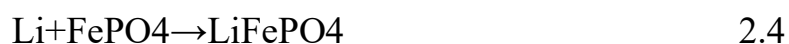
Кількість енергії, яка виділяється внаслідок хімічних реакцій у літій-іонних батареях електромобілів, є результатом електрохімічних процесів між анодом і катодом. Основна реакція полягає в інтеркаляції та деінтеркаляції іонів літію між електродами під час заряду та розряду батареї.

Основним процесом на аноді є окиснення літію, коли літій виділяє електрон, що передається через зовнішній контур, у той час як іон літію переміщується до катоду. Наприклад, у випадку аноду на основі графіту, реакція можна записати як:



Зміна вільної енергії Гіббса для цієї реакції становить приблизно -15 кДж/моль, що свідчить про спонтанність процесу інтеркаляції літію в графіт.

На катоді, особливо в батареях з використанням матеріалів на основі фосфату заліза (LiFePO_4), зміна вільної енергії для реакції:



становить приблизно 331 кДж/моль, що забезпечує високу ефективність перетворення енергії.

При цьому сумарне тепловиділення складатиметься з енергії екзотермічних реакцій (Q_p) та енергії від омічних втрат (Q_c), тобто тієї енергії, яка генерується внаслідок проходження електричного струму, так званої «Джоулевої» енергії.

$$Q = Q_p + Q_c \quad 2.5$$

Власне енергія, яка утвориться внаслідок проходження електричного струму визначатиметься із рівності:

$$Q_c = I^2 R \quad 2.6$$

де I – значення сили струму, що протікає, А; R – внутрішній опір контуру, Ом.

Граничні умови з врахуванням конвективної тепловіддачі:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad 2.7$$

де $-k \frac{\partial T}{\partial n}$ – градієнт температури в напрямку нормалі до поверхні; h – коефіцієнт конвективної тепловіддачі ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); T – температура навколишнього середовища, К .

При дослідження деформацій та пошкоджень літій-іонних батарей при високих температурах застосовується базове рівняння рівноваги:

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0 \quad 2.8$$

де $\nabla \cdot \sigma$ – дивергенція тензора напружень, що характеризує внутрішні механічні напруження у матеріалі; F – вектор зовнішніх сил на одиницю об'єму, які можуть включати механічні навантаження, теплові ефекти або тиск газів, що утворюються при термічному розгоні батареї.

Закон Гука з урахуванням термічного розширення:

$$\sigma = C / (\epsilon - \epsilon_{\text{тер}}) \quad 2.9$$

де C – тензор пружних констант (залежить від матеріалу, для ізотропних матеріалів виражається через модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона); ϵ – тензор загальних деформацій; $\epsilon_{\text{тер}}$ – тензор термічних деформацій.

Власне деформації, які виникають при дії температури можна описати рівністю [194]:

$$\epsilon_{\text{тер}} = \alpha \Delta T I \quad 2.10$$

де α – коефіцієнт лінійного термічного розширення ($1/\text{К}$); $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури; I – одиничний тензор.

Наступна рівність описує, як матеріал, зокрема корпус батарей, деформується під дією навантажень [194, 271]:

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad 2.11$$

де u – вектор переміщень; ∇u – градієнт вектора переміщень; $(\nabla u)^T$ – транспонована матриця градієнта переміщень.

Вектор переміщень u всередині елемента виражається через вузлові переміщення d за допомогою функцій форм N :

$$u = Nd \quad 2.12$$

Рівняння збереження заряду (закон Ома у диференціальній формі) для електрохімічних систем, таких як літій-іонні батареї, має вигляд [272]:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = Q_{\text{rea}} \quad 2.13$$

де ∇ – оператор дивергенції; 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).

Електропровідність матеріалу, яка характеризує його здатність проводити електричний струм. Вона залежить від властивостей матеріалу і може змінюватися з температурою, концентрацією іонів та іншими факторами. Електричний потенціал визначатиме енергетичний стан електричного заряду в точці простору, а його різниця (електричного потенціалу) між двома точками створюватиме електричне поле. Градієнт електричного потенціалу вказує напрямок найбільшого зростання потенціалу та його величину і є векторною величиною.

Ліва частина рівняння $\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi)$ є скалярною величиною та описує швидкість утворення чи генерування електричного струму з елементарного об'єму та показує сильно заряд накопичується або зникає в даному об'ємі.

Тепловиділення від протікання електричного струму виражає густину теплової енергії, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу. Як це вже було описано вище дане тепло генерується через джоулеве нагрівання, коли електричний струм протікає через матеріал з певним опором, (Вт/м³):

$$Q_{\text{еле}} = \sigma (\nabla\varphi) \cdot (\nabla\varphi) \quad 2.14$$

Де $\nabla\varphi$ – градієнт електричного потенціалу, векторна величина, яка показує напрямок та швидкість зміни електричного потенціалу в просторі, (В/м).

Так як густина електричного струму J (А/м²) визначається з рівності [197]:

$$J = -\sigma \nabla\varphi \quad 2.15$$

Тоді тепловиділення яке виникає внаслідок протікання електричного струму можна записати як [198]:

$$Q_{\text{еле}} = \frac{1}{\sigma} J^2 \quad 2.16$$

Під час нагрівання літій-іонних батарей у їх корпусі відбуваються фазові переходи.

Кінетику хімічних реакцій можна описати рівністю [199] :

$$\frac{\partial C}{\partial T} = -k(T) \cdot C \quad 2.17$$

Де C – це концентрація хімічної речовини (реагенту) у системі, вона визначає кількість речовини в одиниці об'єму, (моль/м³); $\partial t/\partial C$ – швидкість зміни концентрації з часом, похідна концентрації C за часом T , яка відображає, як швидко концентрація змінюється з часом. Від'ємне значення означає зменшення концентрації реагенту внаслідок реакції; $k(T)$ – константа швидкості

реакції, яка залежить від температури T . Вона визначає швидкість, з якою реакція протікає, і зазвичай збільшується з підвищенням температури. Загалом правий член рівняння представляє швидкість, з якою концентрація реагенту зменшується внаслідок реакції та визначається у (моль/(м³·с)) або кг/(м³·с), що мають бути узгоженні із лівою частиною рівняння.

Кількість енергії, яка виділяється внаслідок хімічних реакцій у літій-іонних батареях електромобілів можна описати рівнянням на основі рівняння Арреніуса [200]:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = \frac{E_r}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{B_r}{T-T_0}\right) \quad 2.18$$

де E_r – сума енергій, що виділяються всіма реакціями, Дж; T_0 – температура початку реакцій, К; B_r – параметр, який характеризує розвиток реакцій та залежить від температури.

Власне сума енергій E_r , які виділяються при протіканні реакцій, можна розрахувати за питомою масою з врахуванням діаграми виділення енергії для кожної реакції компонента, що вступає у реакцію.

Кількість енергії, який виділяється внаслідок внутрішнього короткого замикання описується виразом [131, 201]:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = \frac{E_k}{\tau_k} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \quad 2.19$$

Де E_k – сумарна енергія, яка виділяється при короткому замиканні, Дж; τ_k – час впродовж якого відбувається коротке замикання, с.

Причому сумарна енергію, яка виділяється при КЗ можна розрахувати з рівності [75, 202]:

$$E_k = C \cdot a \cdot \Phi \quad 2.20$$

де C – сумарна енергетична ємність акумуляторної батареї, Вт·с;

а – стан заряду (у частці від 1);

Ф – коефіцієнт ефективності, який визначає частку накопиченої енергії, яка затрачається на КЗ.

Кількість енергії, яка виділяється при згорянні горючих матеріалів АКБ, можна розрахувати з рівності [203]:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial t} = m'_s \cdot q_s, T > T_i \quad 2.21$$

де m_s – сумарна маса горючих речовин у АКБ, кг; q_s – усереднена теплота згоряння горючих речовин у АКБ, Дж/кг. Причому T_i – температура займання компонента АКБ, яка є найнижчою серед усіх інших компонентів.

При дії джерела зовнішнього тепла, кількість енергії, яка передається АКБ, з врахуванням конвекційного та радіаційного теплообміну виражає рівність [204]:

$$\frac{\partial Q_o}{\partial t} = m'_g \cdot q_g + h \cdot A (T_1 - T_2) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad 2.22$$

де m'_g – витрата пального у пальнику, кг/с; q_g – теплота згоряння пального, Дж/кг; h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; A – площа поверхні теплопередачі, м²; T_1 – температура полум'я, К; T_2 – температура поверхні, на яку передається тепло, К; σ – стала Стефана-Больцмана; ε – ступінь чорноти матеріалу, що опромінюється.

У літій-іонних батареях при високих температурах можуть відбуватися небажані екзотермічні реакції, такі як розкладання електроліту або активних матеріалів електродів.

При перегріванні літій-іонних батарей електроліт може розкладатись та утворювати суміш газів серед яких вуглекислий газ, фтористий водень, метан, етан та навіть водень. Накопичення таких газів всередині корпусу батареї призводить до підвищення внутрішнього тиску, що може спричинити механічне руйнування або вибух.

Тому рівняння дифузії для газів використовується для прогнозування, як гази розповсюджуються всередині батареї та виходять назовні, вигляд якого наведено [205, 206]:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = D_g \nabla^2 C_g + S \quad 2.23$$

де $\frac{\partial C_g}{\partial t}$ – похідна концентрації газу за часом; C_g – концентрація газу, моль/м³
 D_g – коефіцієнт дифузії газу, м²/с; $\nabla^2 C_g$ – лапласіан концентрації газу, що описує просторову зміну концентрації? моль/(м⁵); S — джерело або стік газу (швидкість утворення або поглинання газу в одиниці об'єму), (моль/(м³·с)).

Зв'язок між концентрацією та тиском можна описати рівністю [207]:

$$P = \frac{C_g RT}{M} \quad 2.24$$

де P – тиск газу, (Па); M – молярна маса газу, (г/моль).

Дана рівність дозволяє розрахувати тиск газу, знаючи його концентрацію, температуру та молярну масу, що є важливо для оцінки тиску газів, що утворюються в корпусі літій-іонних батарей. Для спрощення, при суміші газів допускається брати усереднену молярну масу газу.

Розуміння тиску газу, який може утворюватися внаслідок перебігу термодеструктивного процесу створює підґрунтя для проектування вентиляційних отворів, а також дає розуміння щодо забезпечення міцності корпусу батареї.

Про моделюванні теплових процесів використовується базове рівняння теплопровідності, яке має вигляд [208]:

$$\rho c_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_0 \quad 2.24$$

де ρ – густина матеріалу, ($\text{кг}/\text{м}^3$); c_p – питома теплоємність при постійному тиску, ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$); T – температура, (К); t – час, (с); k – коефіцієнт теплопровідності, ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$); $\nabla\cdot(k\nabla T)$ – дивергенція теплового потоку, що описує теплопередачу за рахунок теплопровідності; Q_0 – об'ємне тепловиділення, ($\text{Вт}/\text{м}^3$), яке включає тепловиділення від реакцій та омічних втрат.

З використанням рівняння нестационарної теплопровідності [208]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad 2.25$$

де T – нестационарна температура в певній точці АКБ, $^{\circ}\text{C}$; ρ – усереднена густина матеріалів АКБ, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – усереднена питома теплоємність матеріалів АКБ, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$; t – час, с ; λ – усереднений коефіцієнт теплопровідності матеріалів АКБ, $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$;

Так як, більшість силових батарей складаються з елементів циліндричної форми формату 18660 або 21700 то рівняння нестационарної теплопровідності в циліндричних координатах матиме вигляд [208, 209]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad 2.26$$

де T – нестационарна температура в певній точці АКБ, $^{\circ}\text{C}$; ρ – усереднена густина матеріалів АКБ, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – усереднена питома теплоємність матеріалів АКБ, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$; t – час, с ; λ – усереднений коефіцієнт теплопровідності матеріалів АКБ, $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$; r – відстань в радіальному напрямку, від заданої точки осі циліндра, м ; φ – азимутальний кут, це кут між довільно обраною початковою радіальною віссю і проекцією радіус-вектора точки на площину, перпендикулярну до осі z , вимірюється у площині, перпендикулярній до осі z , радіан; z – осьова координата, координата вздовж осі z , яка проходить через

центр циліндра паралельно до його висоти. Змінна z показує висоту або глибину точки відносно вибраної початкової точки на осі z .

Зважаючи на те, що силова батарея складається із різних речовин та матеріалів, тому усереднену теплоємність можна розрахувати на основі об'єму кожної частини комірки за рівністю [210]:

$$c\rho = \frac{\sum_i \rho_i V_i c_i}{\sum_i V_i} \quad 2.27$$

Де V_i – об'єм кожного компонента, що входить до складу АКБ.

Нестаціонарна температура у певній точці силової АКБ електромобіля з врахуванням теплових енергій в результаті перебігу термодеструктивного процесу, а саме виділення тепла в результаті екзотермічних реакцій розкладання компонентів батареї; вивільнення накопиченої електричної енергії від внутрішнього короткого замикання згідно закону Ленца–Джоуля; енергія, що виділяється при згорянні горючих матеріалів батареї та енергії, що надається джерелом тепла матиме вигляд:

Рівняння збереження енергії в перехідних процесах [208]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q1(t) + Q2(t) + Q3(t) + Q4(t) \quad 2.28$$

Через складність процесу утворення тепла в середині АКБ отримані різні рівняння, які описують такі процеси. Одне з таких рівнянь описує енергію поляризації, енергію, яка утворюється внаслідок хімічних реакцій, джоулеву енергію, а також омічні втрати через опір в електролітній фазі при транспортуванні іонів [211, 212]:

$$Q = a_s J_n (\Phi_s - \Phi_e - U_{OC}) + a_s J_n \left(T \frac{\partial U}{\partial T} \right) + \sigma_{eff} (\nabla \Phi_s)^2 + \kappa_{eff} (\nabla \Phi_e)^2 + \frac{2R_g T \kappa_{eff}}{F} (t_+^0 - 1) \left(\frac{\partial \ln f_+}{\partial \ln c_e} \right) \nabla \ln c_e \cdot \nabla \Phi_e \quad 2.29$$

де $-a_s i_n (\Phi_s - \Phi_e - U_{OC})$ – описує втрати при внутрішньому опорі через різницю потенціалів у системі: a_s – площа поверхні активного матеріалу на одиницю об'єму, m^{-1} ; J_n – густина струму, A/m^2 ; Φ_s , Φ_e – потенціали і твердому та рідкому електроліті відповідно, В; U_{OC} – відкритий потенціал електрода, В; T – температура, К; σ_{eff} – ефективна провідність твердого електроліту, c/m ; $\nabla\Phi_s$ – градієнт потенціалу у твердому електроліті, В/м; κ_{eff} – ефективна провідність рідкого електроліту, c/m ; $\nabla\Phi_e$ – градієнт потенціалу у рідкому електроліті, В/м; R_g – універсальна газова стала, Дж/моль·К; F – стала Фарадея, Кл/моль $^{-1}$; t_+^0 – число іонів, що переноситься; $\nabla \ln c_e$ – градієнт концентрації іонів, $1/m$.

Рівність (2.29) є досить трудомістка при здійсненні обчислень, тому у роботі [213] запропоновано спрощену модель, яка широко застосовується у наукових дослідженнях

$$\dot{Q} = I(U_{OC} - U) - I(T \frac{\partial U_{OC}}{\partial T}) \quad 2.30$$

Де U – робоча напруга елемента, В; I – сила струму, А.

У науковій праці [214] запропоновано визначати кількість енергії виходячи з рівності:

$$\dot{Q} = R_i i^2 - i T \frac{\Delta S}{nF} \quad 2.31$$

де R_i – внутрішній еквівалентний опір одиниці об'єму, Ом·м $^{-3}$; ΔS – зміна ентропії, Дж; n – кількість електронів, які беруть участь в реакції.

Наведені рівності повною мірою описують теплову енергію, яка генерується при виникненні термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів та враховують виділення енергії внаслідок електрохімічних процесів між анодом і катодом, енергії, яка генерується внаслідок проходження електричного струму, так званої «Джоулевої» енергії,

енергії, яка виділяється при КЗ, енергії, яка виділяється при згоряння горючих матеріалів АКБ, а також кількість енергії яка передається АКБ від зовнішнього джерела тепла.

2.3. Числова реалізація рівнянь математичних моделей що описують процеси виникнення займань у літій-іонних батареях електромобілів

Використання різноманітних програмних комплексів із комп'ютерного моделювання у наукових дослідження набуває все більшого поширення, в тому числі для дослідження пожежної небезпеки електромобілів.

Найбільшого поширення набуло пакет прикладної комп'ютерної програми FDS (Fire Dynamics Simulator), яка розроблена Національним інститутом стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology – NIST, США) [215-217].

З використанням програмного комплексу FDS у роботі [218] наведено результати досліджень пожежі електромобіля на закритому паркінгу. Власне досліджувалось розподіл видимості на висоті 1,8 м над підлогою закритого паркінгу, а також розподіл температури під стелею під час пожежі електромобіля. Однак у роботі не досліджено, як температурні поля поширюються у горизонтальному напрямку, з чого можна зробити висновки про безпечні протипожежні відстані.

У праці [219] з використанням FDS дано оцінку безпеці закритого паркінгу під час пожежі електромобіля. Встановлено, що вже через 80 с від початку пожежі хмара продуктів згоряння має розмір понад 20 м у діаметрі. Однак незважаючи хмару з продуктів згоряння, на думку авторі, провести евакуацію з закритого паркінгу є можливо.

У роботі [220] досліджувались теплові потоки які виникають при пожежі електромобіля. Результати отримані за допомогою програмного комплексу FDS.

У праці [221] за допомогою CFD моделювання було проведено дослідження щодо визначення кількості продуктів згоряння, а також тепла, яке

виділяється внаслідок пожежі на закритому паркінгу. Джерело пожежі було змодельовано у вигляді розлитого палива розміром 3 м на 1,5 м і потужністю 5 МВт. Встановлено, що для забезпечення видимості у 15 м за закритому паркінгу під час пожежі потрібно забезпечити повітрообмін 300 тис м³/год зі швидкістю 1,1 м/с. Причому за наявності поздовжніх балок повітрообмін потрібно збільшити на 20 % у порівнянні із плоскою стелею.

Дослідження [222] стосувалось пожежі електробайків у підвалі багатоповерхового будинку, що є схожим до закритого паркінгу. Внаслідок CFD моделювання було встановлено, що продукти згоряння пожежі із п'яти електробайків, які знаходились у підвалі, досягнуть 10 поверху будівлі. Разом з тим протипожежні відстані у даній науковій праці не досліджувались.

У праці [223] ґрунтовно наведено небезпеки розвитку пожежі на закритому підземному паркінгу. Для розрахунків використовувалася програма Fire Dynamics Simulator. У цьому дослідженні встановлено, що особливу небезпеку під час пожежі електромобілів на закритому підземному паркінгу несе втористий водень. За таких умов концентрація втористого водню може у 2 рази перевищувати смертельну концентрацію для людини.

Дослідники Voigt S. та інші на підставі експериментальних даних удосконалили емпіричну модель горіння літій-іонних батарей для програмного комплексу FDS [224, 225].

Програма FDS (Fire Dynamics Simulator) використовується для моделювання сценаріїв пожеж із застосуванням обчислювальної гідродинамічної моделі (CFD). Такий підхід є надзвичайно універсальним і може бути адаптований до різноманітних типів пожеж – від горіння в промислових печах до аварійних ситуацій на нафтових танкерах. FDS реалізує CFD-моделювання тепломасопереносу під час горіння та вирішує рівняння Нав'є-Стокса.

Для врахування турбулентності використовується модель Смагоринського – масштабне моделювання вихрів (LES), яке є режимом роботи

за замовчуванням. У разі високої точності обчислювальної сітки можливе використання прямого чисельного моделювання.

Для моделювання хімічних реакцій у більшості випадків використовується одноступінчастий підхід. Результати обчислюються за допомогою двопараметричної моделі частки в суміші (mixture fraction model). У цьому контексті "частка в суміші" визначається як скалярна величина, що представляє масову частку одного або кількох компонентів газу в конкретній точці потоку. За замовчуванням у моделі розглядаються два компоненти: масова частка незгорілого палива та продуктів згоряння. Для більш складних сценаріїв передбачена двоступінчаста хімічна реакція, яка розділяє процеси окиснення палива до монооксиду вуглецю та його подальшого перетворення на діоксид вуглецю. У такому разі враховуються три компоненти: незгоріле паливо, паливо, що пройшло перший етап реакції, та паливо, яке завершило другий етап. Для визначення масової концентрації основних реагентів і продуктів застосовується рівняння стану, а за необхідності можна використовувати багатоступінчасту реакцію з урахуванням кінцевих швидкостей.

Радіаційний теплообмін моделюється шляхом розв'язання рівняння перенесення випромінювання для сірого газу. У деяких випадках застосовуються широкодіапазонні моделі. Рівняння вирішується методом контрольних об'ємів для конвективного переносу (FVM). Параметри поглинання сажею та димом обчислюються за допомогою вузькополосної моделі RADCAL.

Геометрія в FDS базується на прямокутній обчислювальній сітці, де всі перешкоди повинні мати прямокутну форму для відповідності параметрам сітки. На твердих поверхнях задаються теплові граничні умови, включно з інформацією про горючість матеріалів. Процеси тепло- і масопереносу між поверхнями та середовищем розраховуються із застосуванням емпіричних залежностей. Ця комплексна модель дозволяє точно моделювати процеси

горіння, теплопереносу та хімічної взаємодії, що робить FDS універсальним інструментом для аналізу пожеж.

Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується спеціальна програма SmokeView.

Під час формування математичної моделі динаміки розвитку пожежі використано наступні математичні залежності. Зазвичай у систему рівнянь Нав'є-Стокса [226] входять такі рівняння:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

У векторному вигляді вони мають наступний вигляд [227]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla\left[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)\right] + S \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla\left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\nabla h\right] + Q_{rad} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla\left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_k\right] + Q_k \quad (2.35)$$

де t – час; ρ – густина, кг/м^3 ; V – вектор відносної швидкості, м/с ; p – відносний тиск, Па ; μ – молекулярна динамічна в'язкість, $\text{кг/м} \cdot \text{с}$; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість, $\text{кг/м} \cdot \text{с}$; λ – коефіцієнт теплопровідності суміші, $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$; Pr_t – турбулентне число Прандтля; Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння.

Ентальпію суміші h можна описати рівністю [228]:

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k \quad (2.36)$$

де T – температура; h_0 – початкова ентальпія за температури T_0
 $c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ – теплоємність суміші за постійного тиску; H_k – теплота
утворення k -го компонента.

Член рівняння (2.33) S описується рівністю [229]:

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B, \quad (2.37)$$

де ρ_{hyd} – гідростатична густина; g – вектор гравітаційних сил; B – вектор сил обертання, що який описується рівністю [229]:

$$B = -2\omega \times V, \quad (2.38)$$

де ω – вектор кутової швидкості.

З метою обчислення турбулентної в'язкості використовують різні способи, які пов'язані зі визначення складників величин, які входять до рівняння Нав'є – Стокса. Такі методи визначення турбулентної динамічної в'язкості носять назву моделями турбулентності. Найпоширенішою моделлю є стандартна k - ε модель турбулентності. З використанням даної моделі, динамічну турбулентну в'язкість описують рівністю [229]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.39)$$

де $C_\mu = 0,09$ – константа; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії; k – турбулентна енергія.

З метою визначення коефіцієнтів ε і k використовують рівності, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса [102]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V\varepsilon) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right) + C_1\frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.41)$$

де G – член, який визначають за виразом [102]:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (2.42)$$

де D_{ij} описує рівність [102]:

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3}\left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t}\right)\delta_{ij}, \quad (2.43)$$

член δ_{ij} , який містить рівняння (2.33), описують рівністю [230]:

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (2.44)$$

Рівняння стану ідеального газу матиме вигляд [232]:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (2.45)$$

де R_0 – універсальна газова стала; M_k – молярна маса k -го компонента.

Питому теплоту згорання рідкого палива описують рівністю [232]:

$$\text{LHV}_{liq, fuel} = h_{liq, fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}, \quad (2.46)$$

де $h_{lic, fuel}^0$, $h_{CO_2}^0$, $h_{H_2O}^0$ – відповідно питомі теплоти утворення складників; x , y , z – стехіометричні коефіцієнти для газу,

В горіння суміші газів закладено власне горіння таких сполук як: $C_xH_yO_z$, O_2 , N_2 , H_2O і CO_2 , рівність матиме вигляд [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\rho D_i + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{chem}, \quad (2.47)$$

де Q_i^{chem} швидкість реакції горіння.

Інші складові суміші для рівнянь (2.32) – (2.35) описуються рівностями [233]:

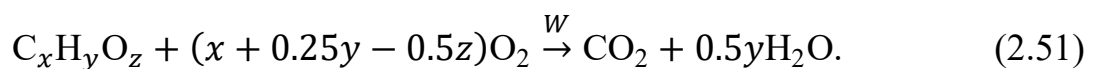
$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,in} - m_{i,out}) \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.48)$$

$$\bar{Q}_{mom}^P = \sum_j \frac{\pi r_p^2}{2} C_{Dj} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.49)$$

$$Q_{enth}^P = \sum_j (m_{i,in} h_{i,in} - m_{i,out} h_{i,out}) \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.50)$$

де індекс i стосується газового компонента; індекс j – відповідної траєкторії частки; N_{pj} – кількість частинок; Ω_{cell} – об'єм простору, що розраховується; C_{Dj} – коефіцієнт опору; ρ_g – густина газової фази; r_p – радіус.

Також модель горіння можна визначити паливом, що згоряє, використовуючи узагальнене хімічне рівняння [232]:



Натомість швидкість перебігу реакції можна обчислити за стехіометричним коефіцієнтом [232]:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z}. \quad (2.52)$$

З метою врахування радіаційного способу передачі тепла використовується дифузійна модель випромінювання газу (P1). З врахуванням припущення, що середовище є ізотропне [232]:

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (2.53)$$

де E_r – густина енергії; де E_b – описується [232]:

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}, \quad (2.54)$$

α – коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p, \quad (2.55)$$

β – коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p. \quad (2.56)$$

Відповідно у рівностях (2.53) – (2.56) величини мають такі позначення:

- α_m, α_p – коефіцієнти поглинання газу та часток;
- β_m, β_p – коефіцієнти розсіювання газу та часток;
- $E_{b,m}, E_{b,p}$ – густина енергії випромінювання для газу та часток.

Дані коефіцієнти описуються рівностями [233]:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (2.57)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (2.58)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.59)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.60)$$

де σ – стала Стефана – Больцмана; T_{pj} – температура; j – тої частки; N_j – кількість часток у комірці; ε_p – ступінь чорноти часток.

Вихідний член у рівнянні (2.32) визначають за рівністю [233]:

$$Q_{rad} = -4\alpha n^2 (E_b - E_r), \quad (2.61)$$

де n – коефіцієнт заломлення середовища.

Відповідно узагальнені рівняння системи Нав'є – Стокса для даного матимуть вигляд:

– рівняння дифузного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (TS \cdot f) = \frac{1}{PS} \nabla (DS \cdot \nabla f) + SST, \quad (2.62)$$

– рівняння дифузно-конвекційного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (TS \cdot f) + \nabla (CC \cdot Vf) = \frac{1}{PC} \nabla (DC \cdot \nabla f) + SST, \quad (2.63)$$

Після інтеграції рівняння (2.62) і (2.63), їх апроксимують для досліджувальної області. Відповідно вже апроксимовані рівняння для дискретної області матимуть вигляд:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.64)$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)} (CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.65)$$

де t – час; $TC \cdot f$ – різницева апроксимація конвективного оператора, при цьому $k = 1$ (1-й порядок точності), $s = 0$ (невраховане перенесення через ребра й вершини осередку); $\nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1})$ – апроксимація дифузійного оператора.

Тому зважаючи на вище викладене, пакет прикладної комп'ютерної програми Fire Dynamics Simulator широко використовується різними науковцями при дослідженні термодеструктивних процесів та причин їх виникнення у літій-іонних батареях. Це підтверджено науковими публікаціями рукописів у провідних технічних журналах, в тому числі, які індексуються наукометричною базою Scopus, в яких успішно використано прикладну комп'ютерну програму Fire Dynamics Simulator. Разом з тим достовірність використання цього програмного комплексу підтверджено використанням фундаментальних законів, зокрема системи рівнянь Нав'є-Стокса для математичної моделі динаміки розвитку пожежі, рівняннями нестационарної теплопровідності, рівняннями збереження енергії, рівняннями стану ідеального газу тощо. Таким чином, FDS спирається на класичну механіку рідин (CFD) та термодинаміку, адаптовану до специфіки пожежної динаміки.

Одним з недоліків даного програмного комплексу є недосконалість прогнозування перебігу хімічних реакцій на мікро рівні, таких як розкладання електроліту, що вимагає інтеграції з іншими програмними інструментами. Але незважаючи на це використання FDS у дослідженнях пожежної небезпеки літій-іонних батарей є обґрунтованим і перспективним підходом, який забезпечує високу точність моделювання та підтверджується експериментальними даними, хоча й потребує подальшого вдосконалення для врахування всіх аспектів хімічної динаміки.

Наступним етапом досліджень є окреслення критеріїв та параметрів, які впливають на процеси виникнення та поширення пожежі по силовій літій-іонній батареї та електромобілі в цілому, а також їх детальний опис. Дані критерії визначатимуться взаємодією теплофізичних, хімічних і конструктивних параметрів літій-іонних батарей електромобілів.

2.4. Критерії розвитку та поширення пожежі по силовій батареї та електромобілі в цілому

Розвиток і характеристика пожеж електромобілів залежатимуть від параметрів горючого. Власне горюче (ще що горить) визначається складом речовин та матеріалів, з яких виготовляється і які містяться у електромобілі, а також їх спільної дії (синергізм). Том доцільно окресли та охарактеризувати критерії, які впливають на параметри, що описують пожежі електромобілів.

Ємність АКБ – характеризує кількість енергії, яку може помістити (акумулявати) батарея. Ємність батареї визначається у Вт·год або А·год і їх похідних (тобто кВт·год, МВт·год, мА·год, кА·год тощо). Однак ємність батареї, яка описує силу струму, що може протікати впродовж певного часу не описує повної енергетичної картини батареї, як ємність що виражається у Вт·год. Так для прикладу дві батареї, де буде зазначена однакова «силова» ємність АКБ, приміром 100 А·год, одна з яких матиме напругу живлення 6 В, а інша 12 В матимуть різну ємність «енергетичну». Перша з них матиме 600 Вт·год, а друга у двічі більше – 1200 Вт·год. Таким чином, ємність АКБ, яка виражається у Вт·год дає повну характеристику ємності батареї. Натомість, при зазначеній ємності у А·год потрібно враховувати напругу живлення, що не завжди береться до уваги і створює спотворення реальної картини.

Очевидно, що з збільшенням ємності силова АКБ має не лише більші розміри і масу, але й і поміщає більшу кількість енергії. Пожежі тому силових АКБ будуть створювати вища характеристики по потужності теплового потоку. Науковці Willstrand та інші [234] на підстав аналізу літературних даних вивели

залежність між ємністю силової АКБ та потужністю теплового потоку, графік якої представлено на рисунку 2.1.

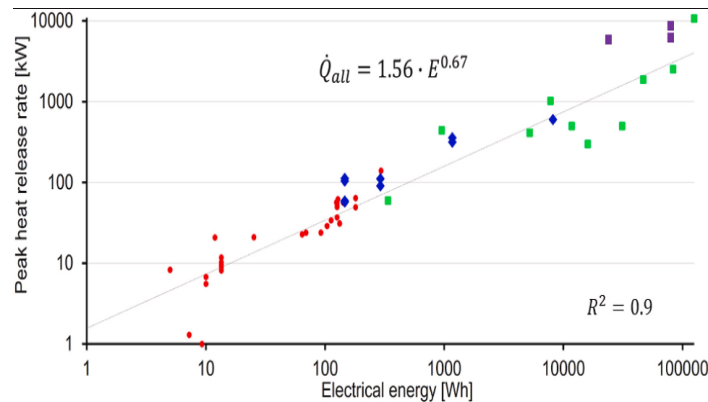


Рисунок 2.1 – Залежність зміни потужності теплового потоку від ємності силової АКБ [234]

Зазвичай ємність силових АКБ електромобілів на сьогоднішній день коливається від 24 до 100 кВт·год, тобто потужність теплового потоку лежить в межах від 1 до 10 МВт.

Маса АКБ і електромобіля в цілому. Так як усереднена питома теплота згоряння палива визначає кількість енергії, яка утвориться внаслідок згоряння 1 кг, то маса автомобіля визначатиме загальну кількість енергії, яка виділиться під час пожежі. Хоча електромобілі на мають традиційних ДВЗ, однак вони виявляється є важчі за їхні ідентичні аналоги по класу та потужності з автомобілями, що обладнані ДВЗ. У наукових працях [235-237] досліджено, що електромобілі на 20-22% є важчими від своїх аналогів із ДВЗ, що складає 270-300 кг.

Стан заряду – заряд батареї у відсотках від максимально можливого заряду, що визначається у відсотках. За результатами роботи [238] встановлено, що при збільшенні заряду батареї потужність теплового випромінювання збільшується. Динаміка зміни приведено на рисунку 2.2.

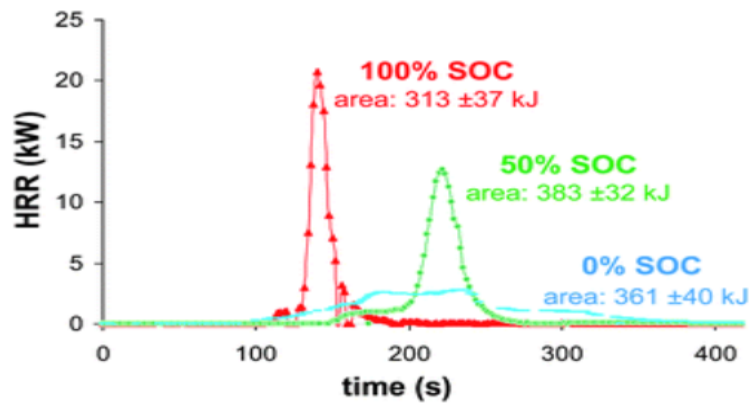


Рисунок 2.2 – Зміна потужності теплового випромінювання від заряду батареї [238].

За даними дослідників Чжан та інших [239] стан заряду впливає на температуру горіння,

Науковці Голубков та інші [240] для літій-іонних елементів типу 18650 з катодом Li_xFePO_4 (LFP), матеріал якого вважається відносно безпечним, а також для літій-іонних елементів типу $\text{Li}_x(\text{Ni}_{0,80}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05})\text{O}_2$ (NCA), що є чи не найбільш поширеними.

Матеріал виготовлення АКБ. У дослідженнях на вплив температури встановлено, що батареї з катодом NCM працюють краще, ніж батареї з LiCoO_2 (LCO) і $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ (NCA), але гірше, ніж батареї з LiMn_2O_4 (LMO) і LiFePO_4 (LFP). Тим не менш, катод NCM демонструє кращу довговічність при високих температурах і вищу питому ємність, ніж LMO, і вищу щільність енергії, ніж LFP [241].

Наявність системи контролю температури АКБ. Температура батареї різко впливає на її технічні характеристики. Оптимальною, для забезпечення сталих характеристик батареї та запобігання її деградації, є температура в межах 15-35 °C [242]. Інші джерела наводять значення в межах 20-40 °C [243]. Очевидно, що внаслідок зміни кліматичних умов та географії використання електромобілів потрібно використовувати технічні засоби, щоб забезпечити температуру силових АКБ в даних межах. Для цього використовуються системи контролю температури АКБ.

При температурі понад 40 °С відбувається збільшення провідності електроліту, що призводить до його розкладання. Це призводить до безповоротної втрати іонів літію [244], що робить батарею не стабільною, внаслідок чого може відбутись термодеструктивний процес [245].

При температурах нижчих за 0 °С відбувається сповільнення хімічних реакції, внаслідок цього перенесення іонів також сповільнюється [246]. Також збільшується внутрішній опір самої батареї і ємність батареї різко падає [247]. За таких умов утворюються дендрити (відростки) літію, які руйнують катод [248].

Тому дуже важливо підтримувати температуру АКБ у діапазоні робочих температур, використовуючи як нагрівання так і їх охолодження. Це збільшує не лише стабільність роботи та термін служби, але й їх безпеку [249].

Так як при низьких температурах експлуатації зменшується ємність АКБ, тобто погіршується технічні характеристики, однак це не призводить до зменшення безпекових показників. Тому системи нагрівання АКБ, з даних міркувань, ми не будемо розглядати.

Усі системи охолодження поділяють на внутрішні, зовнішні та гібридні. Методи внутрішнього охолодження спрямовані на мінімізацію тепла, яке утворюється в процесі експлуатації шляхом використання інших матеріалів для виготовлення катода, анода чи електроліту, які мають інші термохімічні властивості. Це досягається завдяки зменшенню товщини електродів, чи поліпшення їх характеристик [250]. Натомість зовнішні системи відбирають та передають чи розсіюють тепло, яке генерується у силових АКБ .

Найбільшого поширення серед зовнішніх системи набули системи повітряного охолодження [251, 252] рідинного охолодження [253] та системи, що використовують матеріали зі зміною фаз [254-256] Також може використовуватись поєднання вищенаведених систем [257, 258]

Враховуючи, що під час термодеструктивного процесу реакції може виділятися близько 880 кДж/кг, це ставить великі вимоги до систем

охолодження [259]. Власне системи охолодження зі зміною фази вважаються як одні із найефективніших та найсучасніших у електромобілях [260].

Таким чином система охолодження є одним із ключових елементів, яка забезпечує запобігання виникнення термодеструктивного процесу шляхом відведення тепла від силової АКБ.

Температура займання електроліту – мінімальна температура, при якій відбувається займання електроліту. Один із підходів заснований на поглинанні вільних радикалів, які підтримують реакцію горіння у газовій фазі [261]. Добавками у цьому випадку є органічні сполуки фосфору. Так при додаванні 20% трифторетил фосфату електроліт ставав негорючим, при цьому не маючи негативного впливу на графітовий анод та катод [262].

Температура плавлення сепаратора – мінімальна температура, при якій сепаратор втрачає свої властивості з діалектичної здатності. Температура плавлення сепараторів коливається в межах 150-170 °C [263]. Під час руйнування сепаратора відбувається прямий контакт між катодом та анодом. Внаслідок цього відбувається хімічна реакція між сильно окислювальним матеріалом катода і сильно відновлювальним матеріалом анода. Внаслідок цього відбувається різке виділення енергії. Зазвичай сепаратори виготовляють із оксидів MgO , TiO_2 , Al_2O_3 або $CaCO_3$ [264, 265].

Термічна стійкість катода. Виникнення термодеструктивного процесу реакції часто пов'язано із термічною нестабільністю катода у поєднанні із електролітом. Термічна стійкість катода обумовлюється матеріалом виготовлення. Зазвичай це багатошарові $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$ [266]. Причому останній матеріал катода визначний як один із кращих за термічною стійкістю.

Питома теплота згоряння АКБ та електромобіля в цілому – показує кількість енергії, яка виділяється при згорянні 1 кг АКБ. Очевидно, що питома теплота згоряння буде визначати такі ключові поняття як потужність теплового випромінювання та загальну енергію тепловиділення. На питома теплоту згоряння впливають також матеріали виготовлення силових АКБ. Усереднена

питома теплота згоряння для силових АКБ складає 4 МДж/кг для заряду 50% [267]. Що є у 10 разів менше ніж у бензину, де питома теплота згоряння становить понад 40 МДж/кг. Найбільший вклад у питому теплоту згоряння АКБ здійснює електроліт (14%) та сепаратор 4%.

Питома теплоємність АКБ – кількість енергії (Дж), необхідної для нагрівання 1 кг батареї на 1 °С. Питома теплоємність батареї є усереднена величина і складається з питомих теплоємностей компонентів: катода, анода, сепаратора, електроліту та інших матеріалів, з яких складається батарея. Очевидно, що чим більша ємність, то тим менше буде нагріватись батарея при виникненні термодеструктивного процесу. Теплоємність катода лежить в межах 600-700 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹, анод має де що вищу теплоємність, яка складає 800-850 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹. Теплоємність електроліту становить понад 1500 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹, а корпусі із нержавіючої сталі – 460 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹. Діалектик, який розділяє електроди має найбільшу теплоємність – 1900 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹. Теплоємність алюмінієвої фольги складає 900 Дж/кг⁻¹·°С⁻¹ [268].

Питома ємність АКБ – показує кількість енергії, яка міститься у АКБ, що припадає на одиницю її маси. Питома ємність визначається у Вт·год/кг. Світова інженерія бореться за кожен Вт·год батареї, щоб помістити її не збільшуючи її маси. В залежності від типу літій-іонного елемента зміниться його питома ємність. Так для натрій-іонного елемента питома ємність складає 9 Вт·год/кг. [141,269]. Очевидно, що чим більша питома ємність АКБ, тим більше енергії міститься в одиниці маси такої батареї.

Густина (щільність) енергії АКБ – показує кількість енергії, яка міститься у АКБ, що припадає на одиницю її об'єму. Щільність енергії визначається у Вт·год/дм³.

Таким чином окреслено основні технічні та експлуатаційні параметри електромобілів, які впливаю на процеси виникнення займань у силовій батареї та поширення пожежі по електромобілі в цілому. Значення питомих єдностей а також щільності енергії певних АКБ типу 18650 приведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Питома ємність та густина енергії певних літій- та натрій-іонних батареї типу 18650 [270]

Тип батареї	Питома ємність, Вт·год/кг	Густина енергії, Вт·год/л
LiCoO ₂ - (Li-ion)	206	530
LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂ - (Li-ion)	210	530
C/LiN _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂ - (Li-ion)	285	785
C/LiFePO ₄ - (Li-ion)	126	325
C/LMn ₂ O ₄ - (Li-ion)	132	340
CNRS CEA 18650 (Na-ion)	90	250
PNNL-WSU 18650 - (Na-ion)	150	375

Встановлено, що ступінь заряду батареї, її енергетична ємність та склад матеріалів виготовлення впливають на процеси виникнення та розвитку займань. Дані критерії будуть братись за основу при проведенні подальших експериментальних досліджень літій-іонних батарей електромобілів в масштабі елементів та модулів.

2.5. Висновки до розділу 2

На підставі проведених досліджень щодо можливості використання теоретичних механізмів досліджень процесів розвитку пожеж електромобілів та їх вплив на протипожежний захист зазначених об'єктів окреслено їх характеристики та особливості використання, при цьому:

1. Узагальнено та систематизовано відомі теоретичні методи 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.

2. З використанням базових рівнянь термодинаміки та теплопередачі наведено математичні описи початкових та граничних умов, кількості 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.

3. Описано технічні параметри та експлуатаційні властивості електромобілів, як чинники впливу на процеси виникнення займань у силових літій-іонних батареях та поширення пожежі по електромобілі в цілому. Зокрема встановлено, що катодний матеріал, ступінь заряду, характеристика зовнішнього джерела тепла та їх енергетична ємність.

4. Використання програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator для дослідження пожежної небезпеки літій-іонних батарей є ефективним інструментом для моделювання та прогнозування поведінки пожеж, пов'язаних із термодеструктивними процесами та викидом токсичних газів. Fire Dynamics Simulator дозволяє достатньо точно відтворювати фізичні та хімічні процеси, що супроводжуються горінням літій-іонних батарей. Моделювання таких процесів дасть розуміння впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів літій-іонних батарей на виникнення термодеструктивного процесу в них і на підставі цього розроблення ефективних заходів запобігання займань і гасіння електромобілів.

5. На наступних етапах досліджень процесів виникнення займань у силових літій-іонних батареях та розвитку пожеж електромобілів в цілому запропоновано застосовувати спрощені та табличні методи як дадуть змогу реалізувати параметричні підходи у розрахункових процедурах.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗОГІДРОДИНАМІКИ

3.1. Моделювання процесів виникнення та поширення пожежі електромобіля

3.1.1. Опис сценарію виникнення пожежі електромобіля та розрахункові параметри

З метою перевірки обґрунтованості наведених математичних, а також гідродинамічних моделей, з врахуванням впливу чинників на процеси розвитку пожеж електромобілів необхідно здійснити їх верифікацію. Для цього побудовано та реалізовано польову модель електромобіля з використанням програмного комплексу FDS [273]. Даний програмний комплекс дозволяє відтворювати перебіг горіння літій-іонних батарей в тому числі термодеструктивні процеси.

Під час створення комп'ютерної моделі електромобіля за основу взято модель електромобіля Tesla Model S, з габаритами $4976 \times 1963 \times 1435$ мм (довжина, ширина, висота), із загальною масою 2100 кг. Вибір даного типу електромобіля обумовлений найбільшою ємкістю тягової акумуляторної батареї, що використовується на даний момент серед легкових електромобілів, а саме ємність акумуляторної батареї складає 104 кВт·год. Аналіз технічних звітів [274, 275] показав, що відтворити повноцінну конструкцію літій-іонних акумуляторів за допомогою FDS моделювання надзвичайно важко, проте знаючи основні складові компонентів реакції горіння катодних матеріалів, точно відтворити температурний режим реакції горіння, що і є основною задачею.

Літій-іонні батареї зазвичай складаються з катоду, аноду, сепаратора та електроліту. Кожен з них відіграє певну важливу роль у властивостях батарей електромобілів щодо енергетичної ємності, швидкості заряду-розряду, терміну

використання, максимального струмового навантаження, безпеки і вартості. Матеріал виготовлення катода використовується для загальної класифікації літій-іонних акумуляторів, так як їх хімічний є одним із ключових чинників, які впливають на технічні параметри та експлуатаційні характеристики батареї.

Літій-іонні батареї катод яких виготовлений на основі літій-кобальт оксиду (LCO), зазвичай використовуються у різних електроприборах, зокрема для живлення мобільних телефонів. Такі батареї забезпечують високу струм розряду порівняно з іншими катодними матеріалами та є відносно доступним. Разом із тим, такому типу літій-іонних батарей притаманні проблеми щодо пожежної безпеки, особливо при експлуатації за високих температур. Тому чином на сьогоднішній день виробники схиляються до безпечніших літій-іонних батарей, а саме таких катодних матеріал яких виготовлений на основі, літій-залізо-фосфату (LFP).

Натурні дослідження процесів горіння літій іонних батарей електромобілів показав [276], що максимальна температура вільного горіння батареї, яку штучно вивели в аварійний режим із подальшим займанням в період найбільшої швидкості тепловиділення становить 850-1020 С. При цьому, загальна тривалість вільного горіння акумуляторної батареї в більшості випадків становила не менше 70 хвилин.

Під час створення розрахункової моделі враховано дослідження [277] де було доведено, що значення тепловиділення в результаті горіння різних типів літій іонних акумуляторів однакових за своєю ємністю фактично не відрізняється. Проте загальна кількість виділеної енергії тепла в результаті пожежі, як правило, в 18-20 разів більша за фактичну ємність енергії акумуляторної батареї.

Окремо слід зазначити, що дослідження пожеж однакових типів транспорту обладнаних електричним двигуном та бензиновим двигуном показав, що для акумулятора Nissan Leaf ємністю 24 кВт-год загальне значення тепловиділення в наслідок пожежі склало 0,9 ГДж. Для аналогічного типу авто

із бензиновим двигуном з повним паливним баком на 50 л, загальне значення тепловиділення в наслідок пожежі склало 1,8 ГДж.

Для досліджуваної моделі електромобіля Tesla S, загальна кількість виділеного тепла в результаті пожежі склала до 3 ГДж. Таким чином, під час створення моделі слід орієнтуватися саме на це найбільше значення тепловиділення.

Що стосується іншого, окрім акумуляторної батареї, пожежного навантаження, що входить до складу електромобіля то воно складає: гума – 118,4 кг (нижча теплота згоряння 33,52 МДж/кг); мастильні матеріали – 8,4 кг (нижча теплота згоряння 41,87 МДж/кг); полімерні матеріали – 49,7 кг (нижча теплота згоряння 24,3 МДж/кг); пінополіурітан – 32,6 кг (нижча теплота згоряння 47,14 МДж/кг); целюлозні вироби – 6,1 кг (нижча теплота згоряння 13,4 МДж/кг); штучна шкіра – 14,2 кг (нижча теплота згоряння 17,76 МДж/кг).

На рисунку 3.1 наведено фрагмент відтвореної FDS моделі, що буде використовуватися в дослідженні.

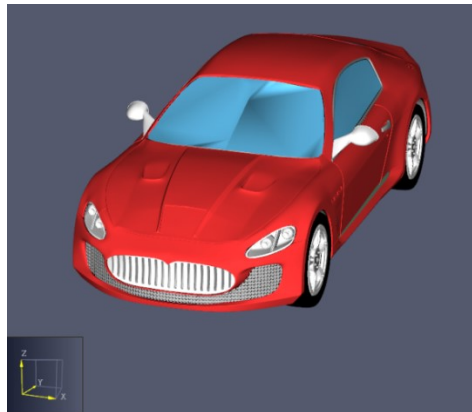


Рисунок 3.1 – Візуалізація створеної FDS моделі електромобіля Tesla S

В основі обраних сценаріїв пожежі передбачена наявність конструкції стіни, яка виконана з червоної цегли з наступними фізичними характеристиками: густина 1950 кг/м^3 ; питома теплоємність $1,04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт випромінювання $0,9$; коефіцієнт поглинання $0,65 \text{ 1/м}$. На основі приведених даних та їх фізичних характеристик створено основні досліджувані об'єкти FDS моделі.

Початкова хімічна реакція горіння складається: С (carbon atoms) – 1.9; Н (hydrogen atoms) – 40.0; О (oxygen atoms) – 2.6. Виділення СО – 0,015 та сажі 0,098. Зменшення інтенсивності горіння (самозатухання) відсутнє. Максимальнt тепловиділення – 6 МВт/м² (приймається згідно даних [276]). Лінійна швидкість поширення полум'я 0,21 м/с (приймається згідно [278, 279]).

Відповідно до прийнятого сценарію, пожежа вільно набуває свого розвитку протягом всього часу моделювання (720 с). Критична температура займання суміжних матеріалів, які входять до складу конструкції електромобіля прийнята як для матеріалу з найменшим значенням температури самозаймання, а саме 160°C (для синтетичних тканин).

Важливим завданням при створенні математичної моделі є наближення параметрів моделі до реальних фізичних умов які досліджуються, а саме геометричні розміри, фізичні та хімічні властивості матеріалів, які беруть участь в горінні, інші параметри системи, що задаються, врахування умов навколишнього середовища, швидкість поширення горіння та ряд інших параметрів. Геометричні розміри об'єктів, що досліджуються слід задавати у масштабі з врахуванням розмірів сітки

Параметри навколишнього середовища, так як відносна вологість, атмосферний тиск та температура повітря задаються аналогічні як при натурних дослідження. При цьому задається математична модель розвитку займання та здійснюється комп'ютерне моделювання моделювання її поширення.

Під час аналізу динаміки розвитку пожежі по елеткромобілі розрахунковими методами допускаються приймати такі припущення: - тепловий потік від полум'я пожежі приймається однаковий по всій площі; - вся акумульована електрична енергія у літій-іонній батареї перетворюється в теплову енергію;

Приймають такі умови навколишнього середовища: швидкість повітряних потоків (вітру) приймається рівним 0 м/с; значення температури повітря 18 °С, атмосферний тиск 101 кПа, ступінь чорноти полум'я (ϵ_f) приймається рівними 1, а ступінь чорноти речовин та матеріалів, які сприймають тепловий потік 0,8

При створення комп'ютерної моделі швидкість руху повітряних мас приймається рівний 0 м/с. Враховуючи аналіз найбільш резонансних пожеж для відкритих автостоянок [280] виявлено, що найбільше теплове випромінювання для відкритого простору спостерігалось від електромобіля розміщеного біля цегляної стіни без світлових прорізів, під час створення моделі, прийнято саме такий сценарій. Таким чином, під час визначення значення безпечної протипожежної відстані для забезпечення обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі та обґрунтування безпечності застосування матеріалів фасадних систем на основі аналізу методик [281-282] прийнято критерій не перевищення максимального значення температури в 150°C на стіні будівлі. Враховуючи коефіцієнт негативного впливу вітру 1,2 згідно з дослідженнями [283], граничне значення температури на стіні не повинно перевищувати 120 °С.

За другий сценарій пожежі прийнято займання електромобіля на закритому паркінгу. Прийнято найменшу допустиму висоту поверху паркінгу, яка складає 2,7 м. Стіни та перекриття паркінгу виконані із монолітного бетону, світлові прорізи та активацію систем протипожежного захисту в приміщенні відсутня. Основною задачею за другим сценарієм дослідження є визначення безпечних протипожежних відстаней до суміжно розташованих автомобілів в об'ємі закритого паркінгу. Критерієм прийнятності значення розрахункової протипожежної відстані (R) є умова того, що розрахункова температура (T_p) із урахуванням тривалості теплового опромінювання на поверхні матеріалу, або речовини суміжного об'єкту (автомобіль), що сприймає тепло від пожежі не перевищує допустиму температуру (T_d) для такого матеріалу або речовини, тобто $T_p \leq T_d$. Критичним матеріалом, що опромінюється від факелу пожежі та є індикатором поширення пожежі приймаємо пластикові вироби автомобілів, а саме конструкція бамперу з температурою спалаху T_p 220 оС [284]. Таким чином, критерієм для другого розрахункового сценарію пожежі прийнято граничне значення температури в просторі, яке не повинно перевищувати 220 °С.

3.1.2. Результати розрахунку моделі пожежі електромобіля

У цьому дослідженні з використанням Fire Dynamics Simulator проведено моделювання пожежі EV, на прикладі автомобіля Tesla Model S. На підставі літературного аналізу та відомих даних про теплоту згоряння матеріалів, які входять до складу автомобіля, а також даних натурних випробувань авторів Sungwook Kang та інші [276] створена FDS модель електромобіля Tesla Model S.

Враховуючи те, що середній час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів складає до 10 хв, і ще орієнтовно до 2 хв знаходиться для подачі вогнегасних засобів, тому час 12 хв, тобто 720 с став часом моделювання пожежі Tesla Model S.

На рисунку 3.2 наведено фрагмент моделі із кутовою стіною.

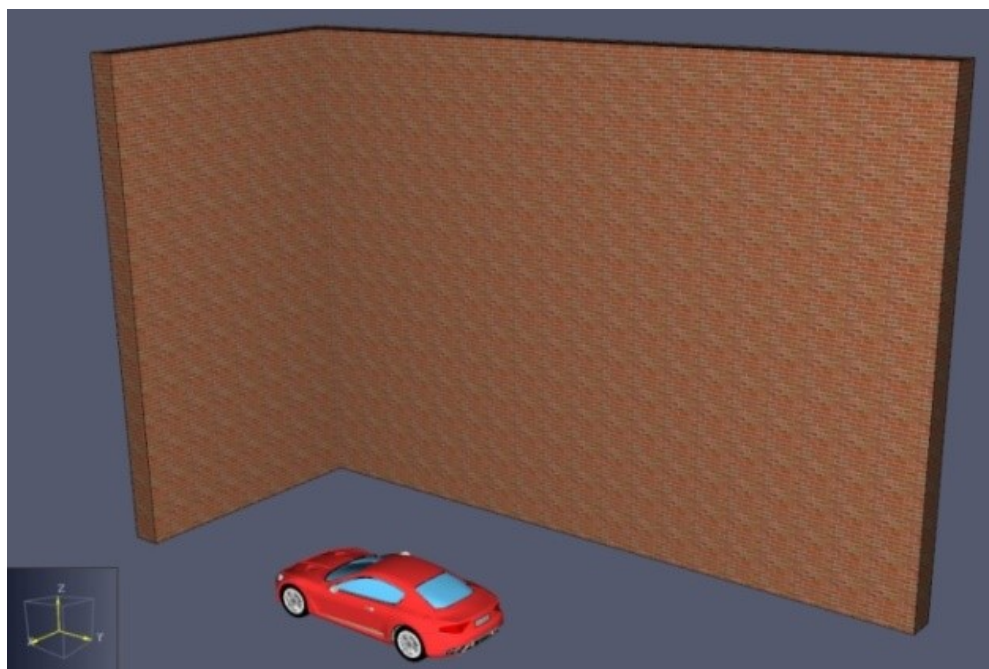


Рисунок 3.2 – Фрагмент створеної моделі відкритої автостоянки із кутовою стіною

За результатом проведеного моделювання дослідження безпечних протипожежних відстаней створено геометричні моделі електромобіля та фрагменту суцільної стіни суміжно розташованої будівлі. Електромобіль є змодельованим джерелом теплового випромінювання, а стіна на яку падає

тепловий потік від пожежі електромобіля об'єктом на якому розміщуються термопари та фіксується температура. З метою забезпечення візуального аналізу температурних полів, зовнішня поверхня стіни, де розміщені термопари має можливість візуалізації впродовж всього процесу моделювання.

Для фіксації температури під час пожежі електромобіля, розміщені датчі температури з інтервалом 50 см від центру та в кожному із сторін. Це дозволить вимірювати зміну температури в об'ємі повітряного простору між корпусом електромобіля та будівлі. На рисунку 3.3 наведено зовнішній вигляд моделі та місця розміщення вимірювачів в газовому середовищі.

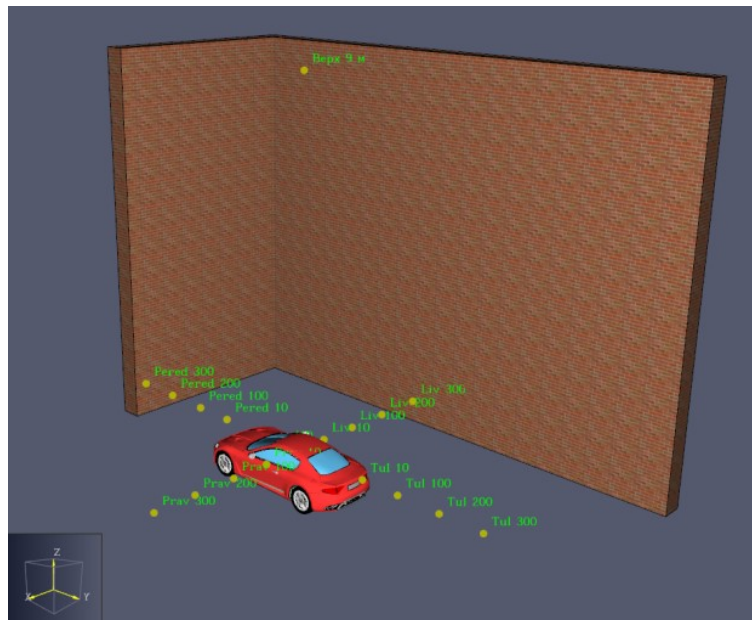


Рисунок 3.3 – Фрагмент створеної моделі відкритої автостоянки із кутовою стіною та вимірювачами в газовій фазі

За результатом моделювання пожежі за першим сценарієм визначено температурні розподіли та теплообмін між суміжними об'єктами під час пожежі електромобіля. На основі даних [275, 276] середня швидкість виділення тепла під час горіння літій іонних акумуляторів становить близько 3 МВт. Таким чином, створена модель дозволила відтворити потужність теплового потоку під час займання та горіння силового літій-іонного акумулятора змодельованого електромобіля, що приведено на графіку рисунку 3.4.

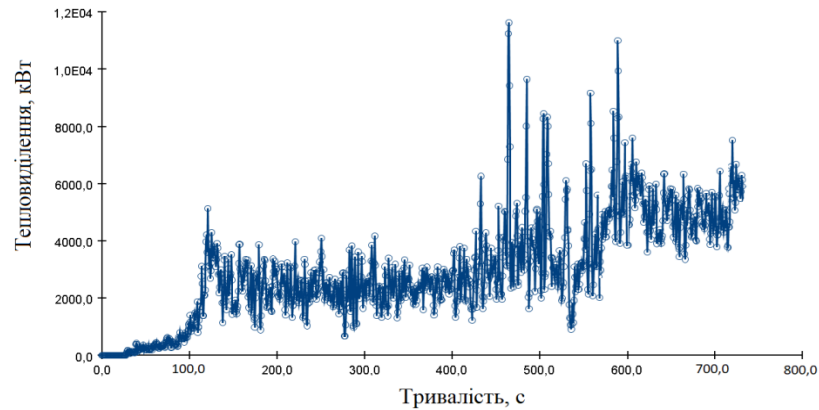


Рисунок 3.4 – Відтворений режим швидкості виділення тепла під час дослідження процесів горіння електромобілів, обладнаних силовими літій-іонними акумуляторами

Небезпечні чинники пожежі, а саме дим, продукти горіння та тепло, вільно розповсюджуються від осередку пожежі (рис 3.5). Серія випробувань проводилася покроково із кроком збільшення відстані на 0,5 м від стіни до електромобіля. Випробування проводилися до моменту, поки не буде визначено значення безпечної протипожежної відстані від електромобіля до стіни при якому тепловий розподіл на ній не буде перевищувати 120 °С.

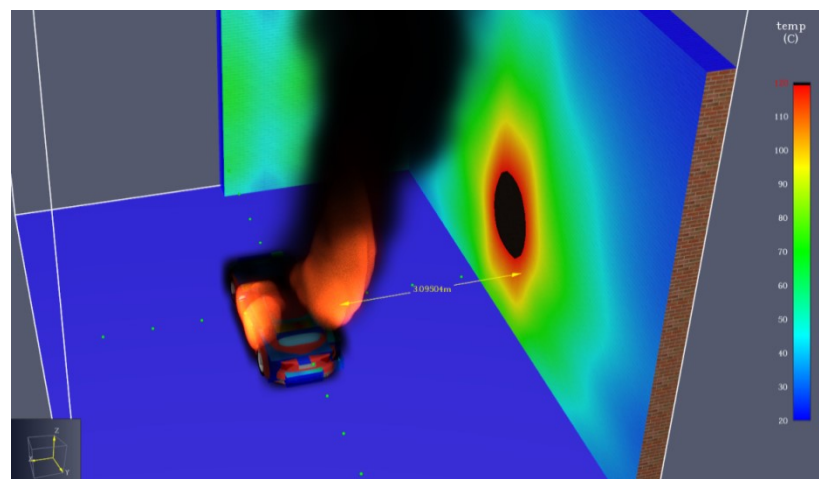


Рисунок 3.5 – Фрагмент моделювання граничного температурного розподілу в 120 °С на суміжній стіні при мінімальній протипожежній відстані в 3 м

Результати відображення динаміки розповсюдження пожежі та зміну теплових розподілів в просторі з часом представлено на рисунках 3.6 – 3.10.

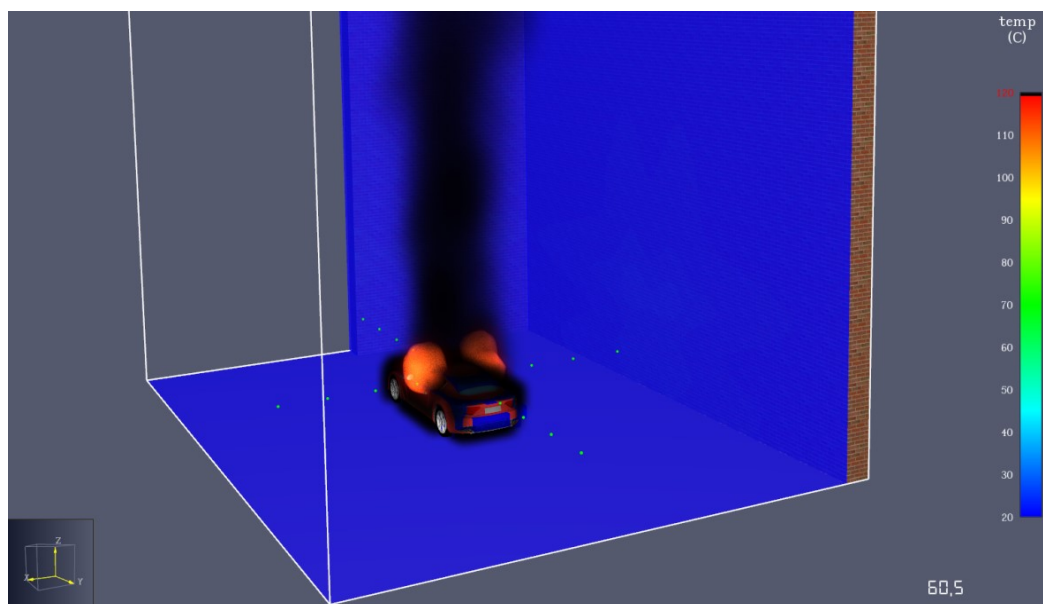


Рисунок 3.6 – Фрагмент моделювання розвитку пожежі на 60 секунді

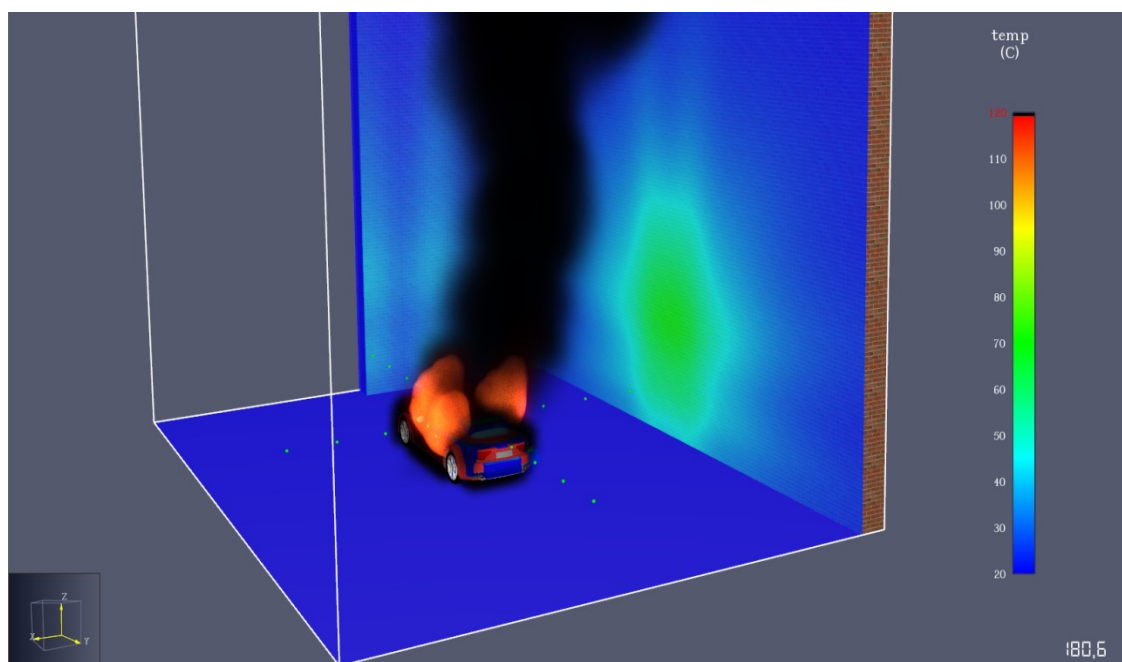


Рисунок 3.7 – Фрагмент моделювання розвитку пожежі на 180 секунді

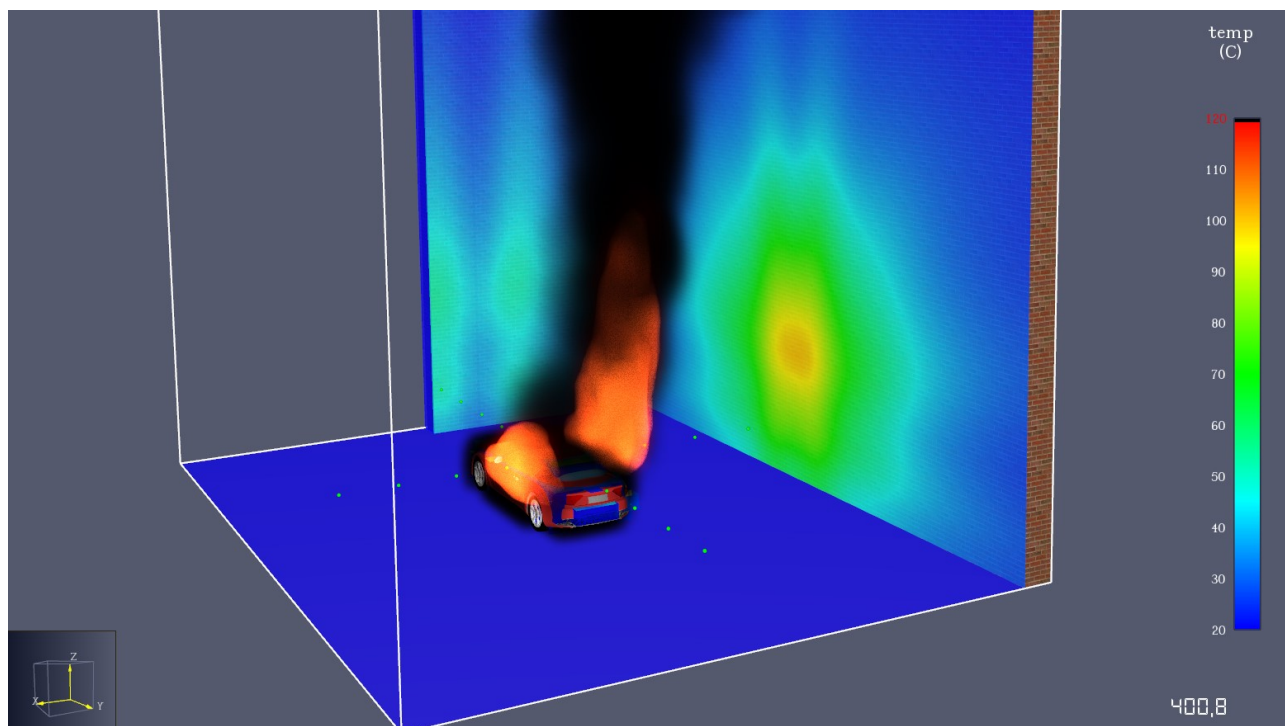


Рисунок 3.8 – Фрагмент моделювання розвитку пожежі на 400 секунді

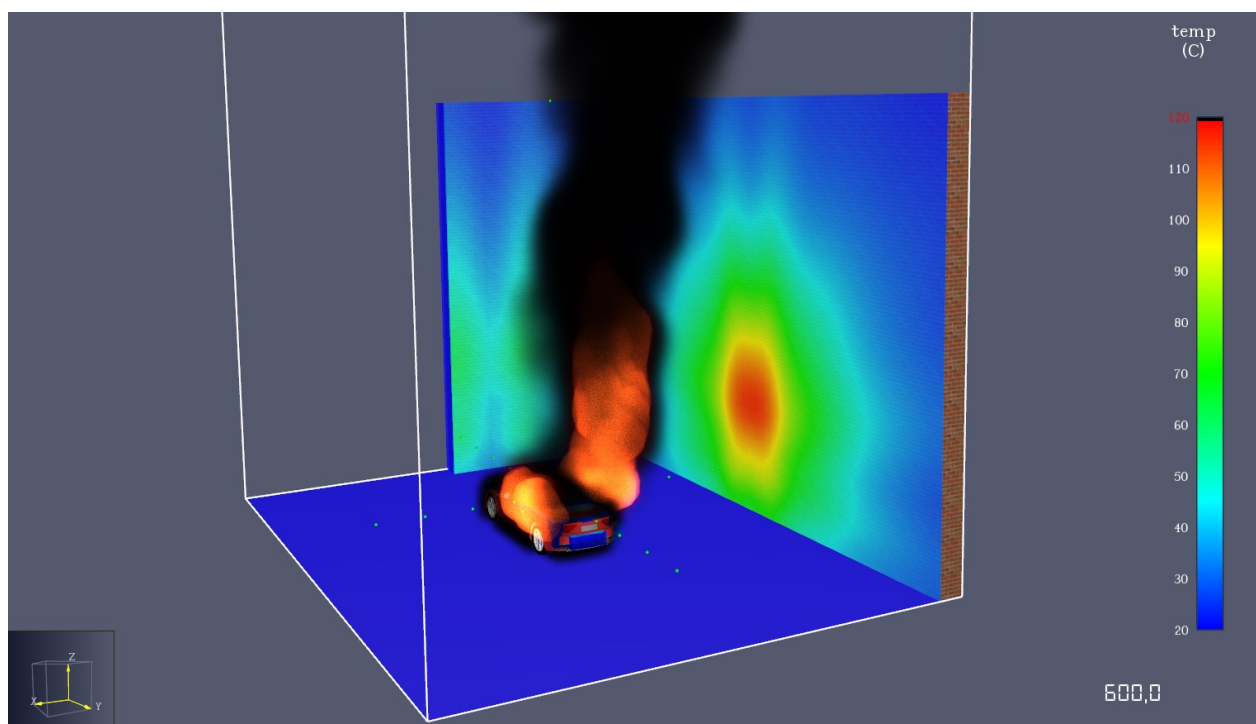


Рисунок 3.9 – Фрагмент моделювання розвитку пожежі на 600 секунді

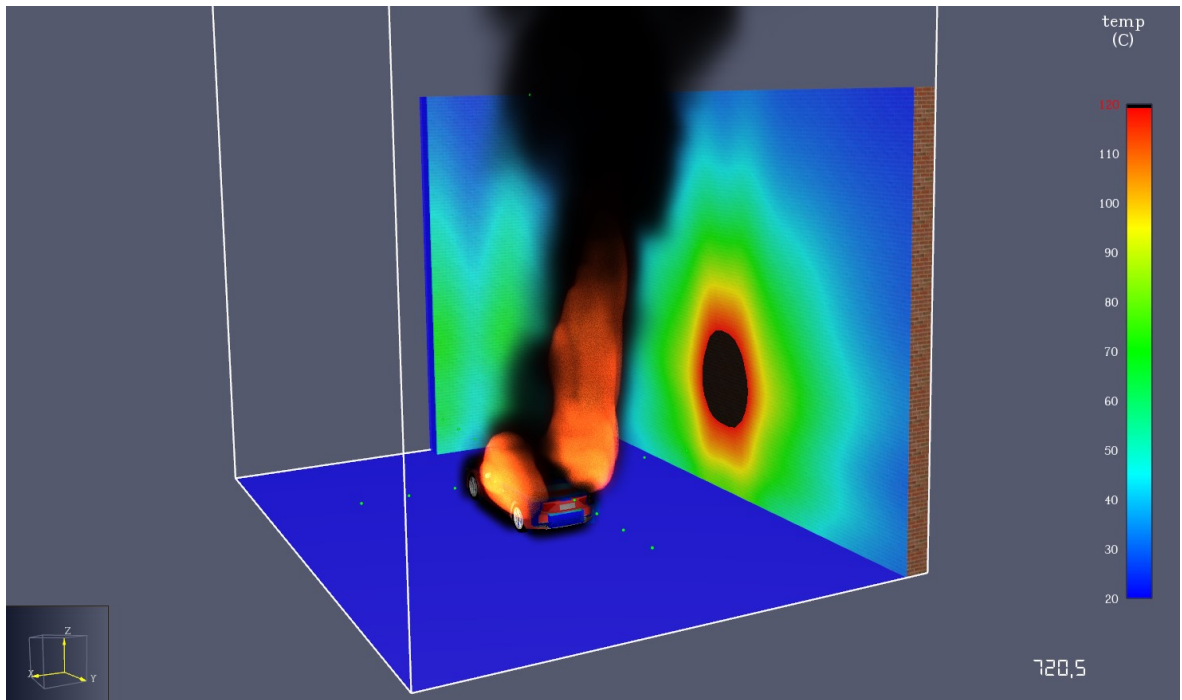


Рисунок 3.10 – Фрагмент моделювання розвитку пожежі та теплові розподіли на стіні на 720 секунді пожежі

За результатом комп'ютерного моделювання визначено, відстань від електромобіля, що горить до стіни будівель має складати не менше 3 м, за зазначених умов проведення експерименту. Отримані дані щодо безпечної протипожежної відстані дозволять запобігти поширенню пожежі від електромобіля як по фасадній системі будівлі так і в середину приміщення через світлові прорізи.

3.2. Моделювання процесів поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу

3.2.1. Опис сценарію поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу

Для проведення розрахунків визначено сценарій пожежі, а саме прийнято займання електромобіля на закритому паркінгу [285].

Закритий паркінг прийнятий з міркувань випадку, який поєднує найбільшу пожену небезпеку, яка обумовлена наявністю великої кількості горючого (пожежної навантаги), обмежений запас вогнегасних речовин, можливість поширення полум'я на суміжні будівлі, а також складність проведення робіт із пожежогасіння.

Прийнято найменшу допустиму висоту поверху паркінгу, яка складає 2,7 м. Стіни та перекриття паркінгу виконані із монолітного бетону, світлові прорізи та активацію систем протипожежного захисту в приміщенні відсутня. Основною задачею дослідження є визначення безпечних протипожежних відстаней до поруч розташованих автомобілів в об'ємі закритого паркінгу. При моделюванні приймався найгірший сценарій розвитку пожежі, який полягав в тому, що паркінг не обладний системою автоматичного пожежогасіння, або така система вийшла з ладу.

Критерієм прийнятності значення розрахункової протипожежної відстані (R) є умова того, що розрахункова температура (T_p) від пожежі не перевищує допустиму температуру (T_d), тобто $T_p \leq T_d$.

Критичним матеріалом, що опромінюється від факелу пожежі та є індикатором поширення пожежі приймаємо пластикові вироби автомобілів, а саме конструкція бамперу з температурою спалаху T_d 220 °C [283, 287].

Таким чином, критерієм для розрахункового сценарію пожежі прийнято граничне значення температури в просторі, яке не повинно перевищувати 220 °C.

3.2.2 Результати розрахунку поширення пожежі електромобіля на інші транспортні засоби за умов закритого паркінгу

На рисунку 3.11 наведено фрагмент створеної моделі закритого паркінгу та розміщених в ньому автомобілів [285].

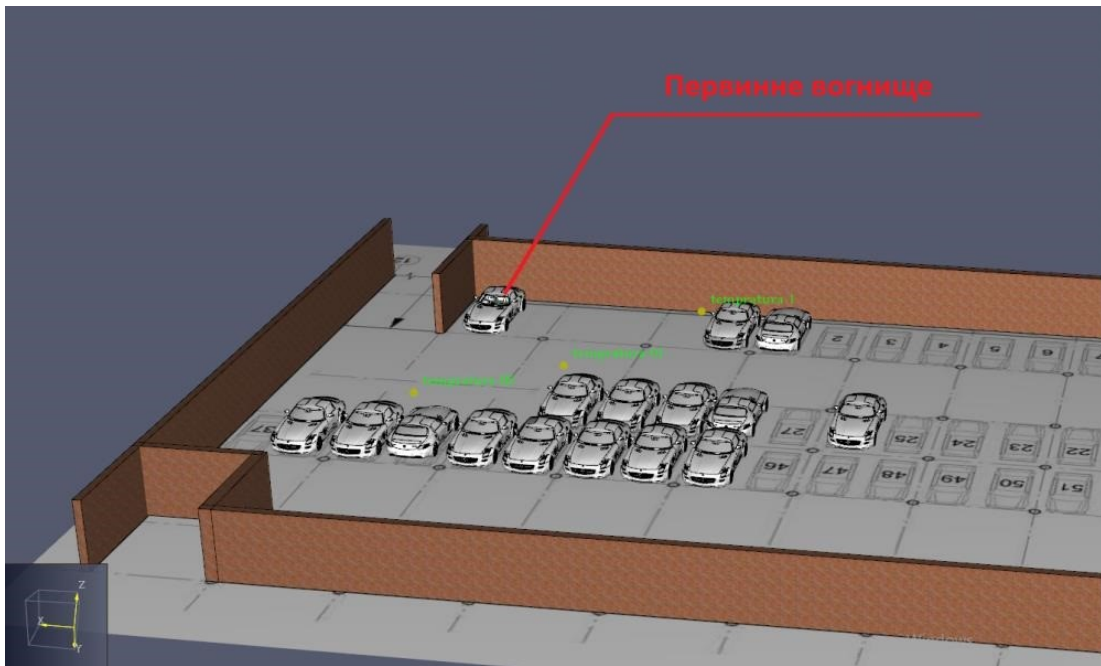


Рисунок 3.11 – Фрагмент створеної моделі закритого паркінгу та розміщених в ньому автомобілів [285]

Результати моделювання в разі займання електромобіля на закритому паркінгу проводилося поетапно із збільшенням протипожежної відстані від електромобіля до суміжних автомобілів з кроком 0,5 м. Критичне значення температури визначено на основі показника температури спалаху конструкції бамперу автомобіля із значенням 220 °С.

За результатом моделювання пожежі за другим сценарієм визначено температурні розподіли та теплообмін між суміжними об'єктами під час пожежі електромобіля. На основі даних [280] середня швидкість виділення тепла під час горіння літій іонних акумуляторів становить близько 4 МВт. Пожежне навантаження в середині електромобілю та початкова реакція горіння прийнята як і для першого сценарію. Таким чином, створена модель дозволила відтворити швидкість виділення тепла під час дослідження процесів горіння літій іонних акумуляторів в електромобілях, що приведено на графіку рисунку 3.12.

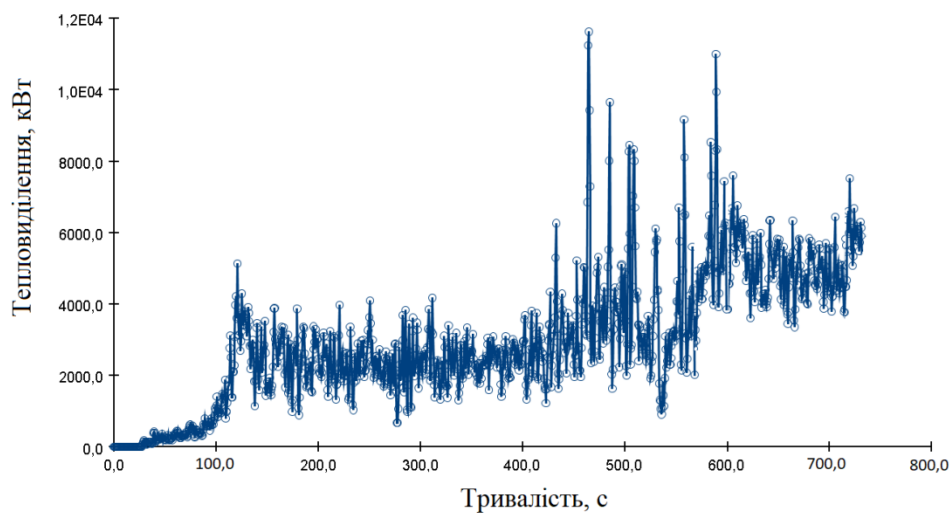


Рисунок 3.12 – Динаміка потужності теплового потоку під час пожежі електромобіля

За результатом проведеного моделювання отримано візуалізацію теплових розподілів від пожежі електромобіля в середині паркінгу у продовж 600 секунд пожежі, що приведено на рисунках 3.13 - 3.17.

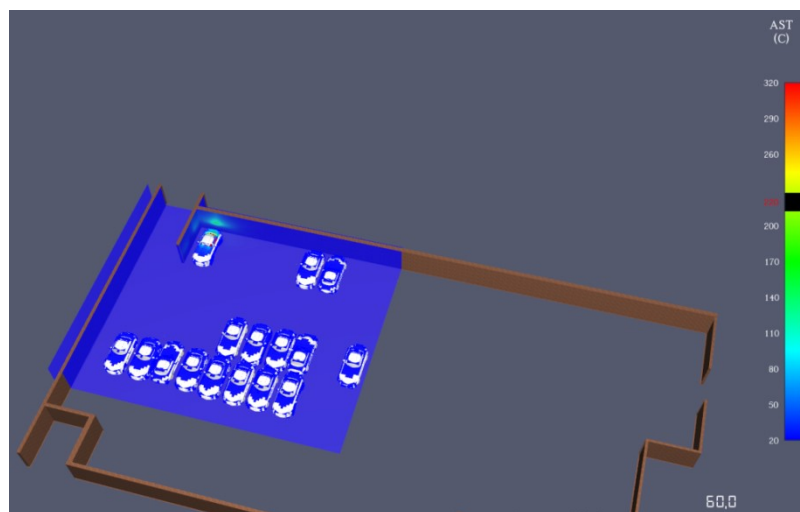


Рисунок 3.13 – Тепловий розподіл від пожежі електромобіля на 60 секунді

На першій хвилині випробування йде розвиток пожежі в середині транспортного засобу.

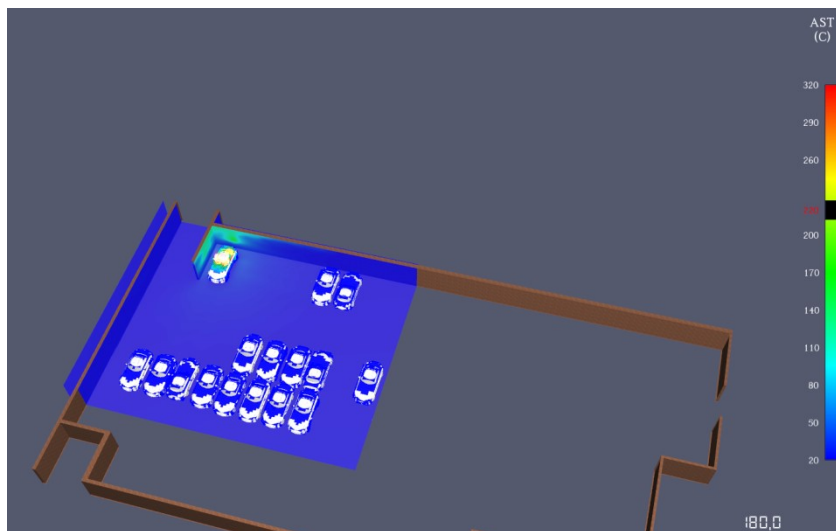


Рисунок 3.14 – Тепловий розподіл від пожежі електромобіля на 180 секунді

Починаючи з 4 хвилини з початку випробування полум'я виривається на зовні електромобіля, а тепловий потік починає діяти на суміжній об'єкти, зокрема на стінку, нагріваючи її до температури 110-140 °С (3.14).

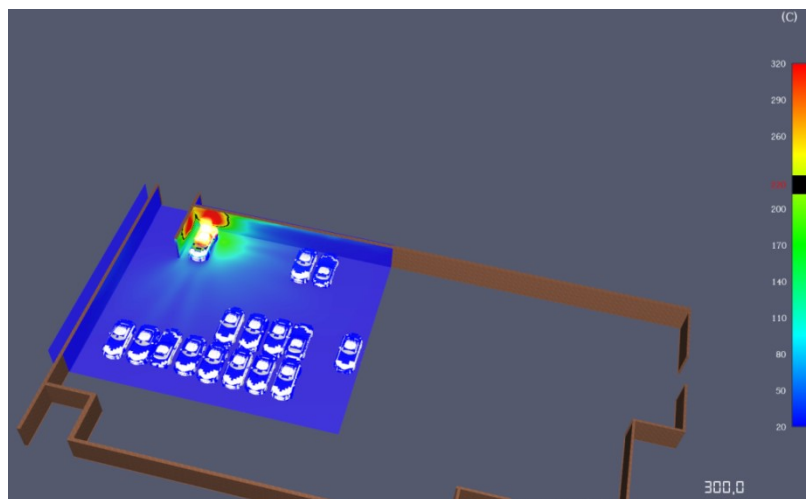


Рисунок 3.15 – Тепловий розподіл від пожежі електромобіля на 300 секунді

Починаючи з 300 с пожежа електромобіля починає стрімко розвиватись, стає чітко видно полум'я, розмір якого збільшується. Температура починає стрімко рости, а тепловий потік діє на суміжні об'єкти, створюючи температуру

на стінці у понад 300 °С. І на 8 хв (420 с) від початку вогневого випробування електромобіль повністю охоплений полум'ям.

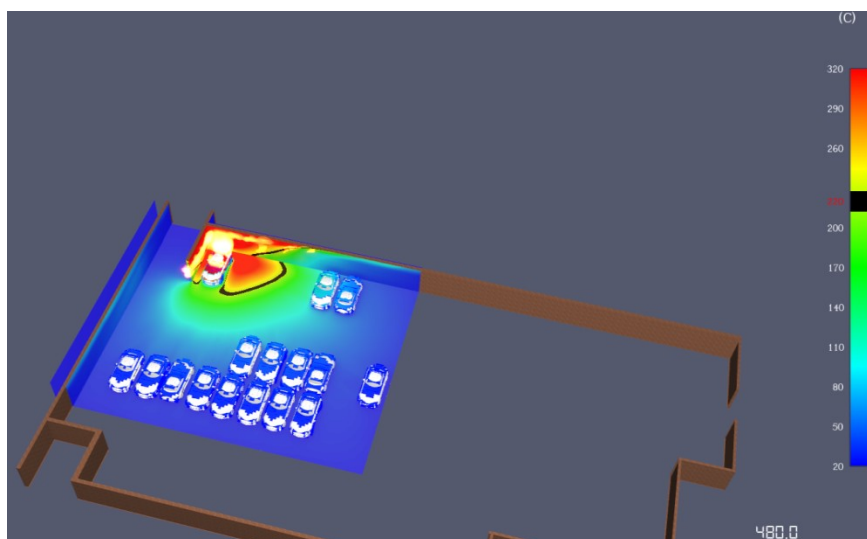


Рисунок 3.16 – Тепловий розподіл від пожежі електромобіля на 480 секунд

На 480с з початку випробування температурне поле поширюється вглиб закритого паркінгу [285].

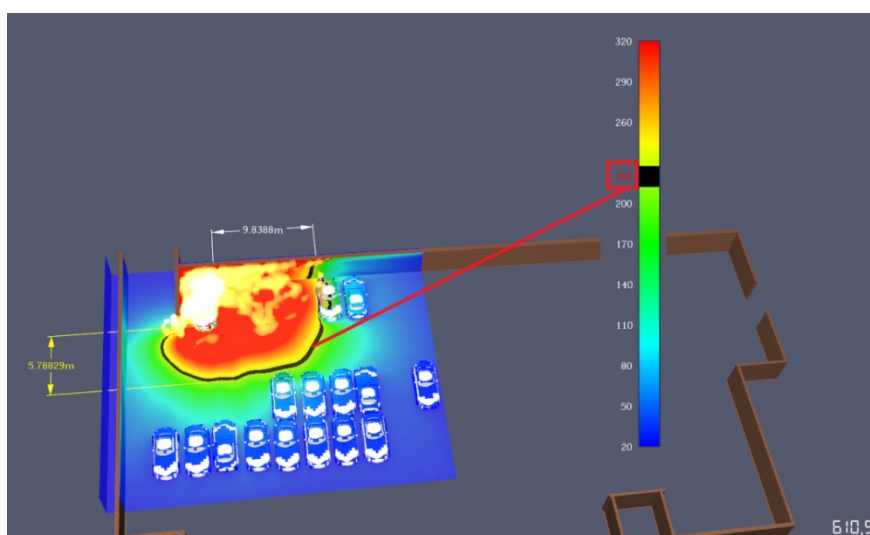


Рисунок 3.17 – Тепловий розподіл від пожежі електромобіля на 610 секунд

На момент прибуття пожежно-рятувальних підрозділів і подачею ними вогнегасних засобів на гасіння пожежі (610 с), полум'я вже охопило сусідній транспортний засіб, який розміщений на відстані 9,83 м.

За результатами моделювання розподілу температурних полів в закритому паркінгу внаслідок пожежі електромобіля Tesla Model 3 встановлено, що критична температура в 220 °C поширюється на відстань до 10 м по флангу і на 6 м по фронту палаючого електромобіля на момент прибуття пожежно-рятувального підрозділу (рис 3.17). Різниця протипожежних відстаней по флангу та фронту пояснюється конструктивними особливостями електромобіля. Тобто зі сторони флангу площа полум'я буде більшою ніж зі сторони фронту електромобіля, що горить, а значить і потужність теплового випромінювання також. Так як, відстань на закритих паркінгах між транспортними засобами становить в межах 0,5–0,8 м, це створює умови для швидкого та успішного поширення пожежі на інші транспортні засоби, ще до прибуття пожежно-рятувального підрозділу [285].

Такі значення отриманих результатів протипожежних відстаней пояснюються наявністю силової акумуляторної батареї, ємність якої може сягати 100 кВт·год і більше, що створює інший характер розвитку пожежі у порівнянні із іншими аналогічними транспортними засобами обладнаними двигунами внутрішнього згорання. Це спричиняє збільшення потужності теплового випромінювання і сумарної енергії тепловиділення внаслідок пожеж такого роду.

Очевидно, що такі протипожежні відстані, які отримані у дослідженні, не дотримуються у закритих паркінгах. Це зумовлено великою кількістю транспортних засобів, недостатньою кількістю паркінгів, в тому числі і закритих. Зокрема це гостро стосується великих міст. Разом з тим, безпекові основи посуваються на другий план, після комерційного зацікавлення, однак це може дорого коштувати згодом. Таким чином, розуміння динаміки розвитку та поширення пожежі електромобілів на закритому паркінгу, а також

забезпечення протипожежних відстаней створить безпечне підґрунтя для всіх, хто використовує такі транспортні засоби та ліквідує події за їх участю.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні різного роду автопаркінгів, та безпечного розміщення у ньому транспортних засобів. Протипожежні відстані між автомобілями на закритих паркінгах можуть враховуватись страховими компаніями при оцінці ризиків пошкоджень автомобілів внаслідок пожеж. А також пожежно-рятувальними підрозділами, які залучаються для гасіння таких пожеж, для врахування, при забезпечення безпеки рятувальників.

Дане дослідження охоплює моделювання пожежі електромобіля Tesla Model 3 на закритому паркінгу. Однак пожежа іншого електромобіля, що має іншу ємність АКБ, очевидно дасть інші теплові характеристики пожежі. Це значить що протипожежні відстані будуть інші. Однак важко вивести середнє значення по теплових характеристиках пожежі електромобілів. Це зумовлено великою різноманітністю модельних рядів електромобілів, а також різним походженням компонентів силових АКБ. Більше того, електромобілі на паливних елементах використовують водень, що створює ще інший сценарій розвитку пожежі таких транспортних засобів. Тому такі особливості створюють труднощі врахувати всі чинники, які впливають на динаміку розвитку та теплові характеристики пожежі.

3.3. Висновки до розділу 3

Результати досліджень запропонованої газо гідродинамічної моделі горіння електромобіля з використанням методів комп'ютерного моделювання дозволяють зробити такі висновки:

1. На підставі здійснено 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.

2. Встановлено, що при пожежі електромобіля, внаслідок дії теплового потоку потужністю 6-8 МВт, досягнення граничного значення температури 120°C на сусідній 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.

3. 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.

4. Доведено ефективність використання газо гідродинамічних моделей та комп'ютерного моделювання при дослідженні процесів виникнення та розвитку пожеж електромобілів з врахуванням їх технічних параметрів та експлуатаційних характеристик, з врахуванням чинників, які впливають на такі процеси розвитку.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

З врахуванням аналізу відомих методик досліджень, які розроблялись та застосовувались науковцями, що займались дослідженням пожежної небезпеки літій-іонних батарей [288-297], виокремлення переваг та недоліків а також з врахуванням основних чинників, які впливають на виникнення їх горіння розроблено комплекс програм експериментальних досліджень, які покликані дослідити температурні межі виникнення процесів горіння літій-іонних акумуляторів електромобілів.

Загальна схема розроблених методик експериментальних досліджень літій-іонних батарей зображена на рисунку 4.1.

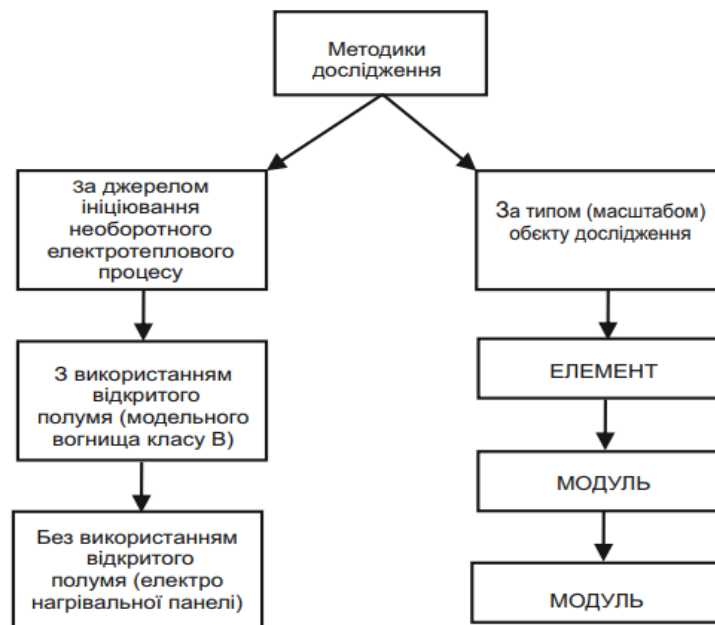


Рисунок 4.1 – Розроблені методики експериментальних досліджень літій-іонних батарей

В основу методики покладено дослідження температурних параметрів процесів, при яких відбувається власне займання літій-іонної батареї, визначення часу та температури її горіння.

4.1. Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням модельного вогнища класу В

Сутність методу полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідження впливу чинників на дані параметри.

Обладнання для досліджень

Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: модельне вогнище пожежі класу В, досліджувані зразки, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

Модельне вогнище це спеціальне вогнище, призначене для моделювання пожежі під час проведення досліджень чи випробувань, розміри, конфігурація, а також горюча речовина якого встановлені стандартом [298].

Під час досліджень в якості модельного вогнища обрані модельні вогнища класів В. Перевагою модельних вогнищ класу В над модельними вогнищами класу А, є те, що вони дають кращу повторюваність теплових характеристик. Це обумовлюється незмінними параметрами горючого. Натомість деревина може бути виготовлена із різних хвойних порід (сосна, ялина, ялівець тощо). Більше того, бруски можуть бути виготовлені також із різного сорту деревини, що і впливає на температурні параметри. Тому виходячи з цього для ініціювання займання обрано модельне вогнище класу В.

Модельне вогнище буде ініціювати займання силових літій-іонних акумуляторів електромобілів. Модельне вогнище створювалось бензином, марки А-92, об'ємом 200 мл, яке поміщалось у металеве деко діаметром 140 ± 3 мм, висотою борта 100 ± 5 мм та товщиною стінки борта $2,0 \pm 0,5$ мм (рис 4.2.). Розміри дека та кількість пального обґрунтовано

експериментальним шляхом з міркувань забезпечення часу горіння модельного вогнища 6–7 хв, а також охоплення дослідних взірців полум'ям.



Рисунок 4.2 – Фото дека вогнища пожежі

Кількість пального, яке поміщалося у деко визначається за допомогою мірної колби із ціною поділки 1 мл.

Підготовка досліджуваних зразків. Для дослідження обрані елементи силових літій-іонних батарей типорозміру 18650 електромобіля Tesla Model S. Елементи мають циліндричну форму діаметром 18 мм та довжиною 65 мм. Ємність складає 3200 мА·год. номінальна напруга – 3,7 В, а максимальна 4,2 В. Катодом є матеріал на основі LiCoO_2 , а матеріалом анода був графіт. Вигляд дослідного елемента зображено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд досліджуваних взірців елементів літій-іонних батарей.

Перший етап підготовки зразків. Підготовлені зразки поміщають у вентилявану шафі для сушіння при температурі $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$ та витримують у ній менше 20 год. Після цього дослідні взірці охолоджують до температури навколишнього середовища, не виймаючи їх з шафи. Також допускається кондиціонування досліджувальних взірців згідно технічних вимог заводу виробника. Після кондиціонування дослідні зразки піддаються зважуванню з похибкою не більше $\pm 0,1$ г. Зразки одного матеріалу не повинні відрізнятись за масою більше ніж на 2%. Зважування кожного елемента здійснюється за допомогою електронної ваги ТВЕ-24, з точністю зважування 0,5 г. На другому етапі визначався стан заряду батарей, а саме на пруги та ємності. Для цього використовується цифровий мультиметр типу UT33C.

З використанням мультиметра силові літій-іонних батареї поділяються на групи, ті які мають 100 % заряду, 50% та 0% заряду відповідно. Власне 100 % заряд батареї, за даними наукових праць [289-291] обумовлює найбільш бурхливий розвиток термодеструктивного процесу, інтенсивніше вивільнення тепла, тобто найгірший сценарій розвитку пожежі.

Для зарядження силових літій-іонних батарей використовувався зарядний пристрій постійного струму, який живився від електромережі напругою 220 В. Для зменшення заряду силових літій-іонних батарей використовувалось навантаження у вигляді лампи розжарення потужністю 100 Вт, та інвертора напруги з ККД 98%. Інвертор забезпечує можливість фіксувати номінальне значення напруги. Зовнішній вигляд якого зображено на рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд утановки для зменшення заряду

елементів літій-іонних батарей

Густина теплового потоку визначалась приладом ВТП-01. Зовнішній вигляд якого відображено на рисунку 4.5.

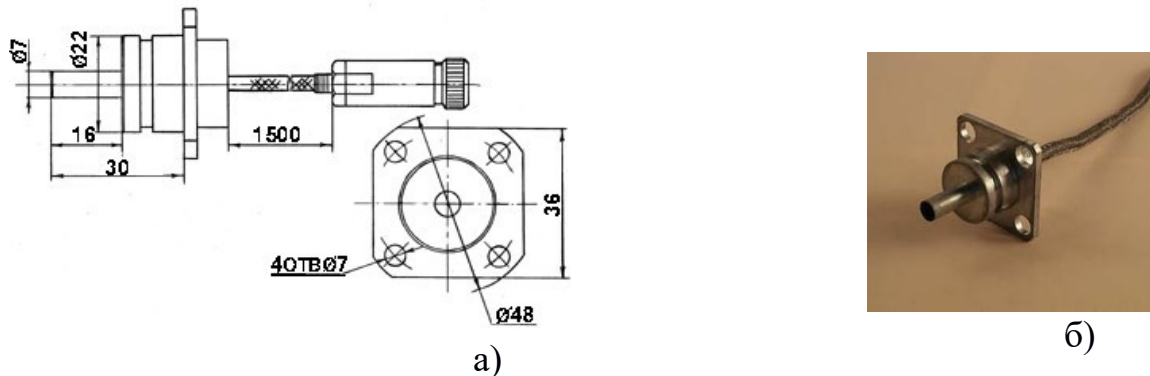


Рисунок 4.5 – Конструктивна схема (а) та фото (б) приймача теплового потоку ВТП-01.

Принцип дії приймача теплового потоку ВТП-01 побудований на визначенні різниці температури, між центром і боком тонкого константанованого диску (а), яка виникає внаслідок теплової дії від полум'я чи іншого джерела тепла. Диск, що закріплений на мідному тепловідводі (рисунок 4.5 (б)). За допомогою термопари, яка утворена мідними термоелектродами (3) здійснюється вимірювання різниці температур, про які йшлося вище.

Густина сумарного теплового потоку, вимірюється приймачем теплового потоку ВТП-01 знаходять за формулою 4.1:

$$q = E/k \cdot 10^3 \quad (4.1)$$

де q – густина сумарного теплового потоку, кВт/м² ;

E – вихідний сигнал приймача теплового потоку, мВ ;

k – чутливість приймача теплового потоку , мкВ·м²/кВт.

Для зменшення похибки вимірювань приймача теплового потоку ВТП-01 був термоізований шаром мінеральної вати, яка покрита фольгою та закріплювався на штативі. Зовнішній вигляд приймача теплового потоку ВТП-01 зображено на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд приймача теплового потоку ВТП-01.

Температуру визначали за допомогою термопар типу хромель-алюмель, які підключались до регулятор-вимірювача температур РТ-0102 через блок комутації. Зовнішній вигляд регулятор-вимірювача температур РТ-0102 та блоку комутації наведено на рисунку 4.7.



Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд регулятор-вимірювача температур РТ-0102 та блоку комутації

Розподіл температурного поля, а також температуру зовні осередка горіння фіксувалось за допомогою телевізійної камери LEADER TIC 3, з діапазоном

вимірювання температур $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$. З метою обґрунтування місця розміщення випробувальних зразків і кількості пального, яке заливалось у деко проведено експериментальні дослідження із визначення розподілу температур відносно джерела нагрівання.

Для цього у деко було поміщено 200 мл пального і над деком помістились 4 термопари. Перша термопара розміщена по центру дека по горизонталі із верхнім краєм стінки дека. Кожна наступна термопара розмішувалась на 7 см ($L1=7\text{ см}$) вище над першою термопарою, так як це зображено на рисунку.

Пристрій для визначення густини теплового потоку ВТП-01 розміщувався на відстані 30 см ($L3$) по вертикалі та 20 см від центру ($L2$) дека по горизонталі (рис. 4.8).

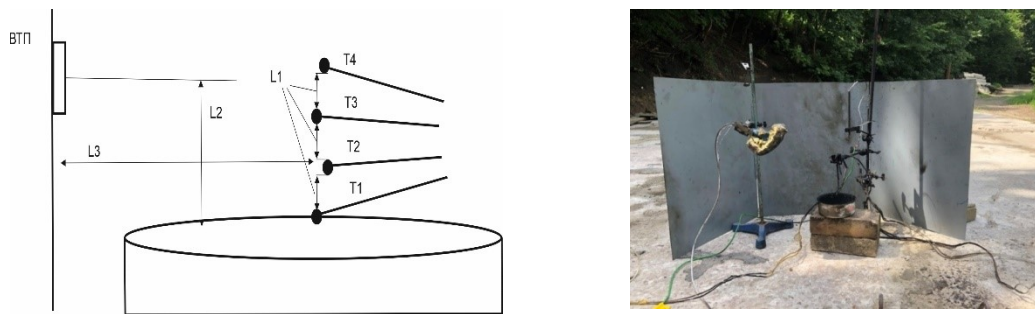


Рисунок 4.8 – Схематичне а) та натурне б) зображення розміщення термопар відносно дека

На рисунку 4.9 представлено фото під час проведення експерименту із визначення температурного розподілу від модельного вогнища пожежі класу В.



Рисунок 4.9 – Фото під час проведення експерименту

Результати досліджень представлені на рисунку 4.10. Час повного вигорання пального складав 11 хв, 20 с. Найбільша температура досягалась на 3-4 хв від початку випробувань. Найбільше значення температури фіксувала термопара T2, яка розміщувалась на висоті 7 см від дека, що пікові значення якої становило близько 1100 °С, а усереднені – 600-650 °С. Значення термопари T3, як розміщувалась на висоті 14 см не значно відрізнялось від значення термопари T2 і усереднене значення становило в мажах 580-650 °С, а максимальна – 1050 °С. Термопара T1 розміщувалась на одній горизонталі із краєм дека і фіксувала максимальну температуру до 550 °С, а усереднена була в межах 400-420 °С.

Таким чином встановлено, що для модельного вогнища класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92, який поміщений в круглий деко діаметром 140 мм максимальна температура горіння досягається на відрізьку 7-14 см по вертикалі від краю дека і складає 1050-1100 °С, а усереднені 600-650 °С (рис 4.10).

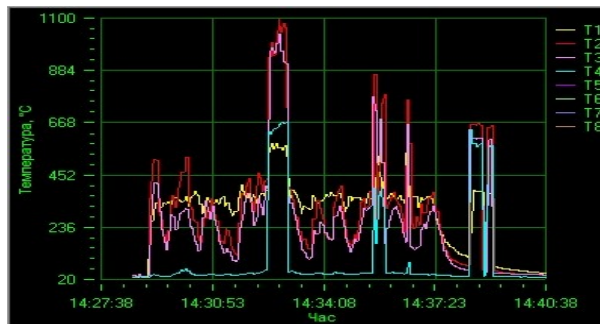


Рисунок 4.10 – Результати досліджень щодо обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела нагрівання

Таким чином обґрунтовано розміщувати дослідні зразки у модельному вогнищі пожежі класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92 у деко діаметром 140 мм на висоті 7-14 см по вертикалі від верхнього краю дека.

На випробувальні зразки елементів літій-іонних батарей дві термопари, як

зображено на рисунку 4.11.

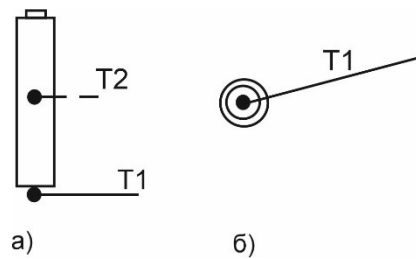


Рисунок 4.11 – Схема улаштування термопар на випробувальних зразках а) вигляд збоку б) вигляд знизу

Термопара Т1 фіксує температуру дії модельного полум'я на силові АКБ а також температуру нагрівання батарей на межі «полум'я-батарея». Термопара Т2 фіксує температуру нагрівання в середині модуля батарей.

Термопара Т3 (рис. 4.12) розміщується на відстані L_2 ($L_2=7$ см) від верхнього краю силових АКБ і фіксує температуру полум'я, яке утворено модельним вогнищем пожежі і полум'ям, яке у може утворитись внаслідок горіння силових АКБ [299].

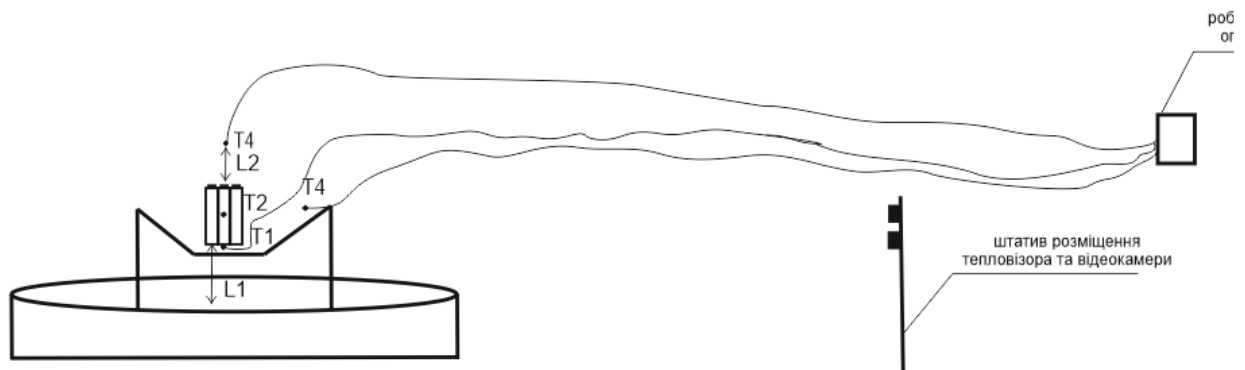


Рисунок 4.12 – Схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Випробування елементів літій-іонних батарей здійснюється у трьох положеннях: вертикальному анодом до джерела тепла; вертикальному катодом

до джерела тепла; горизонтальному.

Тепловізор фіксуватиме зміну розміру полум'я і термографічне зображення розвитку горіння. Відеокамера фіксуватиме динаміку розвитку полум'я у часі. Розміщується телевизор і відеокамера на штативі із врахуванням вимог їх безпечної роботи.

Технічні характеристики ЗВТ, які встосовуються під час натурних досліджень, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики обладнання для досліджень

№ п/п	Найменування обладнання для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1	2	3	4	5	6
1.	Пристрій для вимірювання теплового потоку	Густина теплового потоку			
2.	Пристрій ВТП-01	Густина теплового потоку	0÷630	кВт/м ²	±5%
3.	Термопари ТХА	Температура	-40÷1350	0 _С	±2,5 %
4.	Регулятор-вимірювач РТ 0102-8-К	Температура	-40÷1350	0 _С	±2,5 %
5.	Фото- відеокамера	Матриця	14,2	пікселей	
6.	Тепловізор	Матриця	320 x 240	пікселей	
7.	Ваги ТВЕ 150	масса	0.04 ÷120.0кг	кг	

Основні вимоги до проведення експериментальних досліджень

Для відтворюваності експериментальних результатів дослідження слід проводити не менше трьох разів у безвітряну погоду.

Підготовка для проведення досліджень:

1. Підготовлюються випробувальні зразки.
2. Здійснюється зважування та вимірювання стану заряду дослідних зразків.
3. Розташовується на вогневій площадці модельне вогнище пожежі
4. Розміщуються досліджувальні зразки згідно із схемою
5. Установлюються засоби виміральної техніки (термопари, приймачі теплового потоку) згідно із схемою наведеною на рисунку.
6. Термопари з'єднуються з регулятор-вимірвач РТ 0102-8-К.
7. Готується обладнання для проведення фото- та відео зйомок.
8. Встановлення тепловізора на штатив таким чином, щоб уникнути його падіння.
9. Готуються переносні вогнегасники.

Алгоритм проведення досліджень:

1. Здійснюється вимірювання температури та вологості повітря, швидкості вітру, а також атмосферного тиску.
2. Здійснюється вимірювання початкових значень по показниках відповідних термопар.
3. Після впевненості, що всі термопари працюють коректно, заповнюються деко модельного вогнища водою і після цього доливається визначена кількість пального, причому не більше ніж за 3 хвилини до початку проведення експерименту.
4. Вмикаються пристрої фото та відео-фіксації, контрольню вимірально пристрої у режим реєстрації, та за допомогою факела підпалюється модельне вогнище пожежі класу В.
5. Під час використання тепловізора виконуються роботи з його підготовки

до роботи а саме, під'єднується акумуляторна батарея, вставляється карта пам'яті у слот пам'яті, а також адаптуються налаштування тепловізора до умов та особливостей проведення експерименту.

6. Під час проведення експериментальних досліджень температурні та теплові параметри реєструються у відповідну базу.

7. Реєстрація температури здійснюється з інтервалом не більше, ніж 1 с. Відеозйомка проводиться з метою фіксації процесу перебігу термодеструктивного процесу у досліджуваних зірцях літій-іонних батарей, а також з метою визначення геометричних параметрів полум'я.

8. Дослідження тривають до моменту закінчення перебігу термодеструктивного процесу у дослідних зірцях літій-іонних батарей та припинення їх горіння.

Оцінка результатів досліджень

За результатами експериментальних досліджень теплового впливу на виникення та розвиток термодеструктивного процесу у дослідних зірцях літій-іонних батарей для кожного моменту часу t_j фіксується температура θ_j поверхні дослідного зразка у визначених точках, густина теплового потоку (q_j), а також геометричні параметри полум'я (h_j , δ_j). Отримані результати фіксуються у відповідному журналі.

Після цього визначається похибка експериментальних досліджень за рівністю [300]:

$$\Delta A = \pm k \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (4.2)$$

де ΔA – абсолютна похибка досліджуваних величин;

ΔA_1 – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

ΔA_2 – похибка вимірювальних пристроїв

k – коефіцієнт імовірності ($k=1,1$ пр $P=0,95$).

За отриманими експериментальними даними визначається середнє значення температури \bar{t}_j :

$$\bar{t}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} t_{ji} \quad (4.3)$$

де n_j - кількість результатів випробувань.

Оцінка дисперсій результатів випробувань S_j^2 визначають з рівності

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t}_j)^2. \quad (4.4)$$

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду, t_{jmin} розраховують критерій Граббса, G_{jmin} :

$$G_{jmin} = \frac{\bar{t}_j - t_{jmin}}{S_j} \quad (4.5)$$

Отримані значення G_{jmax} та G_{jmin} прирівнюються з відповідними табличними значеннями. Для рівня значущості 0,05 та об'єму вибірки з 5 елементів (серії із п'яти експериментальних досліджень) мінімальне та максимальне табличне значення відповідно становить 1,715 та 1,764. Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} виявляться меншими (або рівними) за критичні значеннями, які вказані у таблиці, то приймається, що результати випробувань не містять викидів та квазівикидів. Схему реалізації щодо визначення в результатах випробувань викидів та квазівикидів за критерієм Граббса наведено на рисунку 4.13.

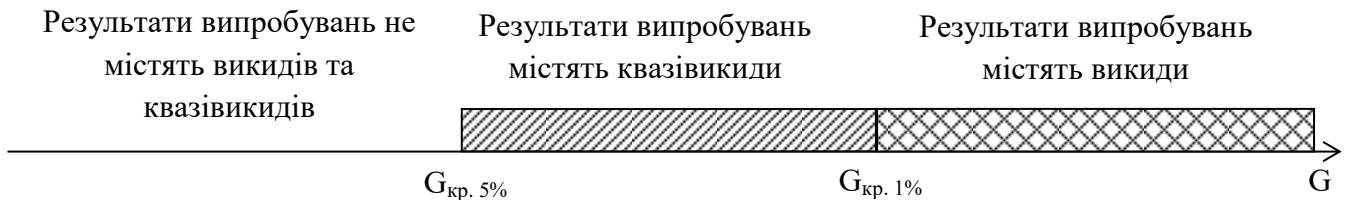


Рисунок 4.13 – Визначення в результатах випробувань викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

Для формування висновку проводиться не менше як три експериментальні дослідження для ідентичних дослідних зрізків з метою забезпечення відтворюваності результатів.

4.2. Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі

Дана методика розроблена з метою обґрунтування проведення експериментальних досліджень літій-іонних батарей (LIB) електромобілів під дією нагрівальної панелі для виявлення впливу потужності нагрівання на час виникнення термодеструктивного процесу у дослідних зрізках, обґрунтування критеріїв які характеризують його виникнення, розміщення засобів вимірювальної техніки, а також дослідження впливу чинників на дані параметри без використання джерела займання [301, 302].

Обладнання для досліджень

Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: пристрій для нагрівання, досліджувані зразки, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок. Нагрівання досліджувальних зразків здійснюється за допомогою електронагрівальної плити потужністю 1,5 кВт

Підготовка досліджуваних зразків.

Підготовка дослідних зразків здійснюється з дотриманням алгоритму, який описаний у 4.1. Тобто зразки кондиціонують, піддаються зважуванню за допомогою цифрових ваг, а також вимірюванню стану заряду. Для проведення досліджень підготовлюють батареї із 100 % заряду 50% та повністю розряджені не менше ніж по три одиниці для кожної групи заряду.

Розміщення дослідних зразків та термопар на них.

На досліджувальному зразку розміщуються три термопари. Одна термопара кріпиться до краю батареї, яка матиме контакт з електронагрівальною плитою, друга посередині батареї, третя термопара на необігрівальній стороні батареї. Четверта термопара кріпиться до нагрівальної електроплити і фіксує її температуру. На рисунку 4.14 схематично зображено розміщення дослідного зразка і термопар на ньому.

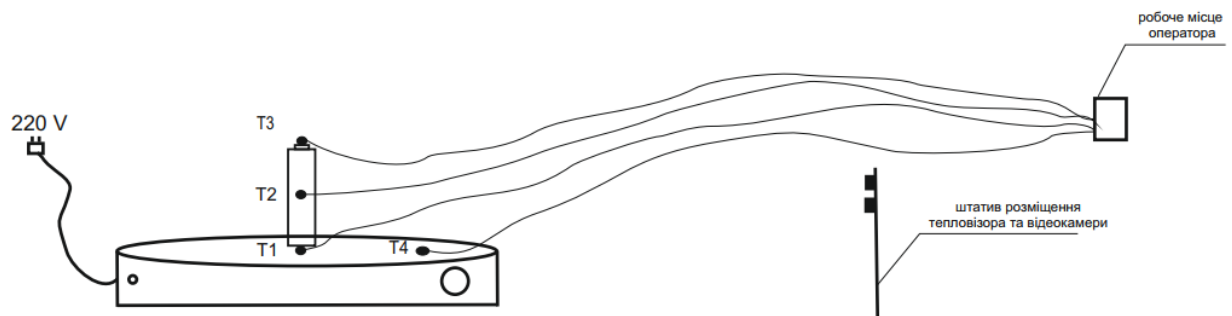


Рисунок 4.14 – Схематичне зображення розміщення дослідного зразка і термопар

Для запобігання розсіювання тепла досліджувальні зразки огортаються мінеральною ватою, а нагрівальна поверхня плити обкладаються теплоізоляційним матеріалом мулітокремнеземним фетром МКРФ-100 товщиною 20 мм.

На рисунку 4.15 зображено дослідне обладнання а також теплоізольована дослідна батарея.



Рисунок 4.15 – Фото дослідного обладнання для дослідження досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів без використання джерела займання

Досліджувальні зразки розміщуються у трьох положеннях на електронагрівальній плиті: вертикально анодом до джерела тепла; вертикально катодом до джерела тепла у; горизонтально.

Для кожного заряду батареї і розміщення проводиться не менше три дослідження.

Засоби вимірювальної техніки

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час натурних вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики приведені в таблиці 4.2.

Вимоги до проведення досліджень.

Кожен етап натурних досліджень проводиться не менше трьох разів. При чому електронагрівальна плита після кожного дослідження охолоджується до кімнатної температури, і вже після цього поміщається на її поверхню наступний дослідний зразок.

Підготовка до проведення досліджень.

1. Підготовлюються силові АКБ
2. Здійснюється монтаж термопар згідно із рисунком і теплоізоляція батареї мінеральною ватою.
3. Встановлюються засоби вимірювальної техніки згідно із схемою зображеною на рисунку. Термопари з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», і перевіряється їх працездатність.

4. Готується обладнання для проведення фото- та відео зйомок.

5. Встановлення тепловізора на штатив таким чином, щоб уникнути його падіння.

6. Готуються первинні засоби пожежогасіння.

Послідовність проведення досліджень:

1. Проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, вологості повітря, атмосферного тиску.

2. Проводиться вимірювання і реєстрація початкових значень температур за показниками усіх термопар та теплового випромінювання за показниками приймачів теплового випромінювання.

3. Вмикаються вимірювально-обчислювальні пристрої у режим реєстрації, включається відеозйомка та вмикається електронагрівальна плита.

4. Роботи з використанням тепловізора:

–під'єднується акумулятор;

–знімається захисна кришка об'єктиву;

–встановлюється карта пам'яті;

–вмикається тепловізор;

–виконуються базові налаштування.

–для більш якісного знаття температур з поверхні досліджуваного зразка виставляється коефіцієнт випромінювання згідно з рекомендаціями по використанню приладу (для деревини коефіцієнт випромінювання становить 0,74);

–вмикається запис вимірювання;

–під час проведення вимірювань при необхідності можлива зміна налаштувань та положення приладу відносно дослідних зразків та джерела теплового випромінювання;

–після закінчення дослідження зберігається запис та складається

обладнання приладу.

5. Під час проведення досліджень інформаційно-вимірною системою вимірюють та реєструють значення температур на обігрівній поверхні дослідного зразка та потужність теплового потоку від модельного вогнища пожежі.

6. Реєстрація температури і теплового потоку проводиться з інтервалом не більше, ніж 1 хв. Фотозйомки проводимо в момент відкривання вентиляційного отвору чи виникнення займання АКБ.

7. Дослідження тривають до повного вигорання досліджувального зразка. А у разі відсутності його горіння – не менше 10 хв при максимальній температурі електронагрівальної плити.

Оцінка результатів дослідження проводиться у послідовності наведених у розділі 4.1 цієї роботи.

4.3.Методика натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля

Сутність запропонованої методики полягає у визначенні температури спрацювання вентиляційних отворів, займання, виникнення термодеструктивного процесу, дослідженні впливу чинників на ці параметри, а також розкритті особливостей розвитку та поширення горіння по модулі літій-іонної батареї електромобіля. Для створення теплового потоку на досліджуваний взірець необхідно визначити джерело тепла та обґрунтувати його параметри. В якості наукової розвідки вибрані модельні вогнища класу С. Перевагою таких модельних вогнищ є простота виконання газової установки-пальника, можливість регулювати подачу газу тощо. У якості горючого газу обрано зріджений нафтовий газ пропан-бутан, також відомий як LPG (liquefied petroleum gas) через його доступність, прийнятну температуру горіння (1960 °C) і питому теплоту згорання (46,23 МДж/кг) [303, 304].

На рисунку 4.16 наведено загальну схему влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, 1 – модуль силової АКБ, яка піддається дослідженню, 2 термопари (кількість зображено умовно), 3 перетворювач вимірювальний інтелектуальний ПВІ - 111 А, 4 мультиметр цифровий, 5 електричний провідник, 6 балон із зрідженим пропаном, 7 пальник з вентиляем, 8 – металева основа для розміщення дослідного взірця на штативі. Причому розмір металевої основи має бути не менше ніж на 50 мм більшим від розміру досліджуваного модуля.

Місце перед початком проведення експерименту наведено на рисунку 4.17

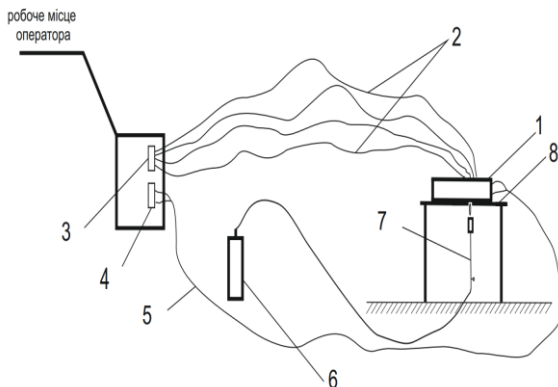


Рисунок 4.16 – Загальна схема влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

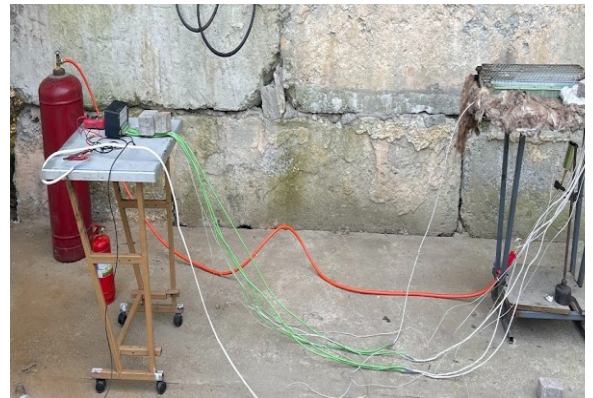


Рисунок 4.17– Натурний вигляд обладнання та засобів вимірювальної техніки перед початком проведення експерименту

У металевій основі 8, на яку поміщається модуль, зроблено отвір, такого розміру щоб забезпечити вплив полум'я від пальника для створення термодеструктивного процесу у одному з елементів модуля. Між сталевим листом та модулем розміщено термоізоляційний шар (за винятком площі отвору) з мінеральної вати чи іншого термоізоляційного негорючого матеріалу товщиною не менше 3 см та коефіцієнтом теплопровідності не більше 0,045 Вт/м·°С. Ізоляційний матеріал використовується для захисту від нагрівання

поверхні модуля, поза площею отвору у сталевому листі. Товщина ізоляційного матеріалу та коефіцієнт теплопровідності обґрунтований температурними межами виникнення термодеструктивного процесу, а також часом проведення експерименту з врахуванням розміщення пальника.

Для розміщення термопар зроблені наскрізні отвори у досліджуваному модулі, діаметром який забезпечить розміщення термопар, але не більшим ніж 3 мм в діаметрі. Отвори слід здійснювати у місцях, як показано на рисунку 4.18 (точка 1). Отвір більший ніж 3 мм в діаметрі призведе до руйнування корпусу елементів літій-іонних батарей та виникання короткого замикання (стосується модулів літій іонних елементів АКБ усього модельного ряду електромобілів Tesla, де використовуються елементи живлення формату 18650). Отвори слід здійснювати у одній секції модуля, де всі елементи з'єднанні паралельно.

При створенні отвору необхідно враховувати розміщення між рядами елементів системи рідинного охолодження модуля. Отвори слід робити таким чином, щоб вони не проходили через рідинну систему охолодження [305, 306], що забезпечить збільшення точності вимірювань через уникнення інерційності нагрівання металеві системи охолодження, по якій циркулює антифриз, що зображено на рисунку 4.19 точкою 2.

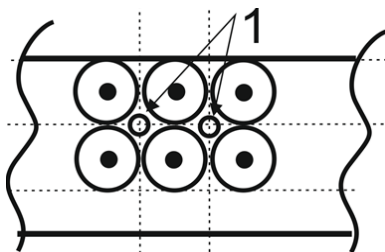


Рисунок 4.18 – Схематичне зображення місць здійснення наскрізних отворів відносно елементів модуля.

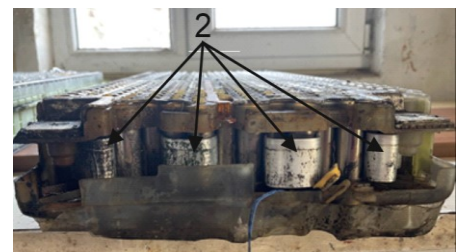


Рисунок 4.19 – натурний вигляд системи рідинного охолодження елементів модуля.

Термопари у досліджуваному модулі розміщуються так, як показано на рисунку 4.20, де рисунок I – вигляд збоку, а рисунок II – вигляд знизу. Натурний вигляд розміщення отворів та влаштування термопар наведено на рисунку 4.21 де рисунок I) вигляд зверху, а рисунок II) вигляд знизу.

Термопари розміщуються навколо елемента, на який спрямовується теплова дія полум'я газового пальника. Термопара T1 фіксує температуру полум'я, термопари T1 та T2 розміщуються з обігрівальної сторони модуля на

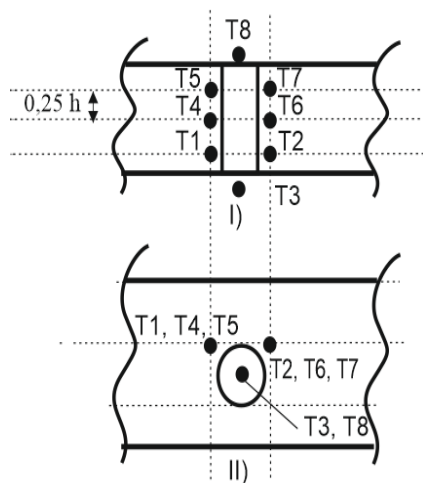


Рисунок 4.20 – Схематичне влаштування термопар.



I)



II)

Рисунок 4.21 – Натурний вигляд влаштування термопар.

відстані $0,25 h$ від краю модуля (де h – товщина модуля), термопари T4 та T6 посередні модуля, термопари T5 та T7 розміщуються з необігрівальної частини модуля на відстані $0,25 h$ від краю модуля. Термопара T8 фіксує температуру на необігрівальній поверхні модуля.

З метою визначення внутрішнього короткого замикання, яке виникає внаслідок руйнування сепаратора та замкнення катода та анода літій-іонного елемента використовується цифровий мультиметр. Цифровий мультиметр підключається до полюсів літій-іонного елемента за допомогою двожильного мідного провідника діаметром $1,5 \text{ мм}^2$ (з метою зменшення опору на

провіднику та підвищення точності вимірювань) та визначає спад напруги на елементі. Точність вимірювань цифрового мультиметра має становити не більше ніж 0,01 В.

Пальник підбирається таким чином, щоб витрата газу, який горить забезпечував прогрів елементів модуля літій-іонної батареї не менше як 0,1 °С/с. Це значення обґрунтоване у науковій праці [307]. Згідно з першим законом термодинаміки, роблячи припущення, що вся теплова енергія йде на нагрівання дослідного взірця, необхідну витрату газу, необхідного для нагрівання, можна визначити з рівності (4.6):

$$w = 10^3 \frac{c \cdot m \cdot dt}{q \cdot dT} \quad (4.6)$$

де w – масова витрата газу, г/с; c – усереднена питома теплоємність досліджуваного взірця, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m – маса досліджуваного взірця, кг; t – температура досліджуваного взірця, К; q – питома теплота згоряння газу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; T – час горіння пальника, с.

Відповідно до необхідної витрати газу підбирається пальник необхідних розмірів. Знаючи теоретичну витрату газу на пальнику експериментальним шляхом визначається коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище та нагрівання інших конструктивних елементів дослідної установки. Для цього влаштовується дослідна установка, згідно із описом вище, лише на місці дослідного взірця розміщується деко з водою масою, що дорівнює масі елементів на які буде діяти газовий пальник. Визначається початкова температура води з використанням рідинного термометра а також маса балона до початку експерименту та запалюється пальник на час 10 хв. Після цього вимірюється температура води в деку та втрата маси балона зі зрідженим нафтовим газом. Причому точність ваг має становити не більше 10 г. Для контролю кількості використаного газу

допускається використовувати витратомір. Коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище, можна знайти з рівності (4.7):

$$\zeta = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot dt_1}{10^3 w \cdot q \cdot dT} \quad (4.7)$$

де ζ – коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище; c_1 – питома теплоємність води, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m_1 – маса води, кг; t_1 – температура води, К.

Тому з врахуванням коефіцієнта ζ рівність (4.6) набуде вигляду (4.8):

$$w = 10^3 \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{c \cdot m \cdot dt}{q \cdot dT}. \quad (4.8)$$

З метою визначення відстані від пальника до досліджуваного модуля доцільно провести його калібрування та визначити зону, де температура горіння є максимальною. Очевидно, що зона максимальної температури полум'я пальника залежить від розмірів полум'я, на які впливає масова витрати газу. В свою чергу, на масову витрату газу впливає маса елемента який нагрівається полум'ям пальника. Після визначення зони з найвищою температурою горіння пальник розміщується таким чином, щоб досліджуваний модуль власне потрапляв у зону з найвищою температурою горіння.

Дослідження модулів також можна проводити з без використання відкритого полум'я, а з використання електронагрівальної панелі. На рис. 4.22. наведено загальну схему проведення експерименту при використанні електронагрівальної панелі, де a – ширина дослідного взірця, b – довжина, h – висота (модуля чи АКБ).

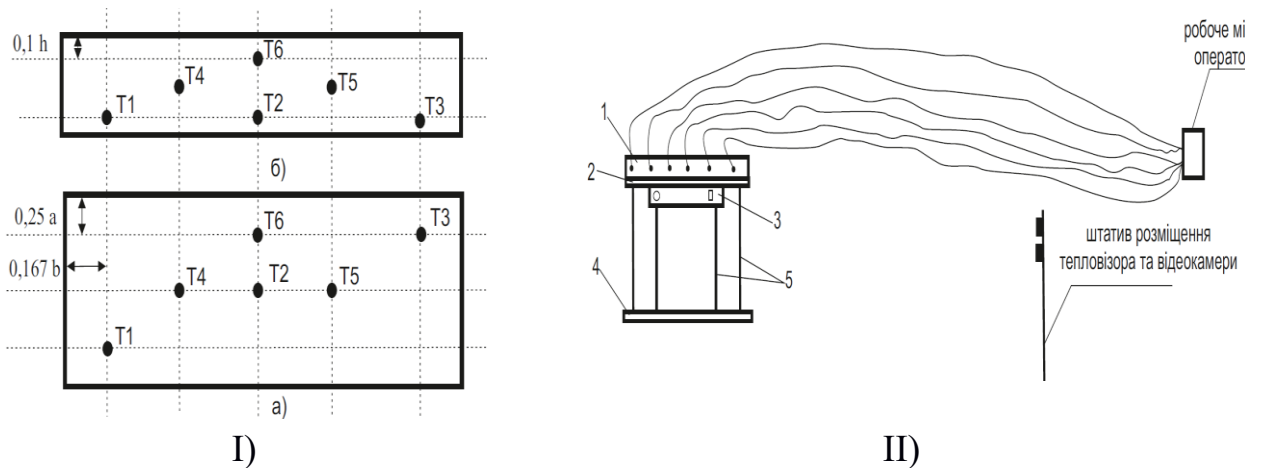


Рисунок 4.22 – I) схему розміщення термопар на дослідному взірці (а) – вигляд зверху б) – вигляд в розрізі); II) схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Розміщення та кількість термопар на досліджуваному взірці обґрунтовано експериментальним шляхом [306].

На рисунку 4.22 II) наведено загальна схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, де 1 – досліджуваний взірець, 2 – металевий лист, 3 – електронагрівальна панель, 4 – електронна вага, 5 – штативи-підставки. Причому забезпечена можливість проводити зважування дослідного взірця на всьому етапі проведення експериментальних досліджень. Дана схема розміщення може бути видозмінена без втрати функціонального призначення основних елементів.

На підставі сучасних аналізу наукових праць встановлено, що потужність електронагрівальної панелі для оптимального прогріву дослідного взірця повинна становити в межах $3-5 \text{ Вт/см}^2$ [308, 309].

Електронагрівальна панель повинна впливати на всю площу дослідного взірця та мати можливість змінювати потужність нагріву. За неможливості використати електронагрівальну панель необхідних розмірів допускається використовувати між електронагрівальною панеллю па дослідним взірцем металевий лист із коефіцієнтом теплопровідності не менше $200 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$. Для цього добре підходять сплави на основі алюмінію. При цьому слід врахувати поправку по потужності електронагрівальної панелі на нагрівання металевого

листа.

Перед початком проведення експерименту відбирається не менше ніж три модулі літій-іонної батареї електромобіля. Модулі мають бути ідентичні за розміром, ємністю та з однаковим станом заряду. Перед дослідженням модулі зважують.

Послідовність проведення досліджень. Не менше ніж за 24 год до початку проведення досліджень відібрані ідентичні модулі з силової АКБ електромобіля поміщаються у вентилявану камеру при температурі 18 °C (± 2 °C) для забезпечення відтворюваності результатів дослідження. Здійснюється підготовка ЗВТ, газового пальника, штативів, пристроїв відеофіксації.

Після цього підключаються термопари до вимірювального перетворювача, який власне і відображає та фіксує значення температури на термопарах, та перевіряється їхня працездатність і коректність підключення. Для цього необхідно подіяти на кінці термопар невеликим джерелом тепла (полум'ям сірника). При цьому значення на відповідній термопарі має відхилитися у більшу сторону.

Реєструються показники навколишнього середовища, а саме: температура, вологість повітря, швидкість вітру, значення атмосферного тиску. Після цього експериментальним шляхом визначається коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище. Маючи значення коефіцієнта визначається необхідна масова витрата газу, за якою підбирається газовий пальник відповідного конструктивного виконання та виставляється на вентилі потрібна витрата газу.

Після цього здійснюється калібрування газового пальника на визначення зони максимальної температури горіння.

Наступним етапом є утворення наскрізних отворів у модулі, для розміщення в них термопар, з врахуванням вищеописаних особливостей. Розміщується металевий лист з отвором над газовим пальником, на який забезпечується відповідна подача газу. Металевий лист застеляється шаром термоізоляційного матеріалу (за винятком отвору) на який поміщається

дослідний літій-іонний модуль від АКБ електромобіля. Впевнившись, що всі термопари працюють коректно, їх розміщаємо у модулі, за схемою, що зображена на рис 5-6. Після розміщення термопар на елементі модуля, на який буде діяти полум'я пальника, під'єднуємо цифровий мультиметр. Цифровий мультиметр під'єднується до катода та анода елемента модуля, на який буде діяти полум'я пальника. Після цього під отвір металевого листа влаштовується газовий пальник, на відповідну висоту, який підключається до балона із зрідженим нафтовим газом.

Переконавшись, що всі ЗВТ влаштовані і працюють коректно, вмикається відеокамера, секундомір і відкривається вентиль подачі газу на пальник та відбувається його підпалення з використання підготовленого факела.

Під час проведення експериментальних досліджень відбувається фіксація температури на термопарах, напруги на елементі модуля, а також час проведення дослідження, з частотами не менше 1 Гц, за якими будуються графічні залежності.

Ключові моменти такі, як час та температура спрацювання вентиляційного клапана, викид вентиляційних газів, займання/горіння, тощо заносяться у протокол випробування за формою що наведено у таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Форма протоколу випробувань

	Температура, °С	Час, с
Початок падіння напруги		
Завершення падіння напруги		
Спрацювання вентиляційного клапана		
Викид вентиляційних газів		
Полум'яне горіння вентиляційних газів		
Вибух		
Спрацювання вентиляційного клапана і-го елемента		
Полум'яне горіння модуля		

Після спрацювання вентиляційного отвору третього елемента модуля не залежно від того чи відбулось полум'яне горіння чи не відбулось, подача газу у пальник припиняється шляхом перекидання вентиля подачі газу на балоні та відбувається спостереження за розвитком термодеструктивного процесу. На підставі чого робиться висновок про її поширення або не поширення по усьому модулі силової АКБ електромобіля.

Експеримент проводиться до моменту повного вигорання модуля або припинення термодеструктивного процесу. Припинення термодеструктивного процесу вважається падіння температури на модулі нижче 80 °С та відсутній її ріст впродовж 6 год. Контроль температури модуля доцільно спостерігати з використанням тепловізійної камери LEADER TIC 3 (або аналог), з діапазоном вимірювання температур до 1250 °С. Для достовірності отриманих результатів дослід слід проводити не менше ніж три рази.

Після цього для кожної з термопар, за результатами трьох експериментів визначають середні значення та дисперсію результатів випробувань. Для визначення викидів чи квазівикидів внаслідок некоректної роботи ЗВТ або впливу на них інших непередбачуваних чинників доцільно розраховувати критерій Грабса, за методикою яка описана у розділі 4.1.

4.4 Методика натурних вогневих досліджень процесів гасіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля

Пожежі літій-іонних АКБ є гібридними, тобто включають горіння твердих речовин (клас пожежі А), горіння рідин (клас пожежі В), горіння газів (клас пожежі С) та горіння металів (клас пожежі D) [310-312].

Власне правильний вибір вогнегасної речовини, яка здійснює найкращий вогнегасний ефект при гасінні пожеж літій-іонних АКБ, створює передумови для підвищення пожежної безпеки об'єктів, де влаштовано системи акумуляування електроенергії.

У роботі [313] вказано, що зазвичай в акумулювальних станціях електроенергії використовують газові системи пожежогасіння, а як вогнегасну речовину застосовують азот та вуглекислоту. Ефективність використання вуглекислоти для гасіння пожеж літій-іонних АКБ окреслено також у науковій праці [314].

Автори роботи [315] розробили на основі калій-алюмінієвого карбонату вогнегасний порошок з покращеною температурною стійкістю для гасіння літій-іонних АКБ.

У статті [316] досліджено позитивний вплив фторовмісних вогнегасних речовин на вогнегасний ефект при гасінні літій-іонних АКБ. Крім того, низка досліджень показали, що матеріали, які містять фтор, можуть блокувати ланцюгову реакцію під час згоряння літій-іонних АКБ, не руйнуючи електро-обладнання [317, 318].

Ефективність гасіння літій-іонних АКБ рідкими вогнегасними речовинами, до основного складу яких входить вода, описано у наукових працях [319, 320]. У роботі [321] проведено дослідження синергічного впливу вуглекислоти та розпиленої води на гасіння та охолодження літій-іонних АКБ. Низка досліджень показала, що використання вогнегасних порошоків є практично неефективним при гасінні літій-іонних батарей [322, 323].

Ефективність гасіння водою описано у статті [324], однак автори зазначають, що компактні струмені можуть призвести до вторинних небезпек.

Тому у наукових працях [325, 326] обґрунтовано ефективність використання власне дрібнорозпиленої води, яка швидко випаровується і, як наслідок, поглинає велику кількість тепла, охолоджуючи літій-іонні батареї, що горять.

Розроблена методика обґрунтовує шляхом експериментальних досліджень вплив різних вогнегасних речовин найпоширеніших переносних вогнегасників в Україні на ефективність гасіння літій-іонних АКБ, а також дослідження критичної інтенсивності їх гасіння.

Згідно із методикою проведення досліджень, Досліджуваний модуль чи АКБ підготовлюють та розміщують згідно опису, який наведений у пункті 4.3. і для ініціювання виникнення термодеструктивного процесу використовують газовий пальник (рис. 4.23). Вимоги до розміщення та потужності пальника також приведено у пункті 4.3. Для фіксації температурного розподілу по досліджуваному зразку використовують тепловізійну камеру. З метою фіксації розвитку полум'яного горіння здійснювалась відеозйомка з використанням відеокамери з роздільною здатністю 12 Мп. Час фіксувався за допомогою цифрового секундоміра з точністю вимірювань 0,01 с [327].

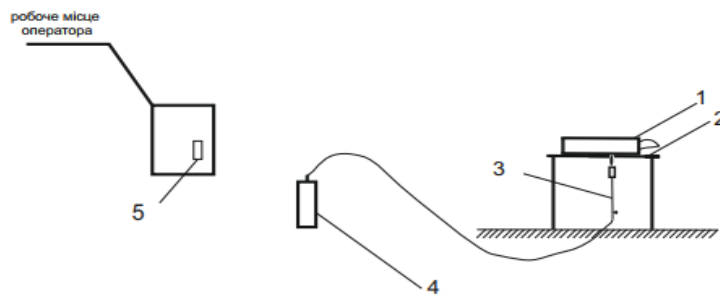


Рисунок 4.23 – Загальна схема влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

де 1 – досліджуваний зразок, 2 – штатив, на який розміщується дослідний зразок, 3 – газовий пальник, 4 – балон з газом, 5 – робоче місце оператора.

Перед початком проведення експерименту відбирається не менше ніж три модулі літій-іонної батареї електромобіля. Модулі мають бути ідентичні за розміром, ємністю та з однаковим станом заряду. Перед дослідженням модулі зважують, а також визначають стан заряду. Підготовлюються переносні вогнегасники з різними вогнегасними речовинами. Вогнегасники перед проведенням дослідження піддаються зважуванню.

Послідовність проведення досліджень. Не менше ніж за 24 год до початку проведення досліджень відібрані ідентичні модулі з силової АКБ електромобіля поміщаються у вентилявану камеру при температурі 18 °C (± 2

°C) для забезпечення відтворюваності результатів дослідження. Здійснюється підготовка ЗВТ, газового пальника, штативів, пристроїв відеофіксації.

Реєструються показники навколишнього середовища, а саме: температура, вологість повітря, швидкість вітру, значення атмосферного тиску. Після цього експериментальним шляхом визначається коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії в навколишнє середовище. Маючи значення коефіцієнта визначається необхідна масова витрата газу, за якою підбирається газовий пальник відповідного конструктивного виконання та виставляється на вентилі потрібна витрата газу. Після цього здійснюється калібрування газового пальника на визначення зони максимальної температури горіння. Переконавшись, що всі ЗВТ влаштовані і працюють коректно, вмикається відеокамера, секундомір і відкривається вентиль подачі газу на пальник та відбувається його підпалення з використання підготовленого факела.

Після цього здійснюється фіксація спрацювання кожного із елементів модуля досліджуваного взірця з подальшим його горінням. При спрацюванні не менше 10 % усіх елементів від загальної кількості елементів модуля подача газу припиняється та відводиться час 3-4 хв на вільний розвиток пожежі з подальшою фіксацією кількості елементів, в яких спрацював вентиляційних отвір. Після цього з врахування рекомендацій заводу-виробника переносних вогнегасників із забезпеченням безпеки оператора здійснюється гасіння досліджувальних взірців, шляхом подачі вогнегасної речовини із корпусу вогнегасника. При цьому здійснюється фіксація часу подачі вогнегасної речовини а також початкова площа горіння.

Оператор повинен привести вогнегасник в дію і спрямувати струмінь на модельне вогнище пожежі, рухаючись навколо нього на свій розсуд так, щоб досягти найкращого результату. Весь заряд вогнегасника може викидатися безперервно або у вигляді послідовних залпів. Дослід вважається успішним коли полум'я погашено та впродовж 30 хв не спостерігається повторне самозаймання літій-іонного модуля. Причому проводиться не менше три ідентичних дослідження [328, 329].

Якщо дослід успішний і полум'я погашено тоді шляхом зважування вогнегасника до і після випробування визначається маса речовини, яка була подано в осередок гасіння. Після цього відтворюючи аналогічні умови здійснюється гасіння полум'я з використанням вогнегасної речовини, яка є на 10 % меншою у порівнянні із попередньою масою. Якщо використання вогнегасника із зменшеною масою вогнегасної речовини на 10 % у порівнянні із масою вогнегасної речовини, яка здійснила успішне гасіння, не призвів до успішного гасіння тоді для кожного із трьох випадків успішного гасіння визначається інтенсивність подачі вогнегасних речовин за формулою 4.9:

$$I = \frac{m_1 - m_0}{S \cdot t} \quad (4.9)$$

Де I – інтенсивність подачі вогнегасних речовин, л/м²·с;

S – площа горіння на момент подачі вогнегасних речовин, м²;

t – час гасіння;

Після цього з використанням рівності визначається критична інтенсивність подачі вогнегасних речовин для трьох випадків не успішного гасіння. І середнє арифметичне значення між обчисленими інтенсивностями буде визначати критичну інтенсивність подачі вогнегасних речовин.

4.5 Висновки до розділу 4

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблено методику натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням модельного вогнища пожежі класу В, а також обґрунтовано його параметри. Запропонована методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією викритого полум'я дозволяє визначити теплові параметри, які описують

процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідити вплив чинників на вказані параметри.

2. Розроблено методику натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використання електронагрівальної панелі. Обґрунтовано критерії, які характеризують початок виникнення термодеструктивного процесу, перелік необхідних засобів вимірювальної техніки, їх розміщення, а також особливості використання електронагрівальної панелі. Описано порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих результатів досліджень.

3. 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

4. Розроблено методику експериментальних досліджень модулів літій-іонних батарей електромобілів під дією відкритого полум'я модельного вогнища класу С. Використання цієї методики дасть змогу визначити температуру спрацювання вентиляційних отворів, виникнення термодеструктивного процесу та займання модуля літій-іонних батарей електромобілів, а також виявити особливості поширення термодеструктивного процесу по модулі. Експериментальним шляхом обґрунтовано критерії розміщення газового пальника, витрату газу та розміщення засобів вимірювальної техніки, описано порядок проведення експерименту, а також оброблення отриманих експериментальних даних. Разом з тим описано методику дослідження критичної інтенсивності подачі вогнегасних речовин під час гасіння літій-іонних батарей, що дозволяє визначити вогнегасний вплив вогнегасної речовини на ефективність гасіння пожеж такого роду.

5. Забезпечено відтворюваність результатів експериментальних досліджень та підтверджено загальну збіжність кожного окремого експерименту, при яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 14 %.

РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ СИЛОВИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

5.1 Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу В.

Для визначення теплових які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідження впливу чинників на дані параметри проведено натурні вогневі дослідження згідно із методикою, яка описана у розділі 4.1. На рисунку 5.1 приведено фото розміщення засобів вимірювальної техніки та досліджуваних зразків.



Рисунок 5.1 – Фото розміщення засобів вимірювальної техніки та досліджуваних зразків перед проведенням випробувань

Дослідження було поділено на три етапи: експериментальне дослідження розряджених батарей; експериментальне дослідження заряджених батарей на 50%; експериментальне дослідження заряджених батарей на 100%. Для кожного із етапів проводилось дослідження для двох позицій розміщення батарей: горизонтального та вертикального по п'ять експериментів на кожному позицію. Причому дослідження батареї у вертикальному положенні проводилось для двох позицій: анодом до джерела тепла та катодом до джерела тепла [330]. Тому загалом було проведено серію із 90 експериментів.

5.1.1 Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння розряджених силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів

На рисунку 5.2 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища пожежі класу В [331].

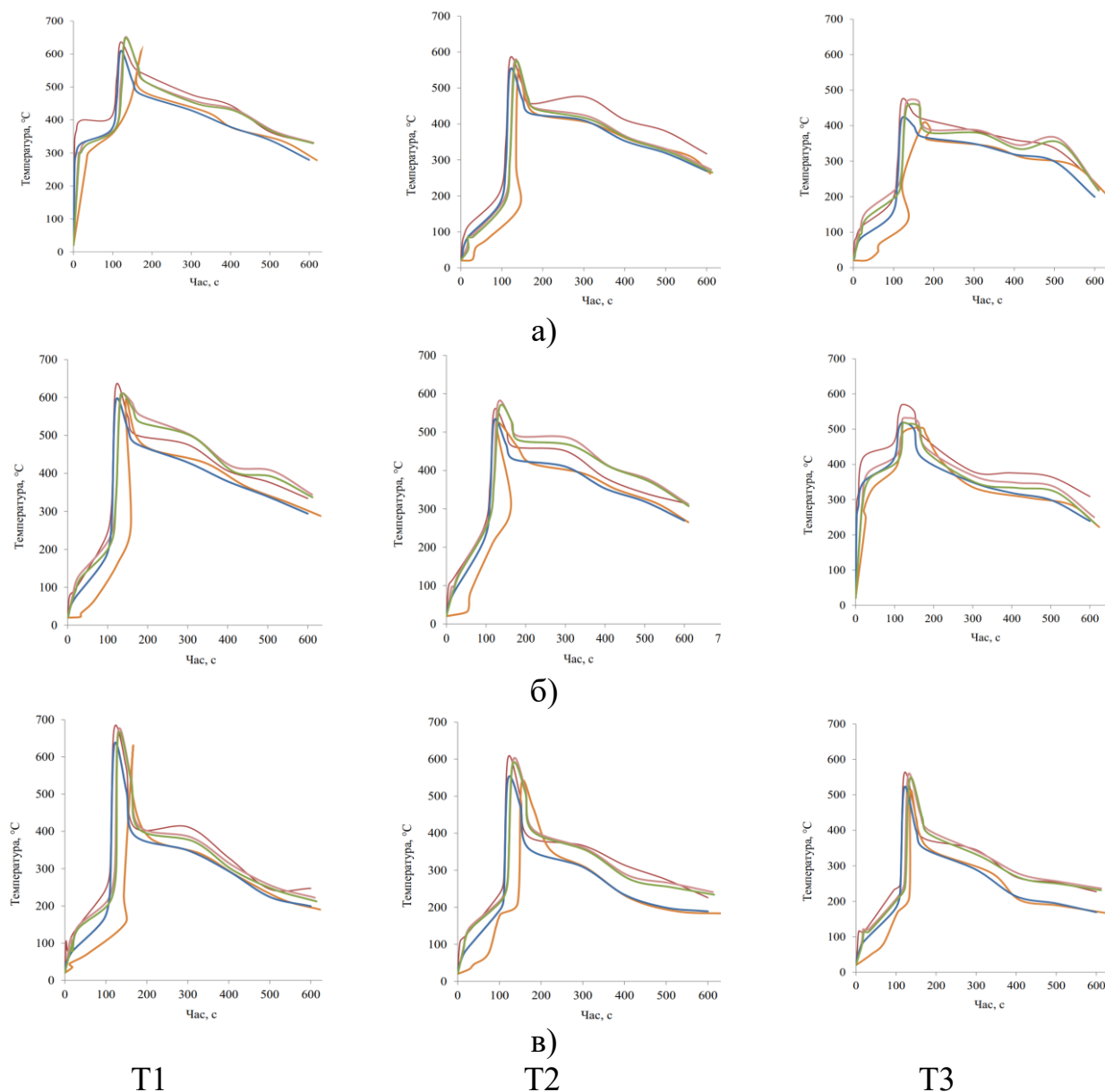


Рисунок 5.2 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Для проведеної серії із п'яти експериментів для кожного просторового розміщення на рисунку 5.3 наведено дисперсії розвіювань експериментальних даних.

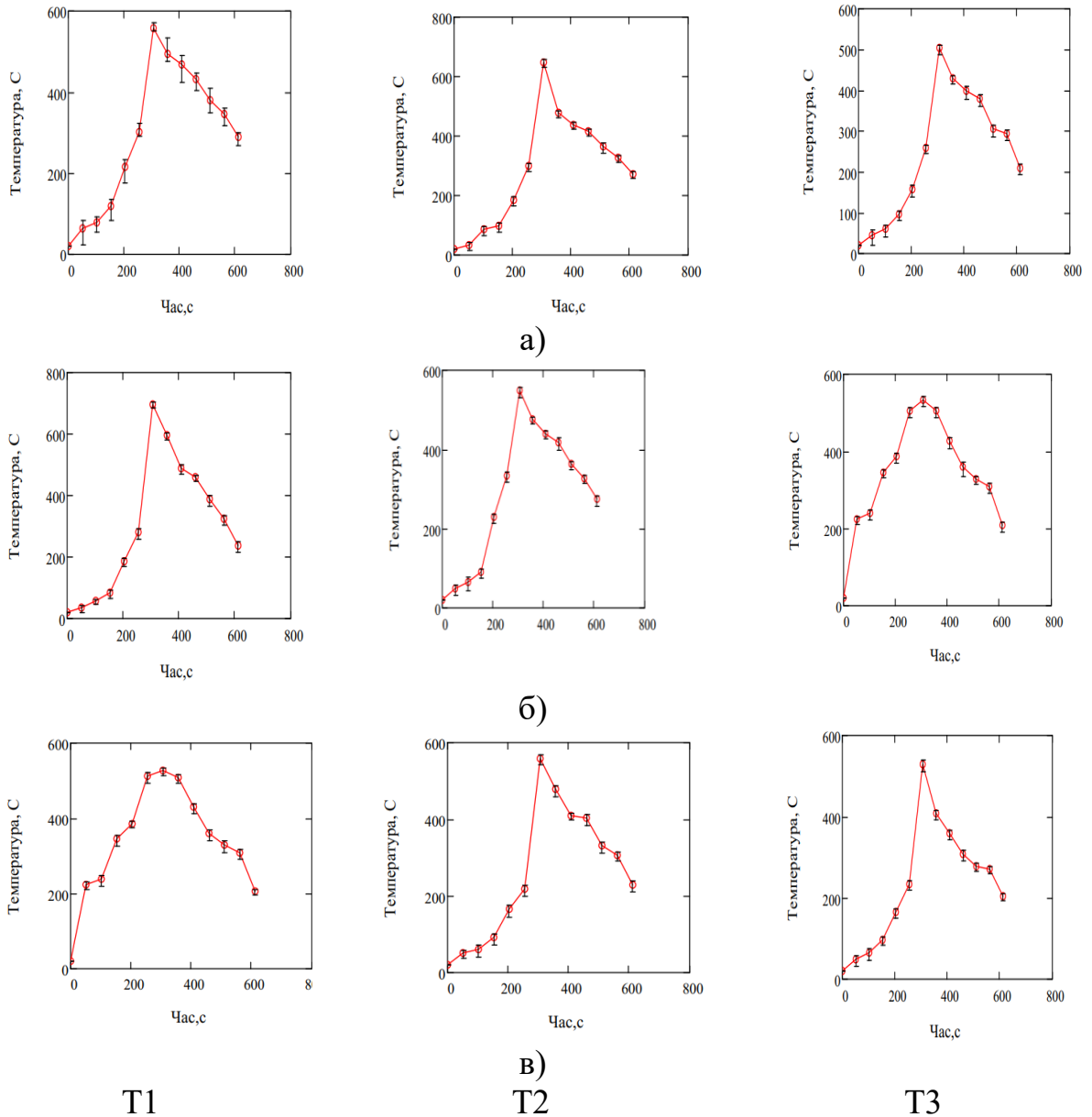


Рисунок 5.3 – Дисперсії відхилень результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Отримані результати температурних параметрів оцінювались на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Грабса. Визначення викидів та

квазівикидів за критерієм Грабса базується на використанні статистичних методів для ідентифікації аномальних (екстремальних) значень у вибіркових даних. При цьому формується нульова гіпотеза і вказується, що у вибірці немає аномальних значень (усі дані належать до одного розподілу) та альтернативна гіпотеза, що у вибірці є хоча б одне аномальне значення. Для оцінки найбільшого результату в ранжованому ряду y_{jmax} квазівикидом чи викидом розраховуємо критерій Грабса, G_{jmax} за формулою 5.1 [332-334].

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (5.1)$$

де \bar{y}_j і S_j - середньоквадратичне відхилення і середнє значення по відповідних температурах.

Для оцінки мінімального та максимального результату в ранжованому ряду y_{jmin} , розраховуємо критерій Грабса, G_{jmin} за формулою 5.2 [285]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{S_j} \quad (5.2)$$

Отримані значення G_{jmax} та G_{jmin} порівнюються з відповідними табличними значеннями. Для рівня значущості 0,05 та об'єму вибірки з 5 елементів (серії із п'яти експериментальних досліджень) мінімальне та максимальне табличне значення відповідно становить 1,715 та 1,764.

Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} виявляться меншими (або рівними) за критичні значеннями, які вказані у таблиці, то приймається, що результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса для експериментальних досліджень розряджених силових елементів літій-іонних батарей наведено на рисунку 5.4.

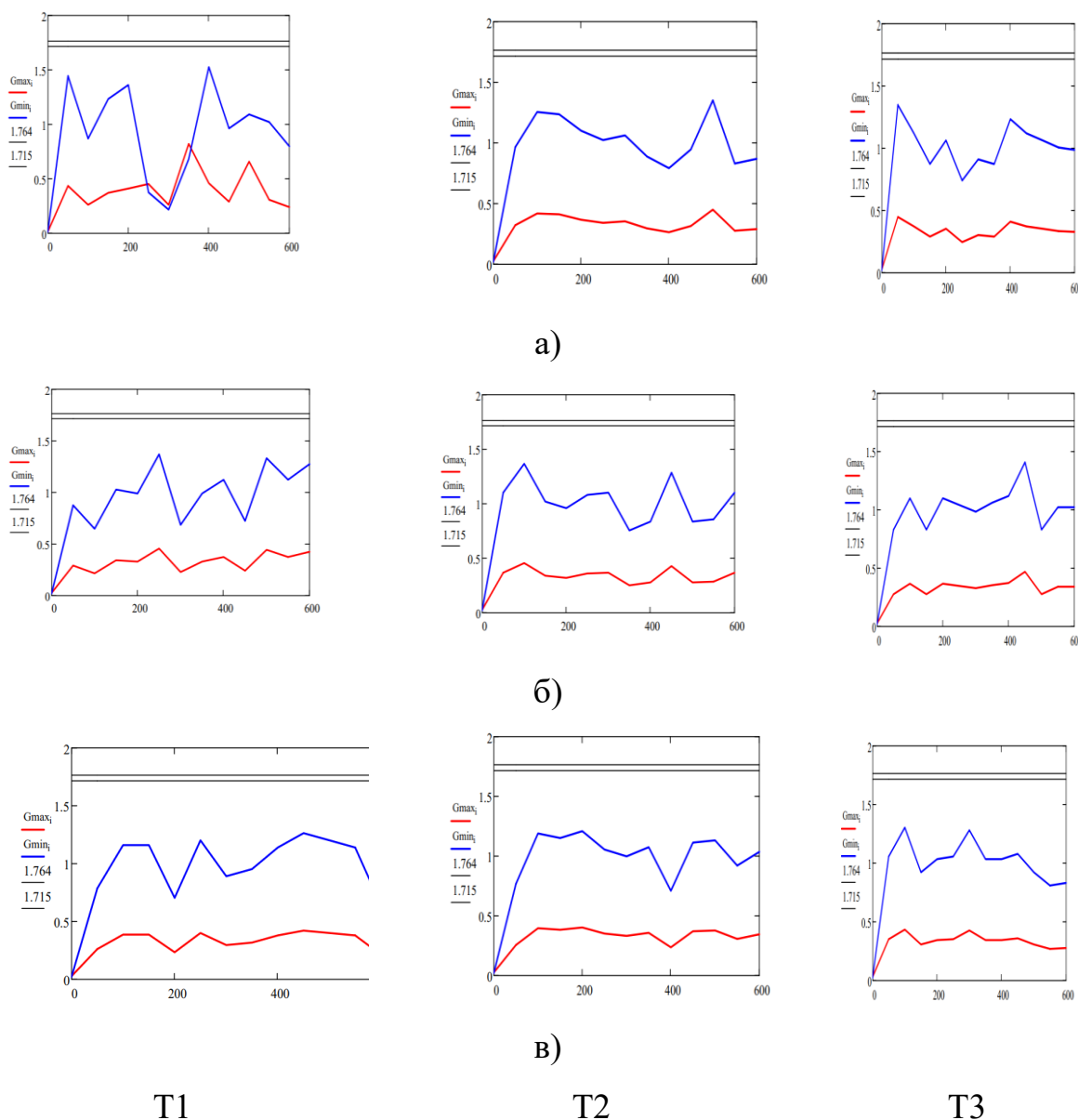


Рисунок 5.4 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: T1, T2, T3 на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса.

Аналіз рисунку 5.4 показує, що обчислене значення критерію Грабса не перевищує відповідних критичних значень, що свідчить про те, що отримані результати не мають викидів та квазівикидів для усіх випадків та значень усіх термопар.

На рисунку 5.5 наведено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної розрядженої батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища класу В.

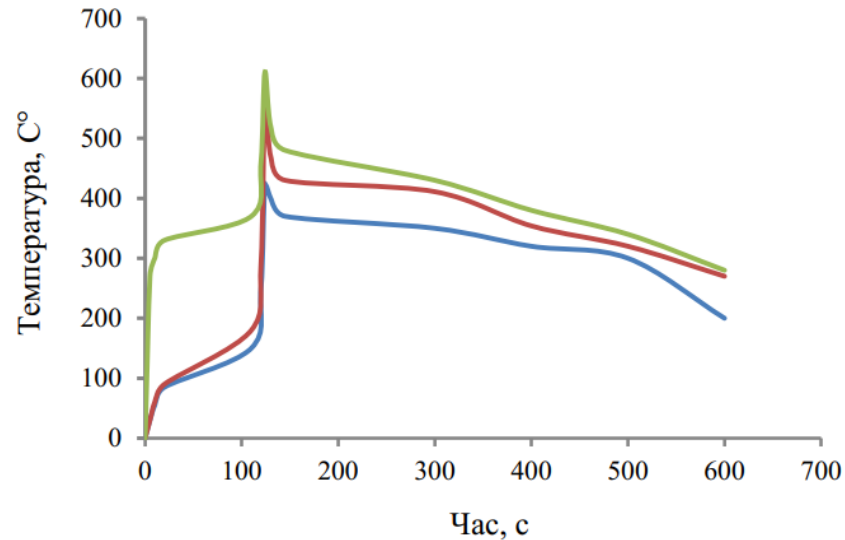


Рисунок 5.5 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В.

Термопара Т1 (лінія зеленого кольору) фіксувала температуру під батареєю на відстані 7 см (L1) по вертикалі від борта дека, термопара Т2 (лінія червоного кольору) фіксувала температура батареї і була розміщена по її середині. Термопара Т3 (лінія синього кольору) фіксувала температуру над батареєю (L2= 6,5 см) на відстані 20 см від борта дека.

Як помітно із графіка (рис 5.5) у момент запалення модельного вогнища температура на термопарах Т1, Т2 та Т3 починає стрімко зростати.

На 110-115 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 170-190 °С, що пояснюється бурхливим розвитком термодеструктивного процесу і як наслідок генерації великої кількості тепла, яка починає нагрівати батарею з середини. Це корелює з роботою [336], де зазначено, що руйнування сепаратора і початок

розвитку термодеструктивного процесу відбувається при температурі 150-170 °С.

На 120-125 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвело до різкого стрибка температури на термопарі Т1, яка розміщувалась на аноді батареї з 460°С до 620°С.

На рисунку 5.6. зображено фото модельного вогнища, при спрацюванні вентиляційного отвору. Так як гази, які горять виходять під тиском, це змінює факел полум'я, що і помітно з рисунка 5.6.



Рисунок 5.6 – Фото викиду газів через вентиляційний отвір і їх горіння під час досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В.

Опис складу газів, які можуть викидатись детально описано у розділі 1. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 280-300 °С. Під час викиду газів, що супроводжувалось свистом та шумом температура стрімко зростає. Викид супроводжувався у всіх п'яти експериментах орієнтовно 3-5 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 550-580 °С на момент закінчення викиду.

З цього можна зробити висновок, що при спрацюванні вентиляційного отвору температура батареї різко зростає з 280-300 °С до 550-580 °С.

Після припинення викиду температура батареї знижується з 550-580 °С до 470-480 °С, тобто до температури, яка близька до температури модельного вогнища. Це підтверджується також показами термопар Т3 (синя лінія), яка фіксує температуру полум'я над батареєю.

На 120 с до моменту відкриття вентиляційного отвору температура полум'я становила 450 °С, і вже після 120 с стрімко зростає і складає у піку 620 °С. Тобто різниця температур полум'ям до спрацювання вентиляційного отвору батареї і під час складає 150-170 °С. Іншими словами, вентиляційні газы, що горять додатково створюють температуру 150-170 °С, себто температура їх горіння складає близько 620 °С за динних умов.

Після закінчення викиду вентиляційних газів температура полум'я монотонно спадає із ступенем вигорання пального у деці модельного вогнища. І вже після 8 хв від початку випробування горіння припиняється. Однак температура батареї зберігає певну інерційність, тому лінія термопар Т1 (синя лінія) і лінія термопар Т2 (пересікаються). При цьому втрата маси батарей під час випробувань складало 7-12 г.

Отже при вертикальному розміщенні силової батареї анодом до модельного вогнища класу В, який забезпечував температурний режим в зоні розміщення батареї 470-500 °С незворотна екзотермічна реакція почалась приблизно при температурі батареї 170-190 °С на 105-114 с від початку випробувань. Це спричинило різке збільшення температури впродовж 10-12 с від 170-190 °С до 300-320 °С і відкриття вентиляційного отвору, що супроводжувалось впродовж 3-5 с викидом вентиляційних газів, горіння яких спричинило ріст температури батареї з 300-320 °С до 560-580°С. Причому температура полум'я над батареєю зросла від 460-480 °С до 620-635 °С.

На наступному етапі батарея розміщувалась вертикально катодом до модельного вогнища класу В. Термопары на елементі розміщувались аналогічно як і у попередньому випадку. На графіку, який зображено на рисунку 5.7.

відображено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної розрядженої батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища класу В.

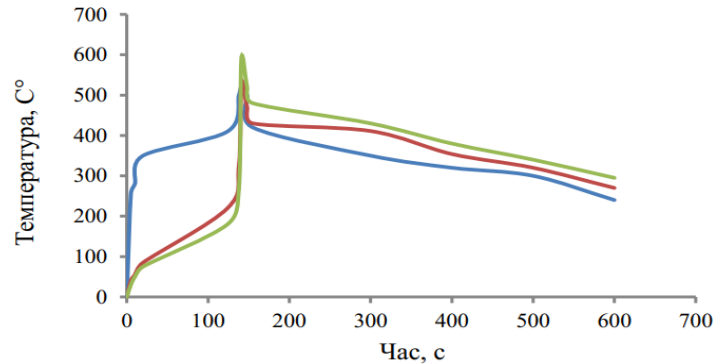


Рисунок 5.7 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батареї електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В.

Температурні характеристики у цьому випадку є наближеними як із вертикальним розміщенням батареї анодом до модельного вогнища. Початок термодеструктивного процесу почався на 125-130 с після початку випробування. На 138-145 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т1, яка розміщувалась над батареєю з 270-300 °С до 570-590 °С. Втрата маси батареї у експериментах, становив 7-9 г відповідно. Таким чином при вертикальному просторовому розміщенні елементів силової батареї анодом вниз і дії на неї відкритим полум'ям модельного вогнища класу В кардинальних температурних змін не виявлено. Але разом з тим спостерігалось на 10-15 с пізніше відкриття вентиляційного отвору.

На графіку, який зображено на рисунку 5.8 відображено усереднені результати динаміки зміни температури горизонтально розміщених розряджених елементів батареї під час випробувань до модельного вогнища класу В.

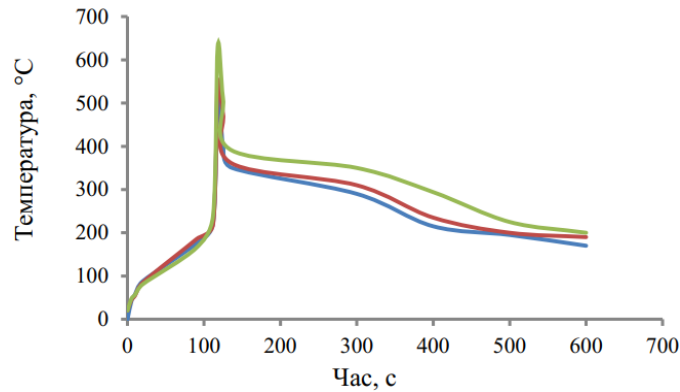


Рисунок 5.8 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В.

При горизонтальному розміщенні батареї початок термодеструктивного процесу відбувався на 87-95 с від початку випробувань. При цьому температура батареї при цьому складала 170-193 °С, а температура полум'я 472-496 °С над батареєю, яка фіксувалась термопарою Т1. Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 105-112 с від початку випробувань, що є на 10-12 с швидше ніж при вертикальному розміщенні батареї анодом до модельного полум'я класу В. Таку особливість можна пояснити кращим прогрівання батареї і як наслідок за короткий час досягнення температури відкриття вентиляційного отвору. Втрата маси елементів батареї при цьому складала 8-12 г.

5.1.2. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 50%

Наступним етапом проводилось дослідження заряджених батарей на 50%, які розміщувались аналогічно, як у випадку розряджених батарей: вертикально анодом до модельного полум'я класу В, вертикально катодом до модельного полум'я класу В та горизонтально.

На рисунку 5.9 наведено результати досліджень з нагрівання заряджених на 50% елементів у різному просторовому розміщенні відносно модельного

вогнища класу В для серії із 15 експериментів (по 5 для кожного випадку просторового розміщення).

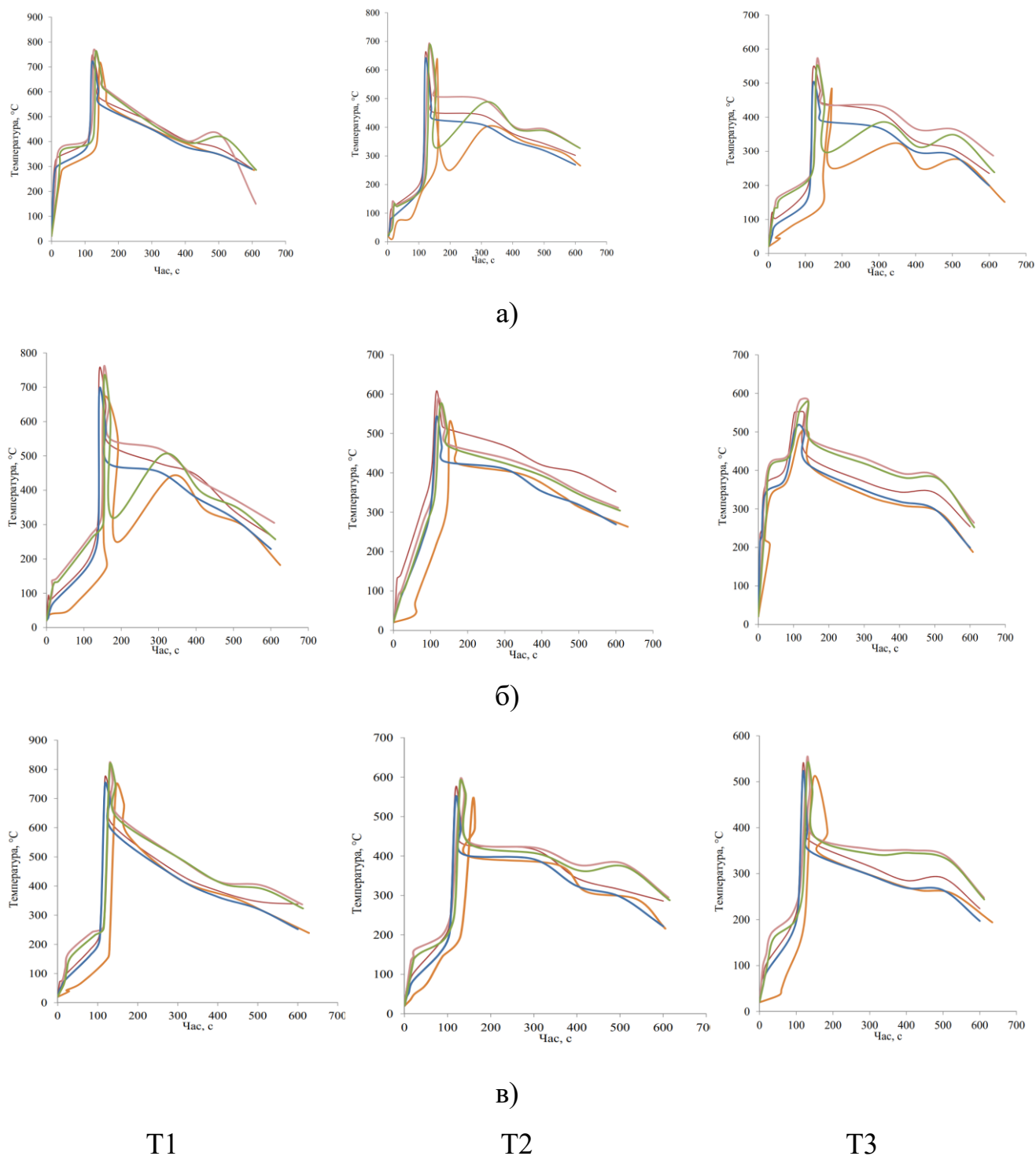


Рисунок 5.9 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Для проведеної серії із п'яти експериментів для кожного просторового розміщення на рисунку 5.10 наведено дисперсії розвіювань експериментальних даних.

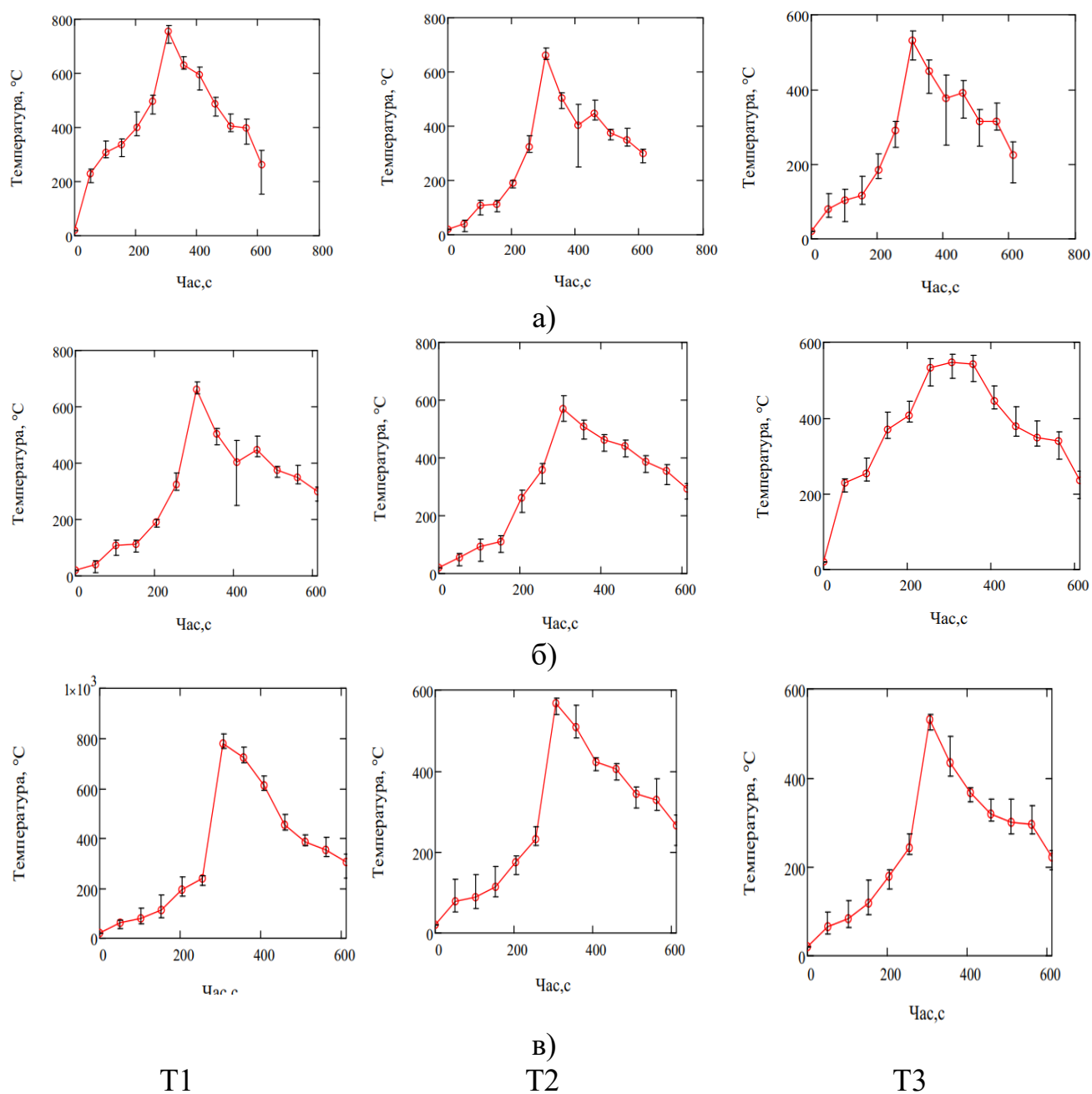


Рисунок 5.10 – Дисперсія розсіювання результатів досліджень силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Отримані результати температурних параметрів оцінювались на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса. Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса для експериментальних досліджень силових елементів літій-іонних батарей заряджених на 50% приведено на рисунку 5.11.

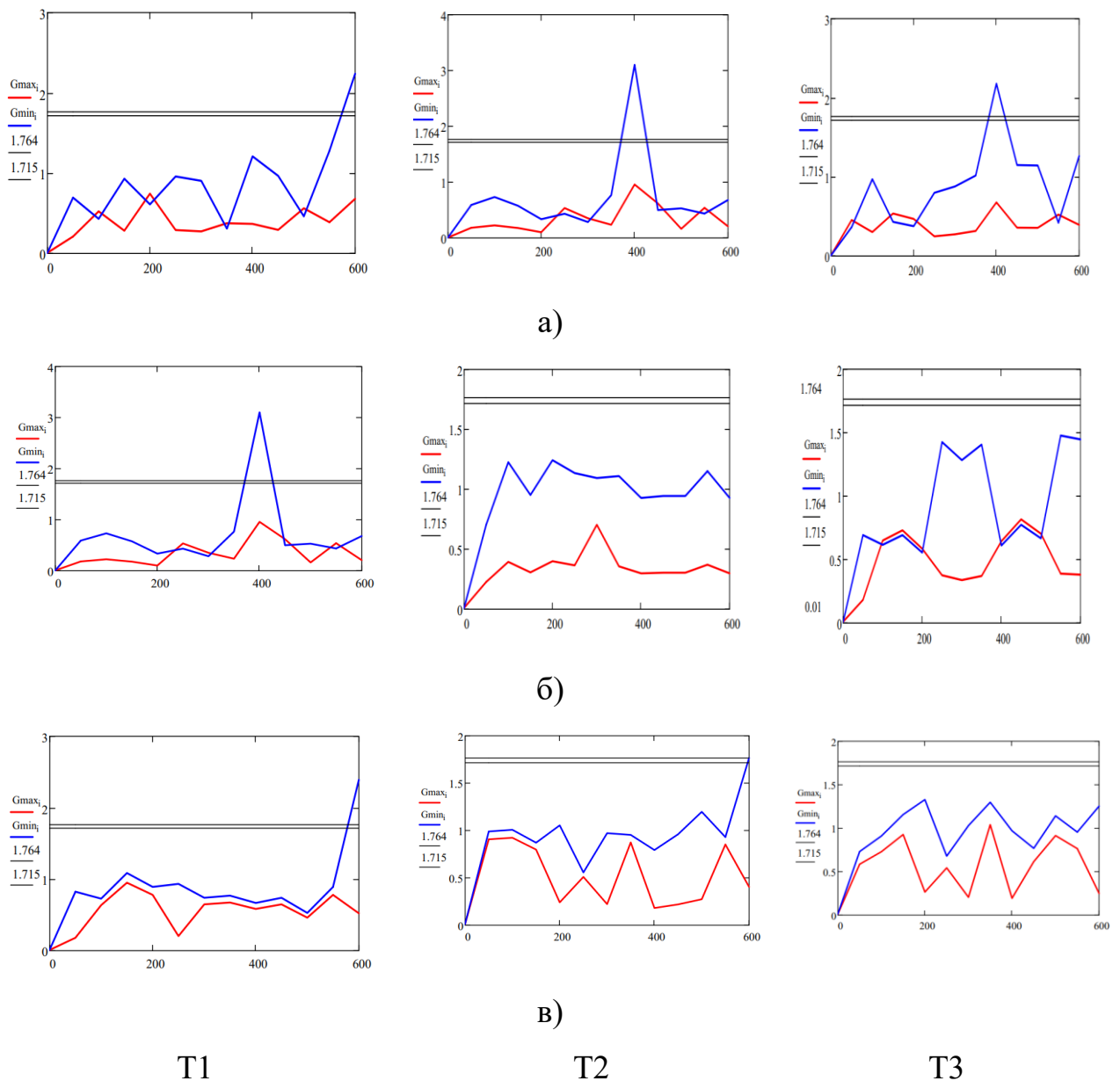


Рисунок 5.11 – Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: T1, T2, T3

Аналіз рисунку 5.11 показує отримані експериментальні дані від термопар Т1 та Т2 при дослідженні силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщені вертикально анодом до модельного вогнища класу В мають викиди. Також викиди присутні для термопари Т1 при дослідженні динаміки зміни температури вертикально розміщених елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщені вертикально катодом до модельного вогнища класу В і термопари Т1 та Т2 при горизонтальному розміщенні (рис 5.12). Таким чином дані значення не беруться до уваги при побудові усереднених графічних залежностей для кожної термопари відповідно.

На рисунку 5.12 зображено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища класу В.

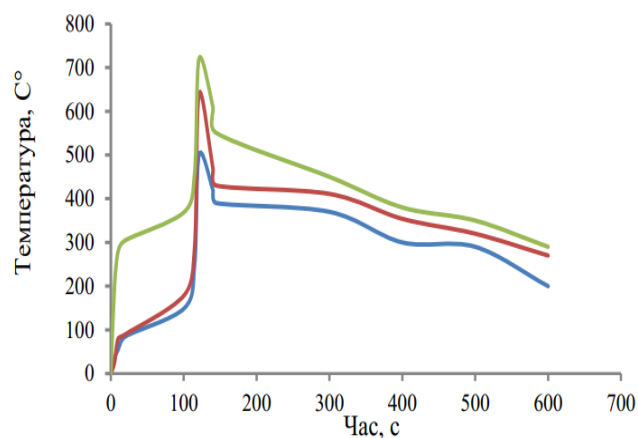


Рисунок 5.12 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батареї електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В.

На 101-112 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 180-195 °C, що пояснюється бурхливим розвитком термодеструктивного процесу і як наслідок генерації великої кількості тепла, яка починає нагрівати батарею з середини.

На 115-120 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т1, з 455-470 °С до 720-736 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 263-289 °С.

Горіння вентиляційних газів та момен розбризування пального з дека модельного вогнища вентиляційними газами приведено на рисунку 5.13.



Рисунок 5.13 – Фото горіння вентиляційних газів та розбризування пального при дослідженні динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В.

Викид супроводжувався у всіх п'яти експериментах орієнтовно 4-5 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 553-573 °С на момент закінчення викиду і через 3-5 с відбувся вибух, при якому температура батареї становила 640-660 °С. Втрата маси дослідних взірців складала в межах 15-18 грам.

На наступному етапі батарея розміщувалась вертикально катодом до модельного вогнища класу В. Термопарі на елементі розміщувались аналогічно як і у попередньому випадку.

На графіку, який зображено на рисунку 5.14 відображено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної розрядженої батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища класу В.

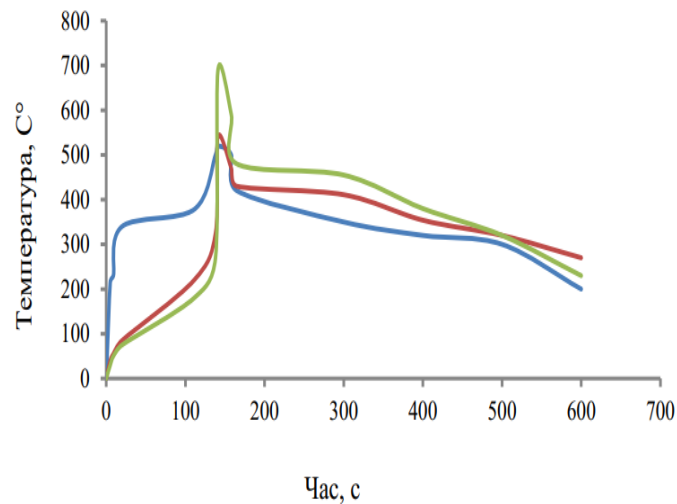


Рисунок 5.14 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батареї електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В.

На 111-120 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. На 135-144 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т1, до 650-680 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 293-298 °С.

Викид супроводжувався у всіх трьох експериментах орієнтовно 4-6 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 545-570 °С на момент закінчення викиду. Втрата маси дослідних зразків складала в межах 14-16 грам.

На графіку, який зображено на рисунку 5.15 відображено усереднені результати динаміки зміни температури елементів батареї заряджених на 50% під час випробувань просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В.

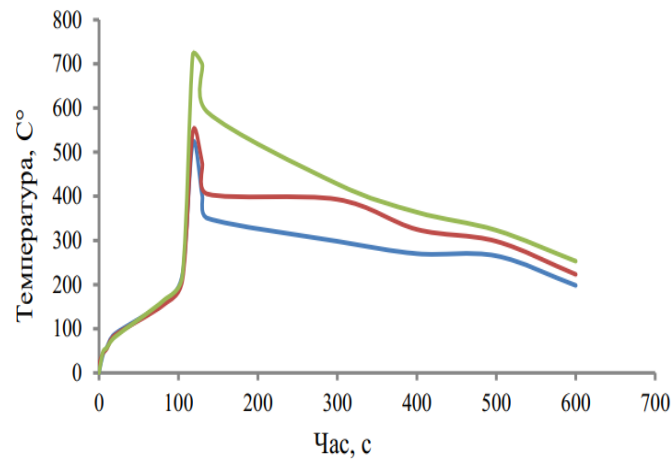


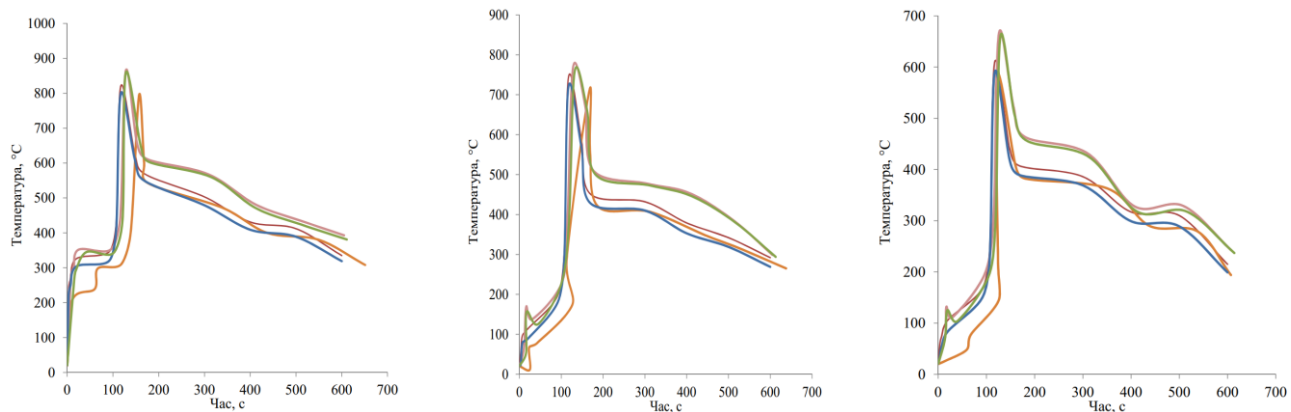
Рисунок 5.15 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50 % просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В.

При горизонтальному розміщенні батареї початок термодеструктивного процесу відбувався на 82-91 с від початку випробувань. При цьому температура батареї складала 163-185 °С, Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 105-111 с від початку випробувань, що є на 30-3 с швидше ніж при вертикальному розміщенні батареї катодом до модельного вогнища. На початку викиду вентиляційних газів температура батареї становила 223-284 °С і стрімко зросла до 555-570 °С, на момент закінчення викиду.

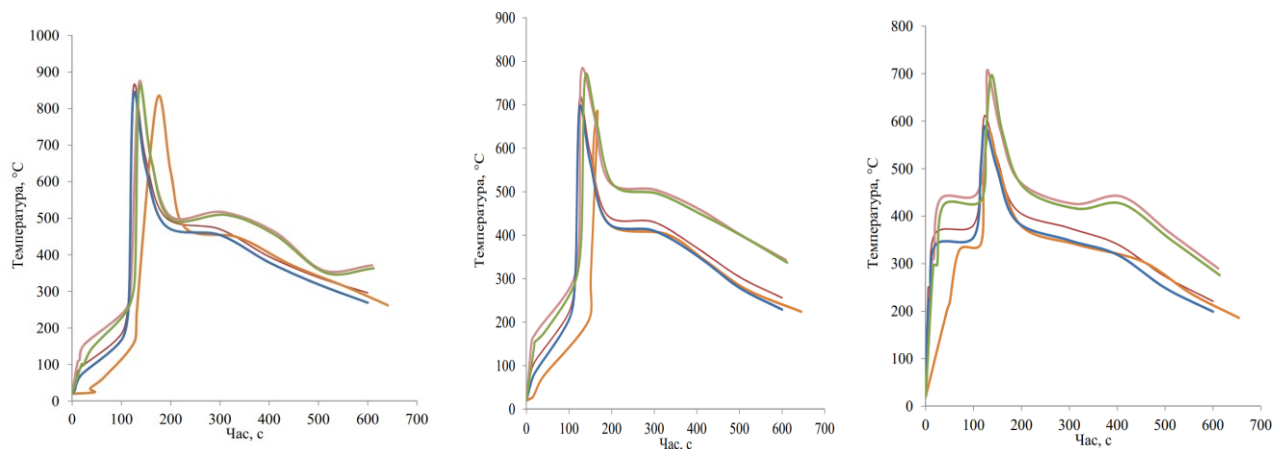
5.1.3. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 100 %

Наступним етапом проводилось дослідження заряджених батарей на 100 %, які розміщувались аналогічно, як у випадку розряджених батарей: вертикально анодом до модельного полум'я класу В, вертикально катодом до модельного полум'я класу В та горизонтально.

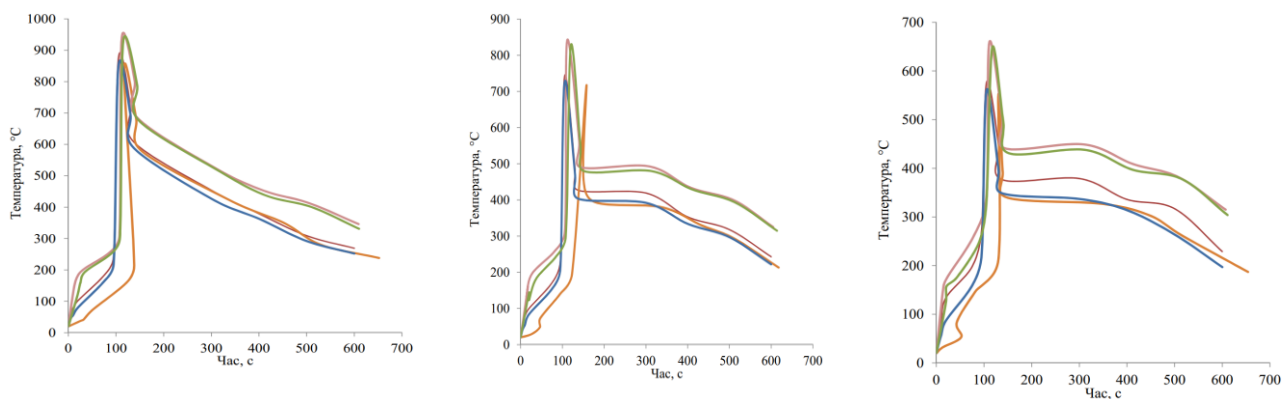
На рисунку 5.16 наведено результати досліджень з нагрівання заряджених на 100% елементів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу В для серії із 15 експериментів (по 5 для кожного випадку просторового розміщення).



а)



б)



в)

Т1

Т2

Т3

Рисунок 5.16 – Результати досліджень силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Для проведеної серії із п'яти експериментів для кожного просторового розміщення на рисунку 5.17 наведено дисперсії розвіювань експериментальних даних.

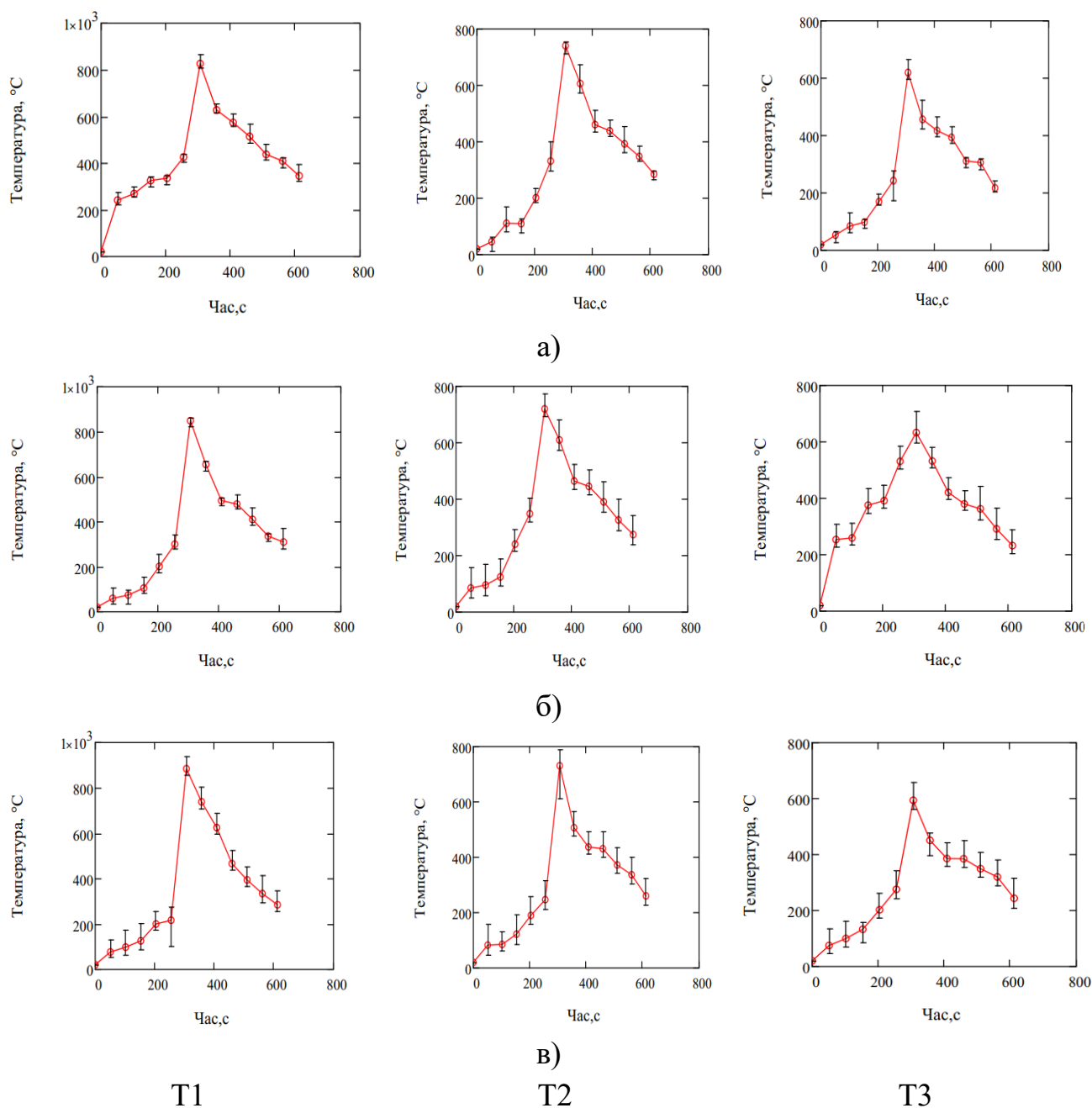


Рисунок 5.17 – Дисперсія розсіювання результатів досліджень силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Отримані результати температурних параметрів оцінювались на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса. Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса для експериментальних досліджень силових елементів літій-іонних батарей заряджених на 100% наведено на рисунку 5.18.

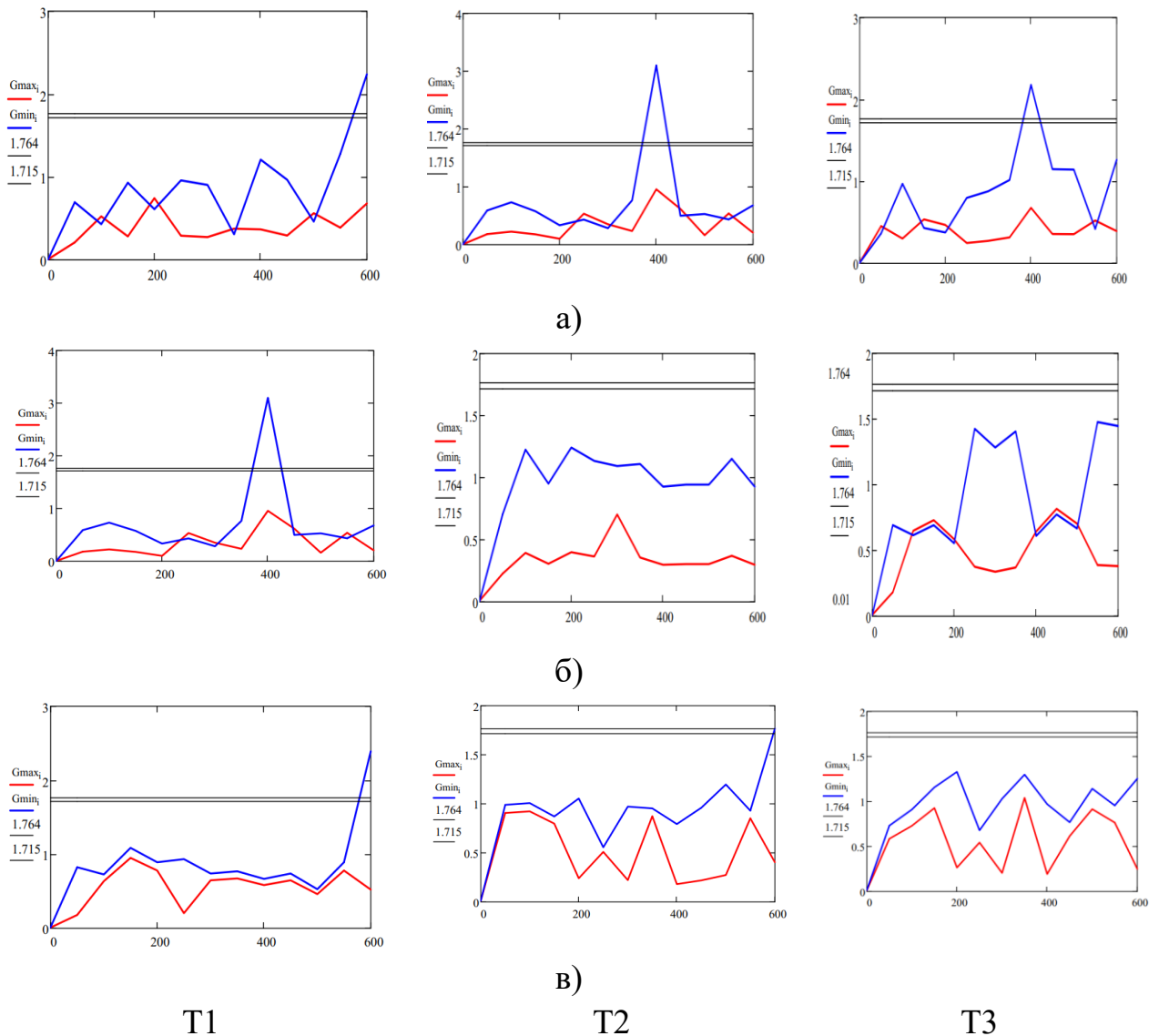


Рисунок 5.18 – Результати перевірки даних експериментальних досліджень

на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених а) анодом б) катодом в) горизонтально до модельного вогнища класу В з п'яти експериментів для термопар: Т1, Т2, Т3

Аналіз рисунку 5.18 показує отримані експериментальні дані від термопар T1, T2 та T3 при дослідженні силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально анодом до модельного вогнища класу В мають викиди. Також викиди присутні для термопар T1 при дослідженні динаміки зміни температури вертикально розміщених елементів батарей катодом до модельного вогнища класу В і термопар T1 та T2 при горизонтальному розміщенні (рис 5.18). Таким чином дані значення не беруться до уваги при побудові усереднених графічних залежностей для кожної термопарі відповідно.

На рисунку 5.19 зображено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища класу В.

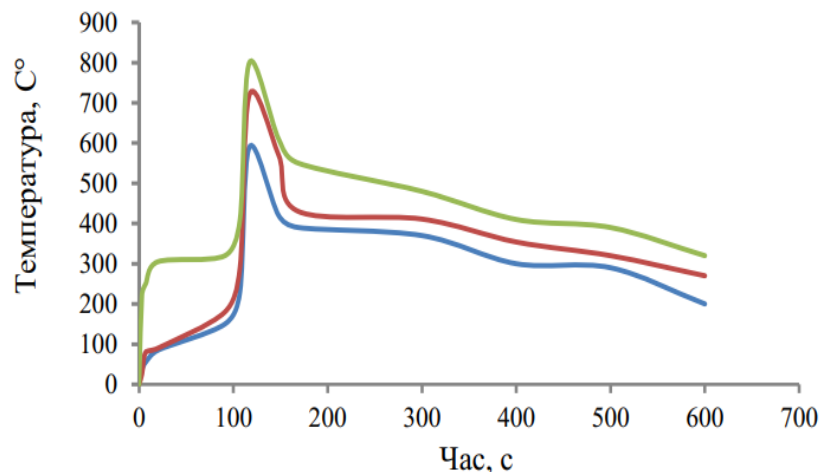


Рисунок 5.19 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В.

На 91-99 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 180-195 °С, що пояснюється бурхливим розвитком термодеструктивного процесу і як наслідок генерації великої кількості тепла, яка починає нагрівати батарею з середини.

Слід відзначити, що заряджені на 100 % батареї під час викиду вентиляційних газів давали більший шум та свист, тому з міркувань безпеки

між вогневою площадкою та за засоби вимірювальної техніки було встановлено металевий бар'єр. Це також мало б і захистити оператора на робочому місці. Фото «захисної споруди» зображено на рисунку 5.20



Рисунок 5.20 – Фото проведення експерименту при дослідженні динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100%

На 103-115 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі T1, з 455-470 °С до 790-820 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 260-290 °С.

Горіння вентиляційних газів та момент розбризкування пального з дека модельного вогнища вентиляційними газами приведено на рисунку 5.21.

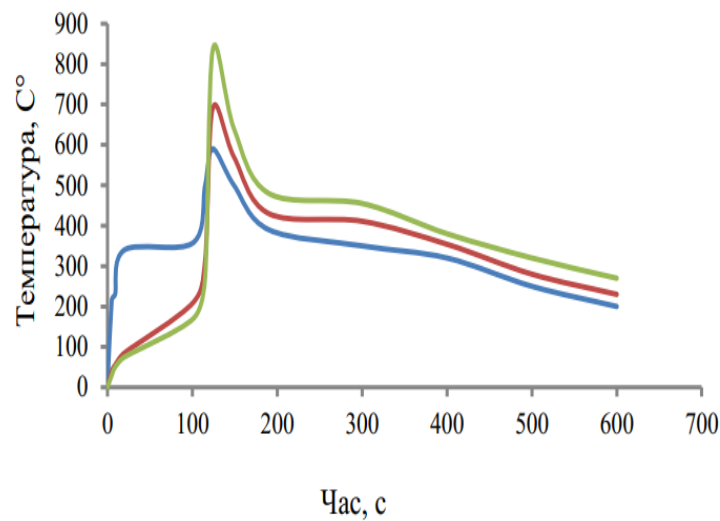


Рисунок 5.21 – Фото горіння вентиляційних газів при дослідженні динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% вертикально розміщеної анодом до модельного вогнища пожежі

Викид супроводжувався у всіх п'яти експериментах орієнтовно 5-8сек. Втрата маси дослідних взірців складала в межах 26-30 грам.

На наступному етапі батарея розміщувалась вертикально катодом до модельного вогнища класу В. Термопарі на елементі розміщувались аналогічно як і у попередньому випадку.

На графіку, який зображено на рисунку 5.22 відображено усереднені результати динаміки зміни температури вертикально розміщеної розрядженої батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища класу В.



Рисунку 5.22 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В.

На 104-116 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. На 115-126 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т1, до 650-680 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 293-298 °С. Викид супроводжувався у всіх трьох експериментах орієнтовно 4-5 сек. При цьому температура батареї досягла значення близько 670-690 °С на момент закінчення викиду. Втрата маси дослідних взірців складала в межах 14-16 грам.

На графіку, який зображено на рисунку 5.23 відображено усереднені результати динаміки зміни температури елементів батарей заряджених на 100% під час випробувань просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В.

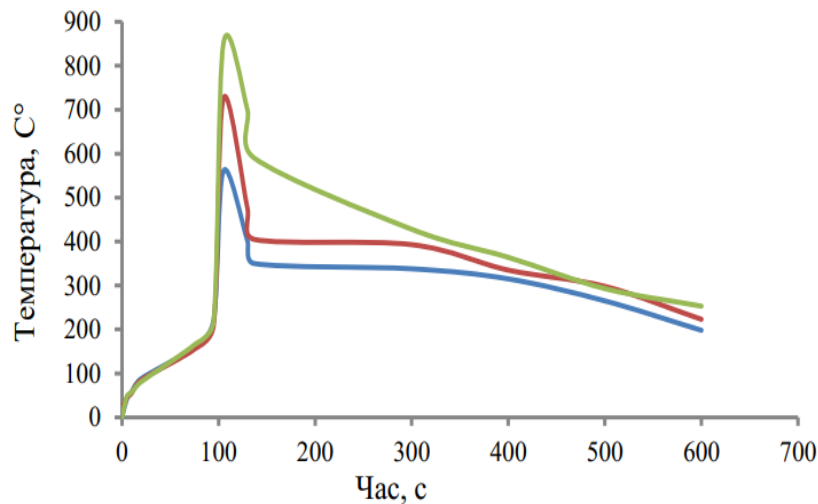


Рисунок 5.23 – Усереднені результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50 % просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В.

При горизонтальному розміщенні батареї початок термодеструктивного процесу відбувався на 82-91 с від початку випробувань. При цьому температура батареї складала 163-185 °С, Відкриття вентиляційного отвору відбулось на 94-108 с від початку випробувань, що є на 18-21 с швидше ніж при вертикальному розміщенні батареї катодом до модельного вогнища. На початку викиду вентиляційних газів температура батареї становила 223-284 °С і стрімко зросла до 720-740 °С, на момент закінчення викиду.

5.2 Результати натурних досліджень силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі

Натурні вогневі дослідження процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі

проводились за розробленою методикою, яка описана у розділі 4.2. З метою запобігання відкидання батареї внаслідок можливого реактивного горіння вентиляційних газів розроблений сталевий кожух (рис. 5.24), який призначений для фіксації батареї.



Рисунок 5.24 – Зовнішній вигляд захисного кожуха та розміщення у ньому батареї.

З метою кращого прогріву досліджуваної батареї, над батареєю і кожухом розміщувався шар термоізоляційного матеріалу.

5.2.1 Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння розряджених силових літій-іонних акумуляторів електромобілів з використанням електронагрівальної панелі.

На рисунку 5.25 зображені фото проведення експерименту, а також сам процес горіння літій-іонної батареї під дією електронагрівальної панелі.



а)



б)

Рисунок 5.25 – Фото проведення експериментальних досліджень а) кріплення силових літій-іонних акумуляторів на електронагрівальній панелі б) горіння силових літій-іонних акумуляторів

На рисунку 5.26 наведено результати досліджень з нагрівання розряджених силових літій-іонних батарей у різних положеннях.

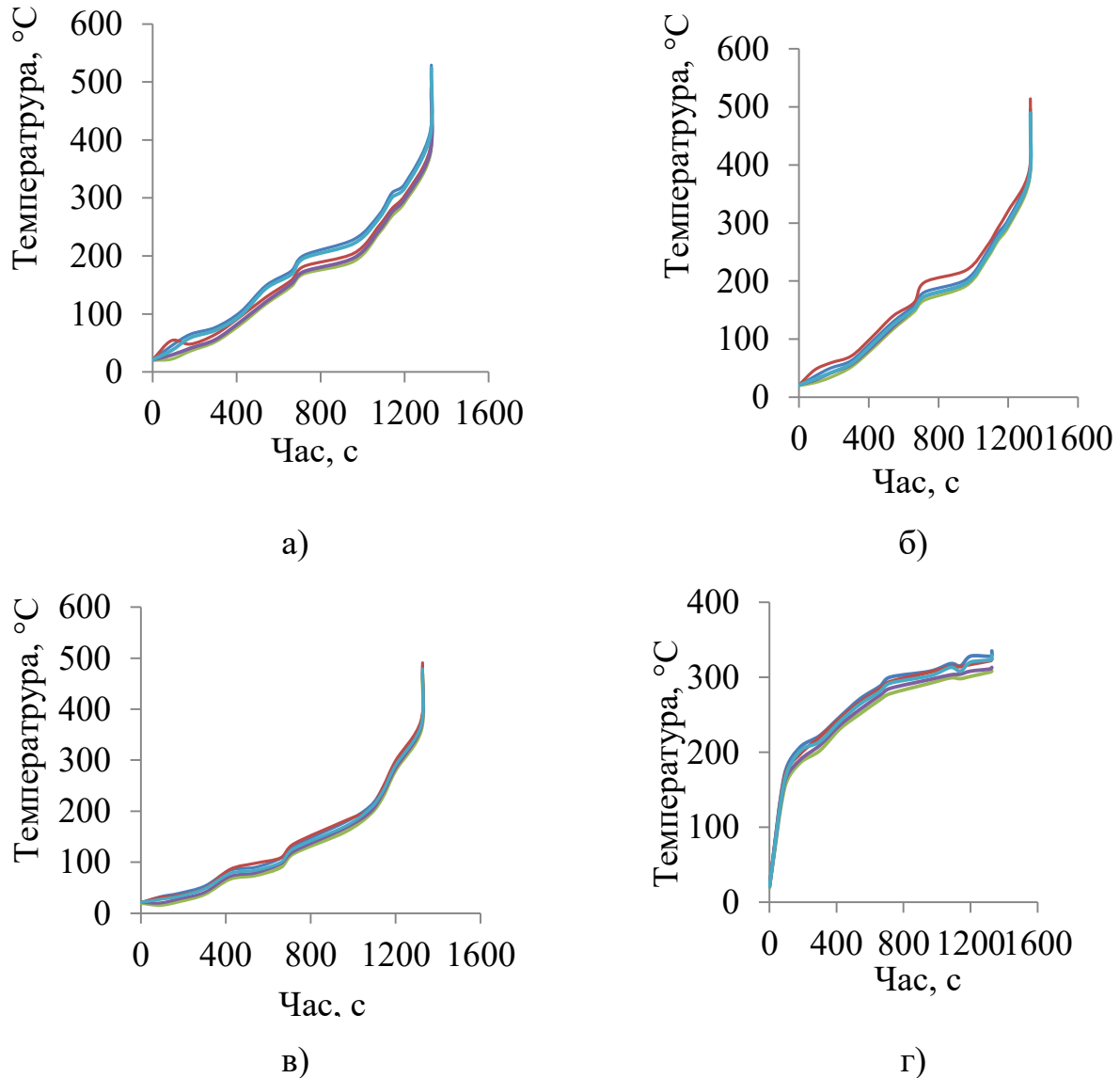


Рисунок 5.26 – Результати досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до електронагрівальної панелі з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

На рисунку 5.5. наведено результати досліджень з нагрівання розряджених силових літій-іонних батарей розміщених вертикально катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для кожної термопари.

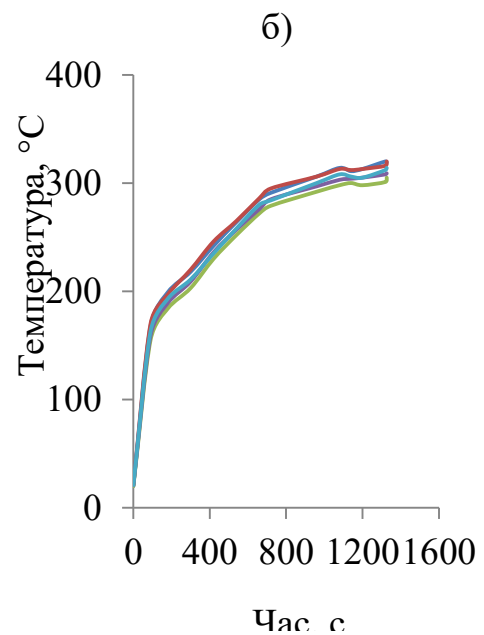
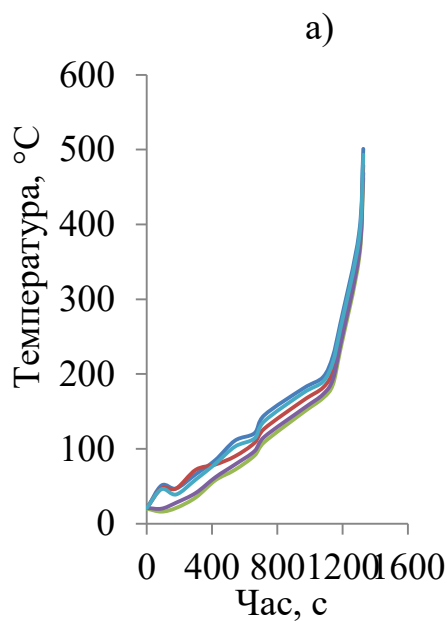
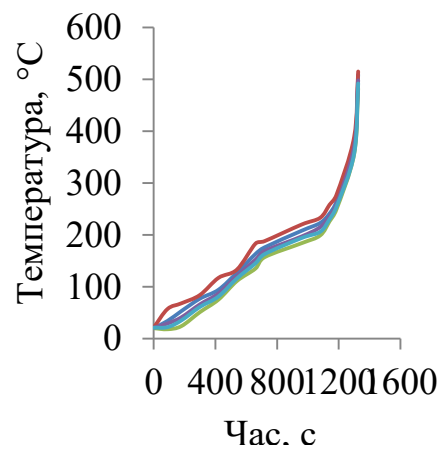
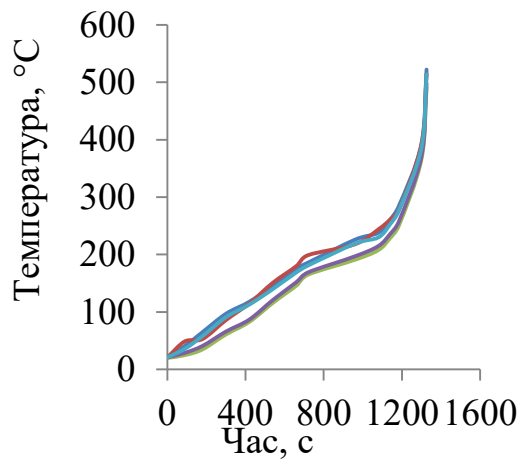
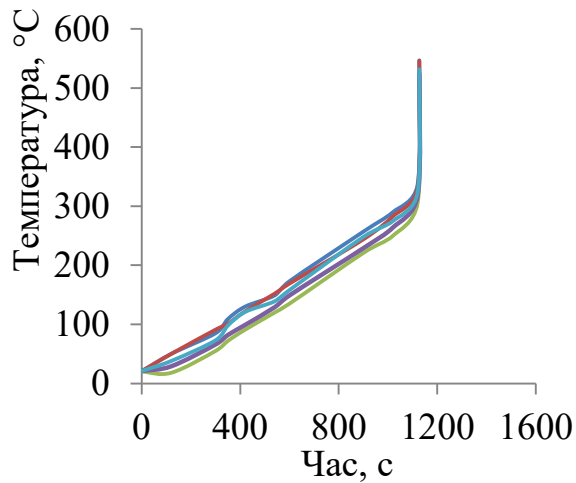
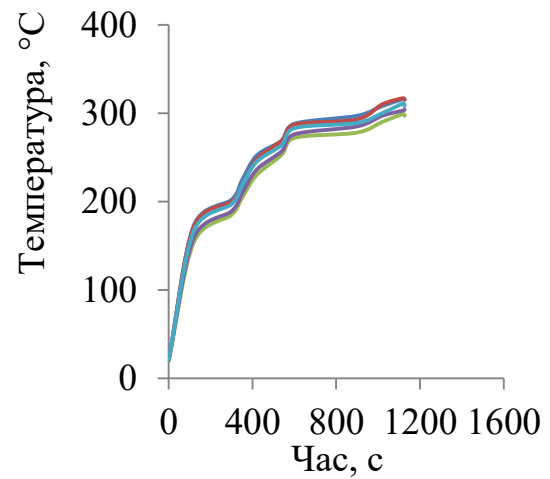


Рисунок 5.27 – Результати досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

Під час проведення експериментів із дослідження розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально розподіл температури по довжині батареї був в межах 10-15 °C, тому було прийнято рішення розміщувати на дослідному взірці лише дві термопари T1 на обігрівальній частині батареї та електронагрівальній панелі.



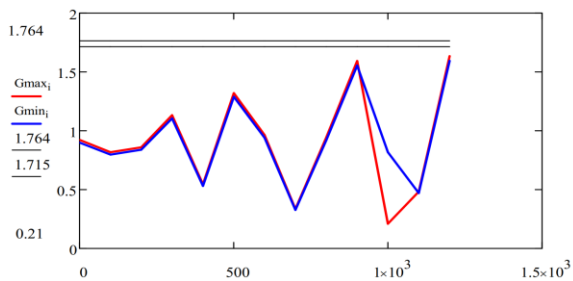
а)



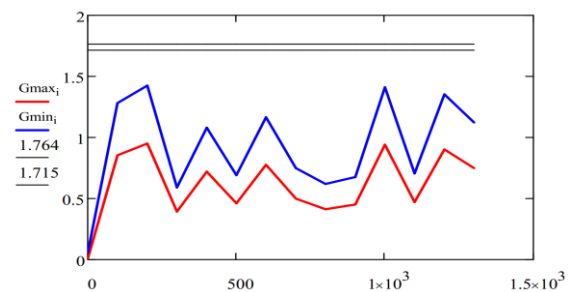
б)

Рисунок 5.28 – Результати досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Панель

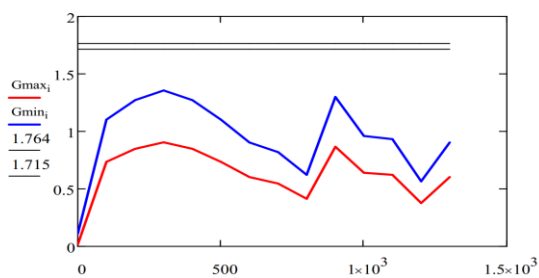
Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса приведено на рисунку 5.29 .



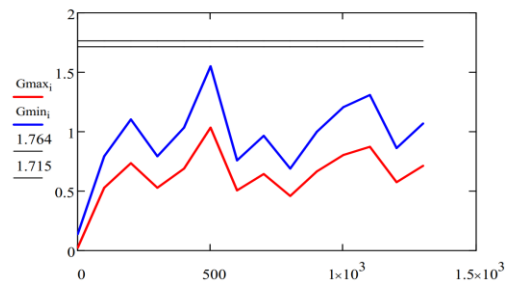
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.29 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

Використання критерію Грабсса, показало, що у вибірці експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні немає викидів чи квазівикидів.

На рисунку 5.30 зображено дисперсію розсіювань експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні.

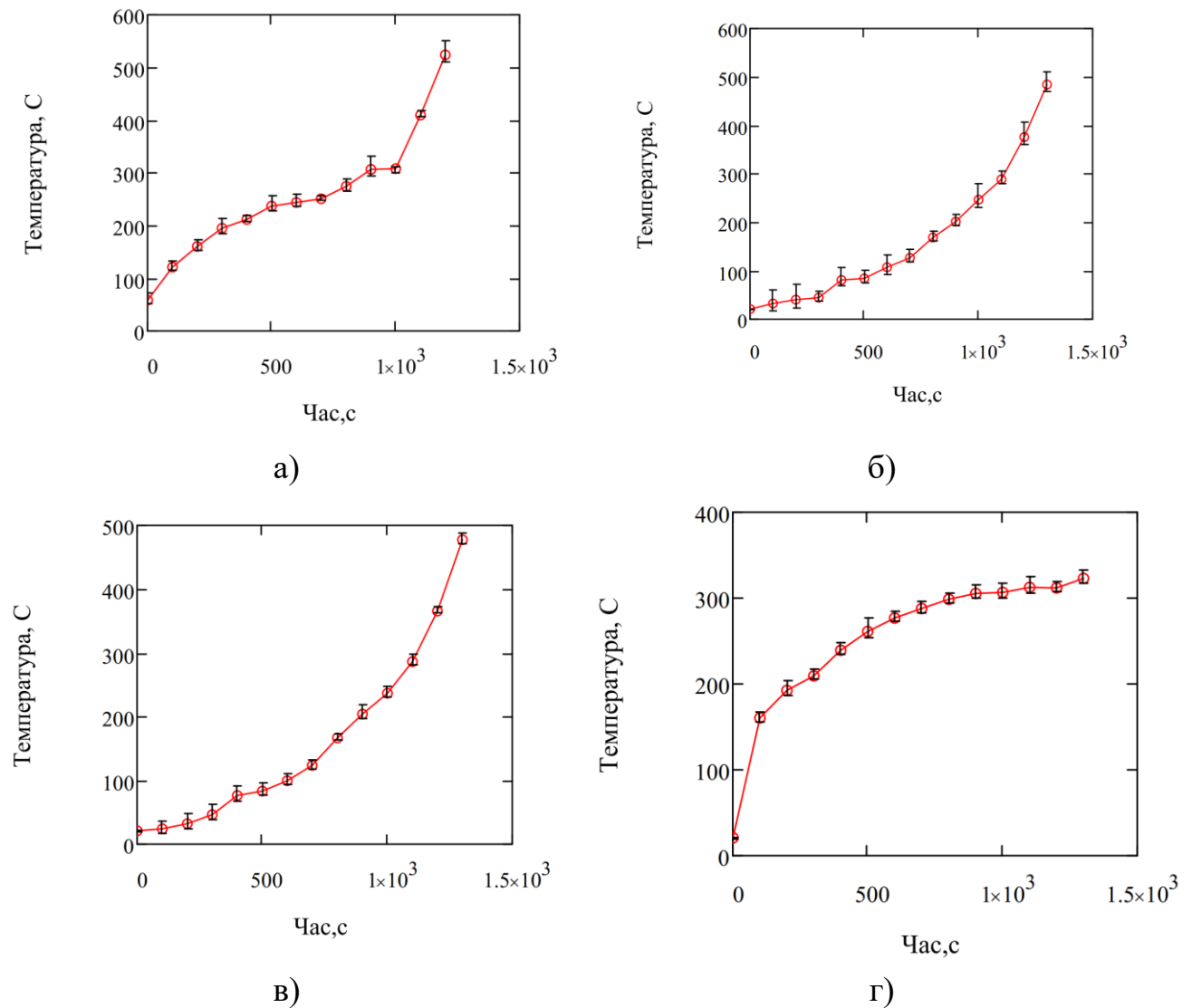


Рисунок 5.30 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

Аналогічно, проведено дослідження на наявність викидів та квазівикидів розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні (рис 5.31).

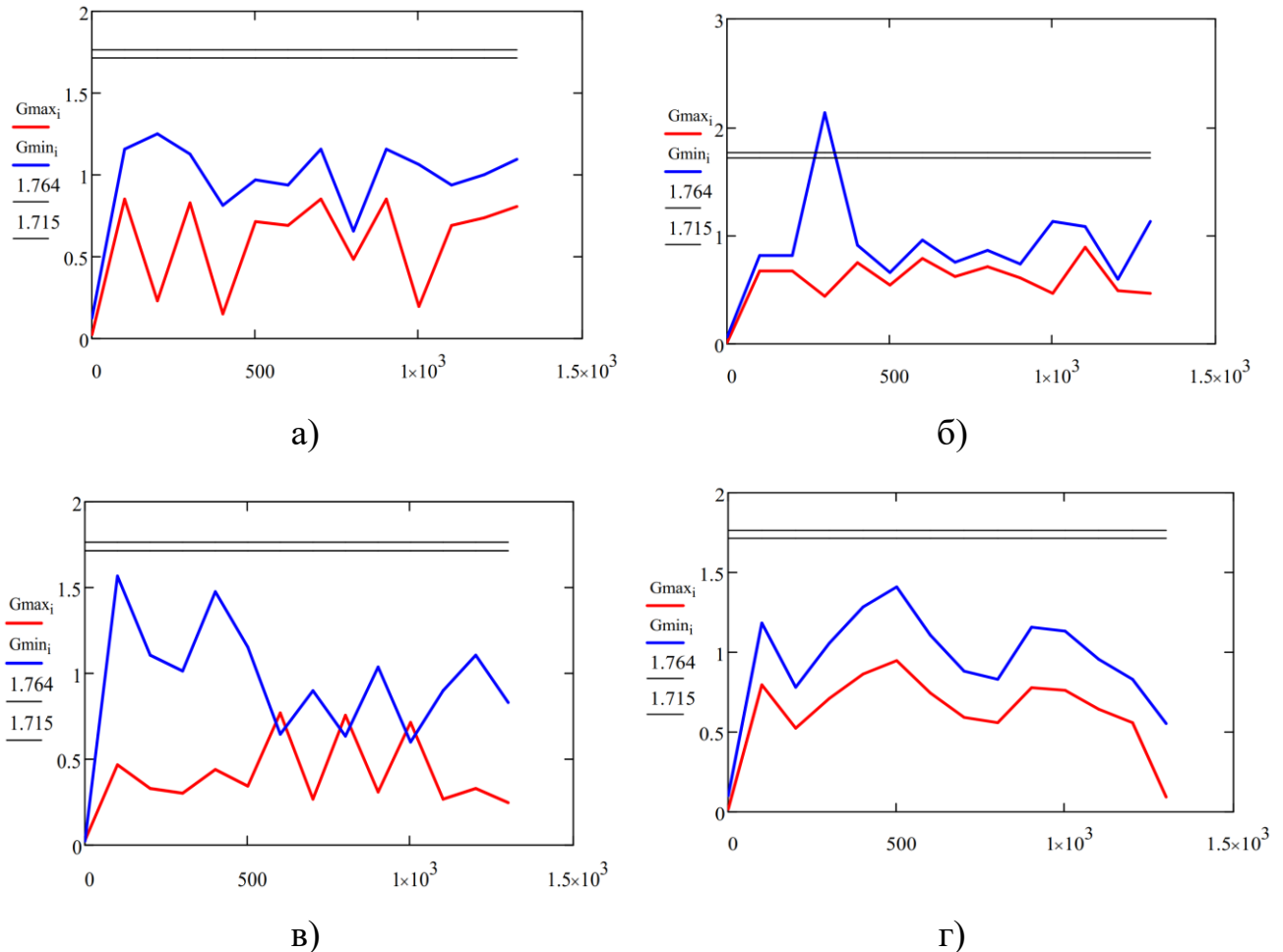


Рисунок 5.31 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Т4

Як помітно із графіка рис 5.31б, для термопарі Т2 при проведенні досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні наявні викиди та квазівикиди. Дані результати досліджень не приймаємо до подальшого оброблення результатів досліджень.

На рисунку 5.32 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні.

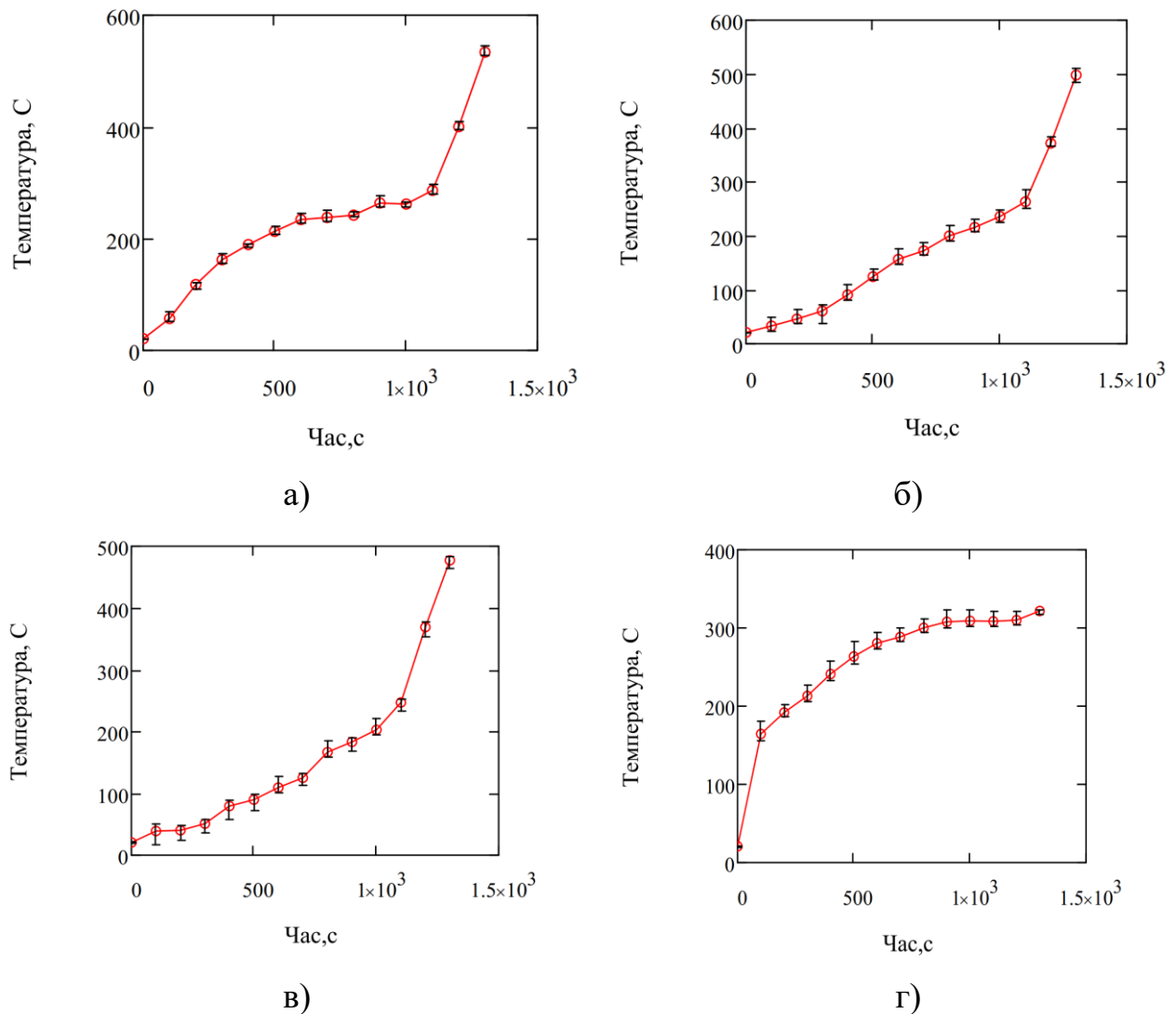


Рисунок 5.32 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) T4

Результати перевірки даних експериментальних досліджень горизонтально розміщеної батареї на нагрівальній панелі на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса приведено на рисунку 5.33.

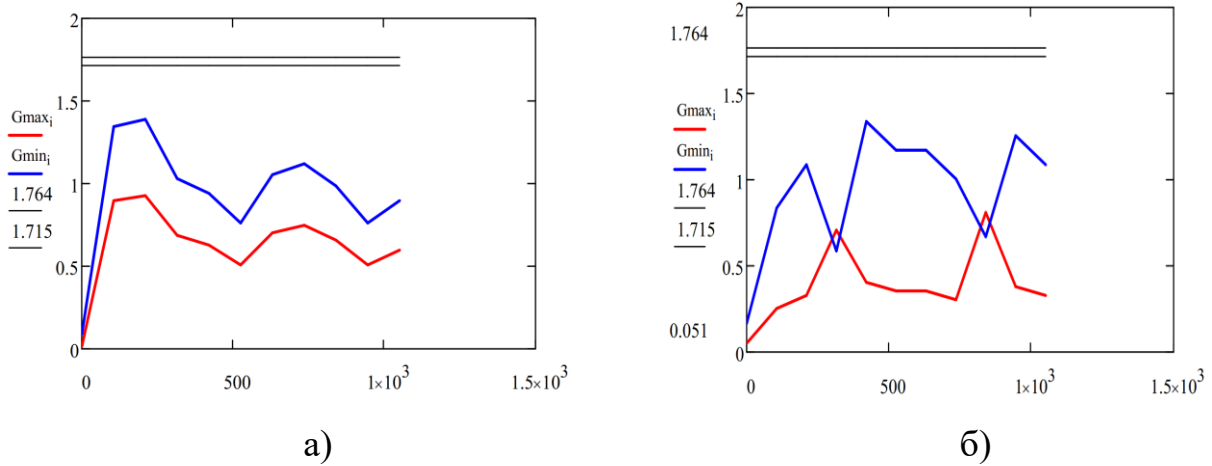


Рисунок 5.33 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

Результати експериментальних досліджень горизонтально розміщеної батареї не містить викидів чи квазівикидів, тому всі отримані результати приймаються для подальшої обробки.

На рисунку 5.34 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні

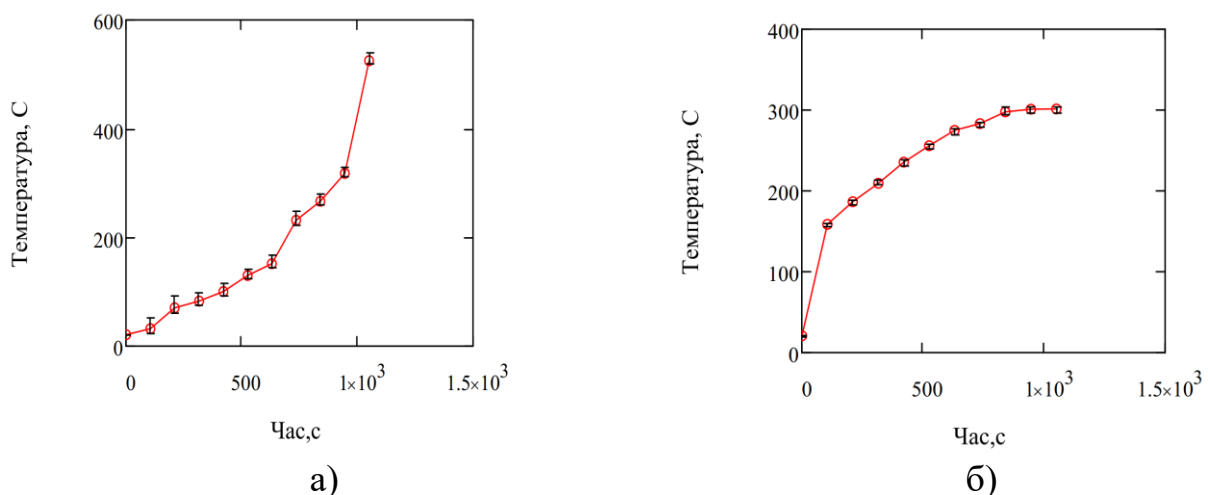


Рисунок 5.34 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

З врахуванням викидів та квазівикидів результати експериментальних досліджень усереднені та приведені нижче.

А саме на рисунку 5.35 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань анодом до електронагрівальної панелі.

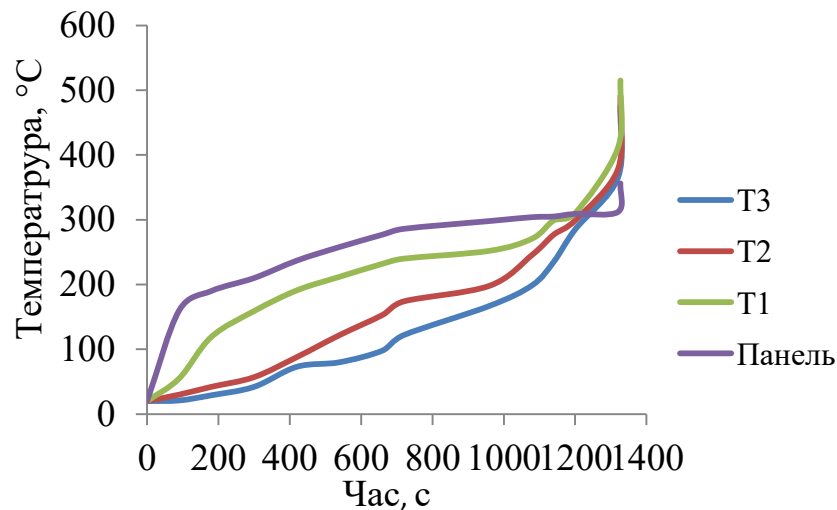


Рисунок 5.35 – Динаміка зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань анодом до електронагрівальної панелі.

Під час проведення досліджень температура розрядженої батареї монотонно зростала.

Орієнтовно на 1200 с випробувань при температурі нагрівальної панелі 309 °C спрацьовує вентиляційний отвір що супроводжується незначним «хлопком». При цьому температура на обігрівальній частині батареї становила 310 °C (T1), температура по середині батареї 298 °C (T2), а температура на катоді 284 °C (T3). До цього моменту явних ознаків перебігу термодеструктивного процесу не спостерігалось. Після цього на 1310-1320 с після початку випробувань (орієнтовно через 2 хв після відкриття вентиляційного отвору) відбувся вибух. На мент виникнення вибуху

температура на обігрівальній частині батареї становила 410 °С (Т1), температура по середині батареї 378 °С (Т2), а температура на катоді 365 °С (Т3). Горіння вентиляційних газів при цьому не відбувалось.

При цьому пікові значення температури розрядженої батареї становили на обігрівальній частині батареї 515 °С (Т1), середині батареї 491 °С (Т2), та не на обігрівальній частині 475 °С (Т3). Втрата маси батареї при цьому становила 8-9 г.

На рисунку 5.36 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань катодом до електронагрівальної панелі. Динаміка зміни температури була максимально наближеною до випадку із розміщенням батареї анодом вгору.

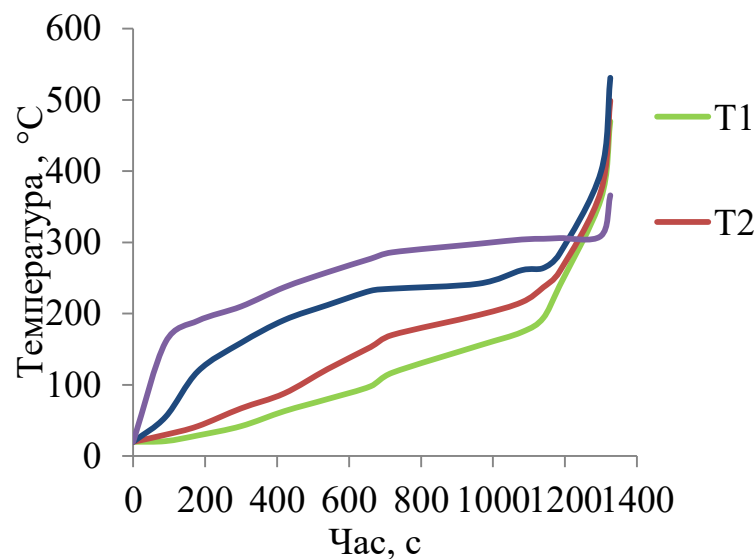


Рисунок 5.36 – Динаміка зміни температури розміщеної вертикально катодом до електронагрівальної панелі повністю розрядженої батареї під час випробувань

Орієнтовно на 1185 с випробувань при температурі нагрівальної панелі 305 °С спрацьовує вентиляційний отвір що супроводжується незначним «хлопком». При цьому температура на обігрівальній частині батареї становила 284 °С (Т3), температура по середині батареї 259 °С (Т2), а температура на

катоді 238 °С (Т1). До цього моменту явних ознаків перебігу термодеструктивного процесу не спостерігалось. Після цього на 1300 с після початку випробувань (орієнтовно через 2 хв після відкриття вентиляційного отвору) відбувся вибух. На момент виникнення вибуху температура на обігрівальній частині батареї становила 399 °С (Т3), температура по середині батареї 372 °С (Т2), а температура на катоді 359 °С (Т1). Вибух супроводжувався горіння вентиляційних газів продовж 6-7 с.

При цьому пікові значення температури розрядженої батареї становили на обігрівальній частині батареї 531 °С (Т3), середині батареї 489 °С (Т2), та не на обігрівальній частині 475 °С (Т1).

Варто відзначити, що при такому розміщенні батареї, вентиляційний отвір спрацював на 25-30 °С меншій температурі ніж при розміщенні батареї анодом донизу. Це пояснюється кращим і швидшим прогріттям тієї частини батареї, де конструктивно влаштовано вентиляційний отвір. Разом з тим це зумовило і нижчу температуру, при якій відбувся вибух.

Також при такому розміщенні спостерігались дещо більші температури на обігрівальній частині батареї (515 °С проти 531 °С). Це зумовлено кращим викидом розпечених частинок та вентиляційних газів ніж у випадку розміщення батареї анодом донизу. Це підтверджується також з розтанням температури на термопарі, яка фіксувала температура нагрівальної панелі з 309 °С (на момент вибуху) до 370 °С на момент його завершення. Горіння вентиляційних газів при цьому не відбувалось. Втрата маси батареї при цьому становила 9-10 г.

На рисунку 5.37 наведено динаміку зміни температури горизонтально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань. Так як прогріття батареї здійснювалось рівномірно і різниця температур на трьох термопарах складало в межах 1-3 °С, тому було прийнято рішення використовувати одну термопару, яка розміщувалась між обігрівальною поверхнею батареї і захисним кожухом.

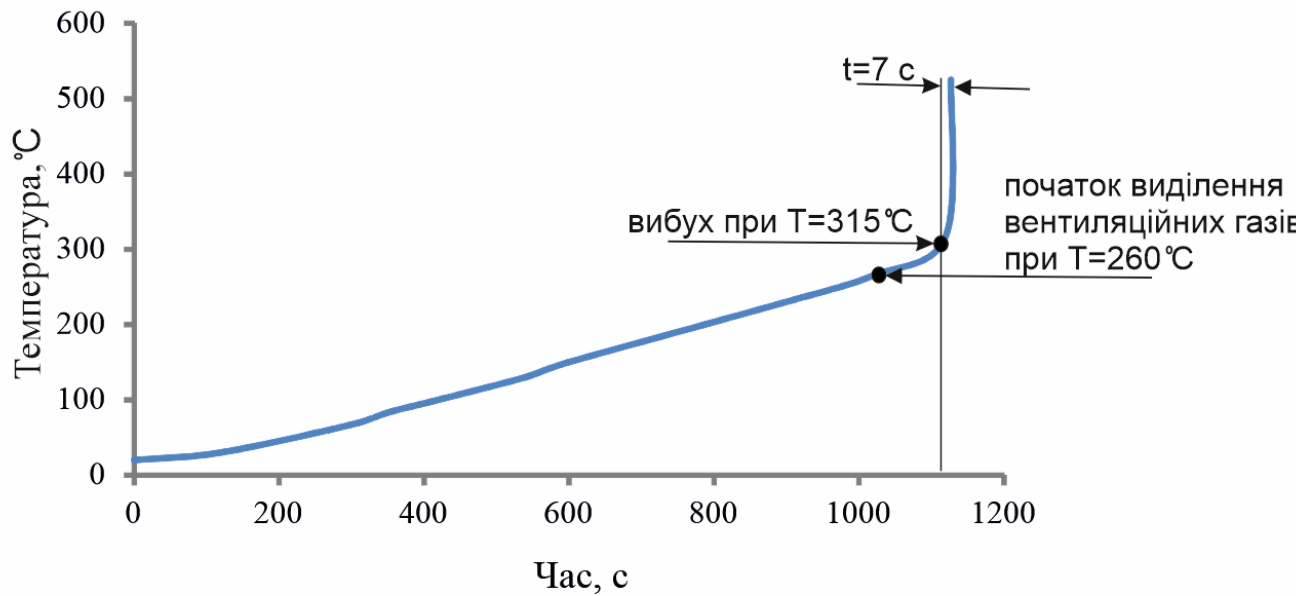
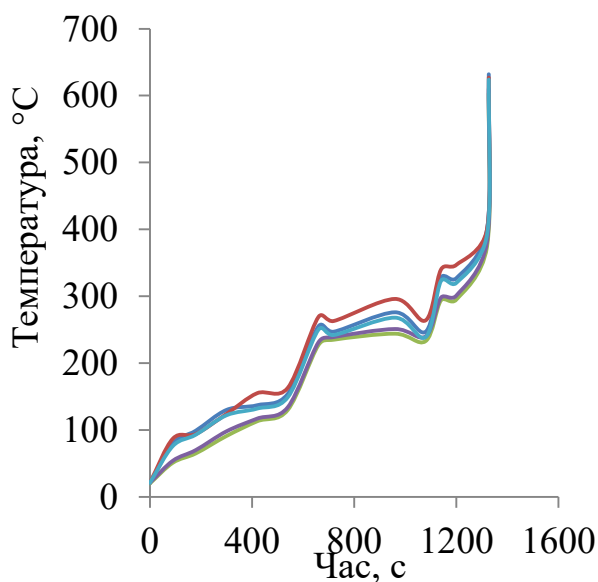


Рисунок 5.37 – Динаміка зміни температури горизонтально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань

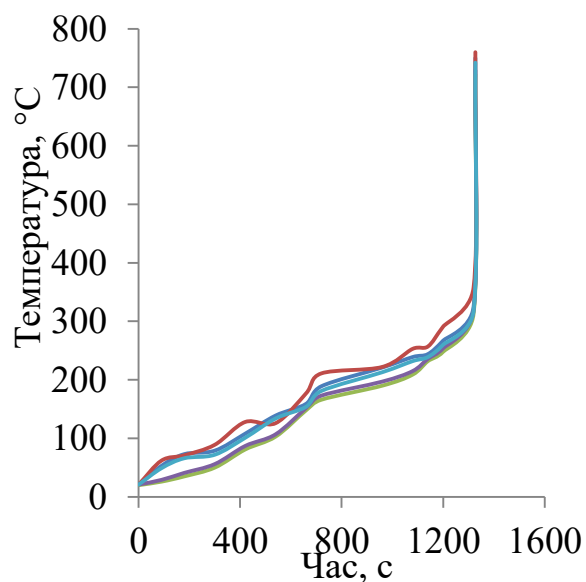
Під час нагрівання розрядженої батареї при досягненні 260 °C почало відбуватись інтенсивне виділення вентиляційних газів. Температура продовжувала збільшуватись завдяки роботі електронагрівальній панелі. При досягненні 315 °C відбувся вибух із миттєвим викидом великої кількості вентиляційних газів. Разом з тим це зумовило впродовж 7 с зростання температури до 525-532 °C. Горіння вентиляційних газів при цьому не відбувалось. Втрата маси батареї при цьому становила 8-9 г.

5.2.2. Результати експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50 % з використанням електронагрівальної панелі.

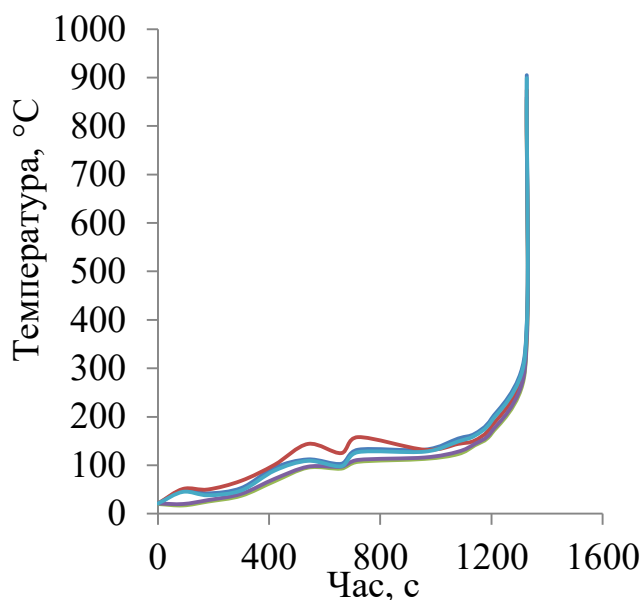
На рисунку 5.38 наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 50 % розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні.



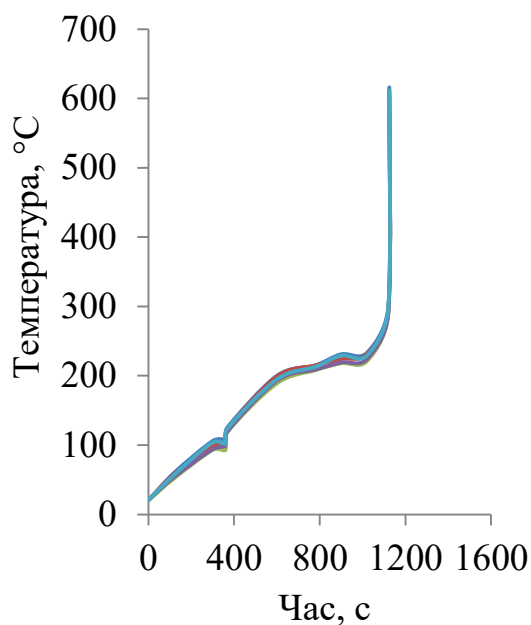
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.38 – Результати досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50 % розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса для експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених анодом до обігрівальної поверхні приведено на рисунку

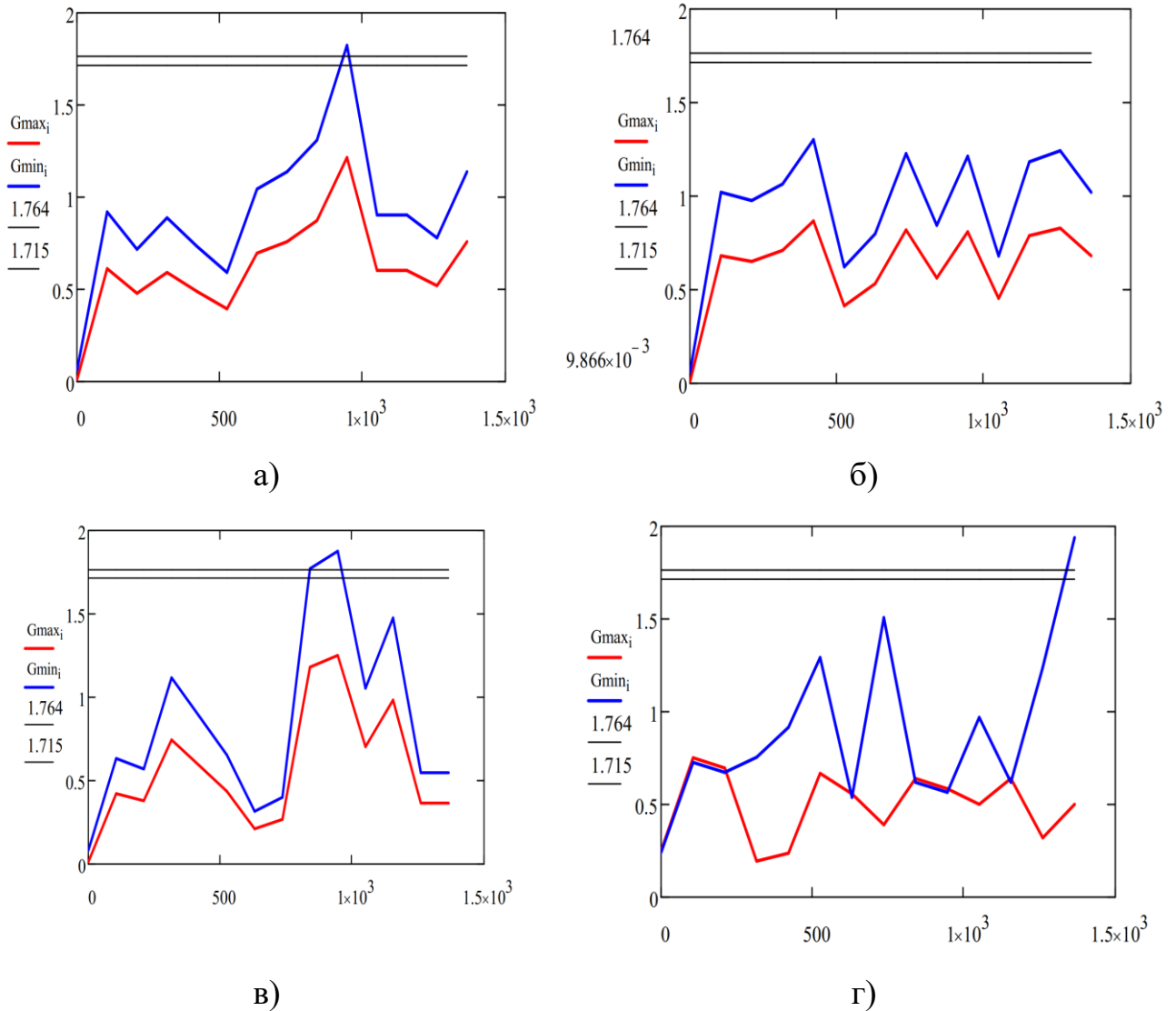


Рисунок 5.39 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні заряджених на 50% з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Т4

Використання критерію Грабсса, показало, що у вибірці експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених анодом до обігрівальної поверхні наявні викиди та квазівикиди для термопар Т3 та Т4.

На рисунку 5.40 зображено дисперсію розсіювань експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% та розміщених анодом до обігрівальної поверхні.

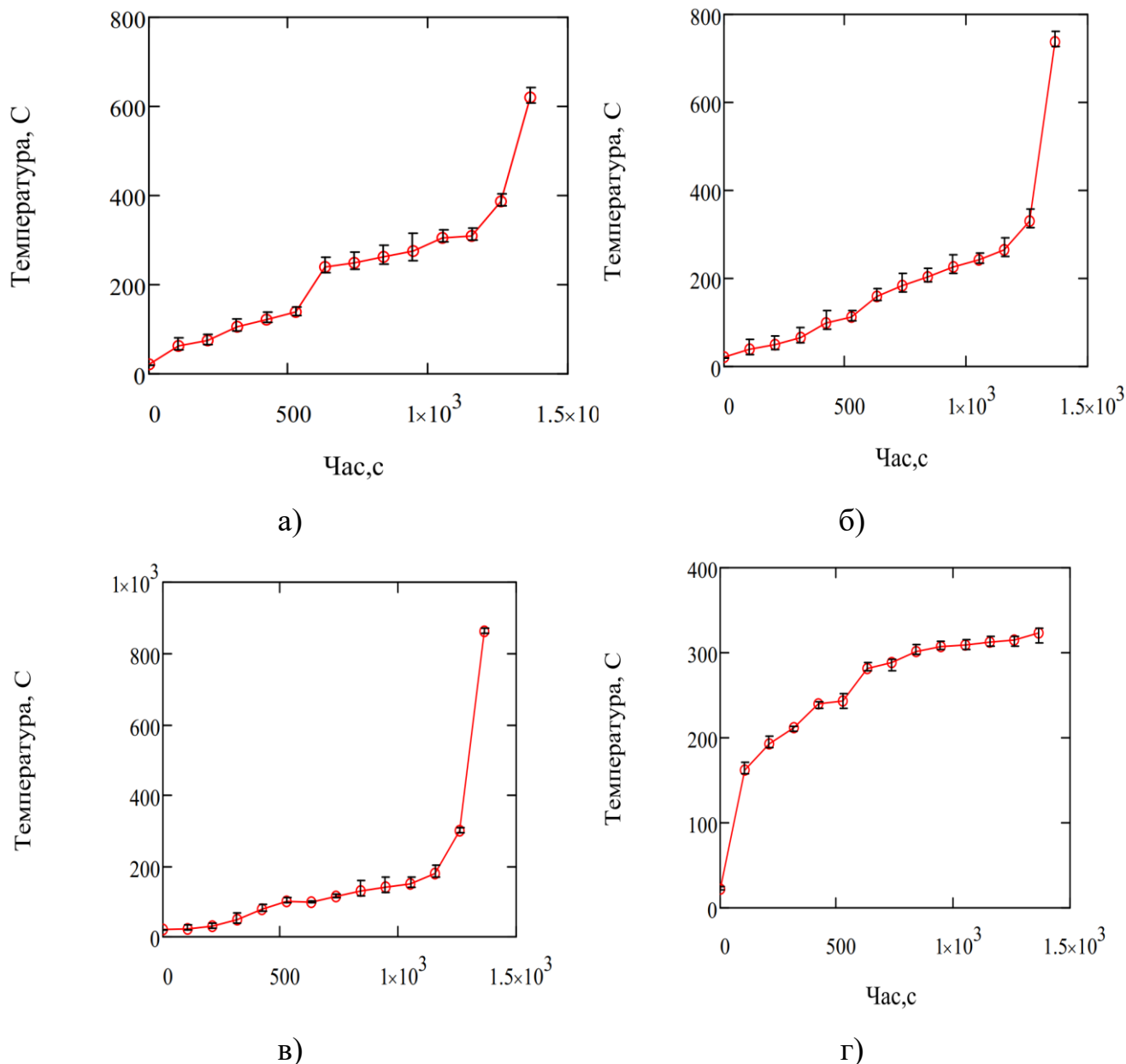
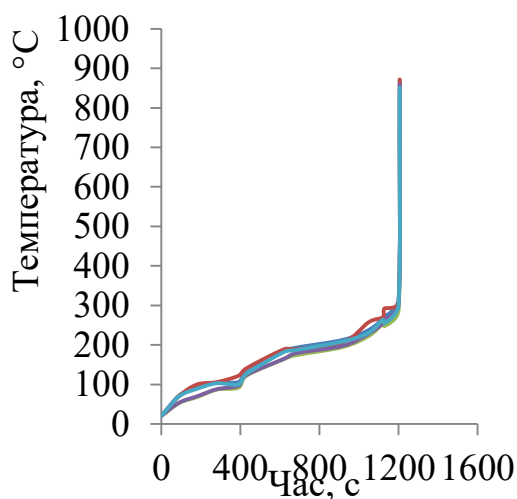
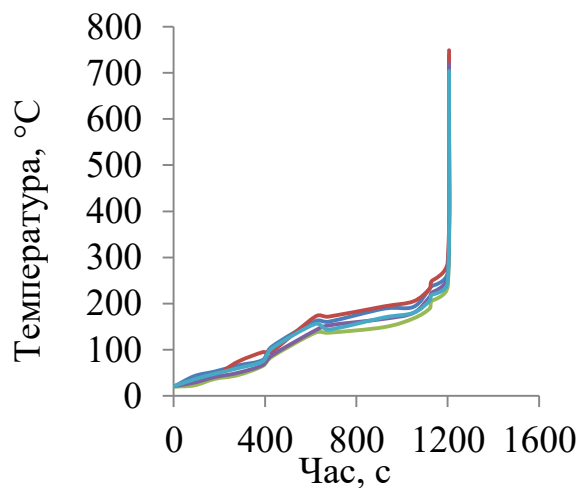


Рисунок 5.40 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Т4

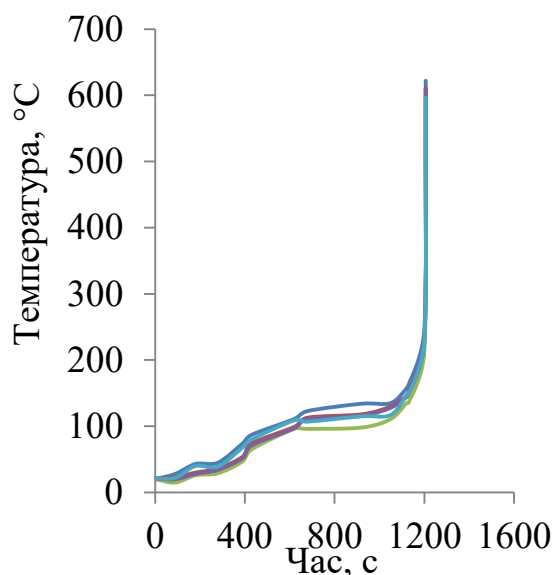
На рисунку 5.41 наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених вертикально катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для кожної термопари.



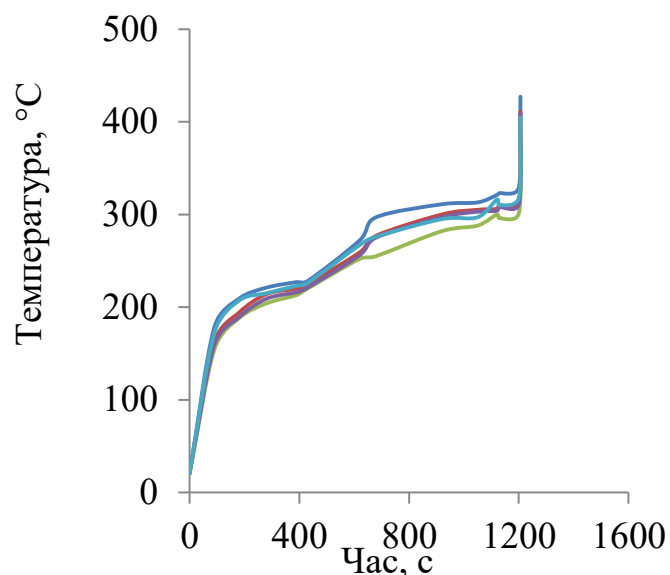
а)



б)



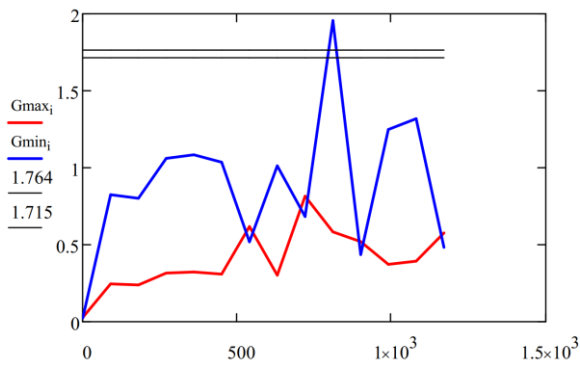
в)



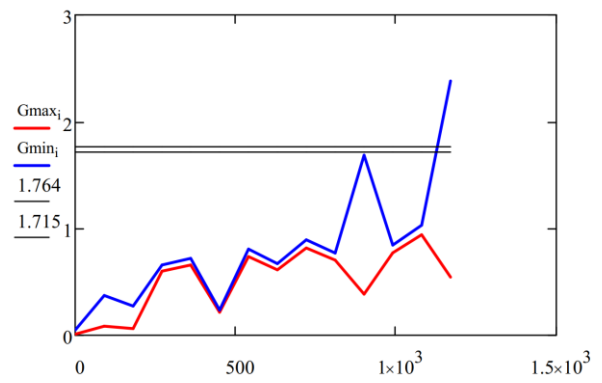
г)

Рисунок 5.41 – Результати досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

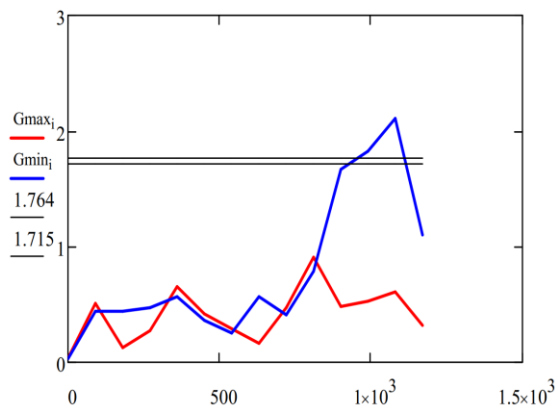
Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса для експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених катодом до обігрівальної поверхні приведено на рисунку 5.42.



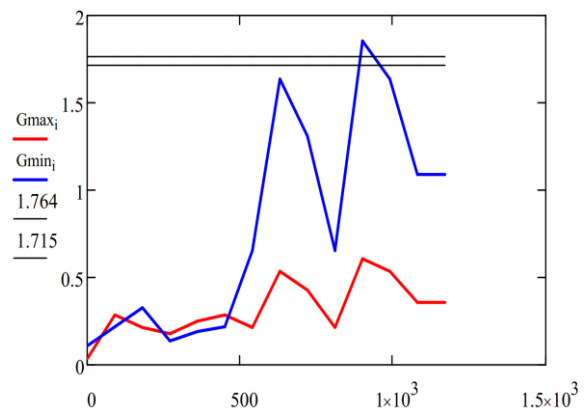
а)



б)



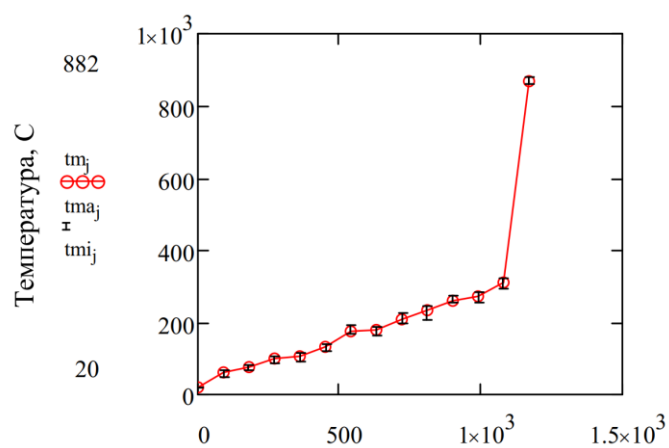
в)



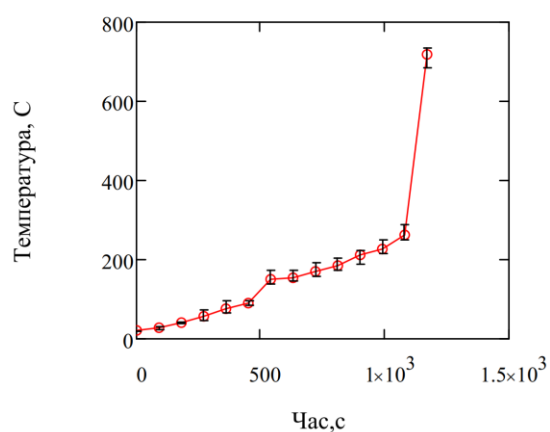
г)

Рисунок 5.42 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні заряджених на 50% з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

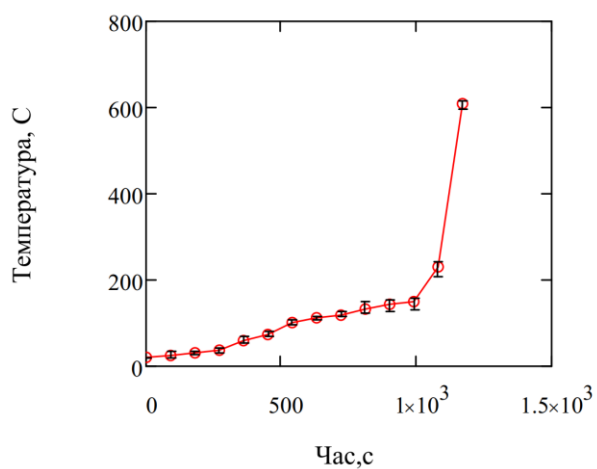
На рисунку 5.43 зображено дисперсію розсіювань експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50% та розміщених катодом до обігрівальної поверхні.



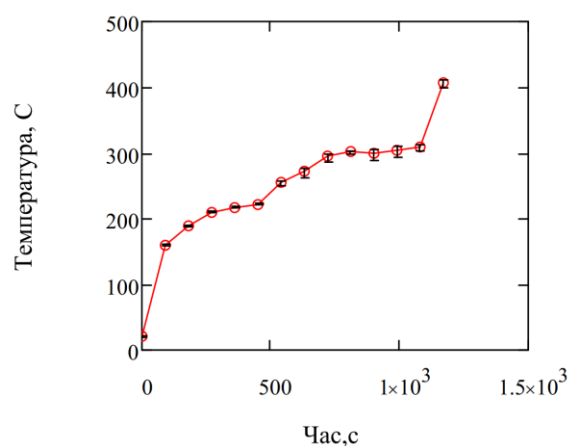
а)



б)



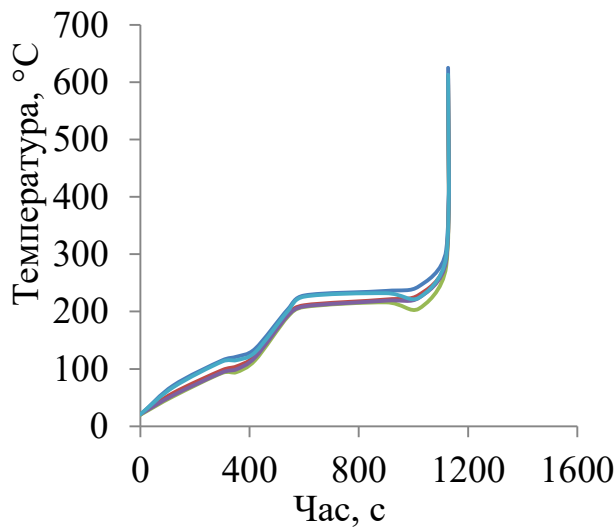
в)



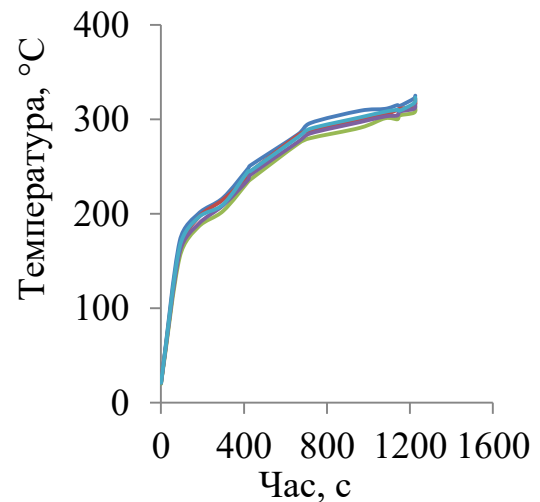
г)

Рисунок 5.43 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей заряджених на 50% розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

На рисунку 5.44. наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 50 % розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні.



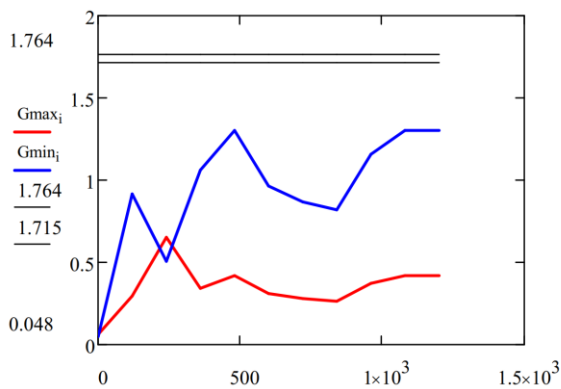
а)



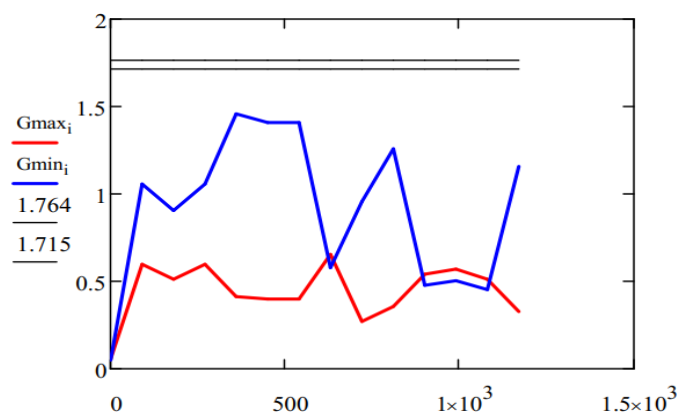
б)

Рисунок 5.44 – Результати досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

Результати перевірки даних експериментальних досліджень горизонтально розміщеної батареї на нагрівальній панелі на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса приведено на рисунку 5.45.



а)



б)

Рисунок 5.45 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 50 % розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

На рисунку 5.46 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні

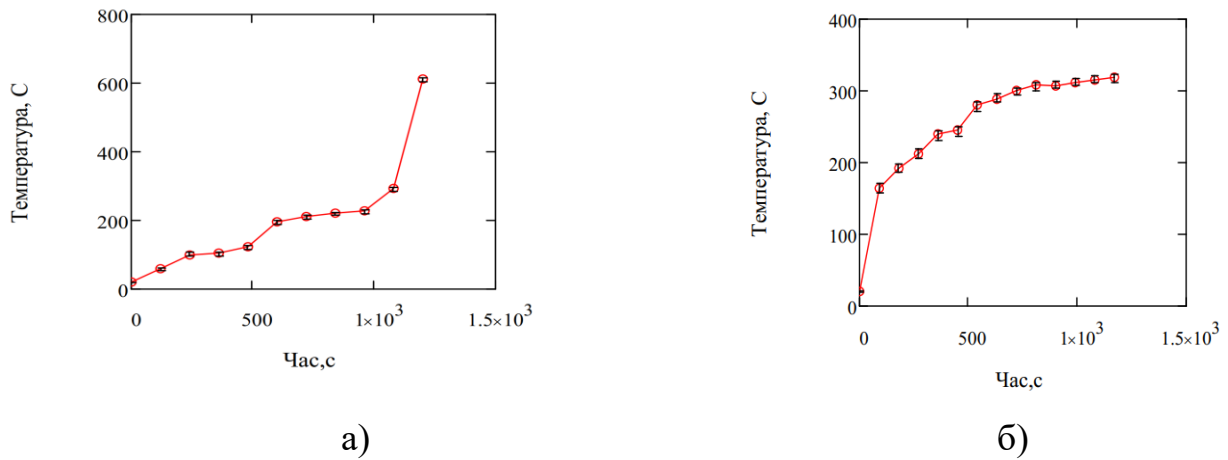


Рисунок 5.46 – Дисперсія експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

З врахуванням викидів та квазівикидів усереднені результати досліджень для літій-іонних елементів заряджених на 50% у різному просторовому розміщенні наведено нижче. На рисунку 5.47 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю зарядженої на 50 % батареї під час випробувань анодом вниз.

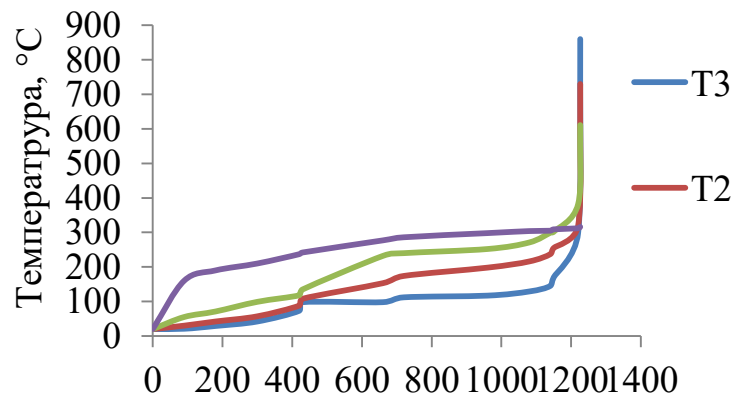


Рисунок 5.47 – Динаміка зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом до електронагрівальної панелі

Під час проведення досліджень температура батареї монотонно зростала до 7 хв проведення експерименту

Орієнтовно на 7 хв випробувань при температурі нагрівальної панелі 220 °С і при температурі 118 °С (Т1) на обігрівальній поверхні температура починає різко зростати. Зростання температури фіксують також термопари Т2 і Т3, де температура зростає з 88 °С до 108 °С та 73 °С до 98 °С відповідно. Це обумовлено руйнуванням сепаратора і виникненням короткого замикання внаслідок якого виділяється енергія, що і зумовлює ріст температури. Орієнтовно на 960-980 с після початку випробувань пішов дим, які супроводжувався шумом. Це відбулось при температурі 252 °С на обігрівальній поверхні батареї (термопараТ1). Вже через 190 с після цього відкрився вентиляційний отвір з притаганим йому «хлопком». Це відбулось на 1150-1160 с після початку випробувань та температурі 302 °С. При досягненні температури на обігрівальній поверхні Т1=382 °С стається вибух із викидом вентиляційних газів, які горіли. Таке горіння супроводжувалось 5-6 с і температура на обігрівальній поверхні становила після завершення вибуху 611 °С (Т2), по середині батареї 730 °С (Т3), а на катоді (термопара Т3) – 860 °С. Власне максимальна температура катоді обумовлена тим, що там розміщений вентиляційний отвір, через який виходять гази, що горять.

Втрата маси батареї при цьому становила 10-12 г.

На рисунку 5.48 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю зарядженої на 50 % батареї під час випробувань анодом вгору. При досягненні температури 98 °С (Т3) на обігрівальній поверхні температура починає різко зростати. Зростання температури фіксують також термопари Т1 і Т2, де температура зростає з 68 °С до 89 °С та 53 °С до 78 °С відповідно.

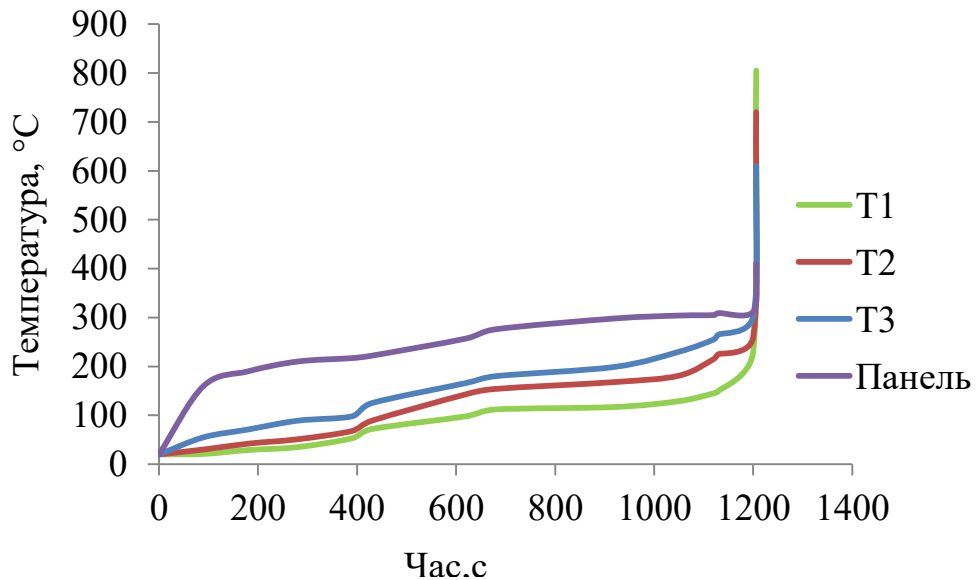


Рисунок 5.48 – Динаміка зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань катодом до електронагрівальної панелі

Це обумовлено руйнуванням сепаратора і виникненням короткого замикання внаслідок якого виділяється енергія, що і зумовлює ріст температури. Орієнтовно на 930-960 с після початку випробувань пішов дим, який супроводжувався шумом. Це відбулось при температурі 232 °C на обігрівальній поверхні батареї (термопара T1). Вже через 170 с після цього відкрився вентиляційний отвір з притаманним йому «хлопком». Це відбулось на 1110-1120 с після початку випробувань. При досягненні температури на обігрівальній поверхні T1=302 °C стається вибух із викидом вентиляційних газів, які горіли. Таке горіння супроводжувалось 5-6 с і температура на обігрівальній поверхні становила після завершення вибуху 872 °C (T1), по середині батареї 720 °C (T3), а на катоді (термопара T3) – 610 °C. Втрата маси батареї при цьому становила 10-12 г.

На рисунку 5.49 наведено динаміку зміни температури горизонтально розміщеної зарядженої на 50 % батареї під час випробувань.

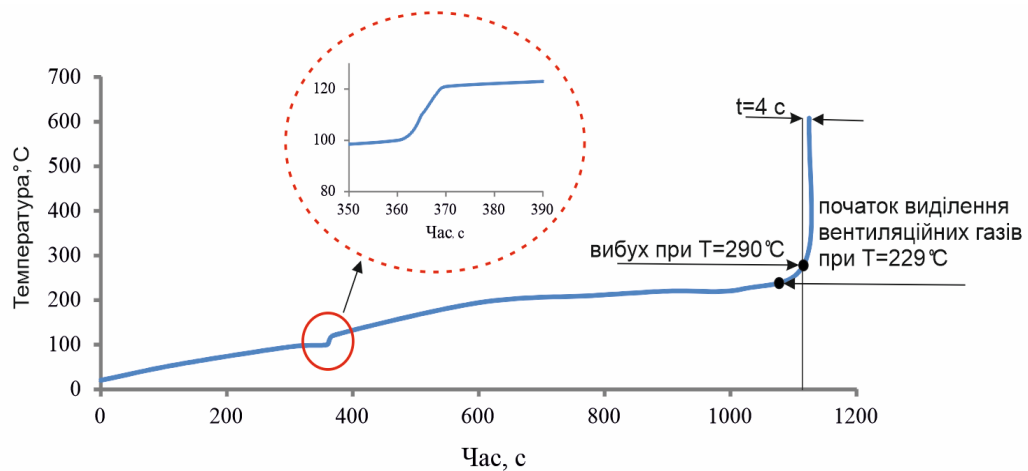
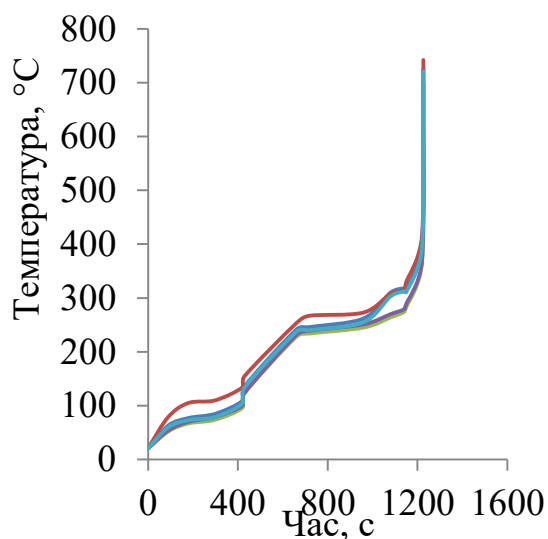


Рисунок 5.49 – Динаміка зміни температури горизонтально розміщеної зарядженої на 50 % батареї під час випробувань

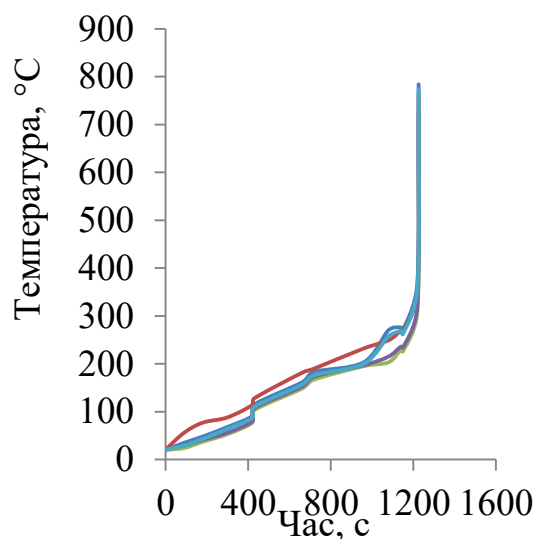
Під час нагрівання зарядженої на 50% батареї при досягненні 95-100 °C відбувається стрибок температури до 116-120 °C впродовж 9-10 с. Таке явище пояснюється початком виникнення екзотермічної реакції, яка і генерує виділення тепла. Після цього температура батареї продовжує монотонно зростати за рахунок роботи електронагрівальної панелі. При досягненні температури 229 °C спрацьовує вентиляційний клапан і йде виділення вентиляційних газів. І вже через 45-50 с при досягненні температури 290 °C відбувається вибух, із горінням газів. Це спричиняє ріст температури батареї до 600-620 °C впродовж 4 с. Втрата маси батареї при цьому становила 11-13 г.

5.2.3 Результати натурних досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів електромобілів заряджених на 100 % з використанням електронагрівальної панелі.

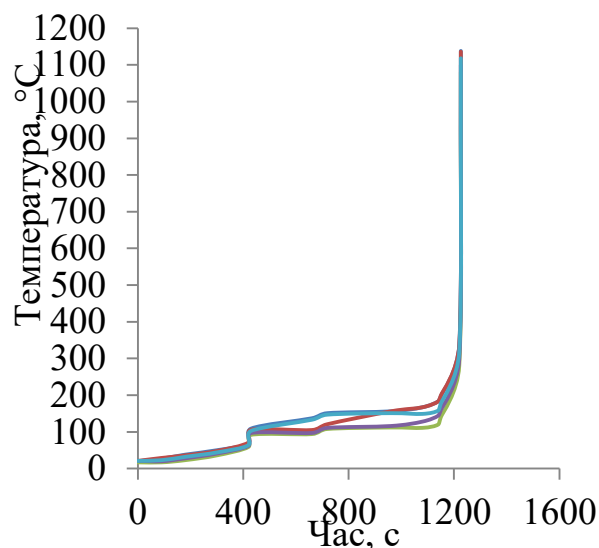
На рисунку 5.50 наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 100 % розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні.



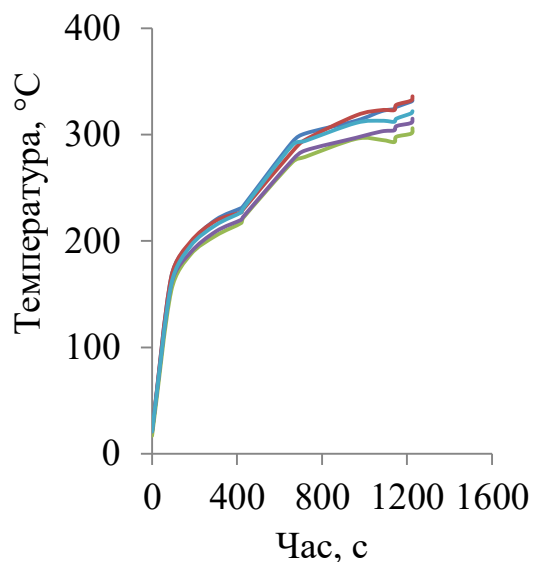
а)



б)



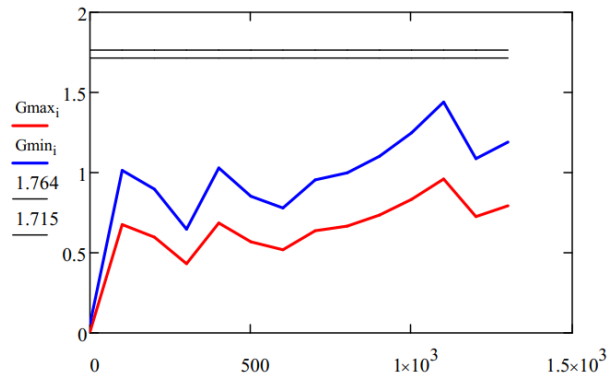
в)



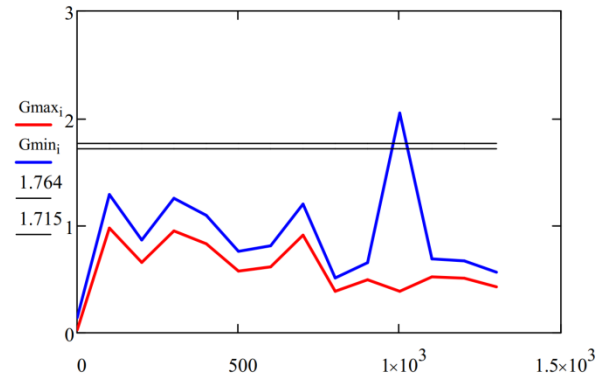
г)

Рисунок 5.50 – Результати досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

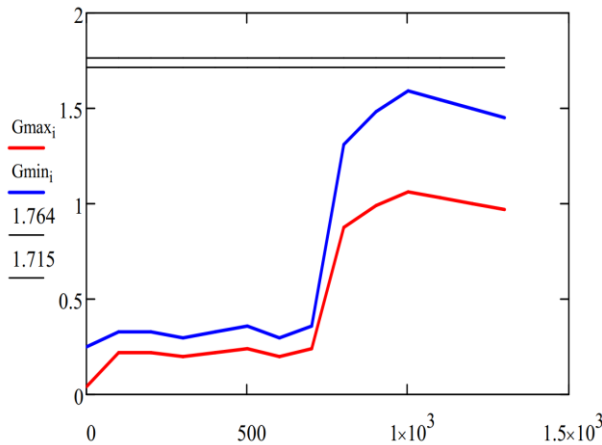
Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса для експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні приведено на рисунку 5.51.



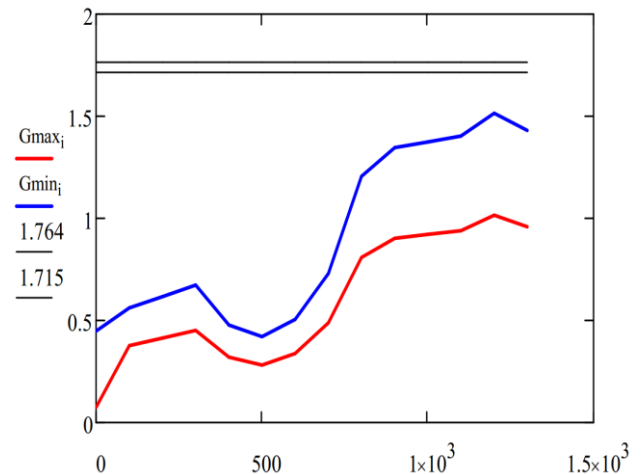
а)



б)



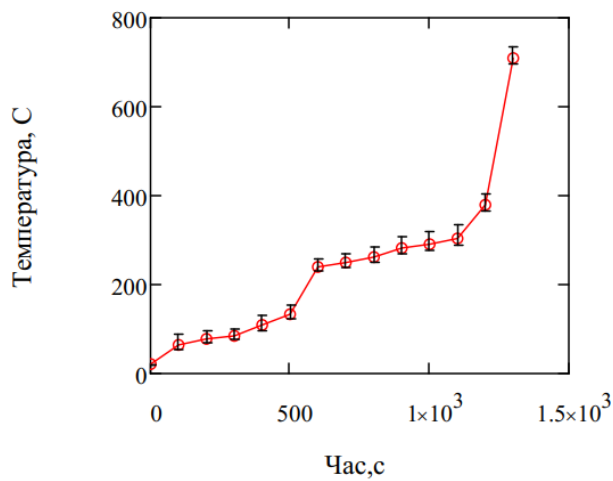
в)



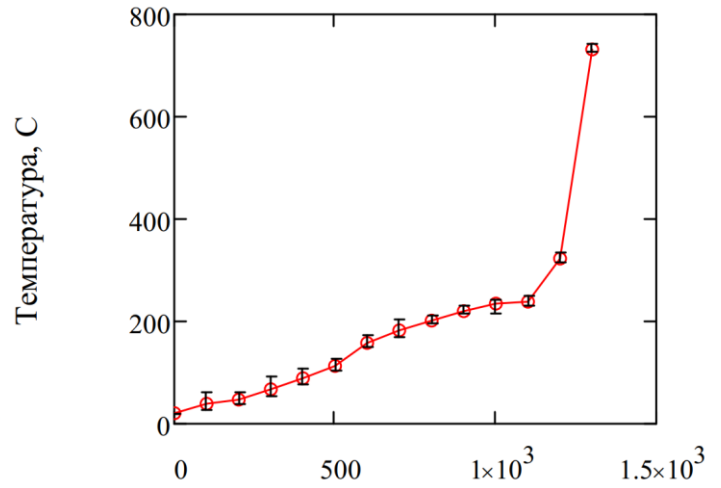
г)

Рисунок 5.51 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні заряджених на 100% з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

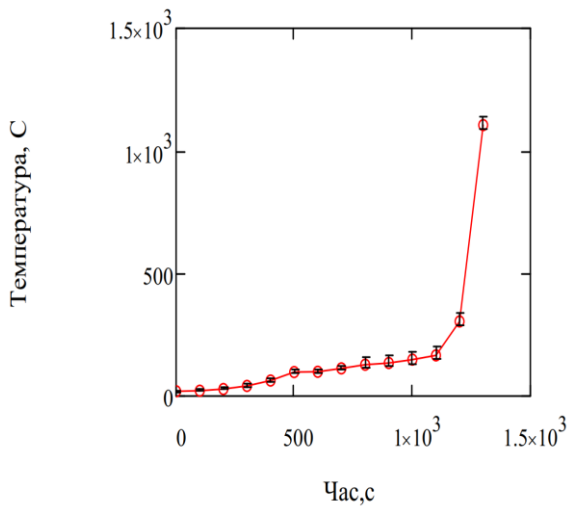
На рисунку 5.52 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні



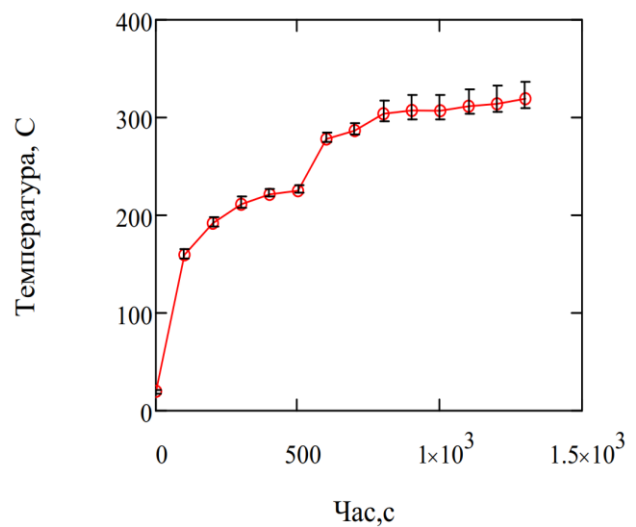
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.52 – Дисперсія експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених анодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

На рисунку 5.53 наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 100 % розміщених вертикально катодом до обігрівальної поверхні.

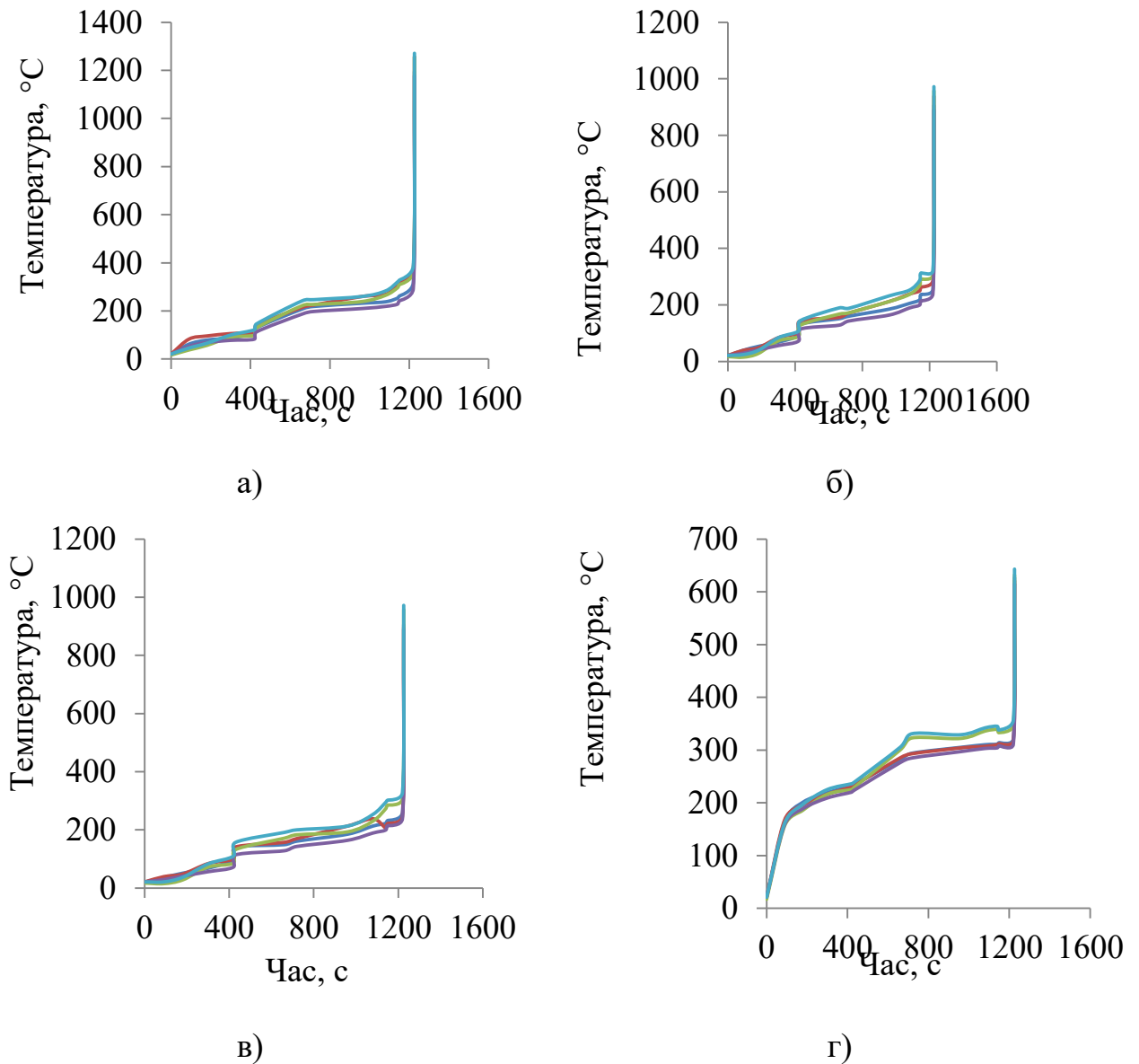


Рисунок 5.53 – Результати досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Т4

Результати перевірки даних експериментальних досліджень на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса для експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених катодом до обігрівальної поверхні приведено на рисунку 5.54

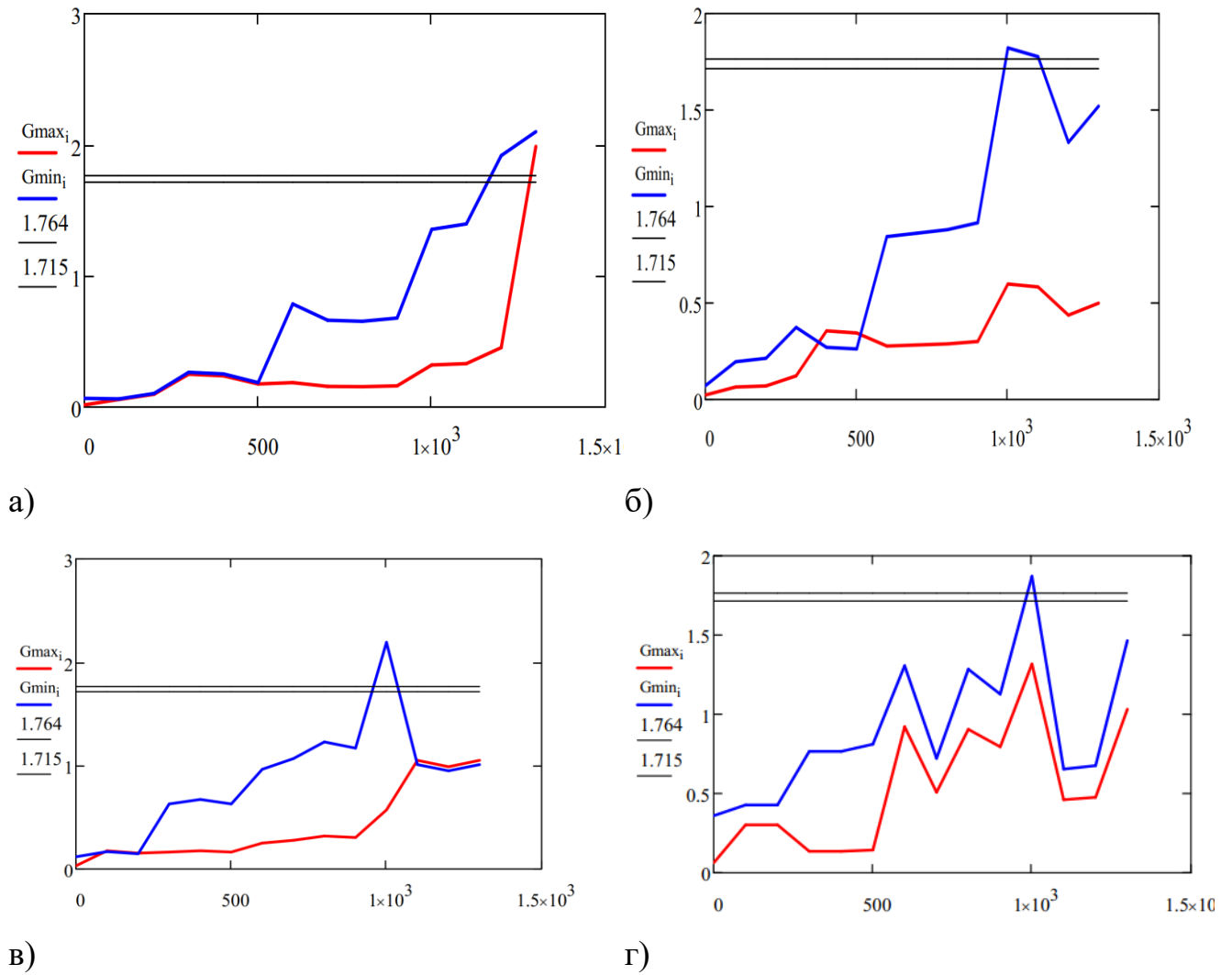


Рисунок 5.54 – Результати з визначення викидів та квазівикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей розміщених катодом до обігрівальної поверхні заряджених на 100% з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

На рисунку 5.55 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених вертикально катодом до обігрівальної поверхні

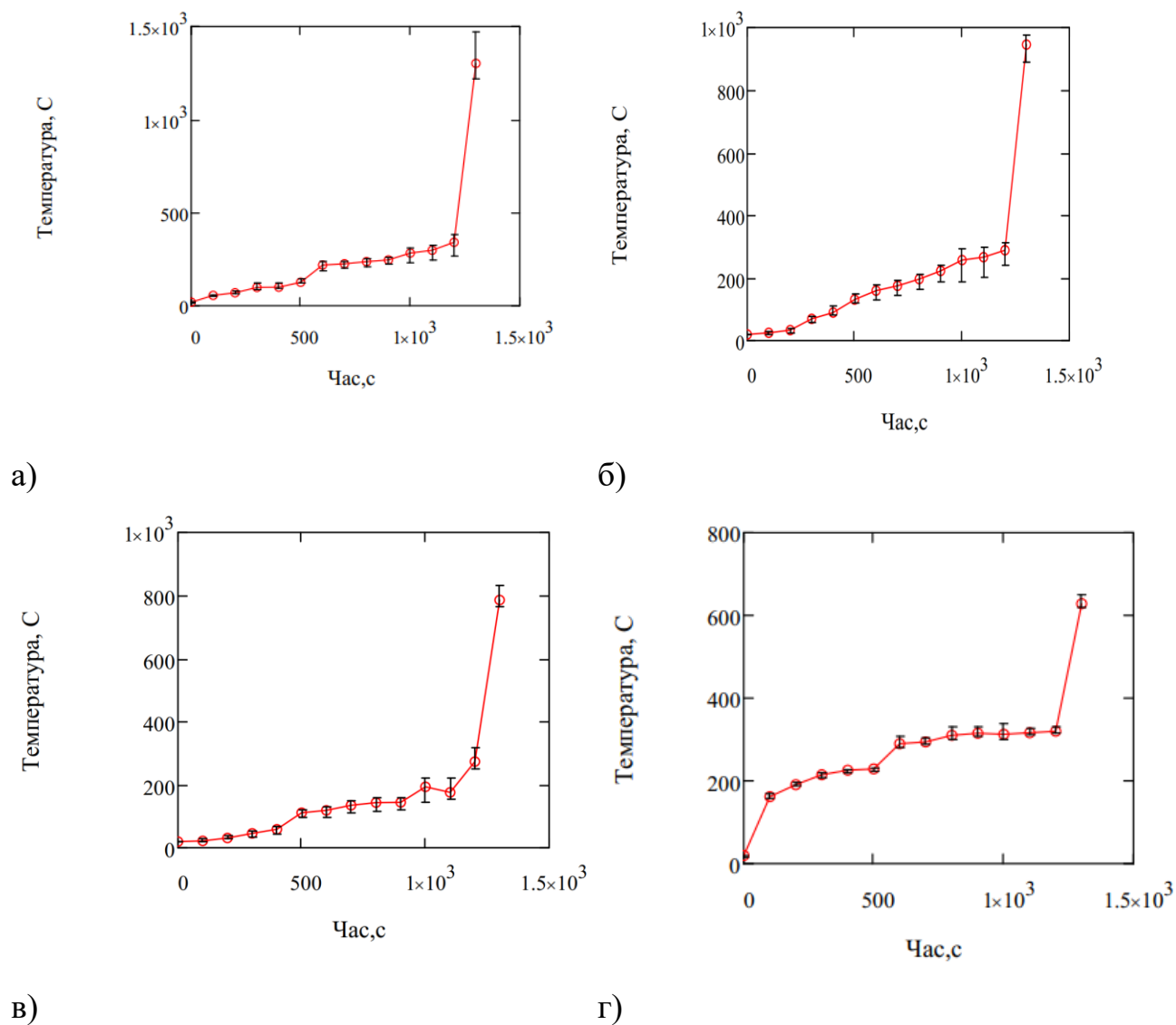
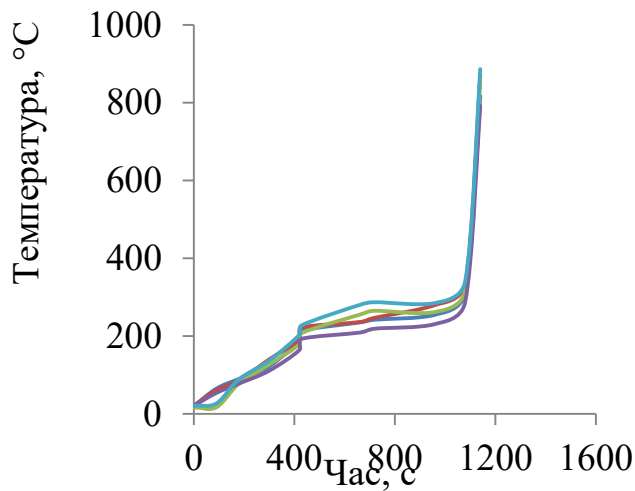
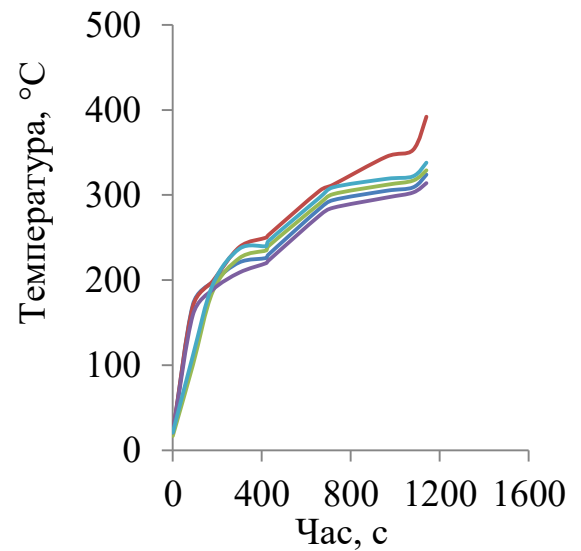


Рисунок 5.55 – Дисперсія експериментальних досліджень розряджених силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених катодом до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, г) Панель

На рисунку 5.56 наведено результати досліджень з нагрівання силових літій-іонних батарей заряджених на 100 % розміщених горизонтально обігрівальної поверхні.



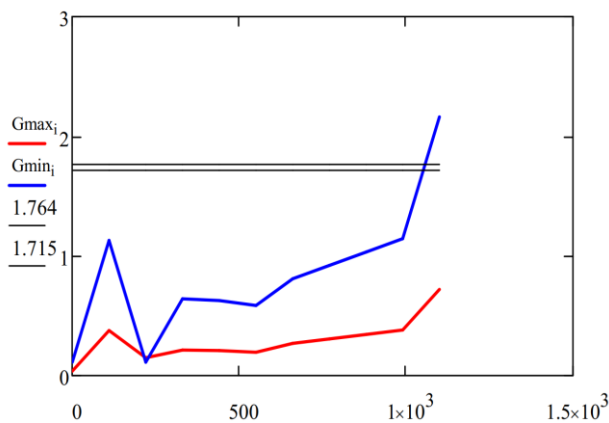
а)



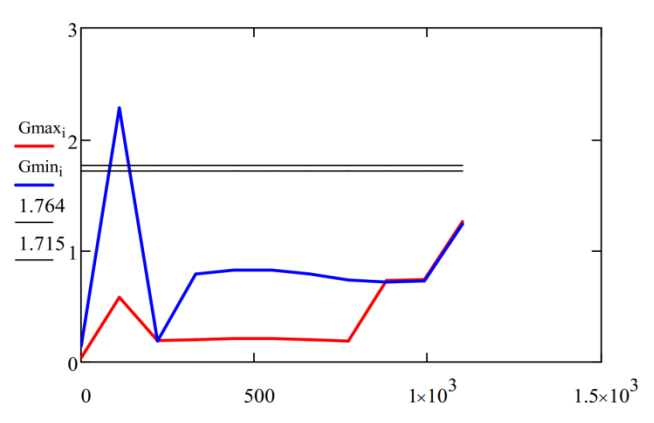
б)

Рисунок 5.56 – Результати досліджень розряджених силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

Результати перевірки даних експериментальних досліджень горизонтально розміщеної батареї на нагрівальній панелі на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса приведено на рисунку 5.57



а)



б)

Рисунок 5.57 – Результати з визначення викидів та квазिवикидів експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100 % розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

На рисунку 5.58 наведено дисперсія розсіювань експериментальних досліджень для заряджених на 100 % силових літій-іонних батарей розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні.

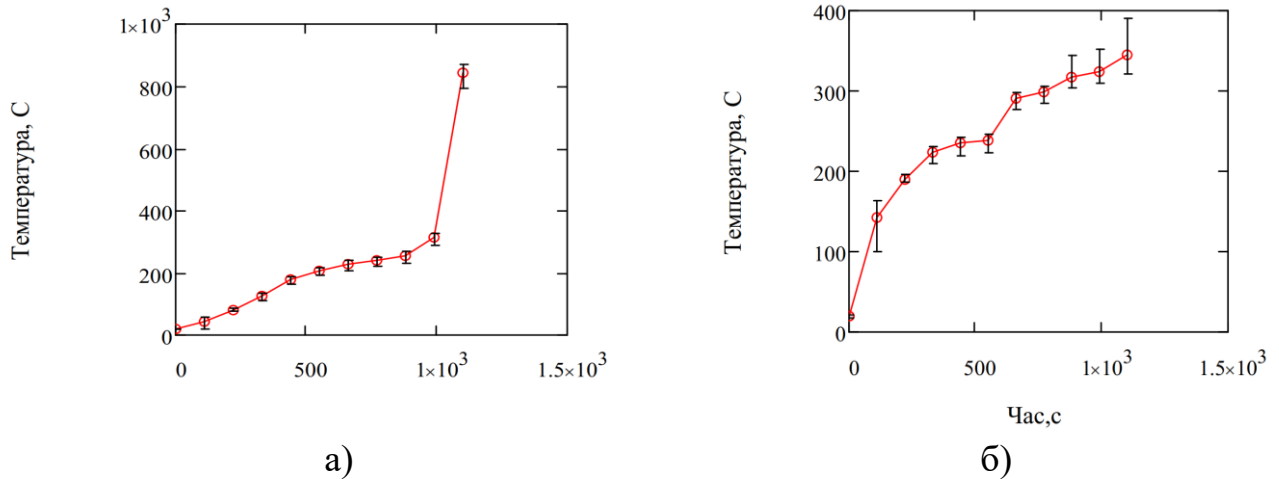


Рисунок 5.58 – Дисперсія експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей заряджених на 100% розміщених горизонтально до обігрівальної поверхні з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3, г) Панель

З врахуванням викидів та квазівикидів усереднені результати досліджень для літій-іонних елементів заряджених на 100% у різному просторовому розміщенні наведено нижче.

На рисунку 5.59 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю зарядженої батареї під час випробувань анодом вниз.

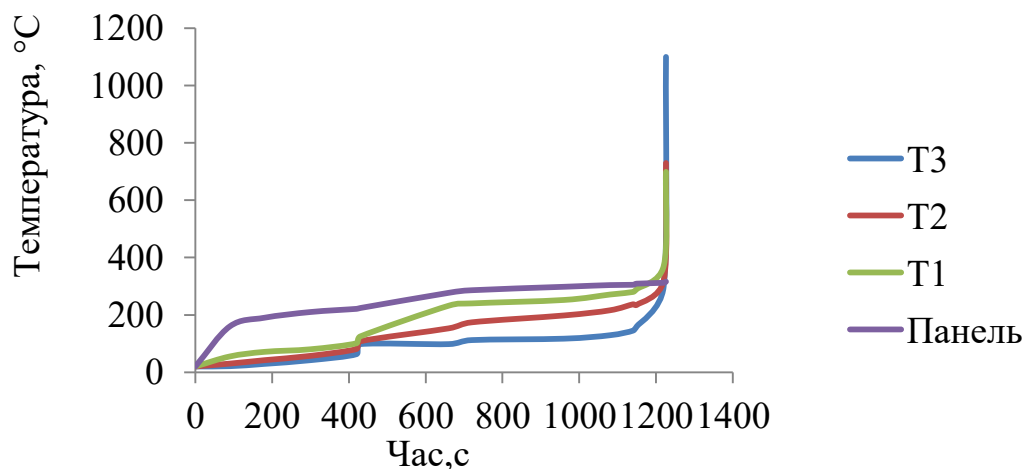


Рисунок 5.59 – Динаміка зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом вниз

При температурі 101 °С (Т1) на обігрівальній поверхні температура починає різко зростати. Зростання температури фіксують також термопари Т2 і Т3, де температура зростає з 81 °С до 105 °С та 64 °С до 94 °С відповідно. При температурі на обігрівальній поверхні 290 °С спрацьовує вентиляційний отвір, а при 369 °С стається вибух із викидом вентиляційних газів. Таке горіння супроводжувалось 3-4 с і температура на обігрівальній поверхні становила після завершення вибуху 611 °С (Т2), по середині батареї 730 °С (Т3), а на катоді (термопара Т3) – 1100 °С. Втрата маси батареї при цьому становила 17-22 г.

На рисунку 5.60 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю зарядженої під час випробувань анодом вгору.

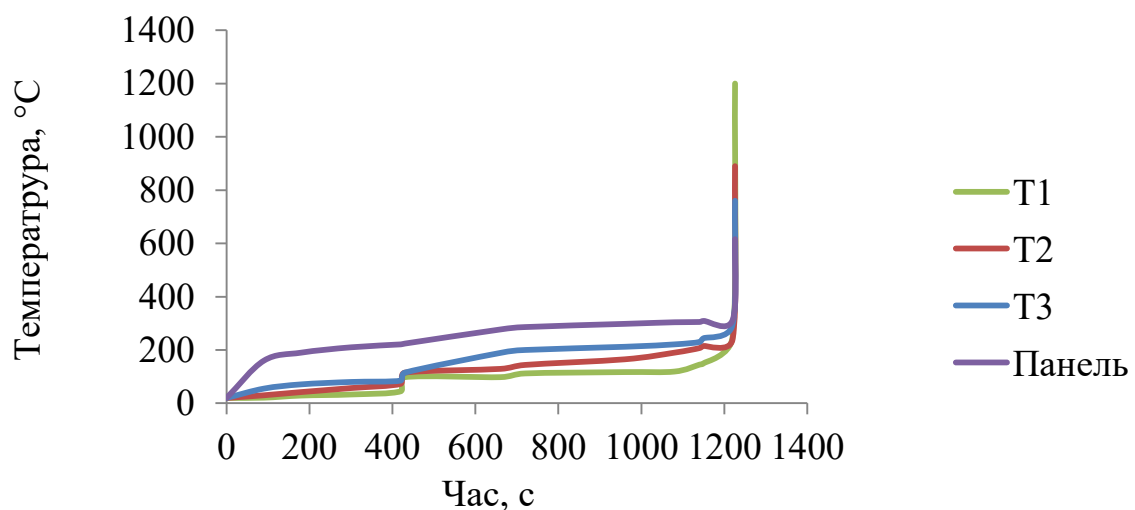


Рисунок 5.60 – Динаміка зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом вгору

При досягненні температури 85 °С (Т3) на обігрівальній поверхні температура починає різко зростати. При температурі на обігрівальній поверхні 244 °С спрацьовує вентиляційний отвір, а при 295°С стається вибух із викидом вентиляційних газів. Таке горіння супроводжувалось 3-4 с і температура на обігрівальній поверхні становила після завершення вибуху 1180 °С (Т1), по середині батареї 790 °С (Т2), а на катоді (термопара Т3) – 1100 °С. Втрата маси

батареї при цьому становила 17-22 г. Втрата маси батареї при цьому становила 18-25 г.

На рисунку 5.61 наведено динаміку зміни температури горизонтально розміщеної повністю зарядженої батареї під час випробувань.

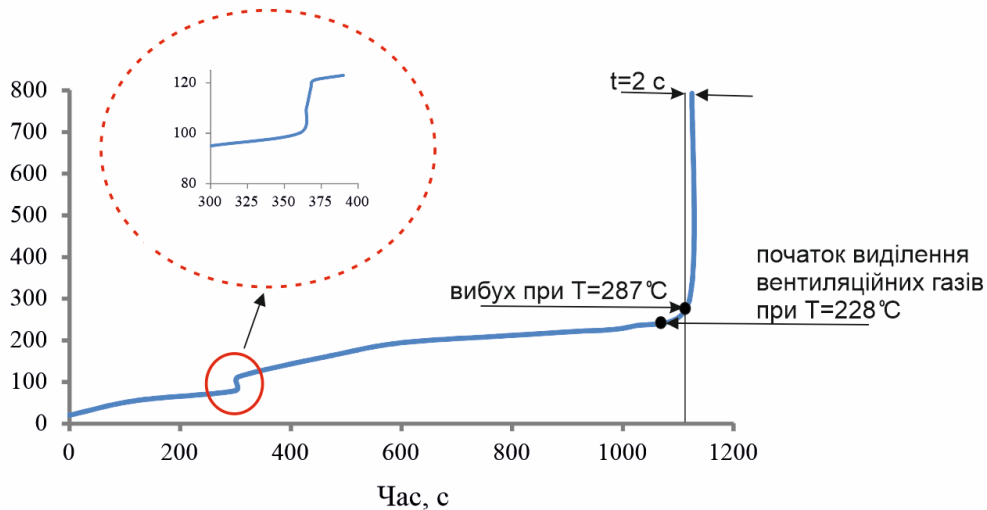


Рисунок 5.61 – Динаміка зміни температури горизонтально розміщеної заряджених на 100 % батареї під час випробувань

Під час нагрівання зарядженої батареї при досягненні 79-80 °C відбувається стрибок температури до 118-123 °C впродовж 6-7 с, що супроводжується свистом та шумом. Після цього температура батареї продовжує монотонно зростати за рахунок роботи електронагрівальної панелі. При досягненні температури 228 °C спрацьовує вентиляційних клапан і йде виділення вентиляційних газів. І вже при температурі 287 °C відбувається вибух, із горінням газів. Це спричиняє ріст температури батареї до 793-810 °C впродовж 3 с. Втрата маси батареї при цьому становила 23-30 г.

5.3. Результати натурних вогневих досліджень процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів у масштабі модуля

У наступній серії експериментів дослідженню піддавались модулі силових літій-іонних батарей.

Для дослідження відбирались модулі з силової АКБ електромобіля Tesla model S ємністю 75 кВт·год (рис 5.62).



а)



б)

Рисунок 5.62– Зовнішній вигляд модуля силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S :а) вигляд згори б) вигляд збоку

Модуль складався із 462 елементів формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та вистою 65 мм). Анод даних елементів живлення виготовлений з графіту, а катод – з $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA). Загальна ємність модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга при повній ємності – 27 В. Розміри модуля становлять 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм, а заряд – 65 %. Модулі були у справному стані та візуально без пошкоджень.

Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Напруга модуля перед початком випробувань становила 24,8 В.

Згідно із методикою досліджень, перед початком випробувань модуль силової літій-іонної батареї піддавався зважуванню. Маса модуля перед початком випробувань становила 28,4 кг.

Для створення теплового потоку використовувався газовий пальник, на який подавався газ пропан з балона об'ємом 50 л, потужність пальника 1 кВт.

У металевому листі, на якому було розміщено модуль силової літій-іонної батареї, зроблено отвір розміром 35x35 мм. Через цей отвір відбувалося нагрівання полум'ям від напальника частини модуля(елемента) для виникнення у ньому термодеструктивного процесу.

Для фіксації температур використовувались термопари хромель-алюмель (ТХА) з діапазоном вимірювання 0-1500 °С та точністю 0,1 °С. Термопари було під'єднані до перетворювача вимірювального інтелектуального ПВІ-111 А, який фіксував температуру термопар. Для більшої точності отриманих результатів здійснювалась відеофіксація температурних параметрів, які відображались на екрані ПВІ-111 А. З відео ми брали температурні параметри з частотою 1 Гц, а параметри з SD-карти були резервними та враховувались при верифікації.

Для розміщення термопар було зроблено два отвори діаметром 3 мм у модулі поруч із елементом, який піддавався нагріванню. Загалом було зроблено 8 термопар. Для фіксації спаду напруги на елементі, який піддається тепловому впливу, до катода та анода під'єднується двожильний провідник ПВ січенням 1,5 мм², а іншим кінцем-до цифрового мультиметра. На рисунку 2 в наведено загальну схему влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, де 1-модуль силової АКБ, яка піддається дослідженню, 2-термопари (кількість зображено умовно), 3-перетворювач вимірювальний інтелектуальний ПВІ -111 А, 4-мультиметр цифровий, 5-електричний провідник, 6-балон із зрідженим пропаном, 7-пальник з вентилем. Під час проведення експерименту здійснювалась відеофіксація. Для відтворюваності експериментальних даних модулі поміщались у вентильовану камеру при температурі 18 °С (+- 2 °С) на час 20-24 год. Загалом було проведено серію із трьох ідентичних експериментів.

Перед початком проведення досліджень напруга на елементі становила 3,42 В, а температура навколишнього середовища - 24 °С.

Кінограма розвитку термодеструктивного процесу літій-іонному модулі з ступенем заряду 50 % приведено на рисунку 5.63.



803 с

804 с

805 с

806 с

Рисунок 5.63 – Кінограма розвитку термодеструктивного процесу у модулі з ступенем заряду 50%

Оброблені результати експериментальних досліджень наведено на рисунку 5.64.

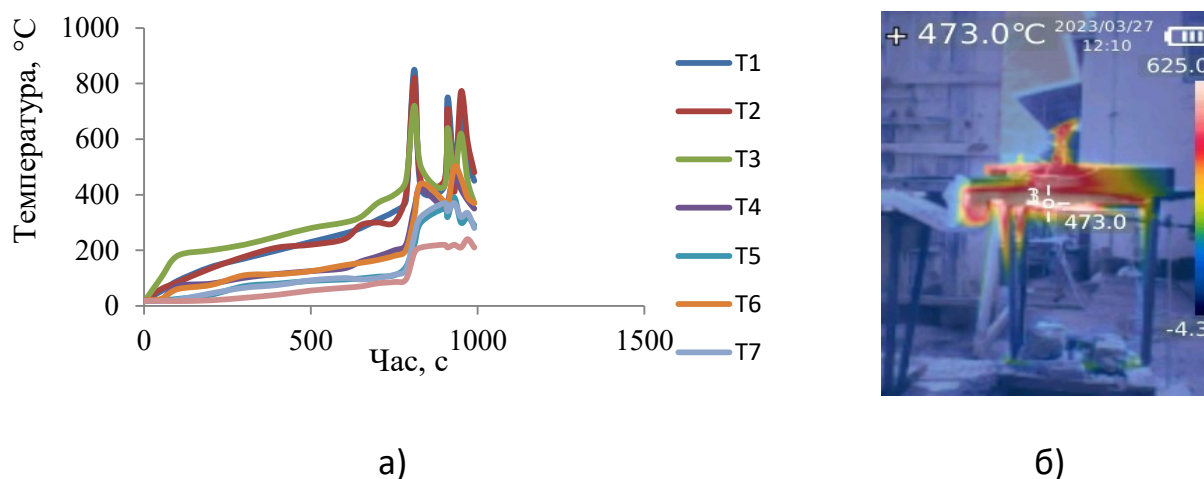


Рисунок 5.64 – Динаміка зміни температури літій-іонних елементів під час розвитку термодеструктивного процесу у складі модуля з ступенем заряду 50% (а); візуалізація температурних полів у модулі (б)

Після запалювання газового пальника термопари Т1-Т3 відразу фіксують приріст температури. Термопари Т4 і Т6 фіксують збільшення температури починаючи з 65 с після початку експерименту, а термопари Т5 і Т7-починаючи з 130 с після початку випробувань. Це пояснюється інерційністю прогрівання модуля АКБ.

Коливання показів на термопарі Т1 можна пояснити вітровим впливом на полум'я газового пальника, і, як наслідок, коливання показів на термопарах Т2-Т3.

На 745 с після початку проведення експерименту спрацьовує вентиляційний клапан і відбувається викид вентиляційних газів. При цьому напруга різко спадає до 0 В. При викиді відбувається займання і горіння вентиляційних газів, яке тривало 5-6 с. Це спричинило різкий стрибок температури, яку фіксують термопари. Фактично стрибкоподібний приріст температури становить 110-127 °С на усіх термопарах (за винятком Т8). Після завершення горіння газів через 11 с відбулось спрацювання вентиляційного клапана іншого елемента, що також супроводжувалось горінням вентиляційних газів. Чергові спрацювання вентиляційних клапанів інших елементів і подальше їх горіння відбувалось з інтервалом 10-28 с. При цьому спостерігалась акумуляція теплової енергії, про що свідчать покази термопар Т1, Т2, Т4, Т6. Після спрацювання вентиляційного клапана 4-го елемента було прийнято рішення перекрити подачу пропану у пальник, однак це не припинило розвитку ланцюгової реакції. Спрацювання вентиляційних отворів елементів модуля літій-іонної батареї набуло стохастичного характеру. Особливість стохастичного розвитку полягає у випадкових спрацюваннях вентиляційних отворів елементів, які межують із елементом, в якому викликана екзотермічна реакція (штучно чи природньо). Передбачити порядок спрацювання вентиляційних клапанів елементів з подальшим їх займанням, в масштабі модуля, є складною та невирішеною задачею.

На 1685 с після початку випробування відбулось полум'яне горіння частини модуля. Після цього експеримент припинився та були використанні переносні вогнегасники для гасіння полум'я. З використанням переносного вогнегасника ВП-5 вдалось «збити» полум'я, яким був охоплений модуль. Однак через 7-12 с полум'я з'явилося знову і горіння модуля продовжилось. Після цього для гасіння був використаний вогнегасник ВВК-3,5, де спостерігався схожий ефект, як при застосуванні порошкового вогнегасника.

Однак полум'я з'явилося через 22 с після використання такого вогнегасника. Загалом було застосовано три вогнегасники ВП-5 та один ВВК-3,5, але і цього виявилось не достатньо для гасіння модуля, що призвело до повного його вигорання, зовнішнів що і наведено на рисунку 5.65.



Рисунок 5.65– Зовнішній вигляд літій-іонного модуля батареї після проведення експерименту

Варто відмітити, що втрата маси модулів після проведення експериментів становила 33-42 % від початкової їх маси.

На основі оцінки розбіжностей для кожної серії проведених експериментів визначені абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення експериментальних даних, а також перевірена належність дисперсій до однієї генеральної сукупності результатів. У таблиці 3 наведено узагальнені дані адекватності для термопар, які були розміщені на дослідних взірцях літій-іонних елементів живлення узагальнені результати перевірки відхилень експериментальних даних, що слугують передумовою для підтвердження гіпотези дослідження.

Таким чином, абсолютні відхилення між середніми значеннями експериментальних досліджень та кожною серією досліджень не перевищують 30,5 °С, для відкритого полум'я та 12,5 °С для електронагрівальної панелі, що становить не більше 16,4 % та 10,0 % у відсотковому вираженні. Середньоквадратичні відхилення знаходяться в межах 34,5÷54,7 °С відкритого полум'я та 10,6÷19,6 °С для електронагрівальної панелі.

Таблиця 5.1 – Узагальнені результати перевірки адекватності проведених серій досліджень щодо виявлення закономірностей виникнення і перебігу термодекструктивних процесів у літій-іонних елементах живлення

Ступінь заряду, %	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %	Середнє квадратичне відхилення, °C	Критерій Фішера 5% - 3,48 5% - 5,19* 5% - 3,47**
При дії відкритого полум'я				
0	19,1	7,4	34,5	0,251
50	32,3	21,5	44,7	0,803
100	39,2	24,5	54,7	0,903
Діапазон відхилень	19,1÷39,2	7,4÷24,5	34,5÷54,7	0,251÷0,903
Середні значення	30,5	16,4	42,1	0,522
При дії електронагрівальної панелі				
0	8,7	6,2	10,6	0,256
50	10,8	9,6	13,4	0,486
100	17,1	12,5	19,6	1,699
Діапазон відхилень	8,7÷17,1	6,2÷12,5	10,6÷19,6	0,256÷1,699
Середні значення	12,5	10,0	15,2	0,81
Модуль				
0	37,6	15,7	39,5	1,713
50	42,7	19,6	44,5	1,988
Діапазон відхилень	37,6÷42,7	15,7÷19,6	39,5÷44,5	1,713÷1,988
Середні значення	40,15	17,65	42,0	1,85

Це вказує на те, що результати кожного експерименту є максимально наближеними до середніх значень, підтверджуючи загальну збіжність даних кожного окремого експериментального дослідження.

5.4. Результати експериментальних досліджень ефективності гасіння модулів літій-іонних акумуляторів з використанням переносних вогнегасників

Крайнім етапом експериментів було дослідження впливу різних вогнегасних речовин переносних вогнегасників в Україні на ефективність гасіння літій-іонних акумуляторних батарей, і на підставі цього визначення критичної інтенсивності подачі та розроблення рекомендацій щодо гасіння зазначених об'єктів. Згідно із методикою проведення експериментального дослідження гасіння модуля відбувалось після спрацювання сумарно 40-50 елементів, що складає близько 10% від загальної кількості елементів. На момент гасіння орієнтовна площа основи полум'я становила 0,02-0,025 м² (з врахуванням горіння інших полімерних матеріалів модуля), а температура горіння понад 600 °С. Під час дослідження використовувались такі переносні вогнегасники: ВП-5(з), ВВК-5(з), ВПП-5(з), ВВ-5(з), з вогнегасними речовинами: вогнегасний порошок загального призначення, вуглекислота, повітряно-механічна піна низької кратності та дрібнорозпилена вода з сольовими добавками відповідно (рис 5.66).



Рисунок 5.66 – Фрагмент переносних вогнегасників, які були підготовлені для гасіння літій-іонних модулів

Демонстрація горіння літій-іонного модуля перед початком гасіння приведено на рисунку 5.67.



Рисунок 5.67– Зовнішній вигляд розміщення модуля перед початком проведення експерименту та його горіння перед початком гасіння

Згідно із методикою проведення досліджень, після пересвідчення, що всі ЗВТ влаштовані і працюють правильно, переносні вогнегасники підготовлені, вмикалась відеокамера, відкривався вентиль подачі газу на пальник, та відбувалось його підпалення з використання підготовленого факела. У момент підпалення пальника вмикався секундомір.

При досягненні температури 225–230 °С спрацював вентиляційний отвір одного з елементів модуля, та відбулось його займання. Такий процес поширювався на інші елементи, маючи стохастичний характер. Після спрацювання вентиляційних отворів 20–25 елементів (що становить близько 5 % від загальної кількості елементів) подача газу у пальник припинилася шляхом перекривання вентиля на балоні з пропаном. Згідно із методикою проведення експериментального дослідження, гасіння модуля відбувається після спрацювання сумарно 40–50 елементів, що дорівнює близько 10 % від загальної кількості елементів модуля. На момент гасіння орієнтовна площа основи полум'я по модулю становила 0,02–0,025 м² (із врахуванням горіння інших полімерних матеріалів). Першим для гасіння застосовувався порошковий вогнегасник ВП-5(з) із зарядом вогнегасного порошку загального призначення 5 кг. Під час гасіння вдалось збити полум'я.

Однак через 18–20 с полум'яне горіння самостійно відновилося. Після цього був відведений час на самостійне розгоряння модуля орієнтовно до площі початкового гасіння, а саме 0,02–0,025 м². Час, за який була досягнута початкова площа горіння після застосування ВП-5(з), становив 245 с. Потім був застосований вуглекислотний вогнегасник ВВК-5 з масою вуглекислоти 5 кг. Слід зазначити, що цей тип вогнегасника менш ефективно збивав полум'я, як порівняти з ВП-5(з), і повторне полум'яне горіння відбулось вже через 3–4 с після припинення подачі вуглекислоти. Така закономірність свідчить про гіршу вогнегасну здатність ВВК-5, ніж ВП-5(з). За аналогією був застосований переносний вогнегасник ВВП-5(з). Після використання цього типу вогнегасника повторне займання не спостерігалось впродовж 1 год, а температура модуля зменшилась до 70–78 °С, що є прийнятною і унеможливорює повторний розвиток електротеплового процесу [2, 3].

З метою дослідження ефективності гасіння ВВ-5(з) із сольовими добавками було використано інший літій-іонний модуль та дотримано аналогічних умов, описаних вище. Водяний вогнегасник, який подавав розпилену воду із сольовими добавками, найкраще візуально здійснював гасіння літій-іонного модуля, як порівняти з попередніми типами переносних вогнегасників. Після використання вогнегасника ВВ-5(з) повторного займання полум'я впродовж 1 год не спостерігалось, а температура модуля зменшилась до 62–68 °С.

Переносні водопінні та водяні вогнегасники із зарядом вогнегасних речовин 4 кг (ВВП-4(з), ВВ-4(з)) за умов проведення експерименту не впорались із гасінням.

Застосування різних типів переносних вогнегасників під час гасіння літій-іонного модуля представлено на рис. 5.68. Аналізуючи вогнегасну ефективність вогнегасних засобів, які були досліджені, можна дійти висновку, що основним ефектом, який призводить до гасіння літій-іонних батарей, є ефективне охолодження, притаманне водяному і водопінному вогнегаснику, у поєднанні з ефектом інгібування (що досягається додаванням розчину солі) та

ізолювальним ефектом (у водопінному вогнегаснику).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.68 – Використання різних типів переносних вогнегасників під час гасіння літій-іонного модуля: а) ВП-5(з); б) ВВК-5; в) ВВП-5(з); г) ВВ-5(з)

Отже, застосування переносних вогнегасників з вогнегасним порошком загального призначення та вуглекислою є неефективним при гасінні літій-іонних батарей. Причому при застосуванні вугле-кислотного вогнегасника полум'яне горіння відновлюється вже через 3–4 с після припинення подачі вогнегасної речовини. Натомість використання водопінного та водяного вогнегасника з сольовими добавками ефективно здійснює гасіння.

З врахування отриманих результатів експериментальних даних впливу вогнегасних речовин на ефективність гасіння літій-іонних батарей досліджено експериментальну та розрахункову критичну інтенсивність подачі змочуючого розчину або розпиленої води з сольовими добавками для гасіння літій-іонних

модулів силових батарей електромобілів з катодним матеріалом NCA (рис. 5.69).

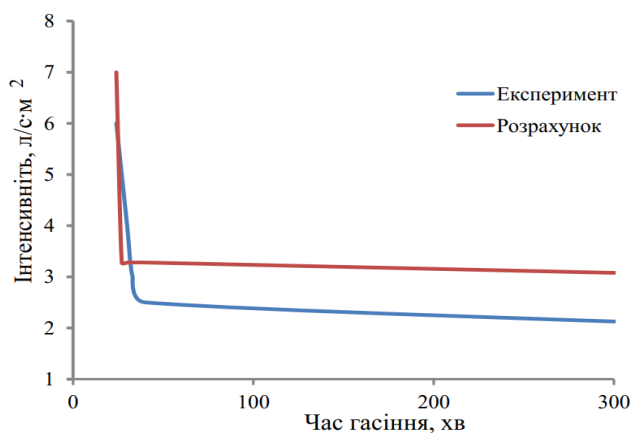


Рисунок 5.69 – Критична інтенсивність подачі змочуючого розчину або розпиленої води з сольовими добавками для гасіння літій-іонних модулів силових батарей електромобілів з катодним матеріалом NCA

Враховуючи неточність розрахункового методу, а також результати отриманні при розробленні газодинамічної моделі досліджено та визначено критичну розрахункову та уточнену інтенсивність подачі зазначених вогнегасних речовин при гасінні літій-іонних батарей з катодними матеріалами NCM та LFP. Результати досліджень приведені у таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Критична інтенсивність подачі змочуючого розчину або розпиленої води з сольовими добавками для успішного гасіння пожежі літій-іонної батареї з різними катодними матеріалами

Катодний матеріал	Інтенсивність подачі змочуючого розчину л/с·м ²		
	Розрахункова	Експериментальна	Уточнена
NCM	2,72	-	2,2
NCA	3,28	2,5	2,5
LFP	2,14	-	1,7

Для літій-іонних батарей з катодним матеріалом NCA розрахункова критична інтенсивність для площі пожежі 1 м^2 складає 3,28 л/с, що є на 13 % більше у порівнянні із експериментальною інтенсивністю, яка складає 2,5 л/с.

Слід відзначити, що у роботі [346] приведено розрахунки властивостей гнучкого трубопровода, себто рукавної лінії, по якій зазвичай подаються вогнегасні речовини для гасіння пожеж електромобілів з викоиртосанням змочуючого розчину в тому числі.

5.5. Висновки до розділу 5

За результатами натурних вогневих випробувань елементів силової АКБ електромобіля за розробленими методиками отримано такі результати:

1. Виявлено залежність 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 300 кВт/м^2 що лінійно зменшується з 114 с до 94 с** для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального на горизонтальне; лінійно зростає з 114 с до 138 с для горизонтального просторового розміщення відносно джерела тепла розміщення при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 %.

2. Встановлено 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 %.

3. Виявлено, та експериментально підтверджено, що для літій-іонного АКБ в масштабі модуля виділення тепла від чотирьох елементів живлення внаслідок

перебігу термодеструктивного процесу та викиду вентиляційних газів, за умов проведення експерименту, є достатнім для виникнення ланцюгової реакції та полум'яного горіння власне самого модуля літій-іонної батареї. Подальші спрацювання вентиляційних отворів інших елементів мали стохастичний характер.

4. З врахування отриманих результатів експериментальних даних впливу вогнегасних речовин на ефективність гасіння літій-іонних батарей досліджено експериментальну та розрахункову критичну інтенсивність подачі змочуючого розчину або розпиленої води з сольовими добавками яка для гасіння літій-іонних модулів силових батарей електромобілів з катодним матеріалом NCA становить $2,5 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$, для катодного матеріалу матеріалу NCM $2,2 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ та для LFP – $1,7 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$.

4. За результатом дослідження статистичних похибок отриманих за кожною серією експериментальних даних, визначено, що абсолютні відхилення між усередненими експериментальними дослідженнями та кожним із експериментів лежать в межах $19,1\div 39,2 \text{ }^\circ\text{C}$ при використанні модельного вогнища класу В та $8,7\div 17,1$ при використанні електронагрівальної панелі, при цьому середні відносні відхилення становлять $16,4 \%$ та $10,0 \%$. У випадку досліджень літій-іонного АКБ в масштабі модуля середні абсолютні відхилення складають $40,15 \text{ }^\circ\text{C}$, а відносне відхилення – $17,65 \%$. Доведено, з використанням критерію Фішера, що отримані експериментальні дані є вибірками однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного дослідження.

5. Удосконалено експериментальну базу дослідження процесів виникнення та розвитку горіння літій-іонних АКБ в масштабі елементів та модулів при дії джерел тепла з відкритим полум'ям та без нього, а також гасіння зазначених об'єктів із використанням найпоширеніших вогнегасних речовин.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ

6.1. Створення газогідродинамічної моделі для прогнозування виникнення займання у літій-іонних батареях електромобілів

Для дослідження впливу найбільш значущих чинників таких як заряд, енергетична ємність та катодний матеріал, а також створення оптимізованого процесу визначення часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях електромобілів розроблено комп'ютерну газогідродинамічну модель, яка забезпечує відтворення умови натурних випробувань. Запропонована модель розроблена в середовищі програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (далі - FDS) [337, 338], а візуалізація фізичних процесів, які описує розроблена газогідродинамічна модель реалізовано у програмному комплексі SmokeView [339, 340]. При створенні комп'ютерної газогідродинамічної моделі застосовувались методики, які наведені у розділі 4 [301, 331].

Важливим завданням під час створення моделі є максимальне відтворення конструктивних параметрів та фізичних умов проведення натурних експериментів, порядок у мови та особливості проведення яких обумовлено програмами-методиками. Фізичні, теплофізичні та хімічні властивості речовин та матеріалів, а саме: теплоємність, теплопровідність, температура займання та самозаймання, ступінь чорноти, коефіцієнт випромінювання, густина, питома теплота згоряння та пароутворення, фазові переходи, стехіометричні коефіцієнти згоряння тощо задавались із бібліотек програми FDS. Властивості речовин та матеріалів задаються по початковому етапі введення вхідних даних і не можуть бути відкориговані в процесі прорахунку моделі, що створює певні незручності під час роботи.

На початковому етапі створення моделі здійснювалось відтворення розміщення об'єктів, досліджуваних взірців та ЗВТ, аналогічно, як це було

здійснено під час фізичного експерименту. Основа проектувалась на відмітці 0,000 м трьох вимірного простору з системою координат (x, y, z – ширина, довжина та висота відповідно).

Після цього об'єм, в якому буде здійснюватися розрахунок та моделювання необхідно розбити на складові, тобто створити розрахункову сітку. Розбиття та створення розрахункової сітки має певні особливості. Дані особливості полягають в тому, що чим менший розмір елемента розрахункової сітки, тим точніший отримуємо результат моделювання. Але разом з тим збільшується час прорахунку, на який впливають також технічні параметри комп'ютера, зокрема тактова частота процесора та об'єм оперативної пам'яті, а також характеристикою відеокарти, яка особливо впливає на візуалізацію фізичних процесів при використанні програмного комплексу SmokeView. У даному випадку для дослідження використовувався ноутбук моделі Lenovo ThinkPad T480, який був обладнаний процесором Intel Core i5-8250U (4 (8) ядра по 1.6 - 3.4 GHz), 6 MB Smart Cache, оперативною пам'яттю 8 GB DDR4. а також інтегрованою відеокартою Intel UHD Graphics 620 (до 1792 MB з ОЗУ).

Кожна комірка має бути створена у вигляді куба, тобто мати правильну та однакову форму по всіх трьох сторонах. Розмір сітки обирається зазвичай з міркувань принципу «точність-час» обчислень. Тобто вибір розміру сітки має забезпечувати задовільну точність вимірювань. Нерідко при визначенні розміру сітки використовують принципу дихотомії. Сутність даного методу полягає у послідовному звуженні інтервалу пошуку. У випадку розрахункової сітки розмір сітки зменшують до того випадку поки подальше її зменшення не дає значущих змін у контрольованих параметрах, чи параметрах які вимірюються [342, 343].

Виходячи із рекомендацій [344, 345, 384] для моделей об'ємом до 10 м³ доцільно використовувати сітку розміром 1 см x 1 см x 1 см. Однак виходячи з методу дихотомії, а також враховуючи принцип «точність-час» розміри сітки були прийняті 0,02 м × 0,02 м × 0,02 м, що складає загалом 33600 розрахункових комірок.

Так як експериментальні дослідження проводились із використання як модельного вогнища класу В так і нагрівальної панелі при дослідженні елементів літій-іонних батарей, тому були створені відповідні їх моделі. На рисунку 6.1 приведено загальний вигляд створеної моделі із використанням модельного вогнища класу В.

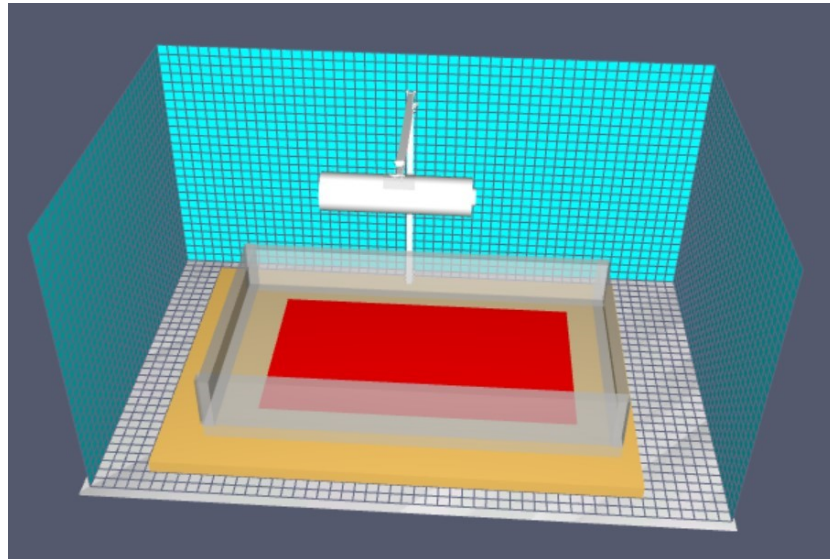


Рисунок 6.1. – Загальний вигляд створеної FDS моделі із використанням модельного полум'я класу В

Під час створення моделі джерела тепла задавались розміри та потужності, ідентичні як при проведенні натурних випробувань, а саме для вогневого впливу квадратне деко розміром 12,5 см, що відповідає площі дзеркала дека діаметром 14 см. Перехід з круглої на прямокутну форму зумовлено особливостями розрахункових процесів програми FDS, яка вимагає кубічну форму розрахункових комірок.

На рисунку 6.2 приведено загальний вигляд створеної моделі із використанням електронагрівальної панелі, тобто термодеструктивний процес викликався джерелом тепла без відкритого полум'я.

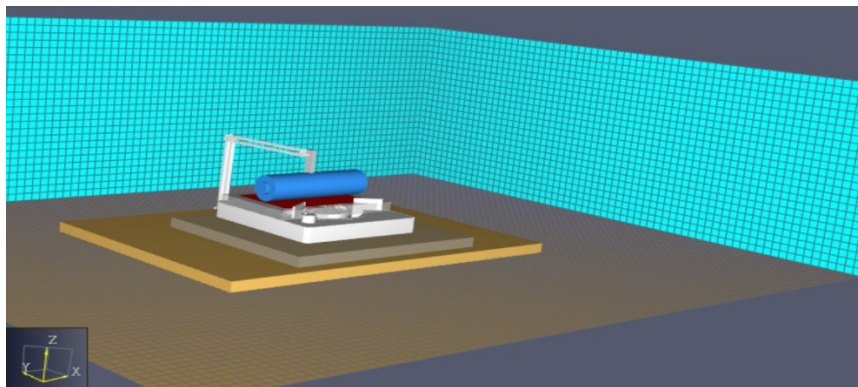


Рисунок 6.2 – Загальний вигляд створеної FDS моделі із використанням електро-нагрівальної панелі

Після створення моделей задавались фізичні параметри речовин та компонентів, які використовуються у літій-іонних батареях.

Якщо розглядати літій-іонний елемент як суцільний об'єкт то його теплофізичні властивості можна задати такими усередненими значеннями: густина – 950 кг/м³, теплоємність 1062 Дж/(кг·К), теплопровідність 6 Вт/(м·К), молекулярна маса 78,8 г/моль, а питома теплота згоряння 423 кДж/моль [347]. Під час моделювання приймалось, що уся електрична енергія, яка є акумульована в батареї перетворюється у теплову енергію. Загалом до основних компонентів батареї, які брались до уваги під моделювання віднесли: катод, анод, електроліт, сепаратор та корпус, який вищеназвані компоненти поміщує. Компоненти батареї, які були враховані при моделюванні та їх масова частка приведено у таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Матеріал компонентів LIB та їх масова частка

Складник батареї	Матеріал	Масова частка, %
Анод	Графіт	20,8
Катод	LiNi _x Co _y Al _z O ₂	36,2
Струмоприймач анода	мідь	6,1
Струмоприймач катода	алюміній	2,5
Сепаратор	поліпропілен	3,5
Електроліт	50% пропіленкарбонат 50% етиленкарбонат	11,5
Корпус	сталь	19,4

Так як моделювання проводилось для літій-іонних батарей з трьома катодними матеріалами, а саме літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, літій-нікель-марганець-кобальт оксид та літій - ферум - фосфат оксид то відповідно у кожному з моделі підставлялись відповідні значення катодного матеріалу.

Зокрема для літій-нікель-кобальт-алюміній оксиду ентальпія розкладання приймалась 1200 кДж/кг, густина 2850 кг/м³; теплоємність 800 Дж/(кг·К) та теплопровідність 1,8 Вт/(м·К). [353-357].

Для літій-нікель-марганець-кобальт оксиду ентальпія розкладання приймалась – 700 кДж/кг, густина 2900 кг/м³; теплоємність 780 Дж/(кг·К) та теплопровідність 1,7 Вт/(м·К). [355-357].

Для літій - ферум - фосфат оксиду ентальпія розкладання – 400 кДж/кг густина 3500 кг/м³; теплоємність 980 Дж/(кг·К) та теплопровідність 2,6 Вт/(м·К). [358-363].

Відповідно теплофізичні властивості аноду (матеріал графіт) приймались густина – 1500 кг/м³, теплоємність 800 Дж/(кг·К), а теплопровідність 8 Вт/(м·К) (з врахуванням добавок, які використовуються власне у анодних матеріалах) [362].

Так як електроліт у більшості випадків містить суміш речовин, тому було прийнято усереднені значення, а саме густина 1150 кг/м³ теплоємність 1500 Дж/(кг·К) та теплопровідність 0,15 Вт/(м·К) [356].

Сепаратор зазвичай виготовляють із мікропористих полімерів, а також в багатошарових комбінаціях. Тому було прийнято припущення що сепаратор має однорідну структуру та наступні характеристики: густина – 900 кг/м³, теплоємність 1200 Дж/(кг·К), а теплопровідність 0,3 Вт/(м·К). Температуру плавлення була прийнята 155 °С, а температура самозаймання 370 °С з теплотою згоряння 43,6 Мдж/кг [357].

Корпус зазвичай виготовляється з сталевих листів, тому фізичні властивості прийняті як для сталі, а саме густина – 7800 кг/м³, теплоємність 550 Дж/(кг·К), а теплопровідність 55 Вт/(м·К).

Фізичні властивості струмоприймачів приймалися як для металів, з яких вони виготовлені. А саме густина для міді 8960 кг/м^3 , для алюмінію 2700 кг/м^3 . Теплопровідність мідь $380 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, алюміній: $210 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, теплоємність мідь: $385 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, алюміній: $900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Після створення моделі, розрахункової сітки та внесення усіх відомих теплофізичних і хімічних параметрів параметрів було розміщено засоби вимірювальної техніки, а саме термопари із фіксацією температури. Зовнішній вигляд створених моделей, а також розміщення на них термопар зображено на рисунку 6.3.

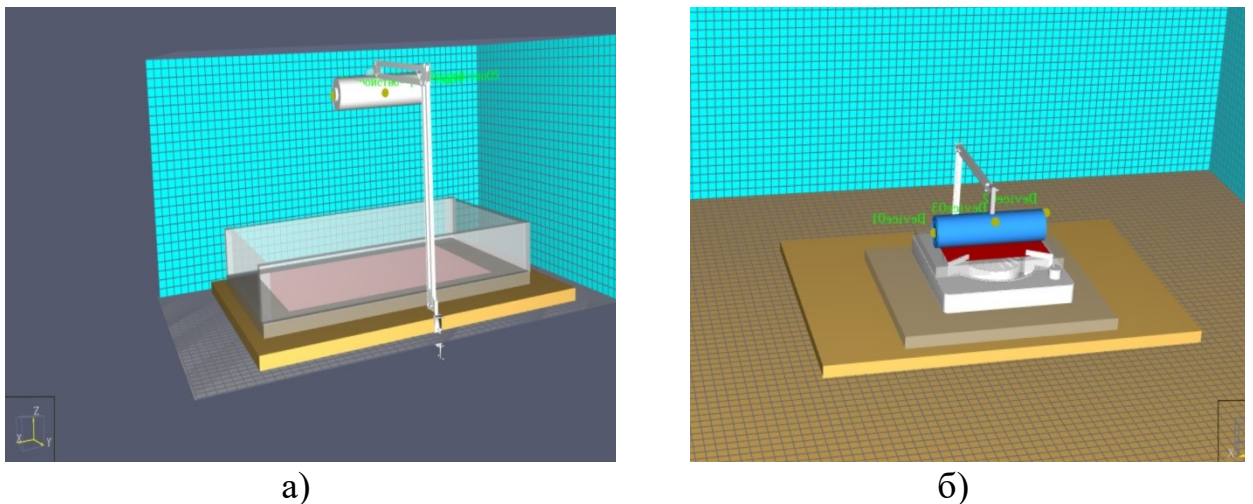


Рисунок 6.3 – Зовнішній вигляд розміщення термопар на FDS моделях
 а) при використанні модельного вогнища класу В б) при використанні електронагрівальної панелі

Розміщення термопар було здійснено згідно із методиками, які описані у розділі 4. Після цього було змодельовано та побудовано модель модуля літій-іонного елемента. Модель відповідала реальним розмірам, а саме загальна ємність модуля становила $5,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, а напруга при повній ємності – 27 В . Розміри модуля становлять 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм , а заряд – 65% . Як у попередніх моделях, приймалось, що всі акумульована електрична енергія вивільнялась у вигляду теплової. Зовнішній вигляд FDS моделі, відображено на рисунку 6.4.

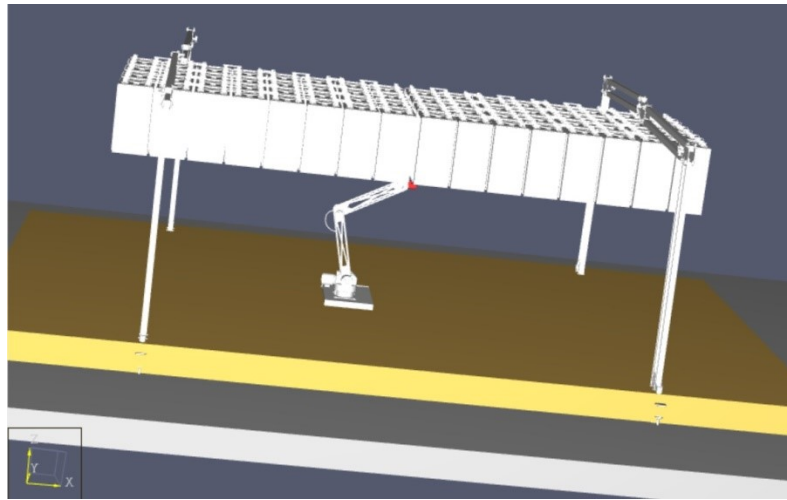


Рисунок 6.4 – Зовнішній вигляд FDS моделі літій-іонного модуля

Для вимірювання температури використовувались 8 термопар, які фіксували температуру по модулі. Розміщення термопар здійснювалось відповідно до методики проведення натурального експерименту. А виникнення термодеструктивного процесу ініціювалось з використанням газового пальника потужністю 1 кВт.

Для оцінки отриманих даних в результаті комп'ютерного моделювання та відповідних усереднених даних отриманих внаслідок натурних експериментів проведено обчислення абсолютного відхилення за формулою 6.1 [364]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n} \quad (6.1)$$

де n - загальна кількість елементів у вибірці;

x_i - значення кожного окремого елемента у вибірці;

\bar{x}_i - середнє значення вибірки;

середнього квадратичного відхилення за формулою 6.2 [359]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}} \quad (6.2)$$

середнього відносного відхилення за формулою 6.3 [364]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \cdot 100\%.$$

6.2 Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу В з використанням газогідродинамічної моделі

На даному етапі верифікації розробленої газогідродинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу В є порівняння температурних розподілів на поверхні літій-іонних елементів отриманих під час натурних досліджень та результатів отриманих з використанням створеної газогідродинамічної моделі за однакових умов дослідження. Під час верифікації створеної газодинамічної моделі задано параметри навколишнього середовища, які відповідали кліматичним умовам проведення експериментальних досліджень, а саме: тиск атмосферного повітря – 102,8 кПа; температура повітря – 24 °С; відносна вологість – 70 %. Натурні вогневі дослідження проводились у безвітряні дні, так як навіть незначний вітровий вплив змінює тепловий потік. Особливо це виражено під час використання модельного вогнища класу В. Тому під час моделювання з використанням розробленої газодинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів вітровий вплив не задавався. Під час використання розробленої газогідродинамічної моделі використовувалась методика, як при експериментальних дослідженнях, тобто дослідження було поділено на три етапи: експериментальне дослідження розряджених батарей; експериментальне дослідження заряджених батарей на 50%; експериментальне дослідження заряджених батарей на 100%; Для кожного із етапів проводилось дослідження для двох позицій розміщення батарей: горизонтального та вертикального по п'ять експериментів на кожену позицію. Причому дослідження батареї у вертикальному положенні проводилось для двох позицій:

анодом до джерела тепла та катодом до джерела тепла. Так як використання розробленої газодинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу В дає ідентичні результати при однакових умовах використання, тому для кожного стану заряду та однакового просторового розміщення здійснено один експеримент.

На рисунку 6.5 представлено результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В для термопар T1, T2 та T3.

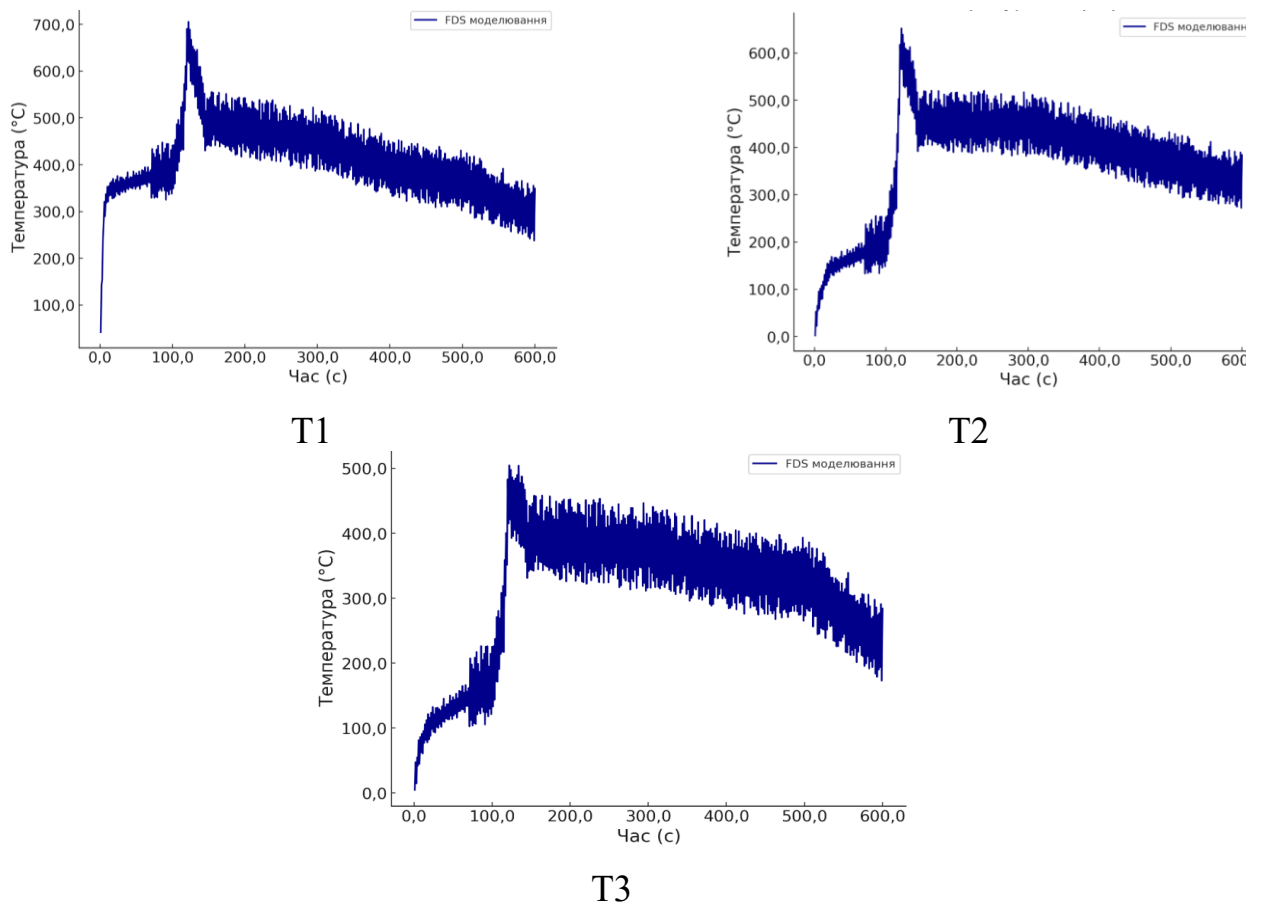


Рисунок 6.5 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.6

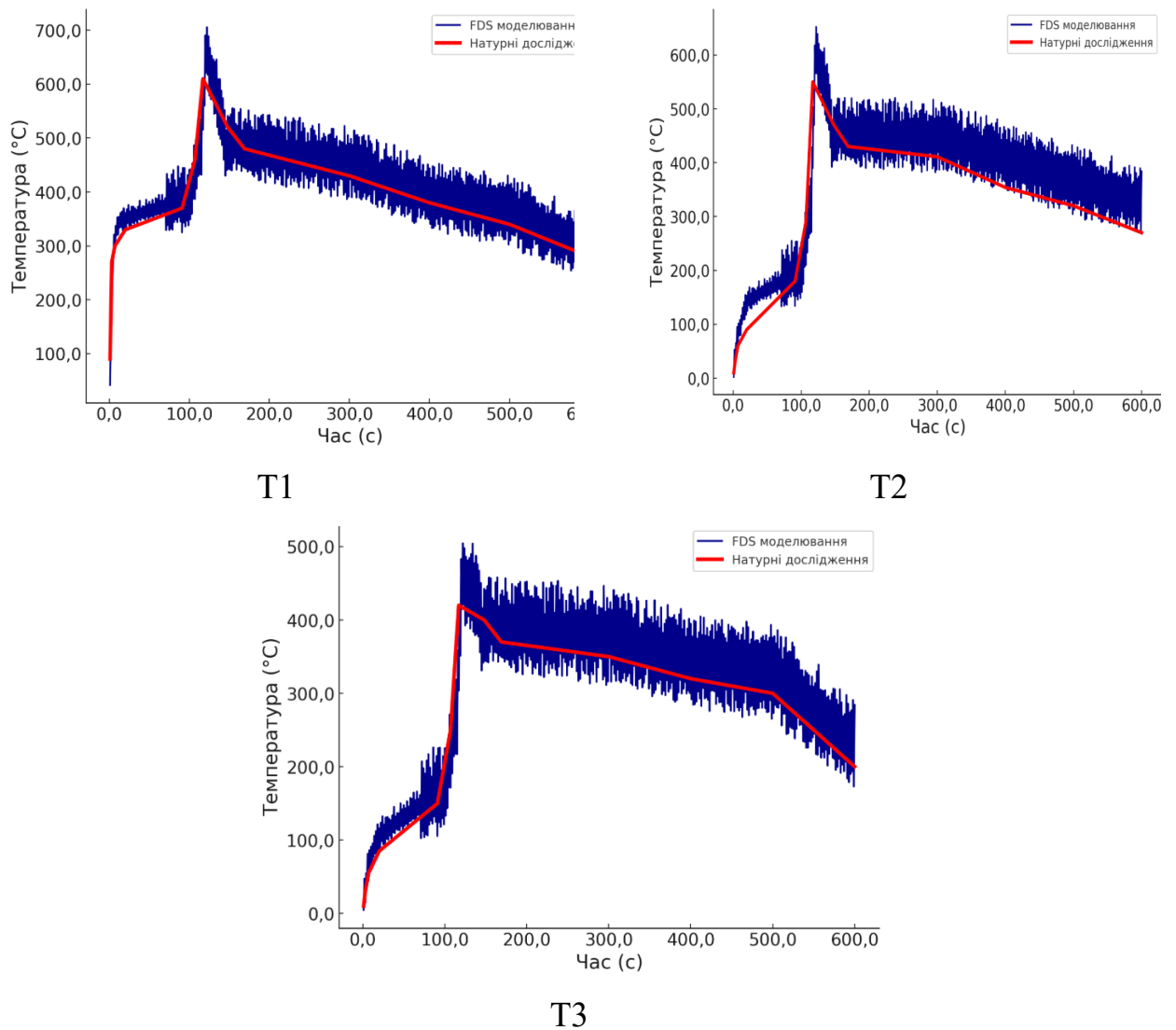


Рисунок 6.6 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.7 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища пожежі класу В, для термопар Т1, Т2, Т3.

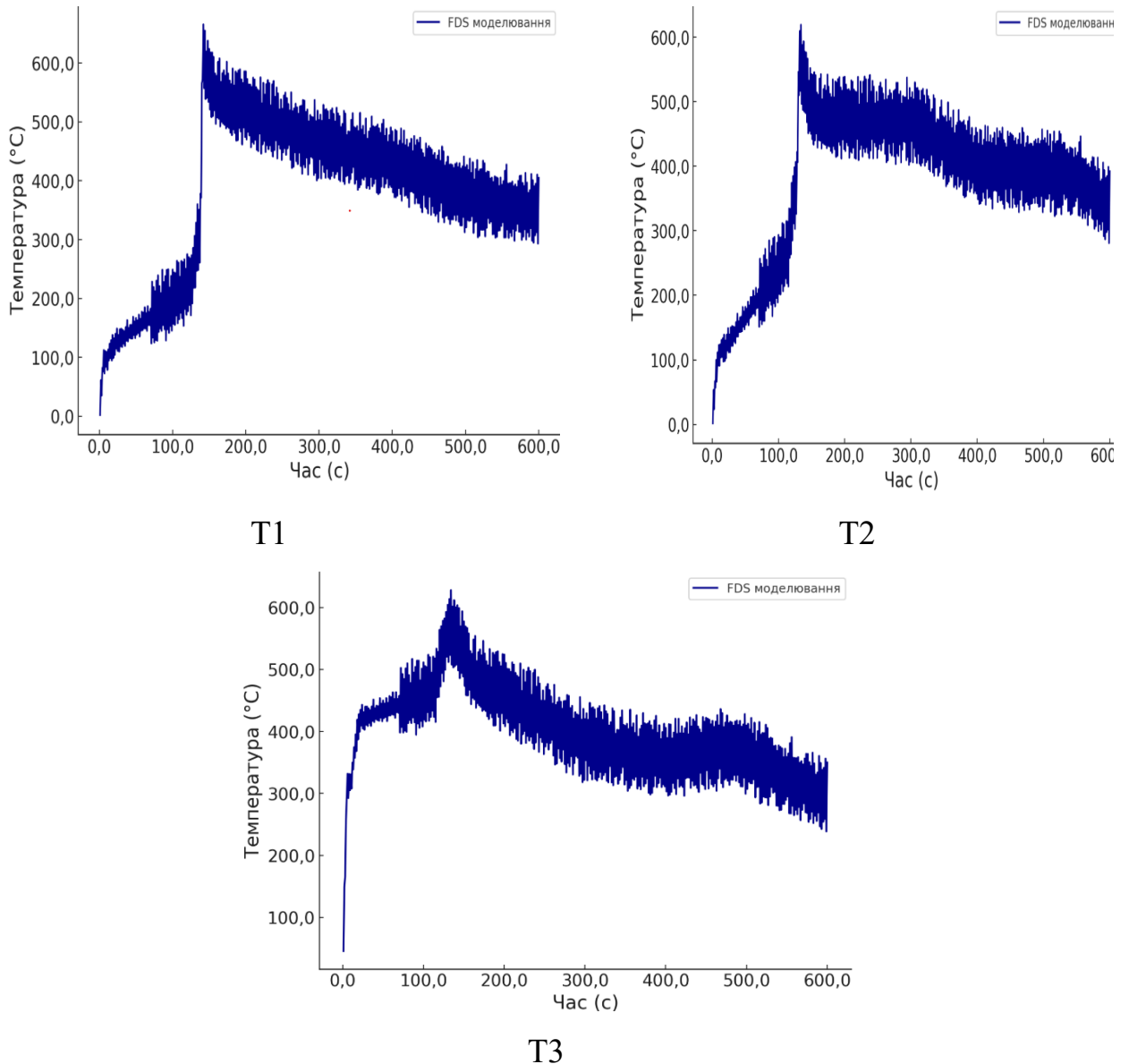


Рисунок 6.7 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термopарах відображені на рисунку 6.8

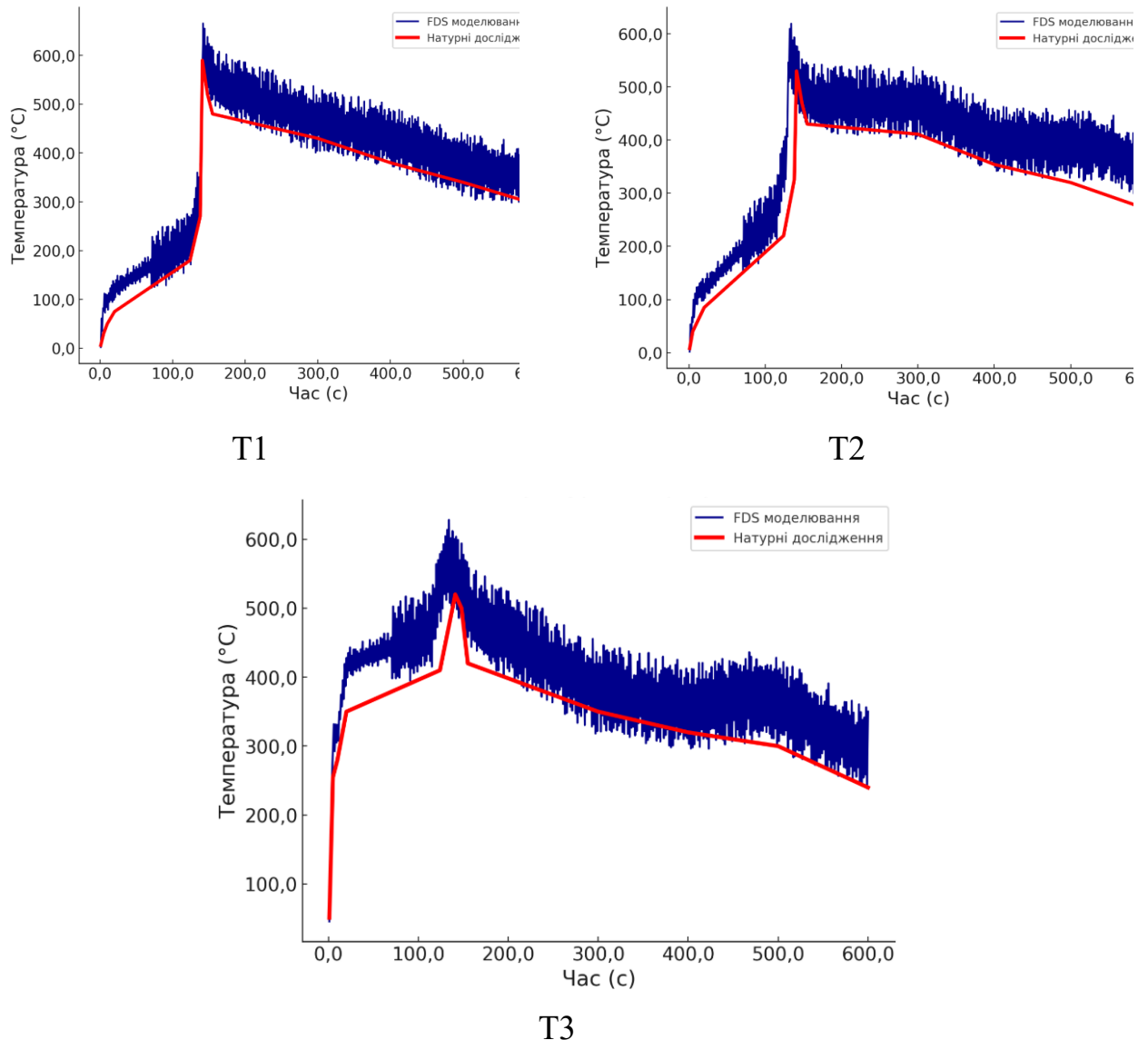


Рисунок 6.8 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.9 наведено динаміку зміни температури горизонтально розміщеної повністю розрядженої батареї під час випробувань, для термопар T1, T2, T3.

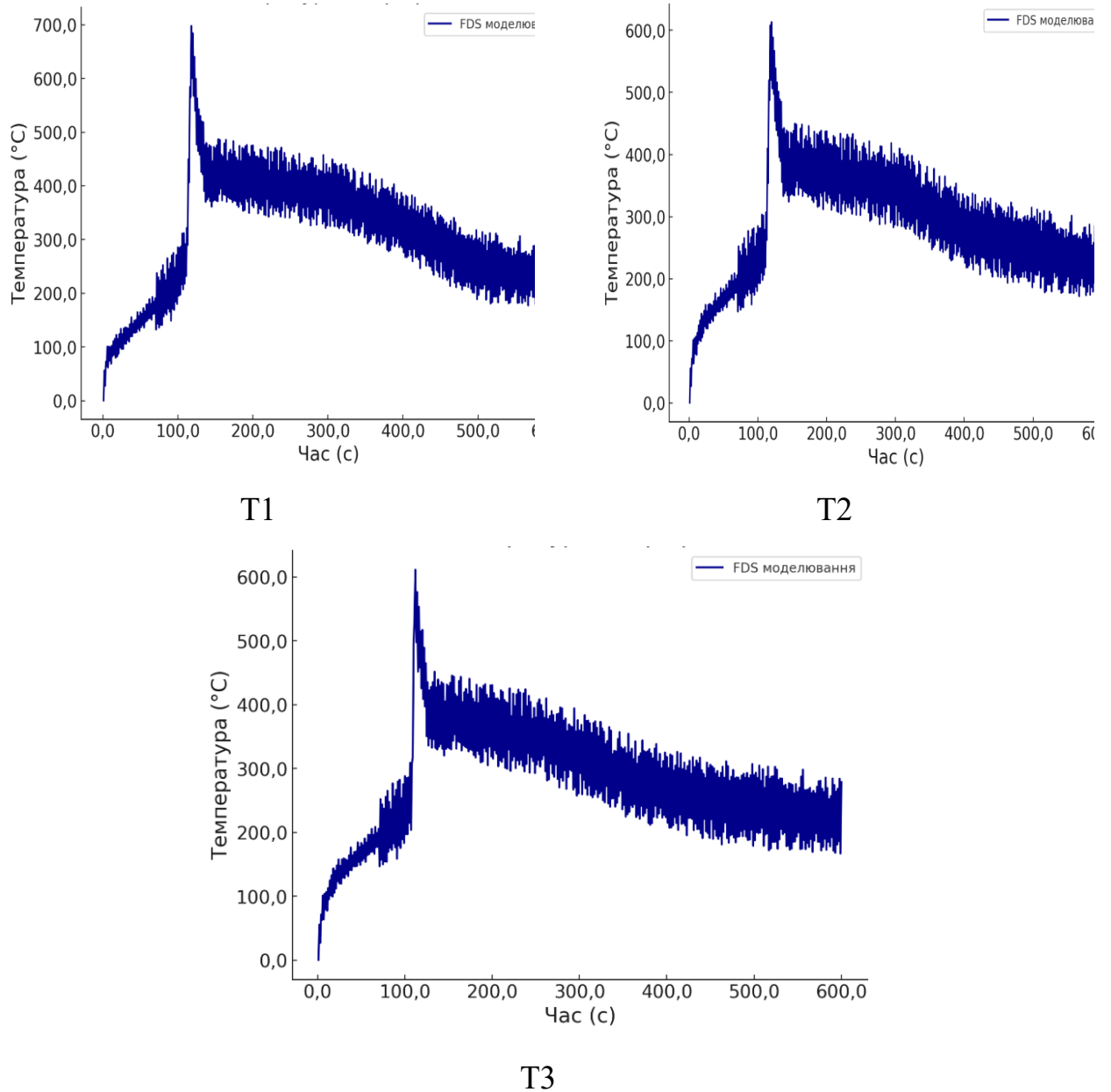


Рисунок 6.9 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термopарах відображені на рисунку 6.10

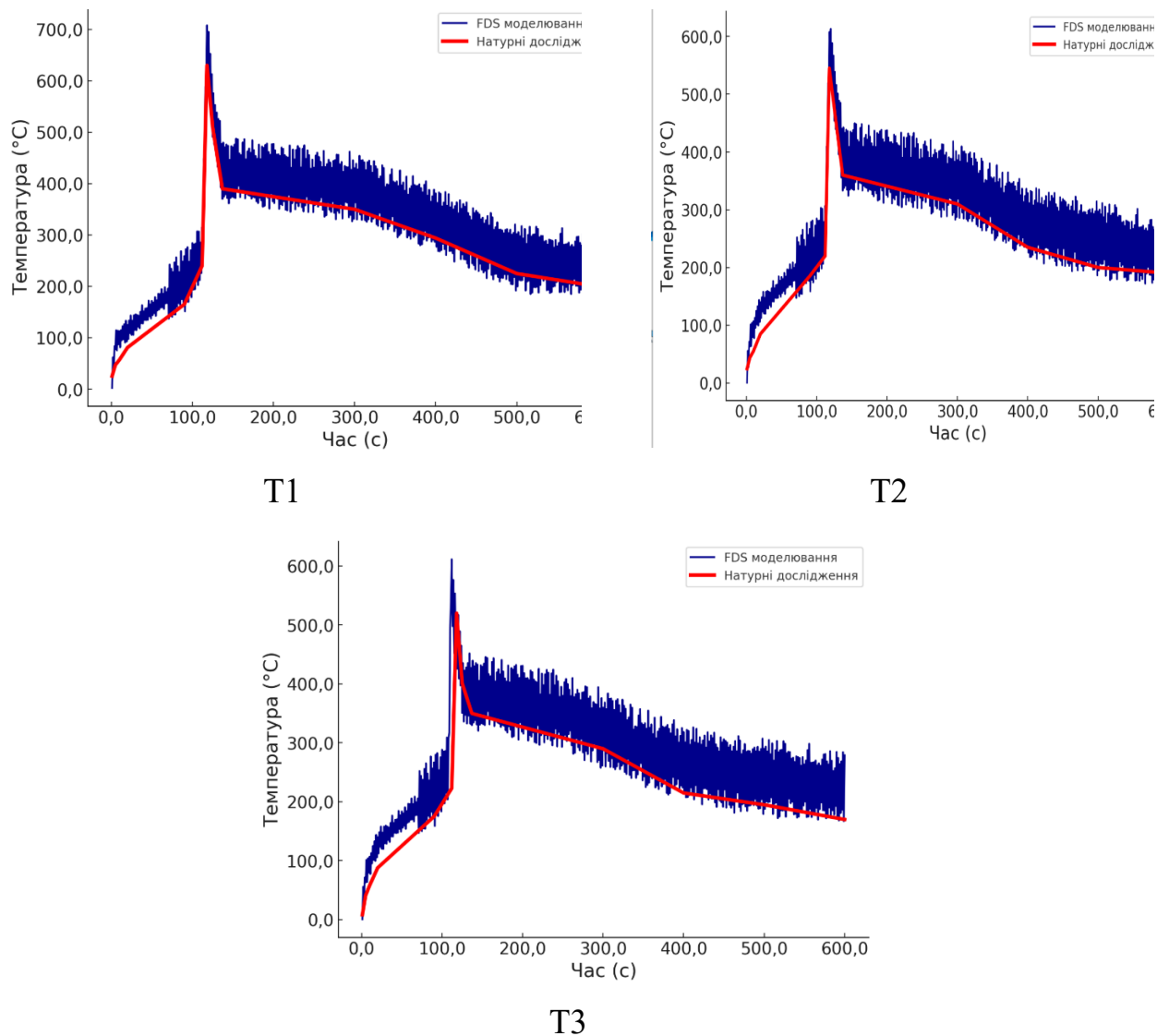


Рисунок 6.10 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

З використанням рівностей 6.1-6.3 усереднені дані по середніх абсолютних, квадратичних та відносних відхиленнях між результатами комп'ютерного моделювання на усереднених даних відповідного натурального експерименту для термопар Т1, Т2 та Т3 у випадку розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів для усіх випадків просторового розміщення відносно модельного вогнища класу В відображено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Усереднені абсолютні, середньоквадратичні та відносні відхилення для Т1, Т2 та Т3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

	Абсолютні відхилення, °С	Середньо квадратичні відхилення, °С	Відносні відхилення, %
Для розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В	84	75	15,2

Аналізуючи отримані усереднені дані під час проведення натурних експериментів та дані отриманні внаслідок комп'ютерного моделювання із використанням розробленої газо гідро-динамічної моделі можна зробити висновок, що модель адекватно відтворює проведення натурального експерименту. Разом з тим для розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В усереднені абсолютні відхилення для термопар Т1, Т2 та Т3 складають 84 °С, а відносні відхилення в межах 15,2 %.

Наступним етапом було дослідження літій-іонних елементів, які були заряджені на 50%. На рисунку 6.11 наведено динаміку зміни температури

вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища пожежі класу В, для термопар Т1, Т2, Т3.

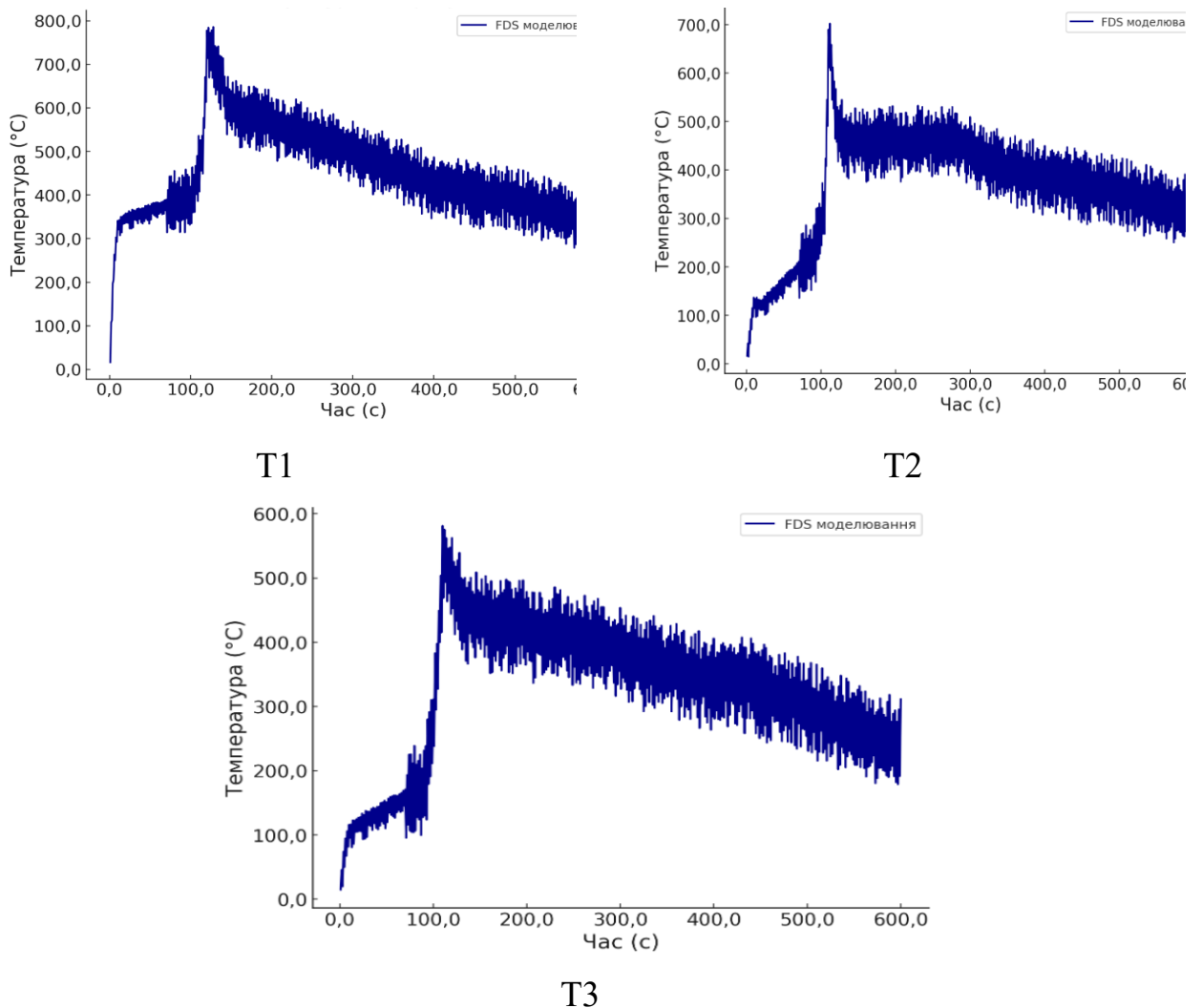


Рисунок 6.11 – Результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.12

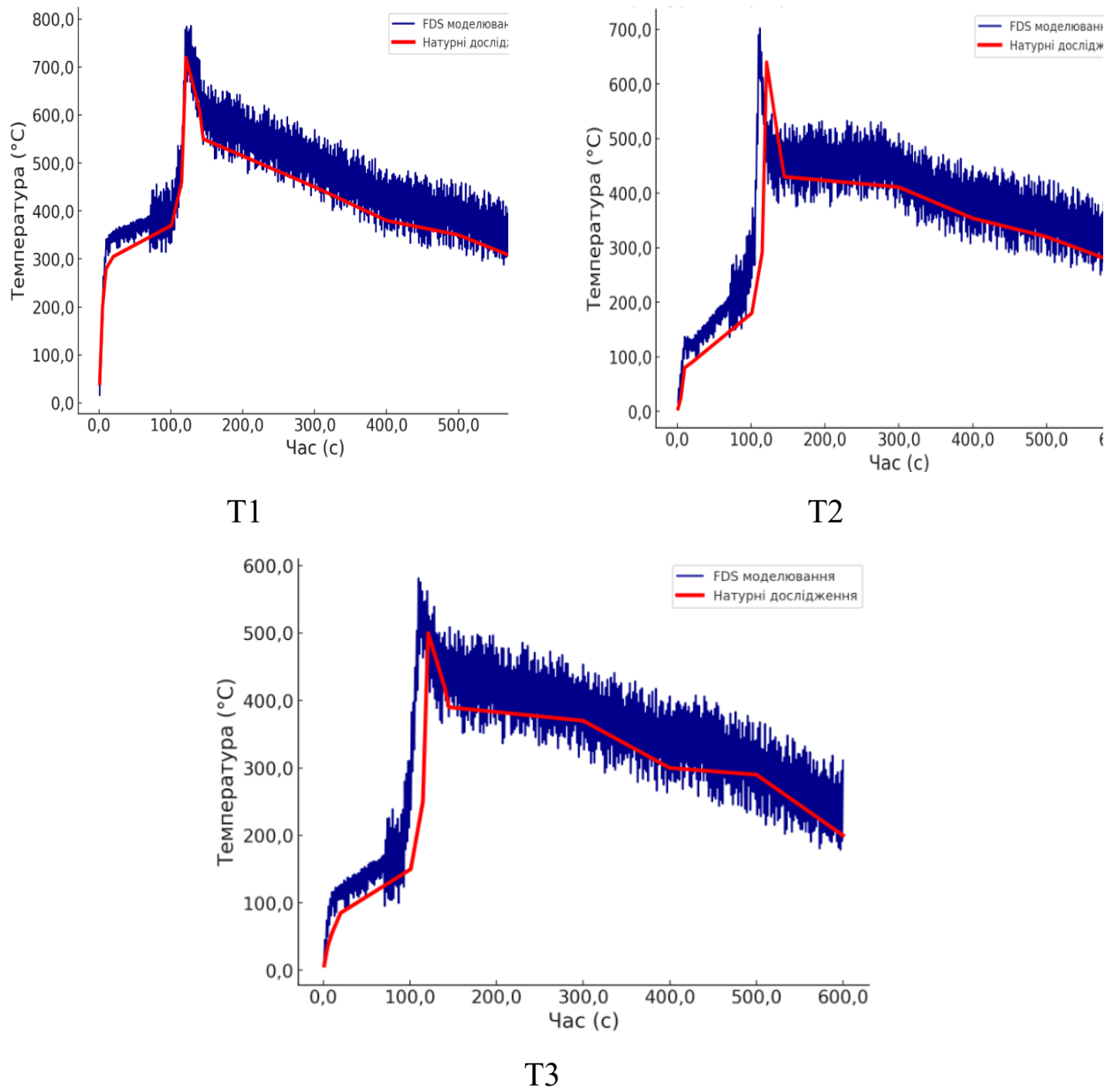


Рисунок 6.12 – Результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.13 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища пожежі класу В, для термопар Т1, Т2, Т3.

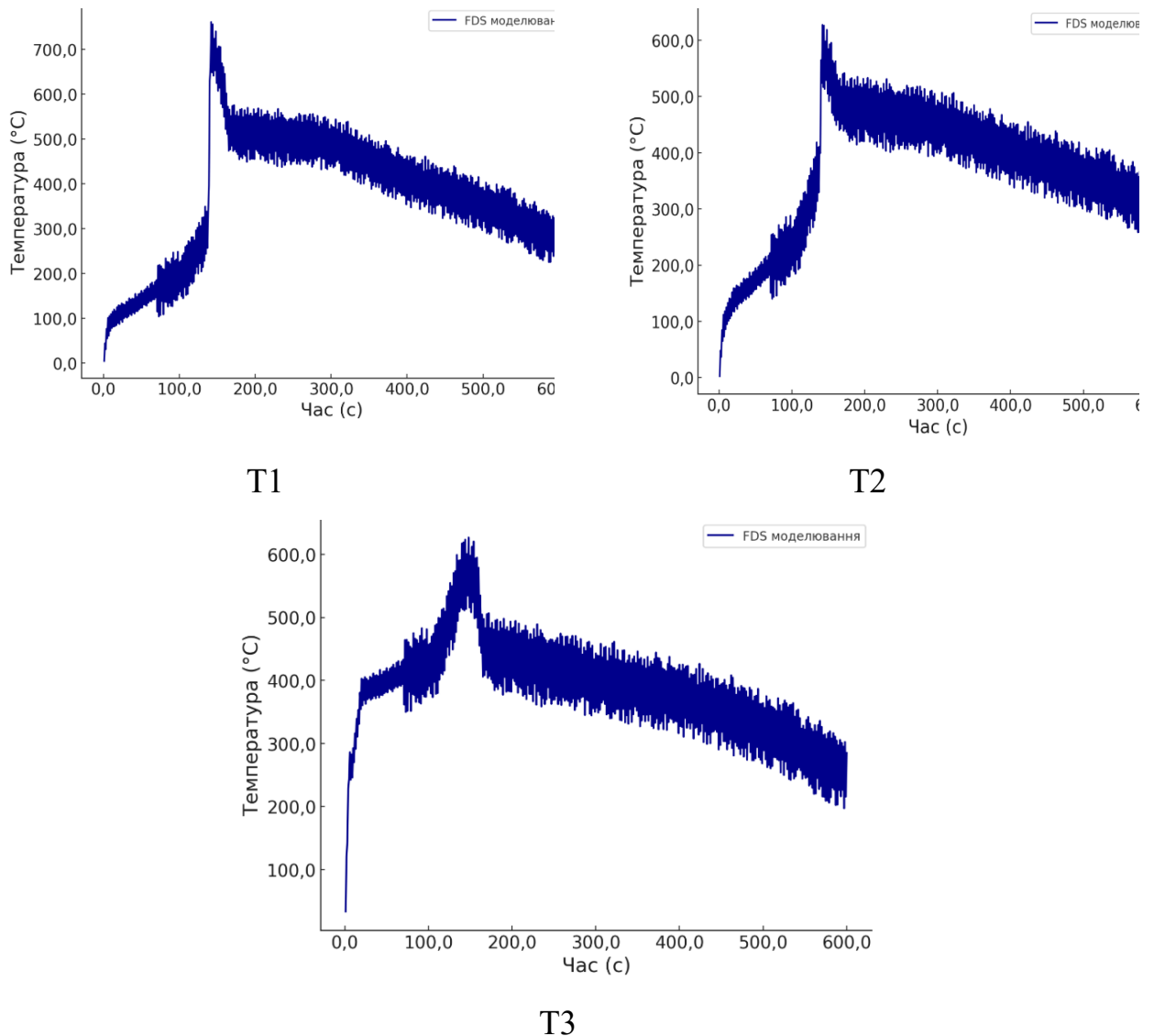


Рисунок 6.13 – Результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених вертикально (катодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.14

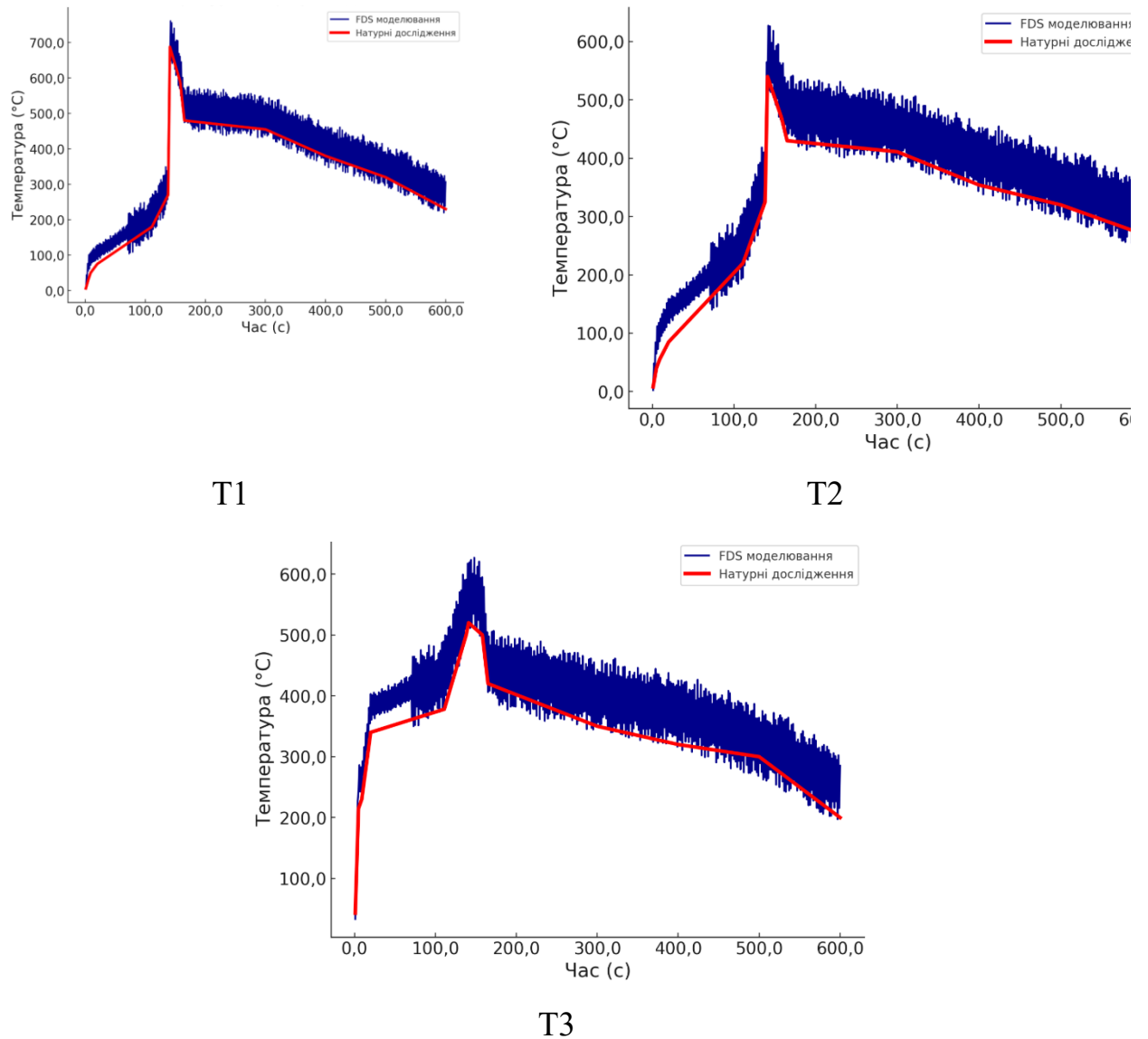


Рисунок 6.14 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.15 наведено динаміку зміни температури батареї зарядженої на 50 % під час випробувань у горизонтальному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища пожежі класу В, для термопар Т1, Т2, Т3.

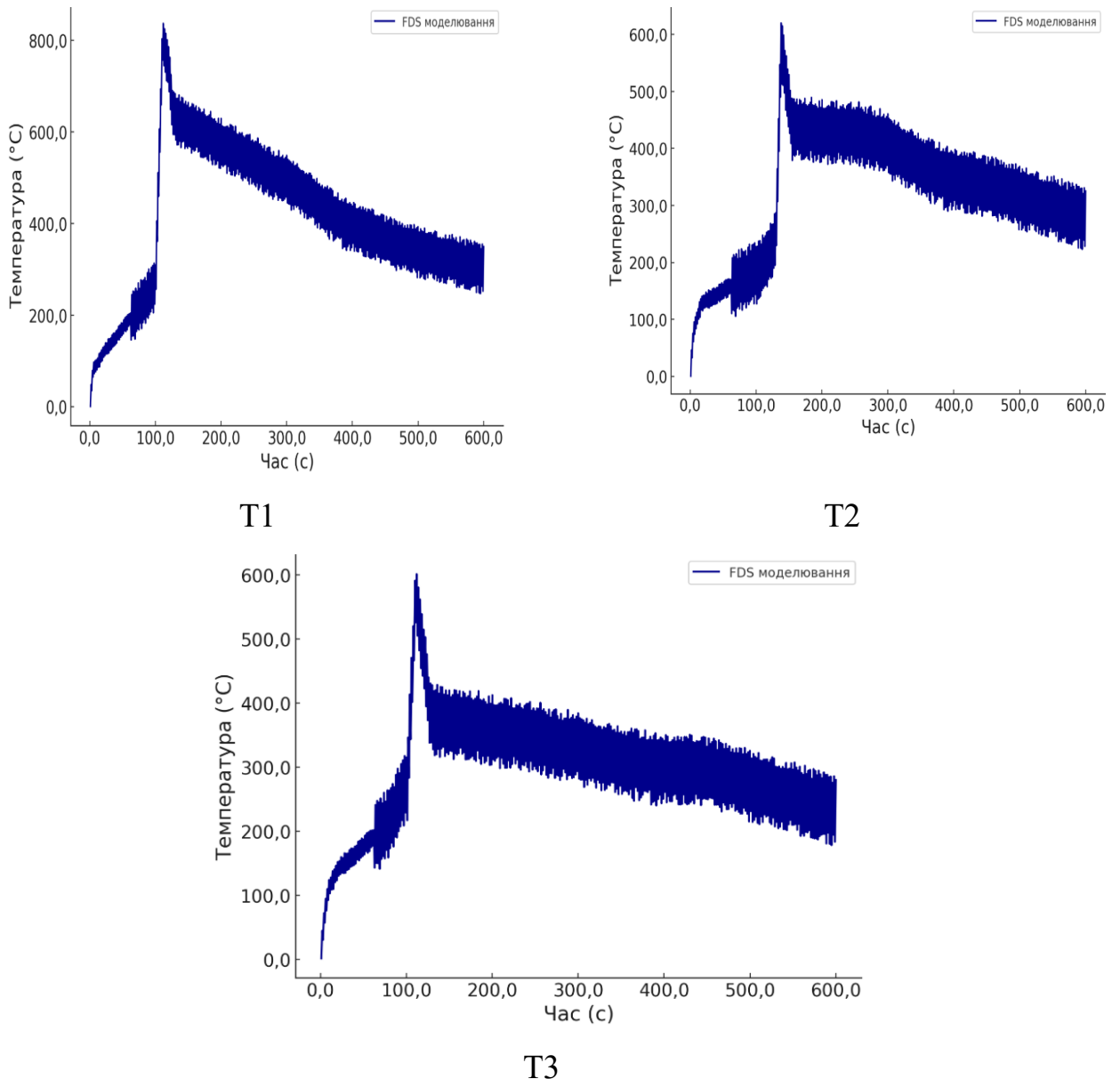
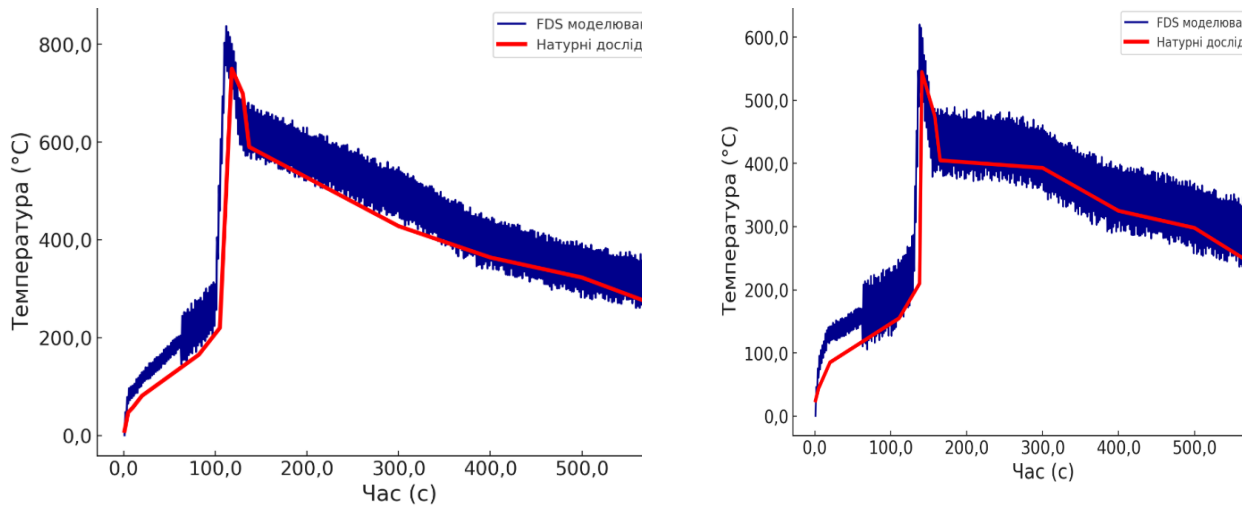


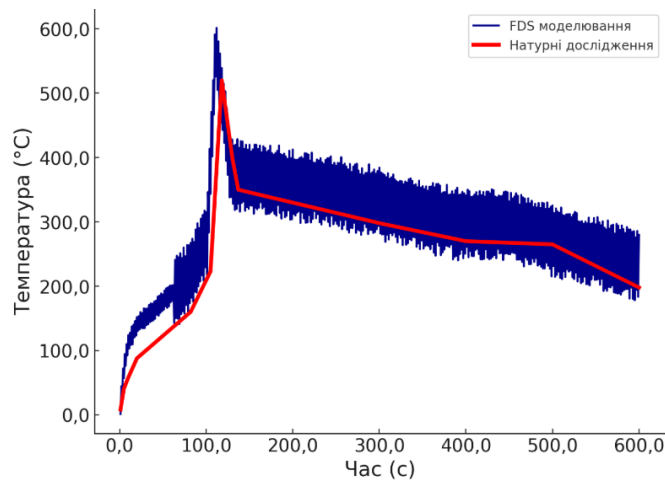
Рисунок 6.15 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей заряджених на 50% просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.16



T1

T2



T3

Рисунок 6.16 – Результати досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50 % просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

Слід відміти, що при збільшенні заряду до 50% комп'ютерне моделювання із використанням газогідродинамічної моделі показує результати по пікових значення температури на 80-110 °C більше ніж при дослідженні розряджених батарей.

З використанням рівностей 6.1-6.3 усереднені дані по середніх абсолютних, квадратичних та відносних відхиленнях між результатами комп'ютерного моделювання на усереднених даних відповідного натурального експерименту для термопар Т1, Т2 та Т3 у випадку заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів для усіх випадків просторового розміщення відносно модельного вогнища класу В відображено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Усереднені абсолютні, середньоквадратичні та відносні відхилення для Т1, Т2 та Т3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

	Абсолютні відхилення, °С	Середньо квадратичні відхилення, °С	Відносні відхилення, %
Для заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В	91	84	17,4

Аналізуючи отримані усереднені дані під час проведення натурних експериментів та дані отриманні внаслідок комп'ютерного моделювання із використанням розробленої газо гідро-динамічної моделі можна зробити висновок, що модель адекватно відтворює проведення натурального експерименту. Разом з тим для розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В усереднені абсолютні відхилення для термопар Т1, Т2 та Т3 складають 91 °С, а відносні відхилення в межах 17,4 %.

Наступним етапом було дослідження літій-іонних елементів, які були заряджені на 100%. На рисунку 6.17 наведено динаміку зміни температури

розміщеної вертикально та зарядженої на 100% батареї під час випробувань анодом до модельного вогнища пожежі класу В, для термодатчиків Т1, Т2, Т3.

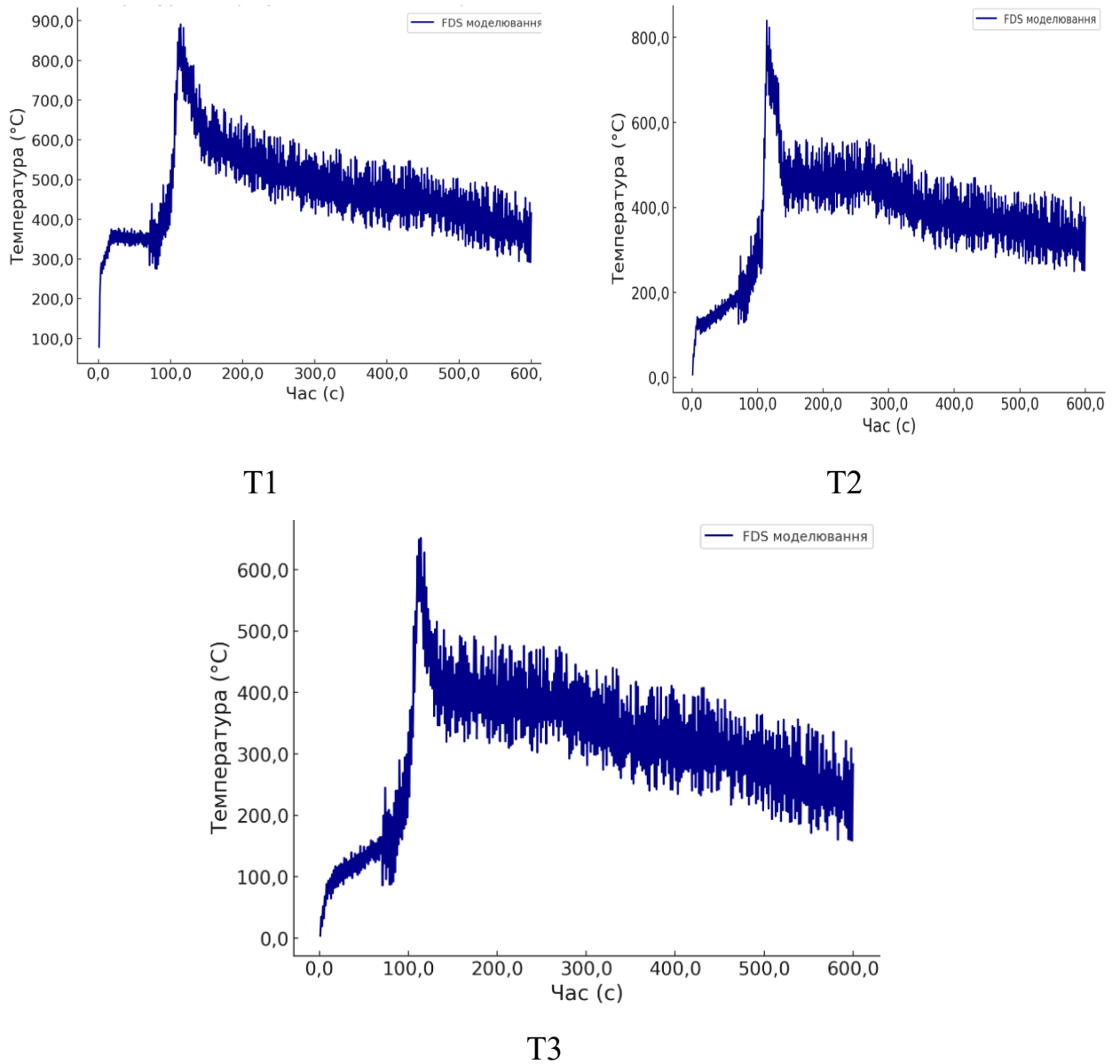


Рисунок 6.17 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально анодом

до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.12.

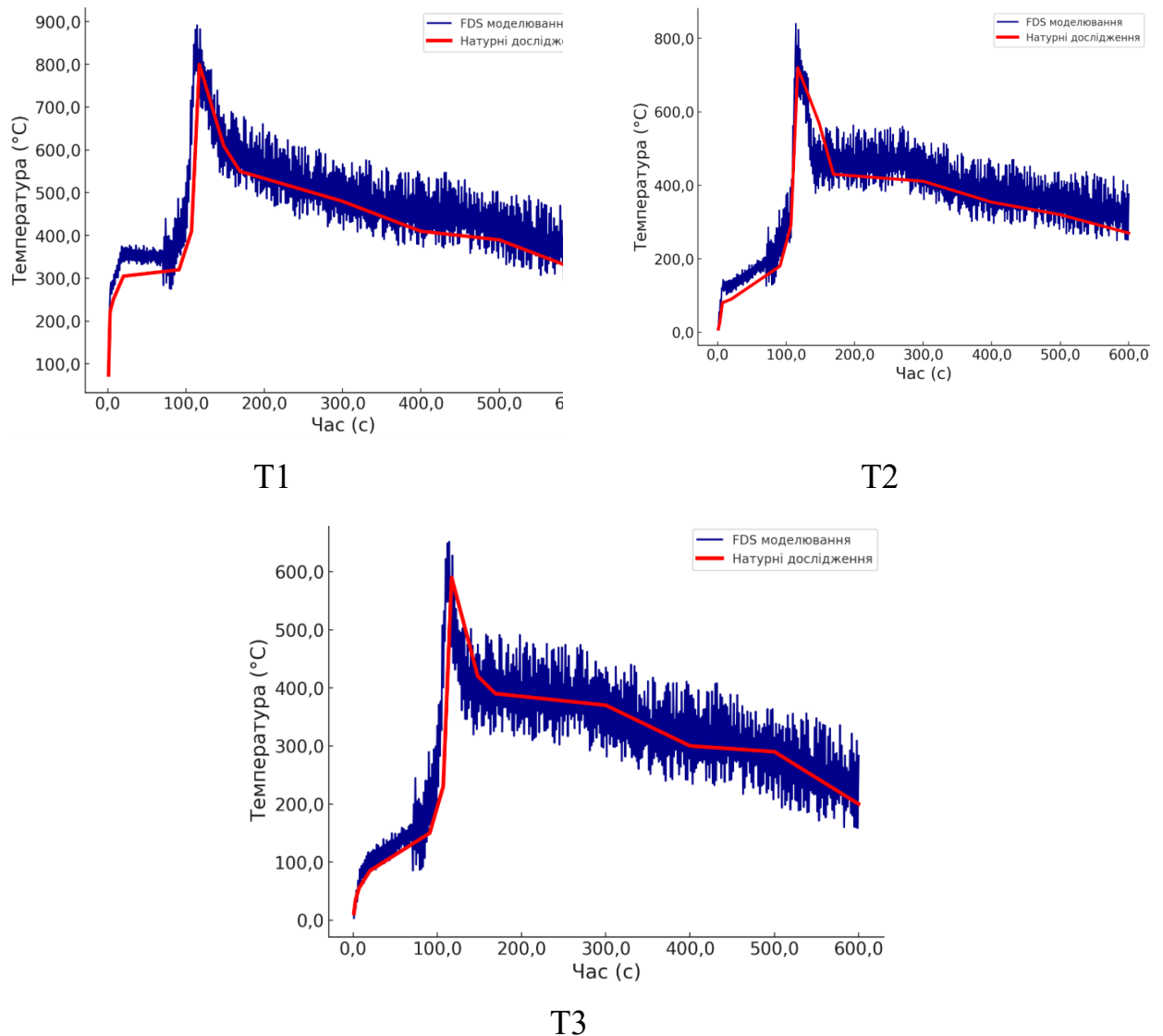


Рисунок 6.18 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.19 наведено динаміку зміни температури розміщеної вертикально та зарядженої на 100% батареї під час випробувань катодом до модельного вогнища пожежі класу В, для термопар Т1, Т2, Т3.

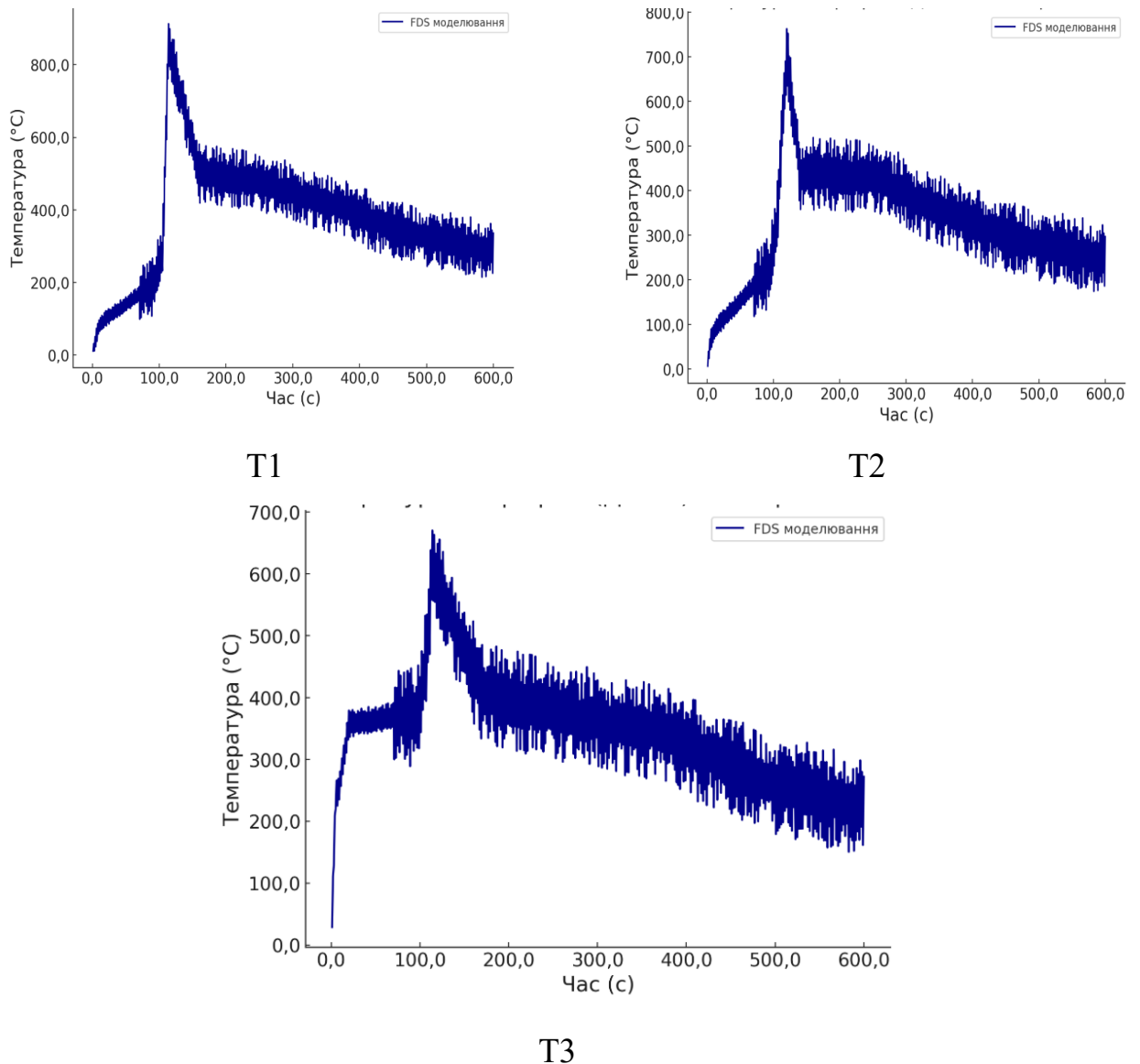


Рисунок 6.19 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.20.

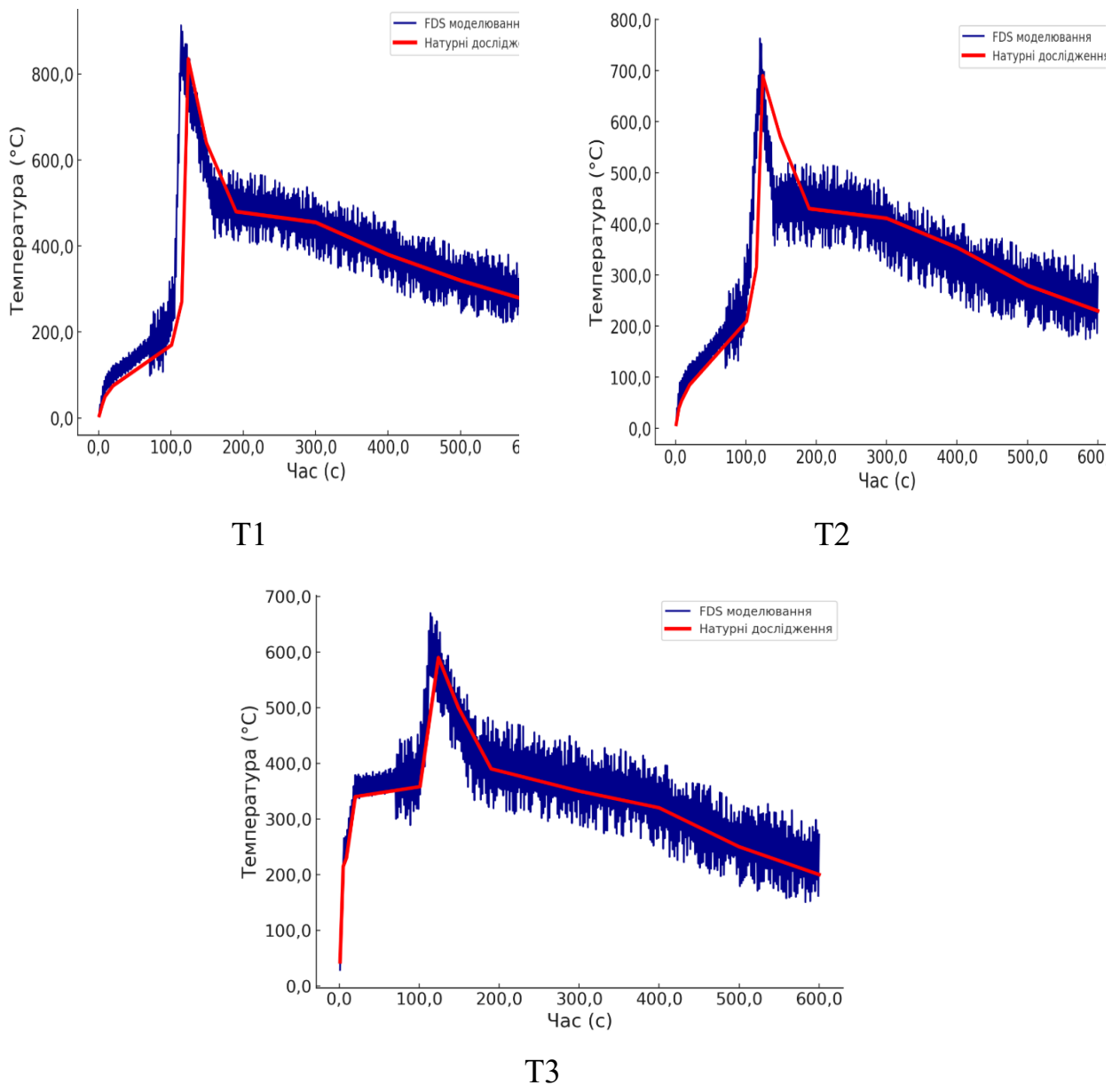
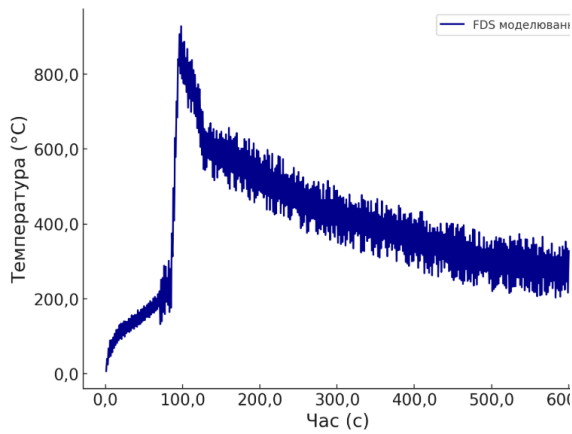
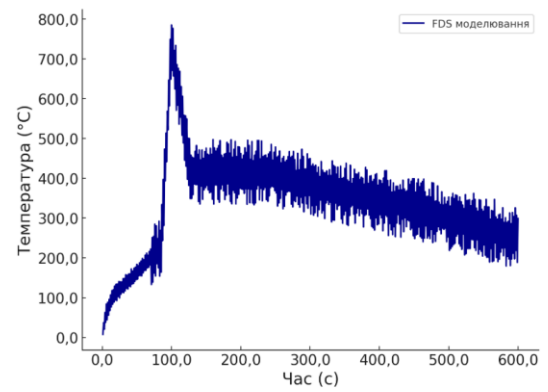


Рисунок 6.20 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

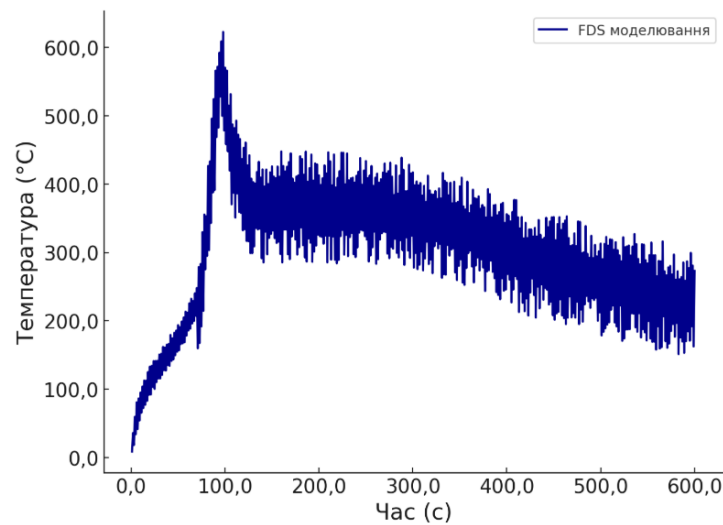
На рисунку 6.21 наведено динаміку зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% розміщеної горизонтально до модельного вогнища пожежі класу В для термопар Т1, Т2, Т3.



T1



T2



T3

Рисунок 6.21 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до модельного вогнища класу В з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.22

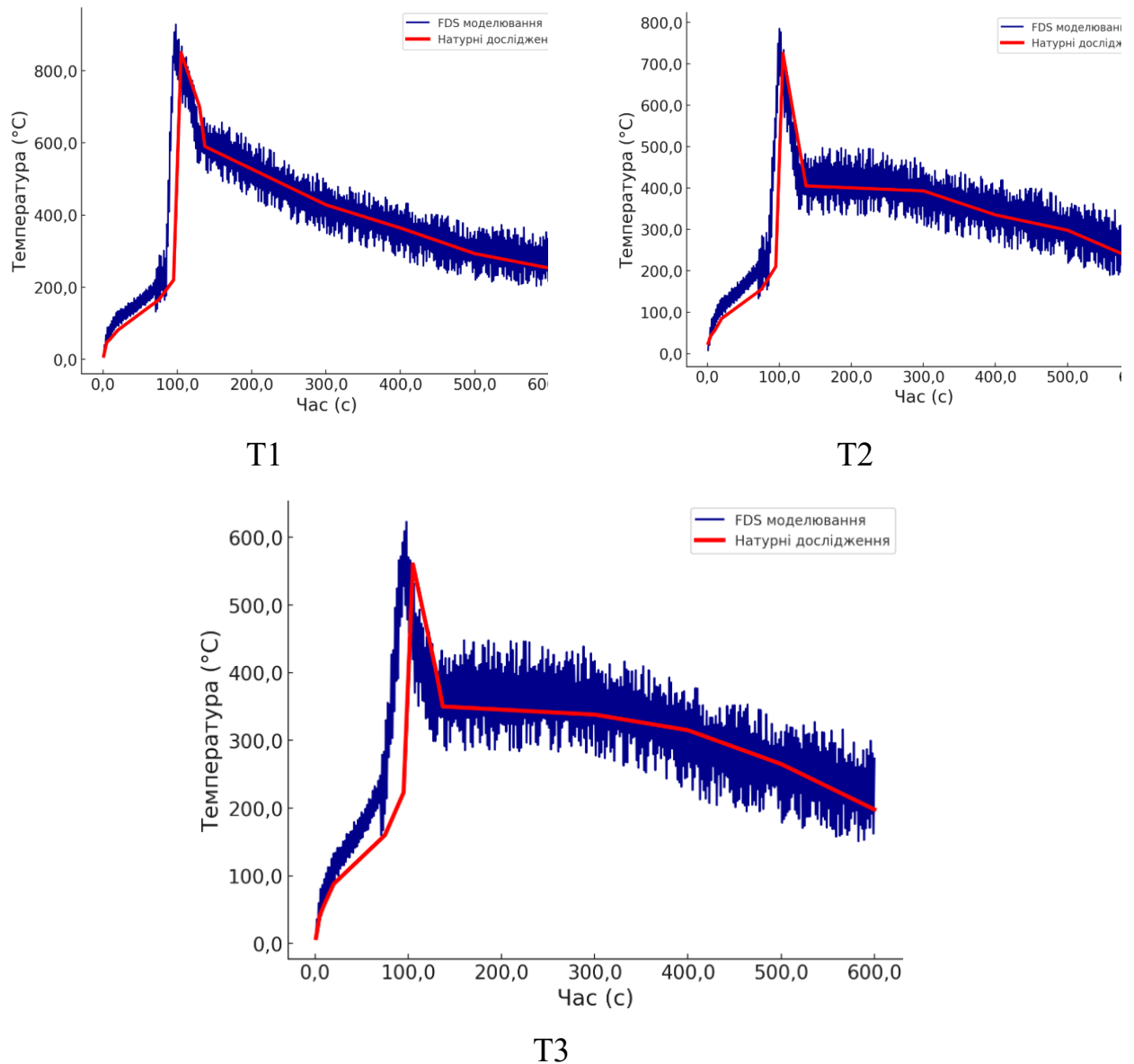


Рисунок 6.22 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до модельного вогнища класу В) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З використанням рівностей 6.1-6.3 усереднені дані по середніх абсолютних, квадратичних та відносних відхиленнях між результатами комп'ютерного моделювання на усереднених даних відповідного натурального експерименту для термопар Т1, Т2 та Т3 у випадку розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів для усіх випадків просторового розміщення відносно модельного вогнища класу В відображено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Усереднені абсолютні, середньоквадратичні та відносні відхилення для T1, T2 та T3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

	Абсолютні відхилення, °C	Середньо квадратичні відхилення, °C	Відносні відхилення, %
для розряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В	105	96	19,7

Аналізуючи отримані усереднені дані під час проведення натурних експериментів та дані отриманні внаслідок комп'ютерного моделювання із використанням розробленої газо гідро-динамічної моделі можна зробити висновок, що модель адекватно відтворює проведення натурального експерименту. Разом з тим для розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до модельного вогнища класу В усереднені абсолютні відхилення для термопар T1, T2 та T3 складають 105 °C, а відносні відхилення в межах 19,7 %.

Внаслідок збільшення заряду до 100% збільшується максимальна температура горіння, і як наслідок збільшуються відносні відхилення між експериментальними даними та даними комп'ютерного моделювання. Загалом, середнє відносне відхилення у випадку використання комп'ютерної моделі із модельним вогнищем пожежі класу В для усіх випадків просторового розміщення та ступеня заряду становить 17,4%.

Наступним етапом було дослідження літій-іонних елементів, з використанням розробленої газо гідро-динамічної моделі з використанням джерела тепла без відкритого полум'я – електронагрівальної панелі.

6.3 Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

На даному етапі верифікації розробленої газогідродинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно електронагрівальної панелі є порівняння температурних розподілів на поверхні літій-іонних елементів отриманих під час натурних досліджень та результатів отриманих з використанням створеної газогідродинамічної моделі за однакових умов дослідження.

Під час верифікації створеної газодинамічної моделі задано параметри навколишнього середовища, які відповідали кліматичним умовам проведення експериментальних досліджень, а саме: тиск атмосферного повітря – 102,8 кПа; температура повітря – 24 °С; відносна вологість – 70 %.

Натурні вогневі дослідження проводились у безвітряні дні, так як навіть незначний вітровий вплив змінює тепловий потік. Особливо це виражено під час використання модельного вогнища класу В. Тому під час моделювання з використанням розробленої газодинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів вітровий вплив не задавався.

Під час використання розробленої газогідродинамічної моделі використовувалась методика, як при експериментальних дослідженнях, тобто дослідження було поділено на три етапи: 1. експериментальне дослідження розряджених батарей; 2. експериментальне дослідження заряджених батарей на 50%; 3. експериментальне дослідження заряджених батарей на 100%.

Для кожного із етапів проводилось дослідження для двох позицій розміщення батарей: горизонтального та вертикального по п'ять експериментів на кожену позицію. Причому дослідження батареї у вертикальному положенні проводилось для двох позицій: анодом до джерела тепла та катодом до джерела тепла.

Так як використання розробленої газодинамічної моделі досліджень процесів горіння силових літій-іонних елементів акумуляторів у різному просторовому розміщенні відносно електронагрівальної панелі дає ідентичні результати при однакових умовах використання, тому для кожного стану заряду та однакового просторового розміщення здійснено один експеримент.

На рисунку 6.23 представлено результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених анодом до електронагрівальної панелі для термопар T1, T2 та T3.

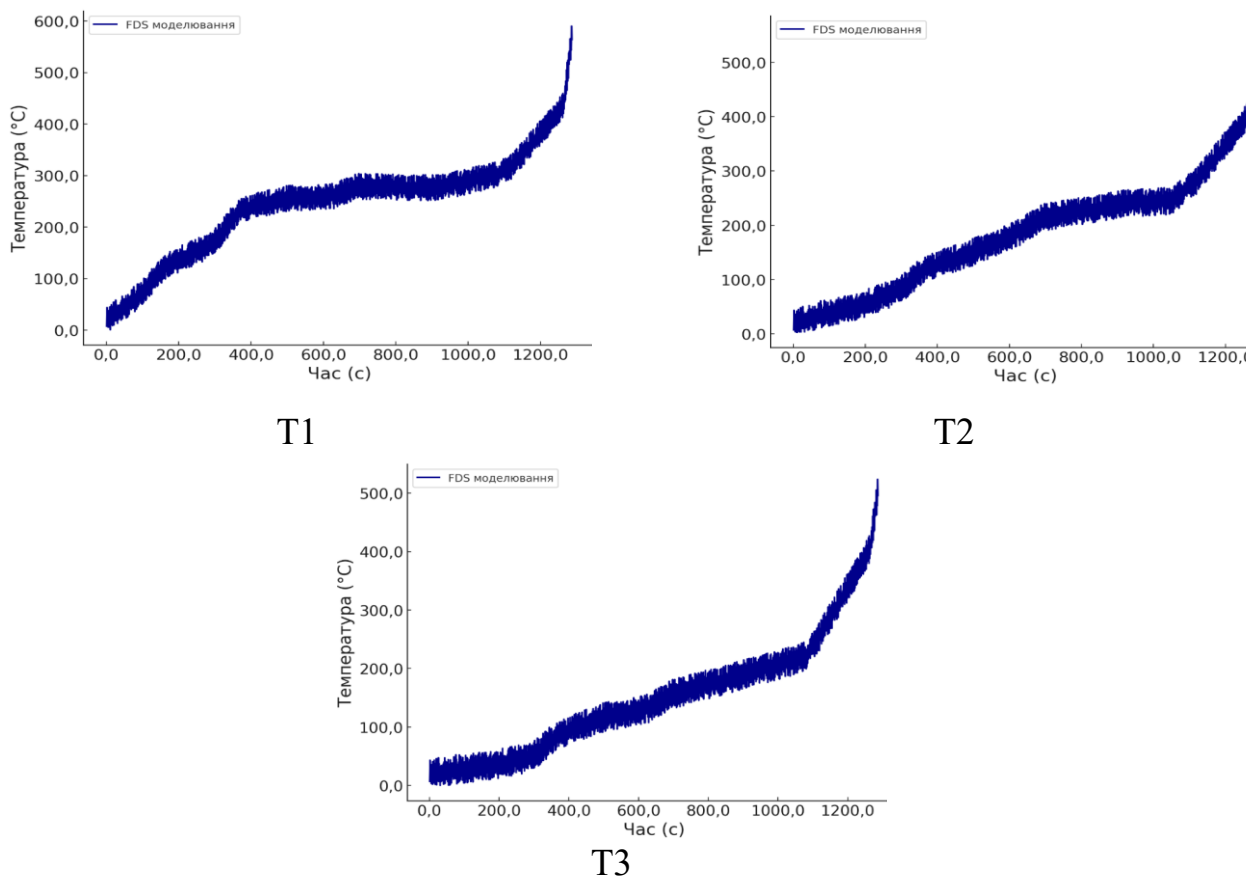


Рисунок 6.23 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально анодом до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних

елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально анодом до електронагрівальної панелі по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.24.

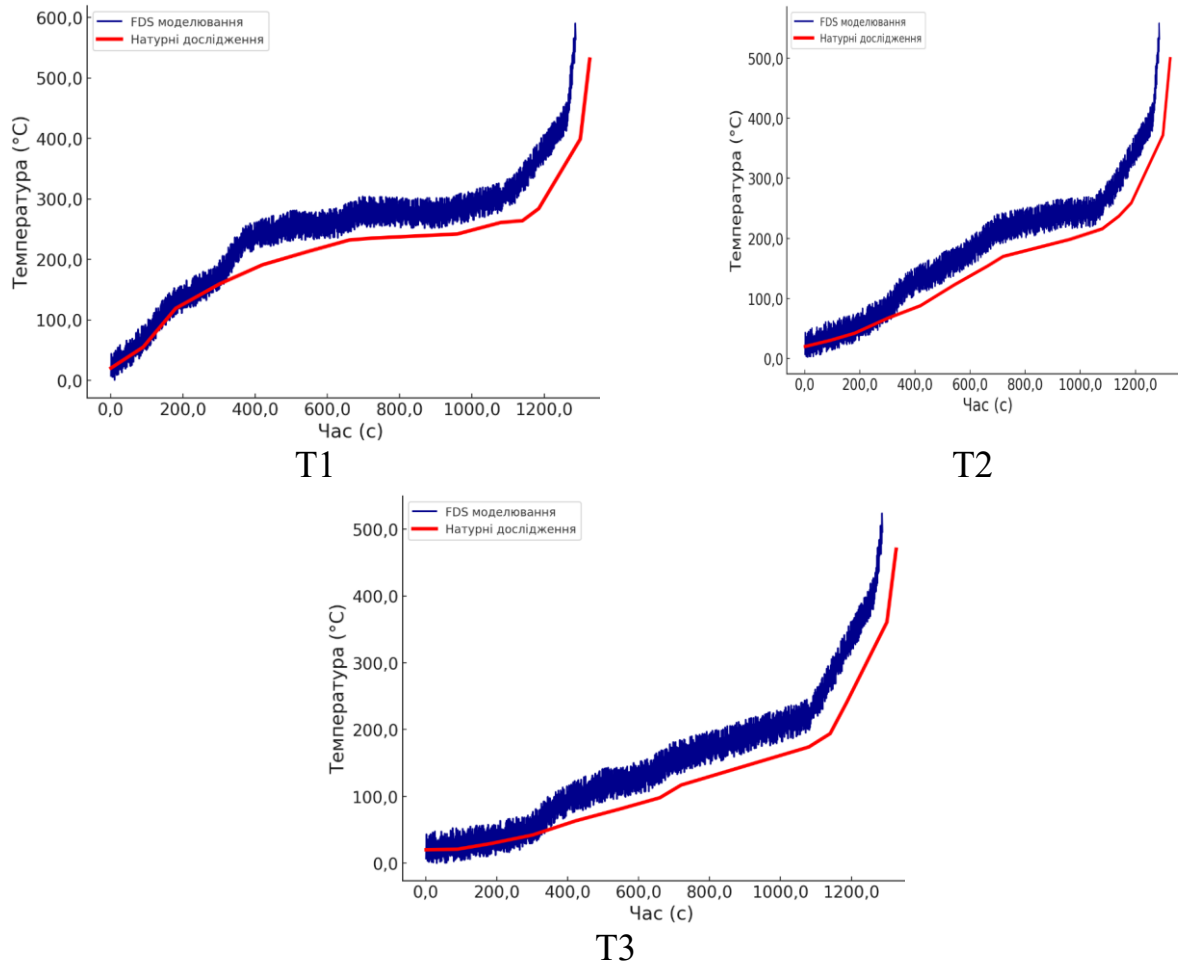
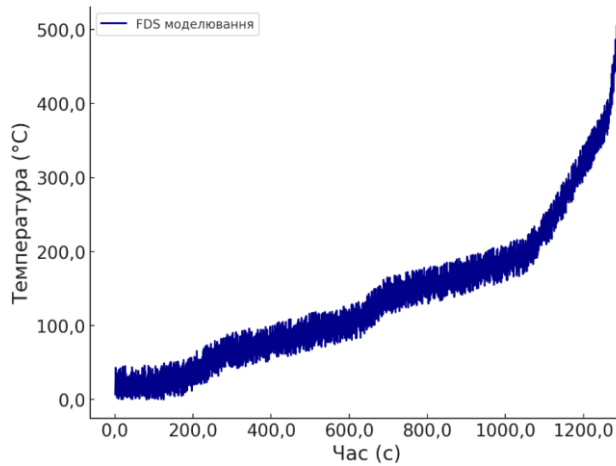
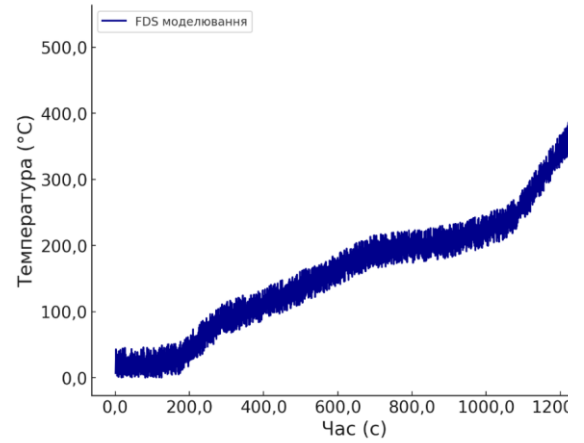


Рисунок 6.24 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально анодом електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

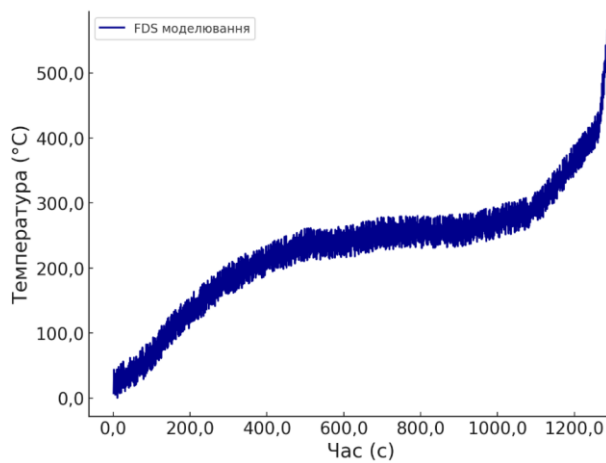
На рисунку 6.25 представлено результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі для термопар T1, T2 та T3.



T1



T2



T3

Рисунок 6.25 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.26

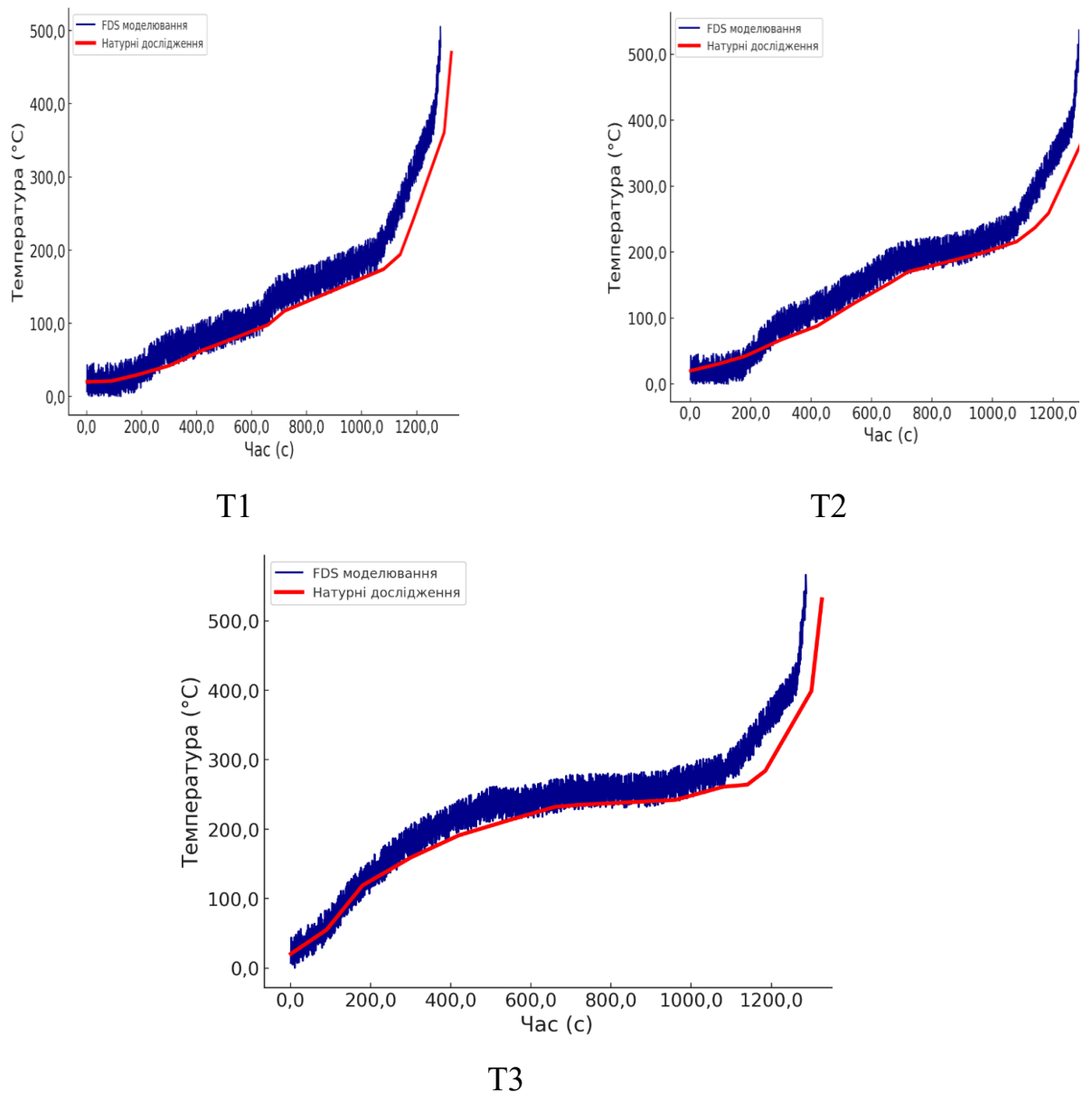
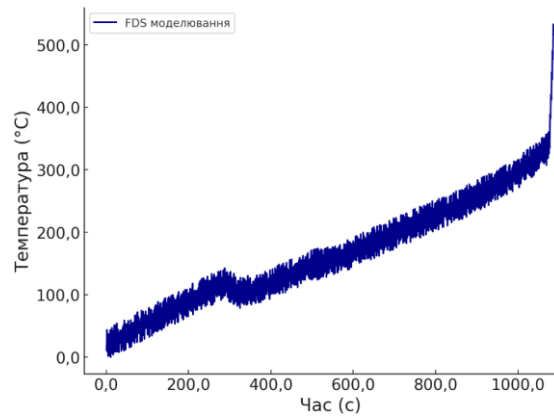


Рисунок 6.26 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

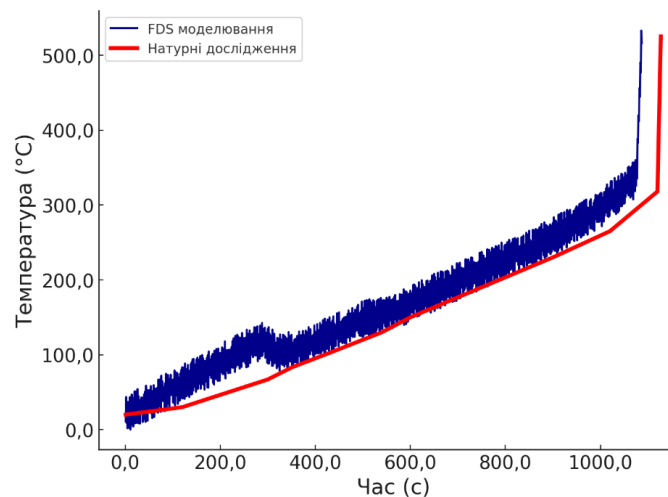
На рисунку 6.27 представлено результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі для термопарі ТЗ.



T1

Рисунок 6.27 – Результати досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.28.



T3

Рисунок 6.28 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

З використанням рівностей 6.1-6.3 усереднені дані по середніх абсолютних, квадратичних та відносних відхиленнях між результатами комп'ютерного моделювання на усереднених даних відповідного натурального експерименту для термопар T1, T2 та T3 у випадку розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів для усіх випадків просторового розміщення відносно електронагрівальної панелі відображено в таблиці 6.5.

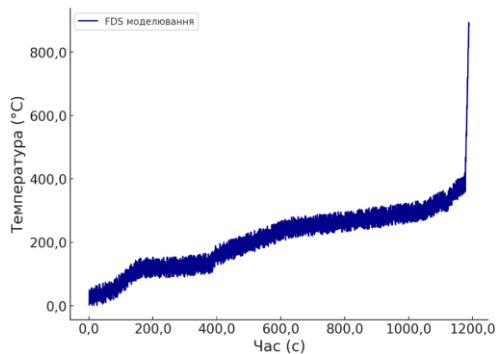
Таблиця 6.5 – Усереднені абсолютні, середньоквадратичні та відносні відхилення для T1, T2 та T3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

	Абсолютні відхилення, °C	Середньо квадратичні відхилення, °C	Відносні відхилення, %
для розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до електронагрівальної панелі	58	45	8,9

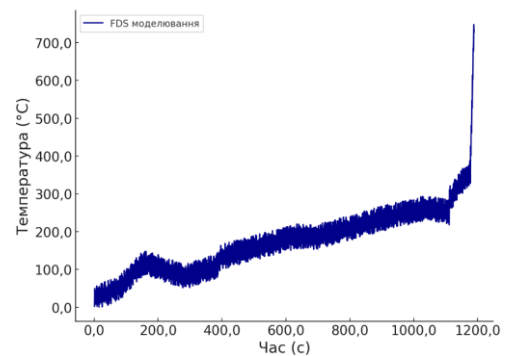
Слід відмітити, що отримані результати із використання розробленої газо гідродинамічної моделі дають кращу збіжність із результатами відповідного натурального експерименту у порівнянні із попереднім дослідженням, де використовувалось модельне вогнище класу В. Це пояснюється власне більш точними експериментальними вимірюваннями, так як електронагрівальна панель дає кращу відтворюваність та є більш стійкою до вітрового впливу, який значно впливає та змінює теплові характеристики модельного вогнища класу В.

Наступним етапом було дослідження літій-іонних елементів, які були заряджені на 50%. На рисунку 6.29 наведено динаміку зміни температури

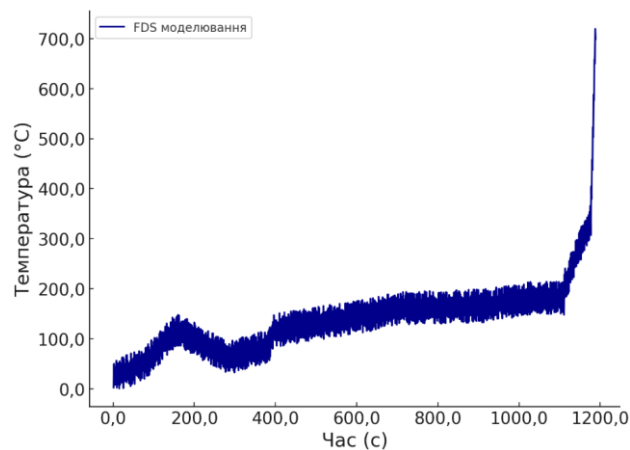
вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань анодом до електронагрівальної панелі, для термопар T1, T2, T3.



T1



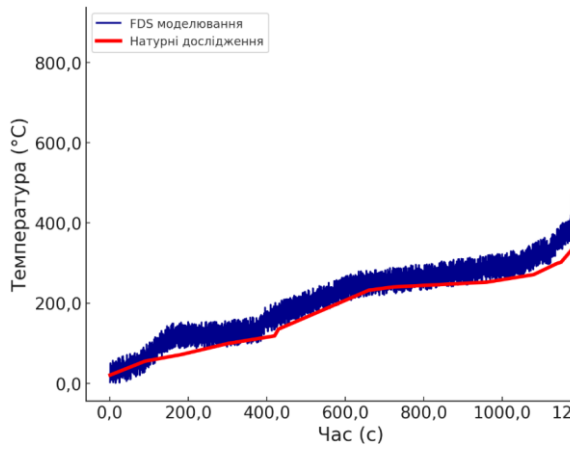
T2



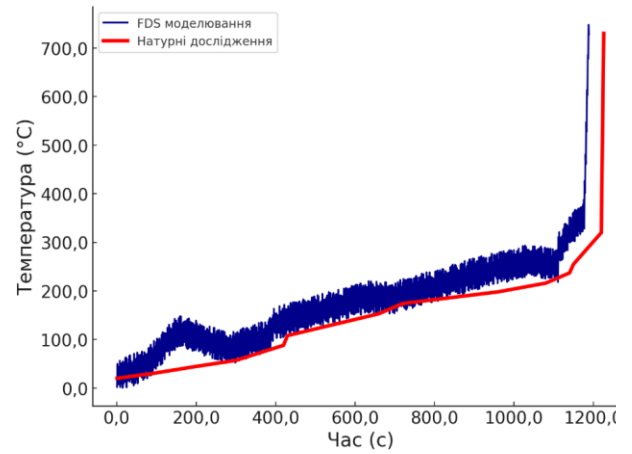
T3

Рисунок 6.29 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

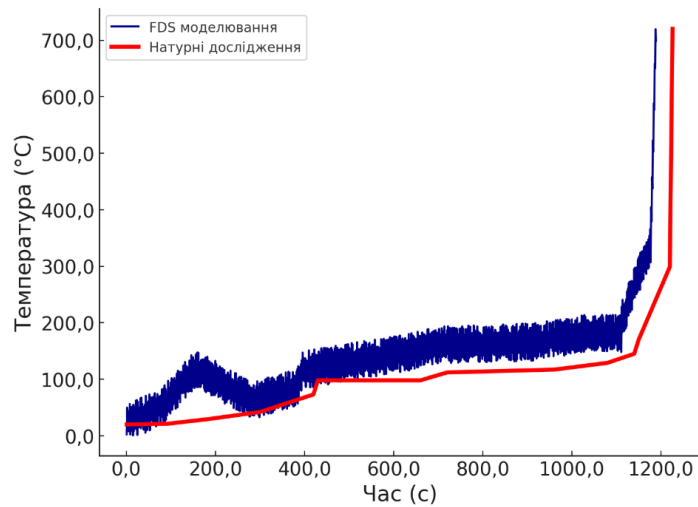
З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.30



T1



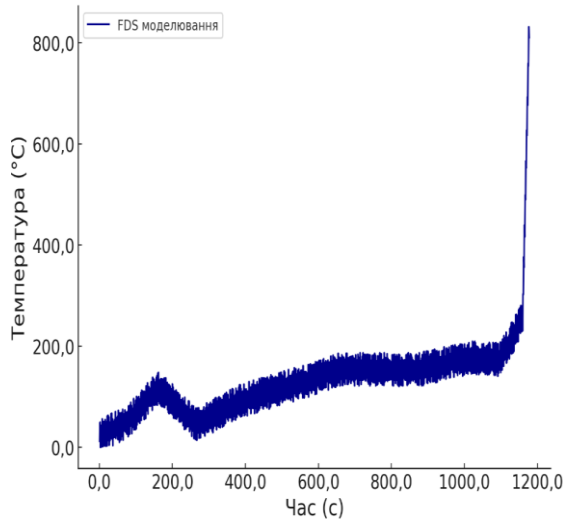
T2



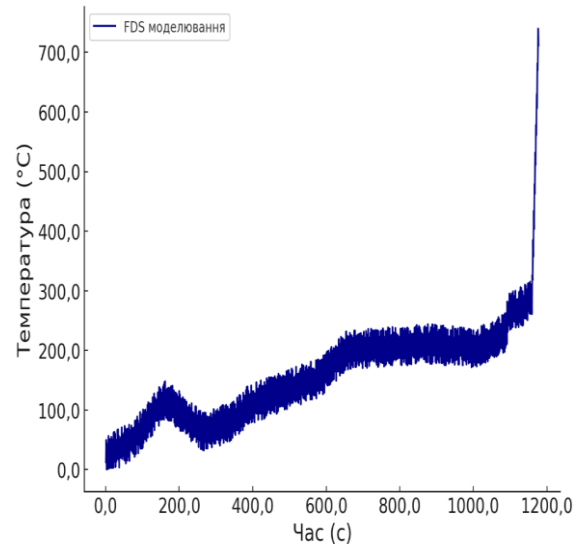
T3

Рисунок 6.30 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

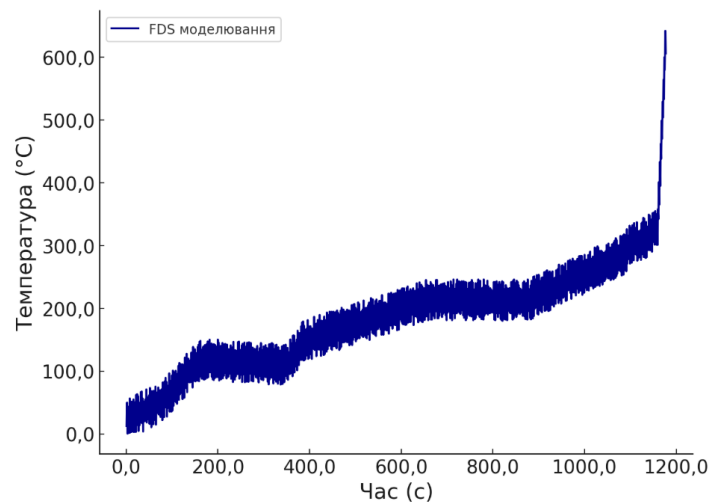
На рисунку 6.31 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 50% батареї під час випробувань катодом до електронагрівальної панелі, для термопар T1, T2, T3.



T1



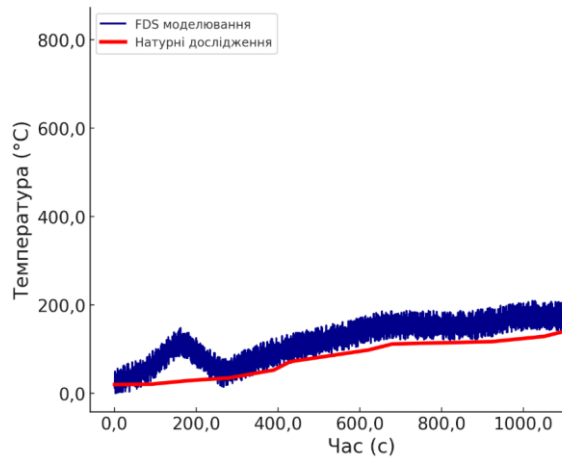
T2



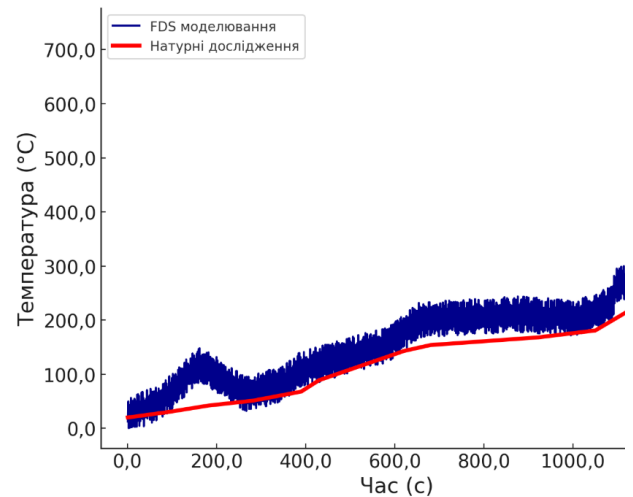
T3

Рисунок 6.31 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

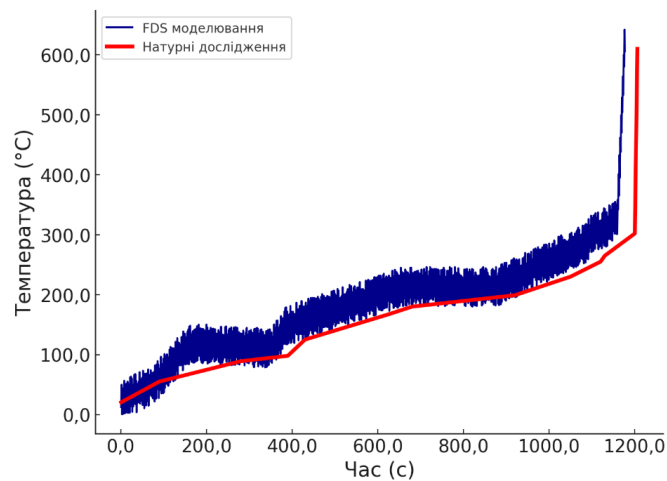
З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термopарах відображені на рисунку 6.32



T1



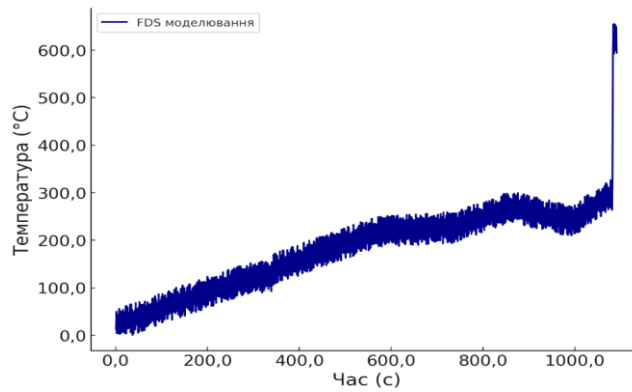
T2



T3

Рисунок 6.32 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

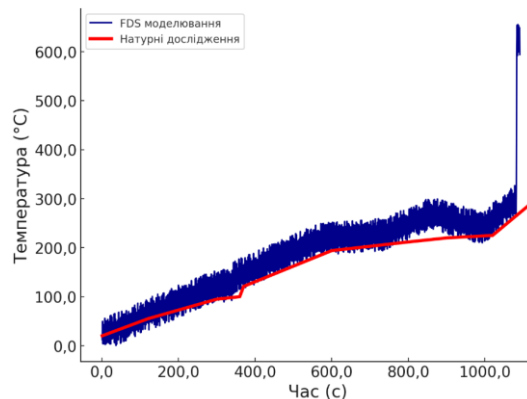
На рисунку 6.33 представлено результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі для термопарі T1.



Т1

Рисунок 6.33 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.34.



Т1

Рисунок 6.34 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50% просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

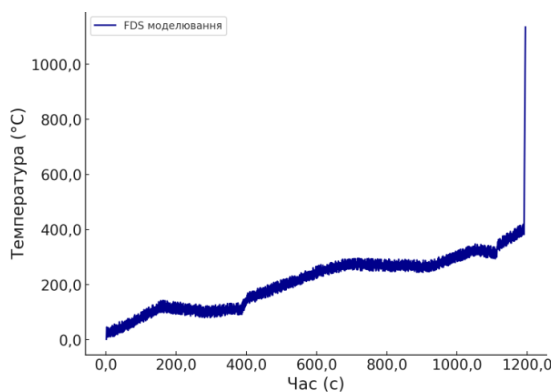
З використанням рівностей 6.1-6.3 усереднені дані по середніх абсолютних, квадратичних та відносних відхиленнях між результатами комп'ютерного моделювання на усереднених даних відповідного натурального експерименту для термопар T1, T2 та T3 у випадку дослідження силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 50 % для усіх випадків просторового розміщення відносно електронагрівальної панелі відображено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Усереднені абсолютні, середньоквадратичні та відносні відхилення для T1, T2 та T3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

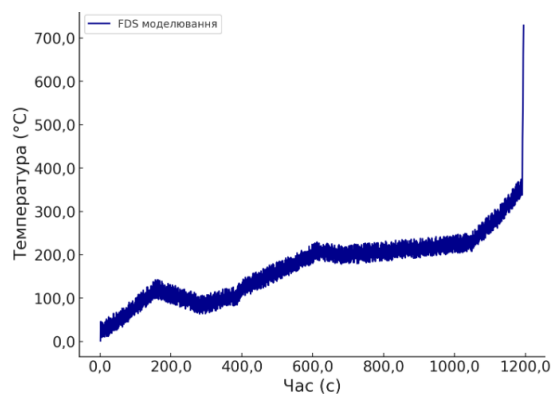
	Абсолютні відхилення, °C	Середньо квадратичні відхилення, °C	Відносні відхилення, %
для заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до електронагрівальної панелі	69	54	11,6

Абсолютне відхилення для заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів усіх випадків просторового розміщення до електронагрівальної панелі становлять 69 °C, а усереднені відносні відхилення 11,6 %.

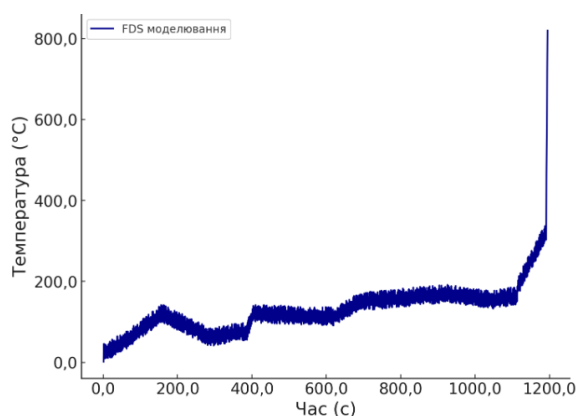
Наступним етапом було дослідження літій-іонних елементів, які були заряджені на 100%. На рисунку 6.35 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 100% батареї під час випробувань анодом до електронагрівальної панелі, для термопар T1, T2, T3.



T1



T2



T3

Рисунок 6.35– Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до модельного вогнища класу В по відповідних термopарах відображені на рисунку 6.36

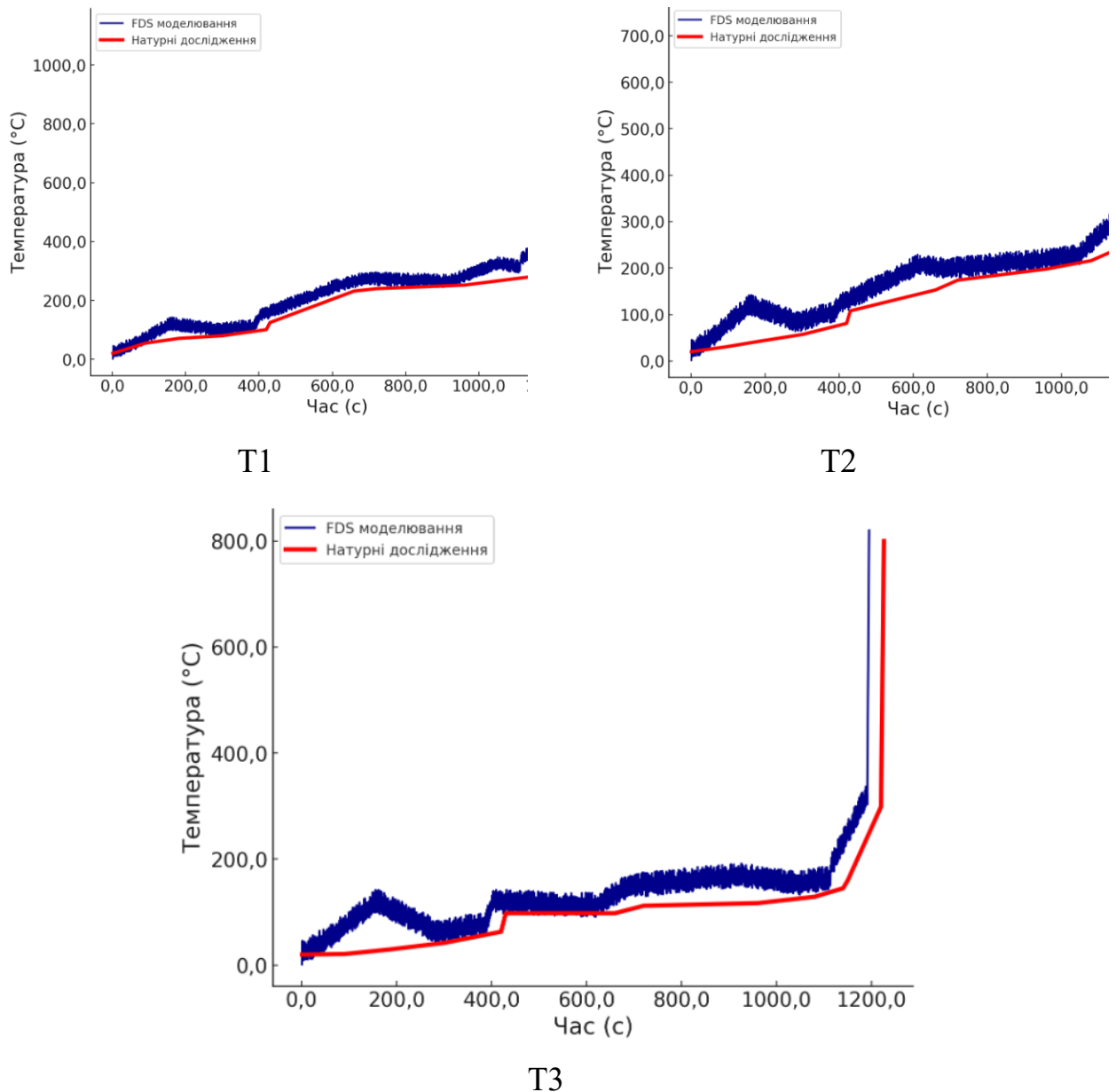


Рисунок 6.36 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (анодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

На рисунку 6.37 наведено динаміку зміни температури вертикально розміщеної зарядженої на 100% батареї під час випробувань катодом до електронагрівальної панелі, для термопар T1, T2, T3.

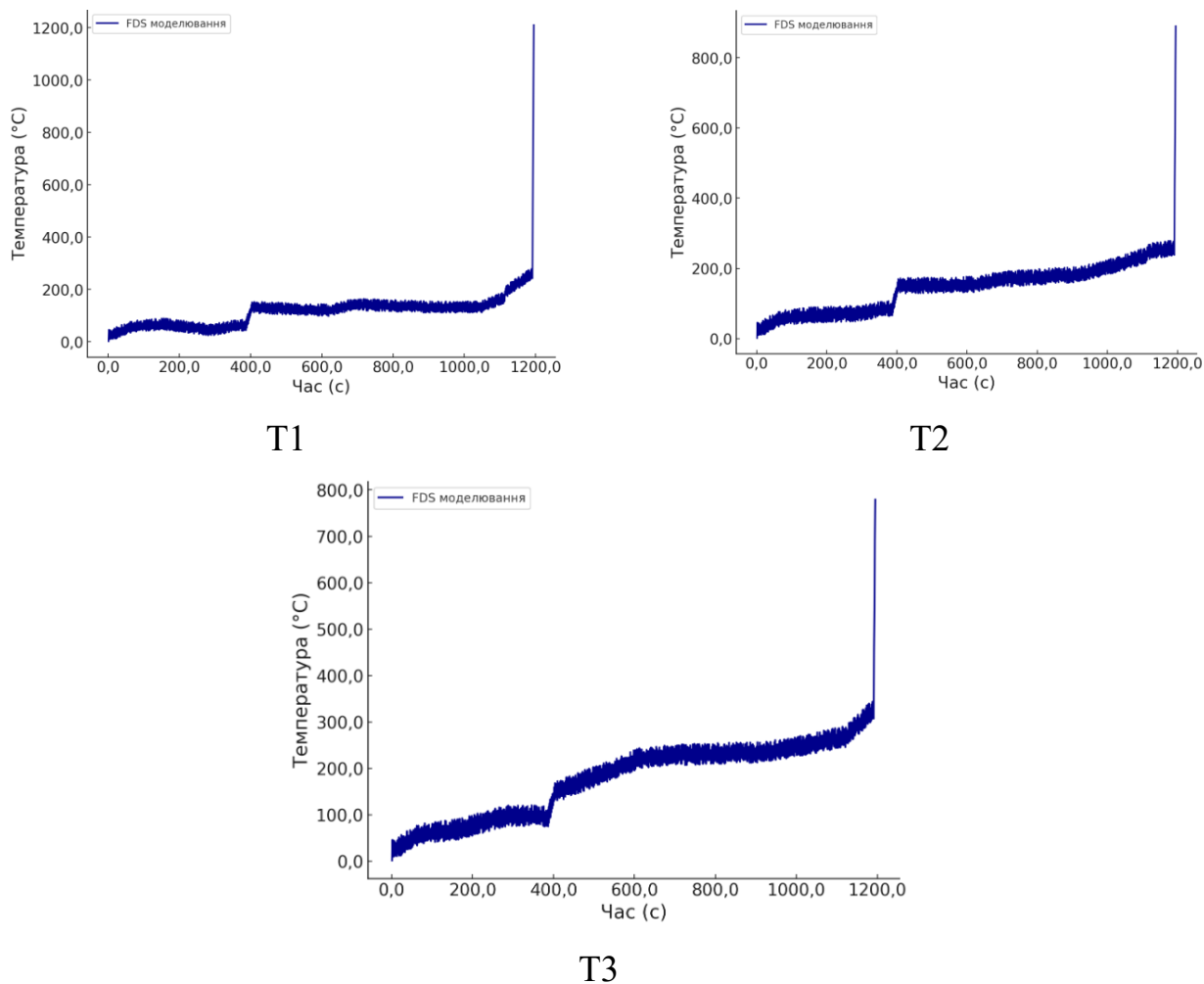
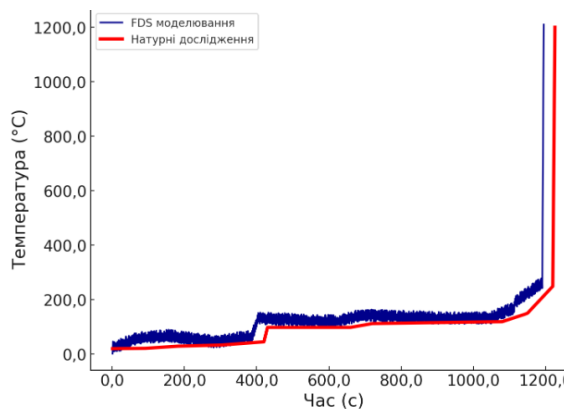
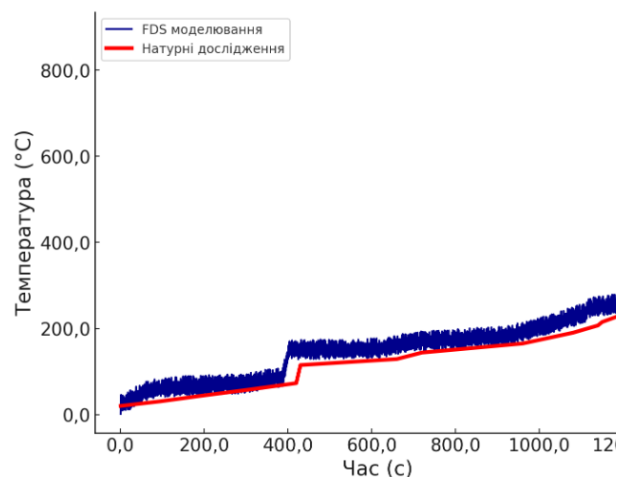


Рисунок 6.37 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

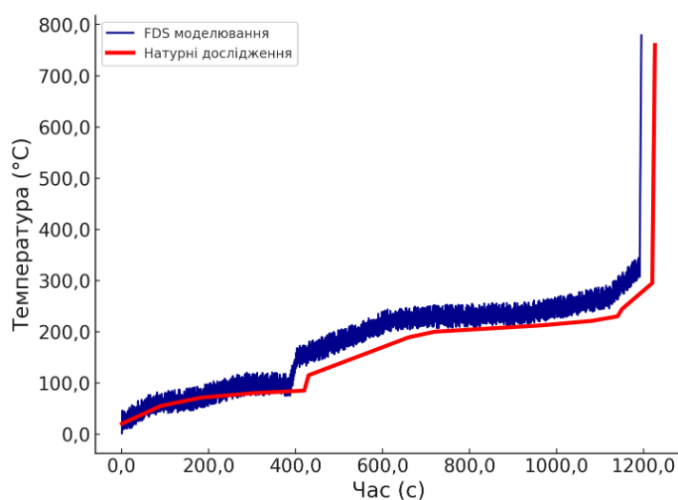
З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури заряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термopарах відображені на рисунку 6.38



T1



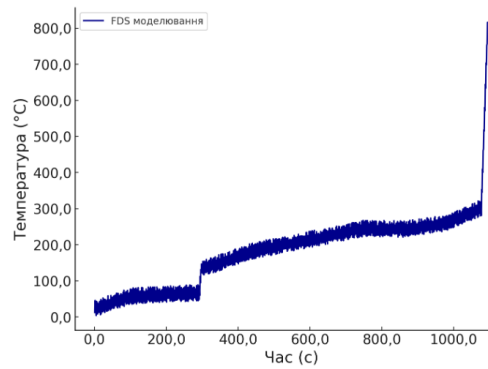
T2



T3

Рисунок 6.38 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури заряджених на 50% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально (катодом до електронагрівальної панелі) з використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

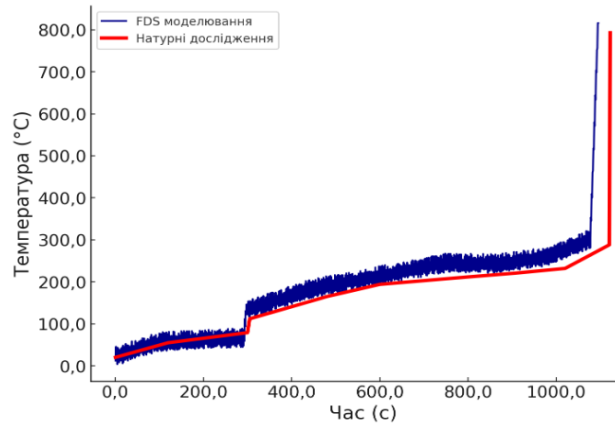
На рисунку 6.39 представлено результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі для термопарі T1.



T1

Рисунок 6.39 – Результати досліджень динаміки зміни температури заряджених на 100% силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі з використанням розробленої газогідродинамічної моделі

З врахуванням відповідних отриманих експериментальних даних суміщені графіки для динаміки зміни температури розряджених силових літій-іонних елементів батарей електромобілів просторово розміщених вертикально катодом до електронагрівальної панелі по відповідних термопарах відображені на рисунку 6.40.



T3

Рисунок 6.40 – Аналіз результатів досліджень динаміки зміни температури силових літій-іонних елементів батарей електромобілів заряджених на 100% просторово розміщених горизонтально до електронагрівальної панелі використанням розробленої газогідродинамічної моделі та натурального експерименту

6.4. Результати досліджень процесів горіння силових літій-іонних модулів у різному просторовому розміщенні відносно модельного вогнища класу С з використанням газогідродинамічної моделі

Так як експериментальні дослідження в масштабі модуля проводились із застосування газового пальника, тому FDS також була побудована із використанням даного роду джерела тепла. Термопари розміщувались у FDS моделі аналогічно як при експериментальному дослідженні, принцип розміщення яких і методика проведення експерименту описано у розділі 4 а також у науковій праці [27]. Відповідно, на рисунку 6.42. відображено динаміку зміни температури на термопарах Т1 і Т2, Т3, на накладена крива усереднених значень по температурі для відповідних термопар, значення яких отриманні в ході проведення натурального експерименту.

Під час моделювання експериментальні дані із термопар Т1 і Т2, Т4 і Т6, Т5 і Т7 давали ідентичні результати, так як математичний апарат FDS моделі відтворює ідентичні параметри по температурі (рис. 6.41).

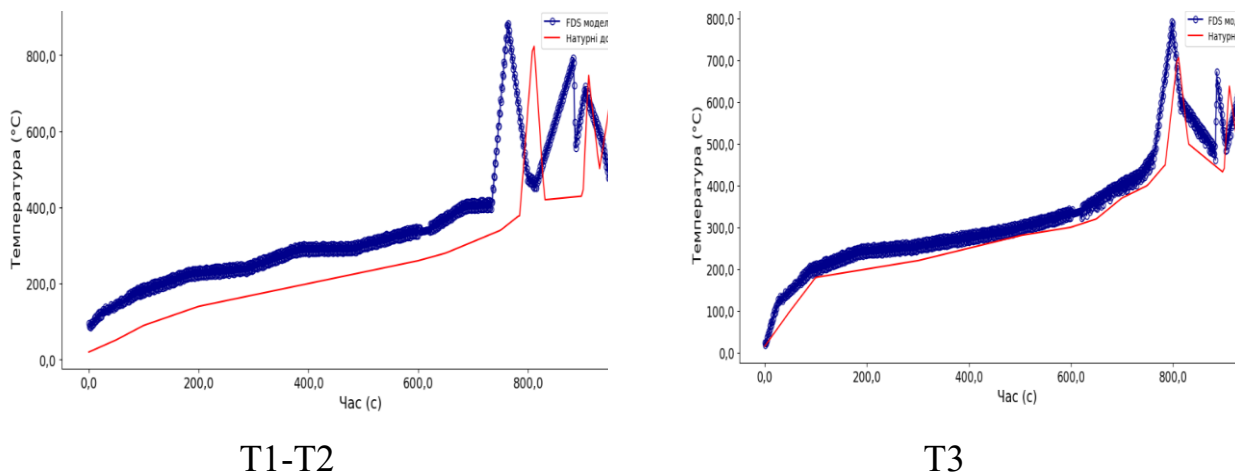
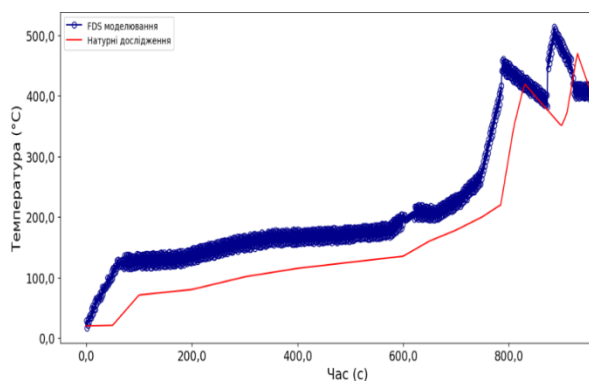
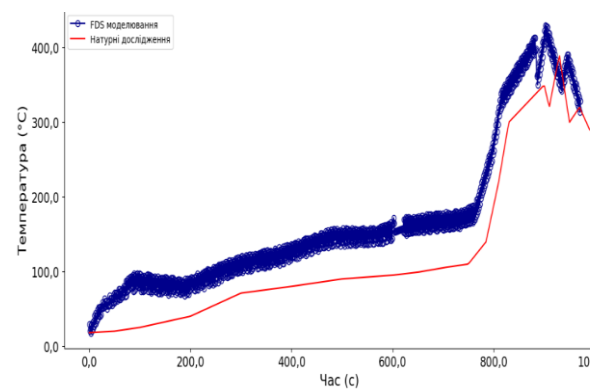


Рисунок 6. 41 – Порівняння результатів експериментальних досліджень створеної газогідродинамічної моделі та натурних досліджень модуля силових літій-іонних батарей заряджених на 50% для термопар Т1-Т2, Т4-Т6

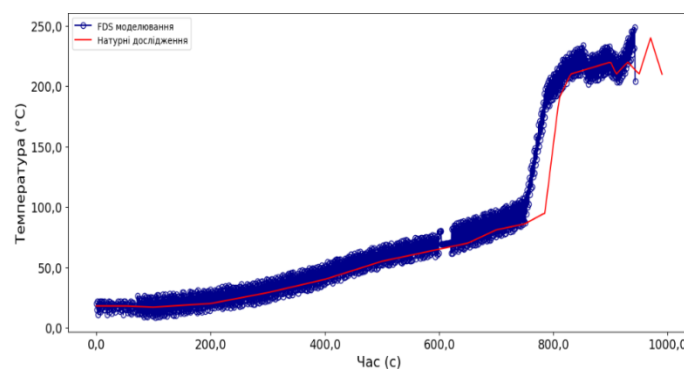
Як помітно з рисунка 6.41 графічні залежності мають стрибкоподібну форму. Це пояснюється тим, що при дослідженні виникнення термодеструктивних процесів у літій-іонних елементах в масштабі модуля при дії джерела тепла (у нашому випадку газового пальника) відбувається нагрівання кожного елемента не однаково. Це відповідно призводить до стохастичного спрацювання вентиляційного отвору кожного із елементів, які входять в склад модуля, викиду вентиляційних газів та їх горіння. Відповідно момент викиду та горіння вентиляційних газів елемента фіксують термопари, які знаходяться на корпусі елемента, що відображено температурним піком на графічних залежностях. На рисунку 6.42 відображено динаміку змінити температури на термопарах T4 і T6, T5 і T7, T8 на накладена крива усереднених значень по температурі для відповідних термопар, значення яких отриманні в ході проведення натурального експерименту.



T4-T6



T5-T7



T8

Рисунок 6.42 – Порівняння результатів експериментальних досліджень створеної газогідродинамічної моделі та натурних досліджень модуля силових літій-іонних батарей заряджених на 50% для термопар T4-T6, T5-T7, T8

Аналіз результатів дослідження показує, що температурні параметри отримані з використанням розробленої газодинамічної моделі на 30-100 °С (в залежності від часу) є більшими у порівнянні з натурним експериментом. Це можна пояснити «ідеальними» умовами, які приймаються під час моделювання та складністю досконалим врахування під час моделювання усіх фізичних параметрів системи, яка досліджується.

Тому у цьому випадку середнє абсолютне відхилення по усіх термопарах становить 75,3 °С, а відносне – 15,9 % у порівнянні із натурним експериментом. Після цього, через певний час, спрацьовують вентиляційні отвори інших сусідніх елементів, також з подальшим горіння вентиляційних газів. Однак через те, що відповідні термопари знаходяться на корпусі елемента, який спрацював дещо швидше, тому температурний пік є не таким стрімким.

Це вказує на те, що дані комп'ютерного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність створеної газогідродинамічної моделі та кожного окремого експериментального дослідження.

6.5. Висновки до розділу 6

Результати досліджень, описані у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. З використанням програмного комплексу обчислювальної газогідродинаміки FDS побудовано моделі для дослідження літій-іонних батарей з найпоширенішими катодними матеріалами, які використовуються у сучасних електромобілях, а саме літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, літій-нікель-манган-кобальт оксид та літій-ферум-фосфат оксид при впливі джерела тепла з відкритим полум'ям та без нього в масштабі елементів та модулів, які відповідають умовам проведення аналогічних натурних експериментів та відтворюють взаємозв'язок між експлуатаційними і технічними

характеристиками літій-іонних батарей та процесами їх нагрівання і особливостями горіння.

2. Підтверджено адекватність розроблених газогідродинамічної моделей у масштабах елементів та модулів, для випадку джерел тепла з відкритим полум'ям та без нього. Відносні похибки між результатами математичного моделювання та відповідними усередненими експериментальними даними дослідження елементів силових літій-іонних батарей становлять 17,4 % у випадку використання джерела тепла у вигляді модельного вогнища класу В та 11,1 % при використанні електронагрівальної панелі. При дослідженні літій-іонних елементів в масштабі модулі відносна похибка склала 15,9 %.

3. З використанням розробленої газо гідродинамічної моделі встановлено, що під час впливу модельного вогнища пожежі класу В з густиною теплового потоку 30 кВт/м^2 на літій-іонні елементи з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$): - максимальна температура літій-іонного елемента під час горіння вентиляційних газів зростає з $450 \text{ }^\circ\text{C}$ до $810 \text{ }^\circ\text{C}$ при збільшенні заряду від 0% до 100%, причому максимальна температура спостерігається на аноді; при зміні просторового розміщення 100 % зарядженого літій-іонного елемента відносно джерела тепла з вертикального анодом до джерела тепла на горизонтальне час виникнення займання змінюється зменшується на 15-19 % для різних ступенів заряду.

4. З використанням розробленої газо гідродинамічної моделі встановлено, що під час впливу електронагрівальної панелі з густиною теплового потоку 30 кВт/м^2 на літій-іонні елементи з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$):

- максимальна температура літій-іонного елемента під час горіння вентиляційних газів зростає з $450 \text{ }^\circ\text{C}$ до $810 \text{ }^\circ\text{C}$ при збільшенні заряду від 0% до 100%, причому максимальна температура спостерігається на аноді;

- при зміні просторового розміщення літій-іонного елемента відносно джерела тепла з вертикального анодом до джерела тепла на горизонтальне час виникнення займання зменшується на 7-10 % для різних ступенів заряду.

5. Методами комп'ютерного моделювання виявлено закономірність зниження часу виникнення займання у АКБ електромобіля залежно від хімічного складу катодів, а саме час виникнення займання АКБ електромобіля з катодним матеріалом літій-нікель-манган-кобальт оксид ($\text{LiNi}_x\text{MnyCozO}_2$) є на 9-16% менший порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-нікель-кобальт-алюміній оксид ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) і на 15-19% меншим порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-ферум фосфату (LiFePO_4), при однакових технічних характеристиках, конструктивних та експлуатаційних параметрах, а також однаковій густині теплового потоку зовнішнього джерела тепла.

РОЗДІЛ 7. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ЧАСУ ВИНИКНЕННЯ ТЕРМОДЕСТРУКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

7.1. Розрахунок часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів за спрощеним розрахунковим методом

З врахуванням обґрунтованих критеріїв, які впливають на виникнення та розвиток термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторах електромобілів, а також процесів розвитку пожеж зазначених об'єктів постала задача виявити та дослідити взаємозв'язки найбільш значущих чинників, які впливають власне на час виникнення таких процесів.

З врахуванням вищенаведених досліджень виникнення та розвиток термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторах електромобілів окреслено такі чинники, які мають вплив на зазначені процеси: стан заряду батареї; катодний матеріал; енергетична ємність батареї; вік батареї; якість збірки (дефекти); просторове розміщення відносно джерела тепла; потужність (густина теплового випромінювання) джерела тепла; наявність (відсутність) відкритого полум'я тощо.

Разом з тим під час прогнозування виникнення та розвиток термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторах електромобілів не береться до уваги використання первинних засобів пожежогасіння чи інших технічних рішень, які покликані підвищити протипожежний захист зазначених об'єктів.

З врахуванням окреслених чинників створено узагальнену схему та прокласифіковано чинники в залежності від їх ступеня впливу. Де червоним фоном відображено найбільш значущі чинники, тобто ті які мають найбільший вплив на виникнення та розвиток термодеструктивних процесів у силових

літій-іонних акумуляторах електромобілів та їх пожеж загалом. Жовтим фоном виділено чинники, які мають дещо менший вплив, серед яких порушення правил експлуатації, використання нештатних зарядних пристроїв, наявність (відсутність) системи охолодження.

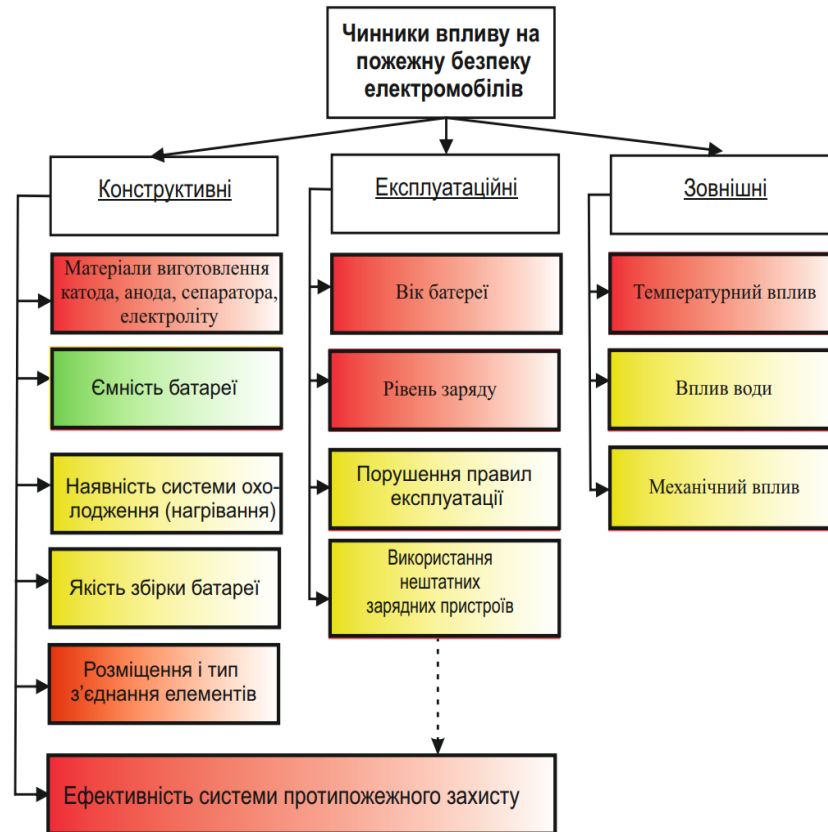


Рисунок 7.1 – Систематизація основних чинників впливу на ефективність протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів

І відповідно ємність батареї має найменший вплив на процеси виникання та розвитку термодеструктивних процесів. Однак, варто відмітити, що власне енергетична ємність визначатиме теплові характеристики пожежі електромобіля, серед яких: сумарна енергія тепловиділення; потужність теплового потоку; густина теплового потоку.

Тобто, енергетична ємність не впливає власне на сам перебіг виникнення та розвиток термодеструктивних процесів однак вона має визначальний вплив на розвиток самої пожежі, тобто стадії, яка настає після виникнення термодеструктивних процесів. Таким чином для побудови повного факторного

експерименту відібрано найбільш значущих чинників, а саме: типу матеріалу катода (Т), заряду батареї (к), теплового потоку (q) та ємності літій-іонної батареї (с). Тепловий потік приймався для випадку відкритого полум'я та без нього. Відповідно висунута гіпотеза, що час виникнення термодеструктивного процесу відображається не лінійною залежністю від найбільш значущих чинників, таких як: типу матеріалу катода (Т), заряду батареї (к), теплового потоку (q) та ємності літій-іонної батареї (с). Тепловий потік приймався для випадку відкритого полум'я та без нього. Інтервали діапазонів, в межах яких змінювались фактори під час числового повного факторного експерименту для відтворення математичної моделі залежності часу виникнення термодеструктивного процесу від зазначених вище чинників. У таблиці 7.1 вказані інтервали варіювання параметрів, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 7.1 – Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів

Матеріал катода			Заряд батареї, к %			Густина теплового потоку, кВт/м ²			Ємність, кВт·год		
NCM	NCA	LFP	Найменше значення, к ₀	Середнє значення, к ₀	Найбільше значення, к ₊	Найменше значення, q ₀	Середнє значення, q ₀	Найбільше значення, q ₊	Найменше значення, q ₀	Середнє значення, q ₀	Найбільше значення, q ₊
Відкрите полум'я			0	50	100	100	200	300	30	60	90
Без полум'я			0	50	100	10	20	30	30	60	90

В якості критерію настання умови виникнення горіння електромобіля розглядається виникнення термодеструктивного процесу. Початок виникнення термодеструктивного процесу характеризується різким стрибкоподібним зростанням температури, що супроводжується інтенсивним викидом вентиляційних газів, які можуть горіти, шумом та навіть вибухом.

Початок такої реакції відбувається при досягненні температури 250-300 °С відповідно до даних приставлених у наукових дослідженнях [360-363].

З огляду на не лінійну залежність гіпотези, її математична модель виражається рівністю:

$$\tau = \sigma_0 + \sigma_1 X_1 + \sigma_2 X_2 + \sigma_3 X_3 + \sigma_4 X_1 X_2 + \sigma_5 X_1 X_3 + \sigma_6 X_2 X_3 + \sigma_7 X_1 X_2 X_3 \quad (7.1)$$

де τ – власне час виникнення термодеструктивного процесу, с; $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7$ – коефіцієнти регресії,

X_1, X_2, X_3 – параметри, що враховують вибрані фактори, які зазначені у таблиці 7.1;

З метою визначення констант числової регресії за формулою (7.1) було проведено 8 чисельних експериментів. Коефіцієнти регресії отримано за результатами числових експериментів згідно із план-матрицею проведенням дослідження, яка зображена у вигляді таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

Номер експерименту	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Варіюючи факторами, які зазначені в таблиці 7.1 та враховуючи план-матриці повного факторного експерименту таблиці 7.2 отримано числові значення часу виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї електричних колісних транспортних засобів.

Узагальнені результати експерименту для прикладу силової літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCM приведено у таблиці 7.3

Таблиця 7.3 – Час виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї катодним матеріалом NCM

Джерело тепла / № експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
з відкритим полум'ям	211	247	778	1094	136	153	631	745
без відкритого полум'я	2129	2347	10153	11157	1344	1462	6380	7071

Узагальнені результати експерименту для прикладу силової літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCA приведено у таблиці 7.4

Таблиця 7.4 – Час виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї катодним матеріалом NCA

Джерело тепла / № експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
з відкритим полум'ям	184	220	699	1059	115	138	552	662
без відкритого полум'я	1920	2112	9216	10137	1201	1320	5760	6336

Узагальнені результати експерименту для прикладу силової літій-іонній батареї з катодним матеріалом LFP приведено у таблиці 7.5

Таблиця 7.5 – Час виникнення термодеструктивного процесу у силівій літій-іонній батареї катодним матеріалом LFP

Джерело тепла / № експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
з відкритим полум'ям	232	285	811	1245	156	168	659	764
без відкритого полум'я	2218	2455	10722	11796	1455	1505	6691	7325

Беручи до уваги дані таблиць 7.3-7.5 константи рівняння числової регресії, яка описана залежністю (7.1) з використанням формул (7.2-7.8) [364]:

$$\sigma_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (7.2)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 \tau_i \quad (7.3)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 \tau_i \quad (7.4)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 \tau_i \quad (7.5)$$

$$\sigma_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 \tau_i \quad (7.6)$$

$$\sigma_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 \tau_i \quad (7.7)$$

$$\sigma_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 \tau_i \quad (7.8)$$

$$\sigma_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 \tau_i \quad (7.8)$$

де $N = 8$ – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту; x_i – значення параметру згідно із матрицею плану (див. таблицю 7.2);

σ_i – значення часу згідно із таблицею 7.3-7.5

Використовуючи формули (7.2-7.8) отримали константи числової регресії, які наведені у таблицях 7.6-7.8 для кожного катодного матеріалу відповідно.

Таблиця 7.6 – Константи рівняння числової регресії для літій-іонної батареї NCM

Коефіцієнт	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7
Значення 1	499	-60	-312	83	47	-27	-40	22
Значення 2	5255	-253	-3435	1191	169	-51	-773	26

Таблиця 7.7 – Константи рівняння числової регресії для літій-іонної батареї NCA

Коефіцієнт	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7
Значення 1	453	-66	-289	86	51	-32	-49	29
Значення 2	4750	-225	-3112	1096	147	-51	-717	34

Таблиця 7.8 – Константи рівняння числової регресії для літій-іонної батареї LFP

Коефіцієнт	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7
Значення 1	540	75	-329	103	59	46	-55	36
Значення 2	5521	-249	-3613	1277	177	-78	-848	31

За результатом повно факторного експерименту враховуючи дані таблиць 7.6-7.8 отримано залежності впливу кожного із факторів на час виникнення термодеструктивного процесу у силових літій-іонних батареях з різними катодними матеріалом при дії теплового потоку створеного відкритим полум'ям так і без нього.

Отже для літій-іонних батарей з катодним матеріалом NCM залежність часу виникнення термодеструктивного процесу при дії джерела тепла з відкритим полум'ям (1) та без нього – (2):

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

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

Для літій-іонних батарей з катодним матеріалом NCA залежність часу виникнення термодеструктивного процесу при дії джерела тепла з відкритим полум'я (1) та без нього – (2):

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

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

Для літій-іонних батарей з катодним матеріалом LFP залежність часу виникнення термодеструктивного процесу при дії джерела тепла з відкритим полум'я (1) та без нього – (2):

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

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

Усереднений коефіцієнт детермінації для усіх отриманих регресійних залежностей становить 0,998, що дуже добре відтворює варіацію τ .

Після опрацювання даних виявлено закономірності залежності часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях електричних колісних транспортних засобах з різними матеріалами катодів від найбільш значущих параметрів: ступеня заряду (k) та густини теплового потоку (q). Ємність літій-іонних батарей (c) не мала значного впливу на часу виникнення термодеструктивного процесу.

На рисунку 7.2 приведено залежності впливу кожного із факторів на час виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї катодним матеріалом NCM при дії теплового потоку створеного відкритим полум'ям.

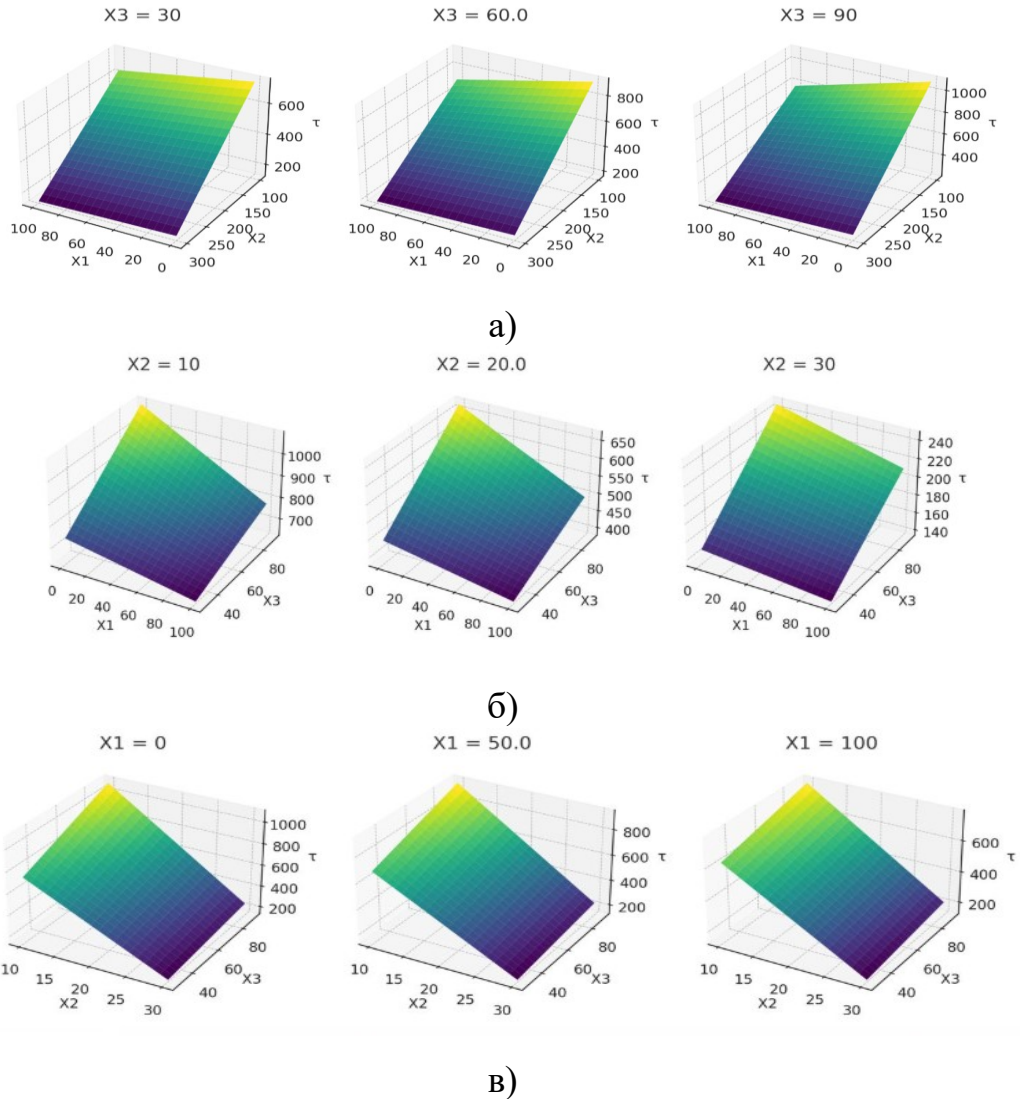


Рисунок 7.2 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом NCM за умови впливу джерела тепла з відкритим полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

У випадку створення теплового потоку без відкритого полум'я вплив досліджуваних факторів на час виникнення термодеструктивного процесу матиме вигляд, який зображено на рисунку 7.3

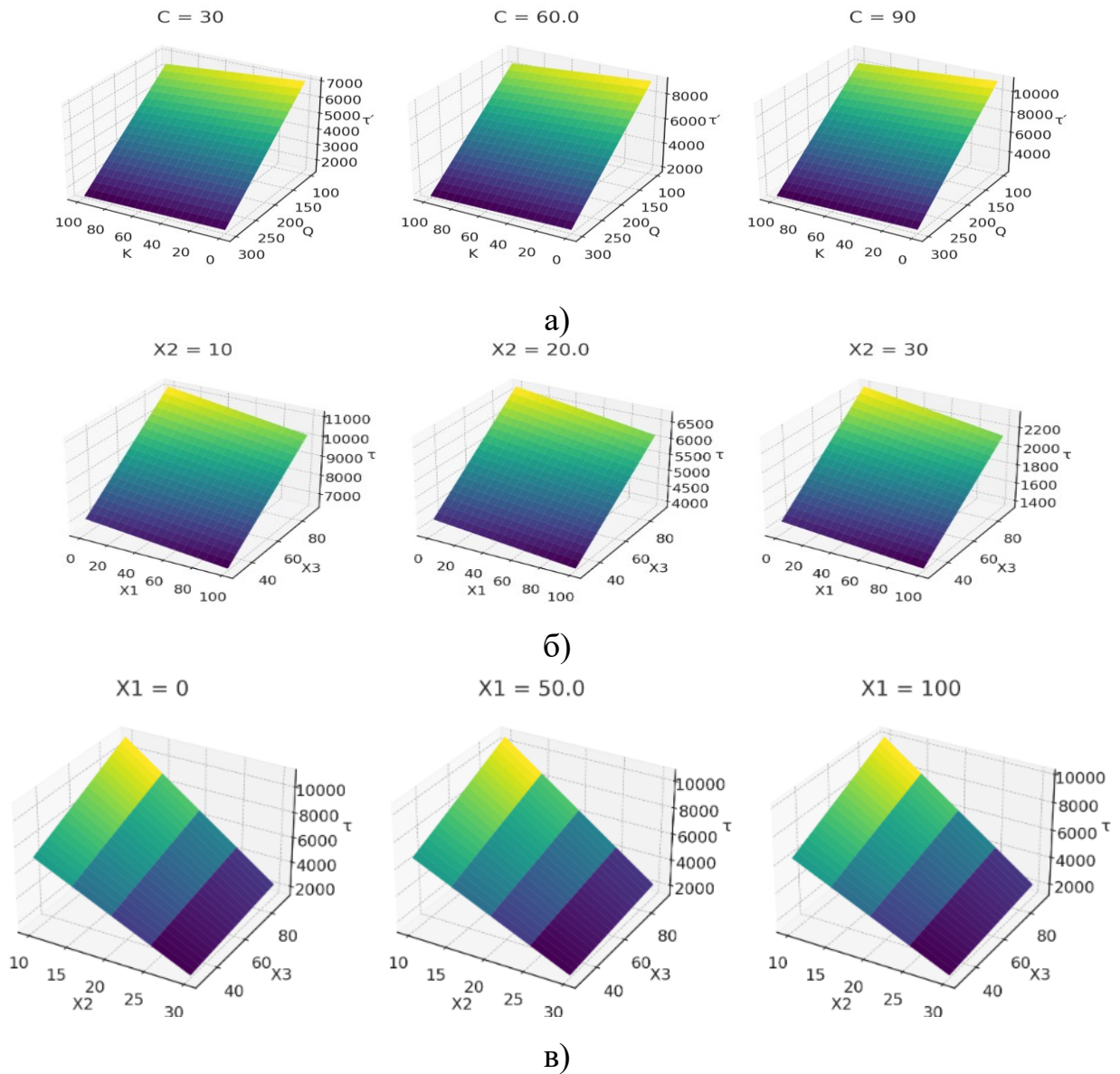


Рисунок 7.3 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом NCM за умови впливу джерела тепла без відкритого полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

На рисунку 7.4 приведено залежності впливу кожного із факторів на час виникнення термодеструктивного процесу у силевій літій-іонній батареї катодним матеріалом NCA при дії теплового потоку джерела тепла з відкритим полум'ям.

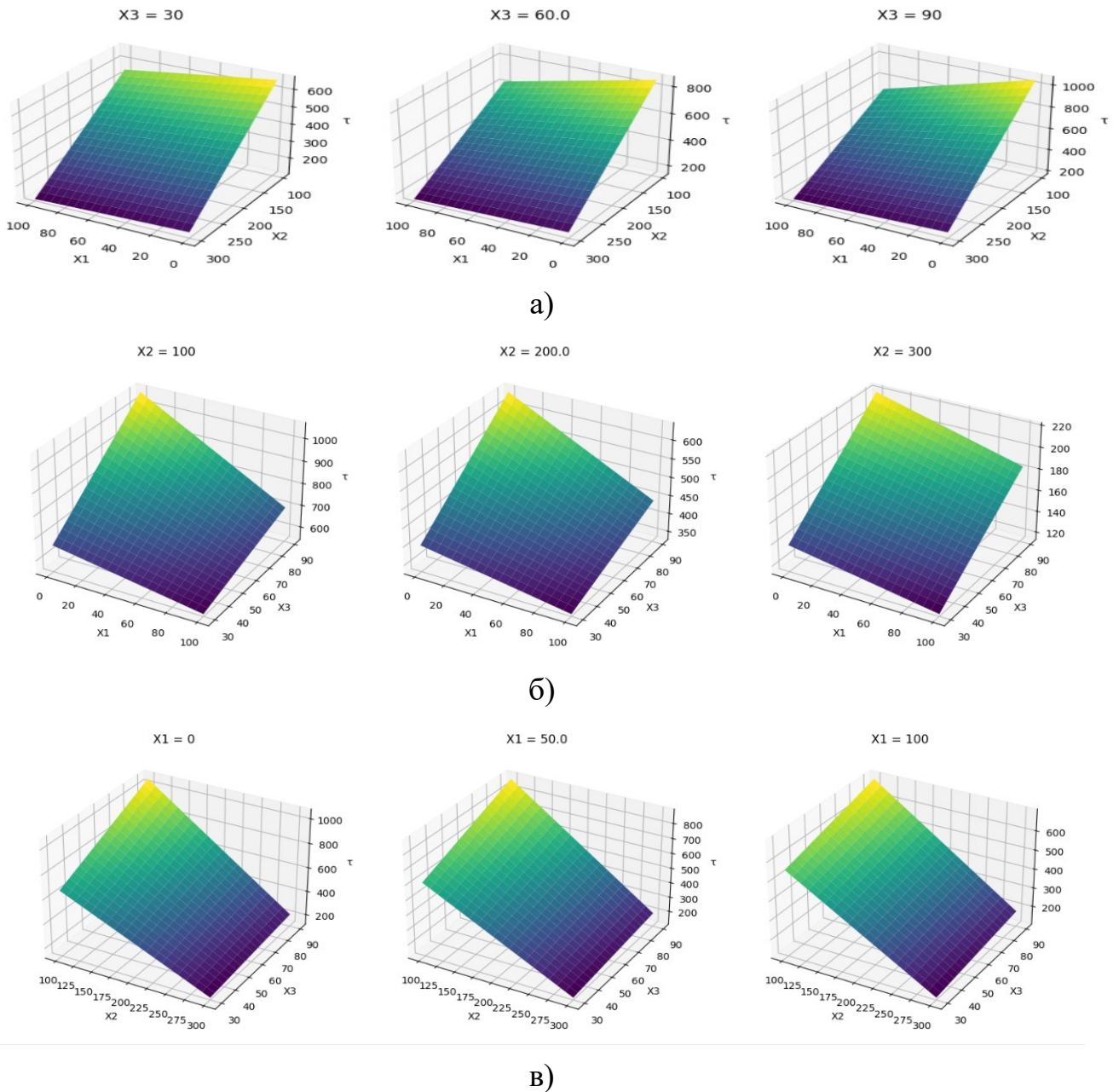


Рисунок 7.4 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом NCA за умови впливу джерела тепла з відкритим полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

У випадку створення теплового потоку джерелом тепла без відкритого полум'я вплив досліджуваних факторів на час виникнення термодеструктивного процесу матиме вигляд, який зображено на рисунку 7.5

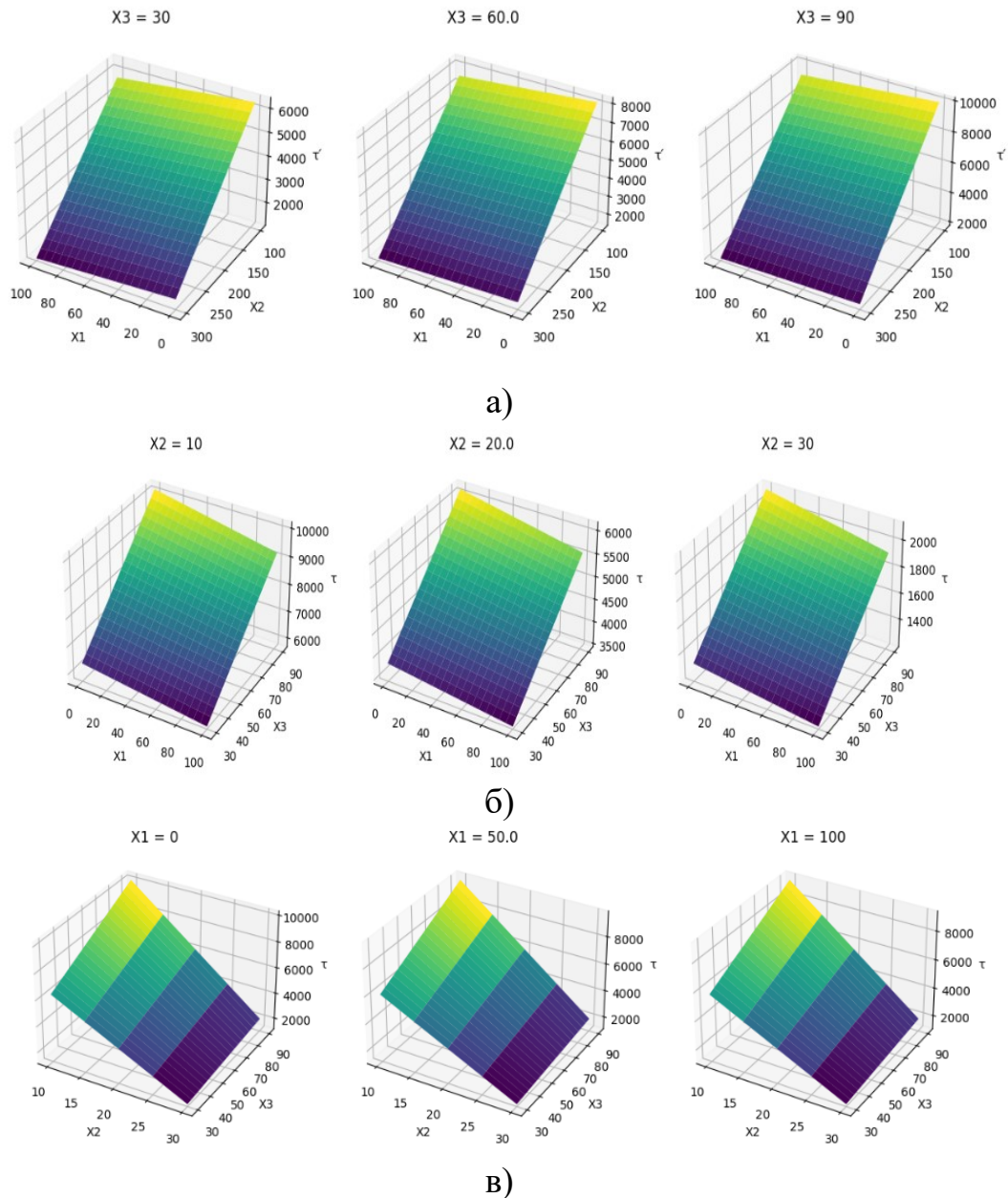


Рисунок 7.5 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом NCA за умови впливу джерела тепла без відкритого полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

На рисунку 7.6 приведено залежності впливу кожного із факторів на час виникнення термодеструктивного процесу у силевій літій-іонній батареї катодним матеріалом LFP при дії теплового потоку створеного джерелом тепла з відкритим полум'ям.

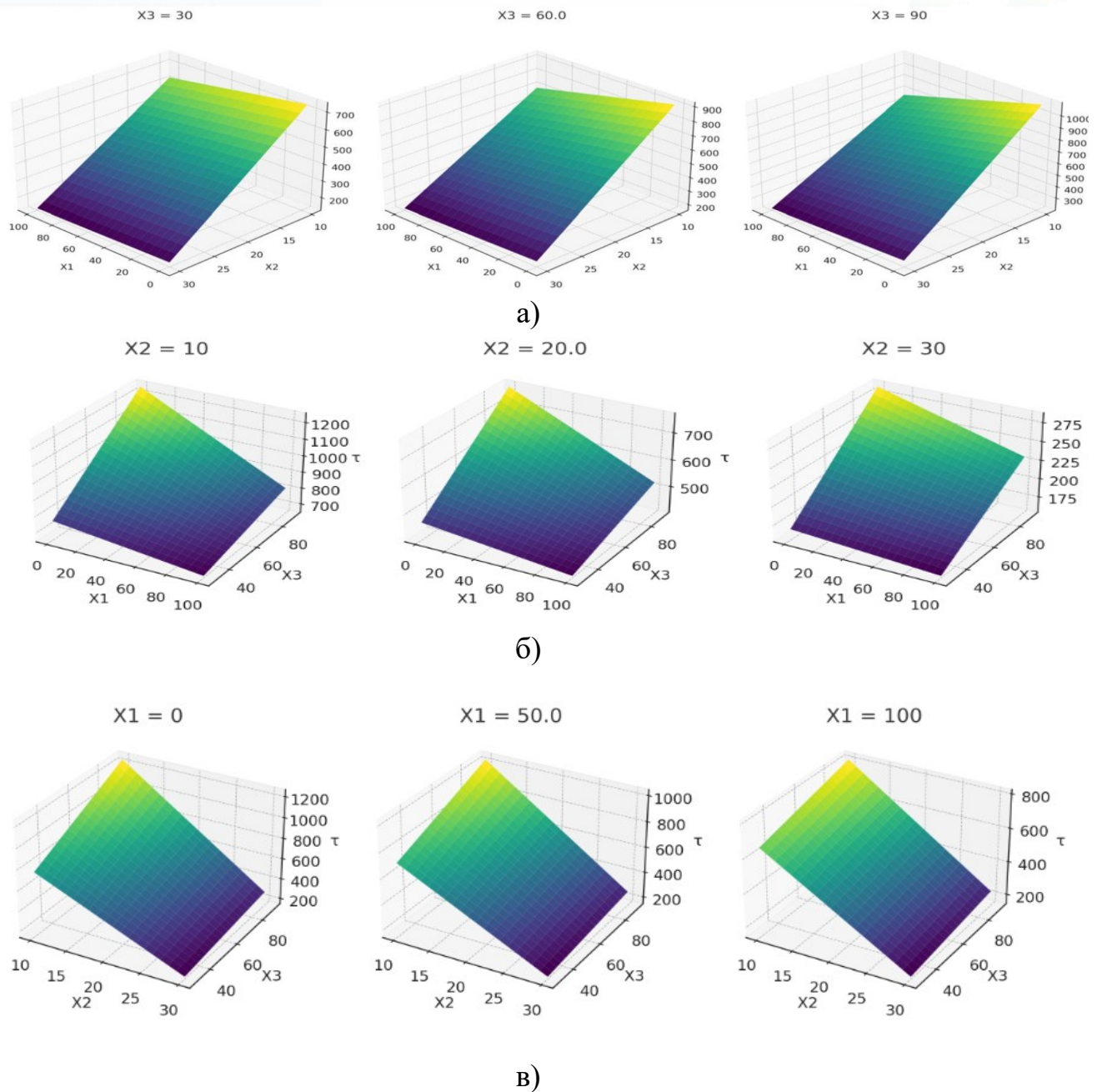


Рисунок 7.6 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом LFP за умови впливу джерела тепла з відкритим полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

У випадку створення теплового потоку без відкритого полум'я вплив досліджуваних факторів на час виникнення термодеструктивного процесу матиме вигляд, який зображено на рисунку 7.7

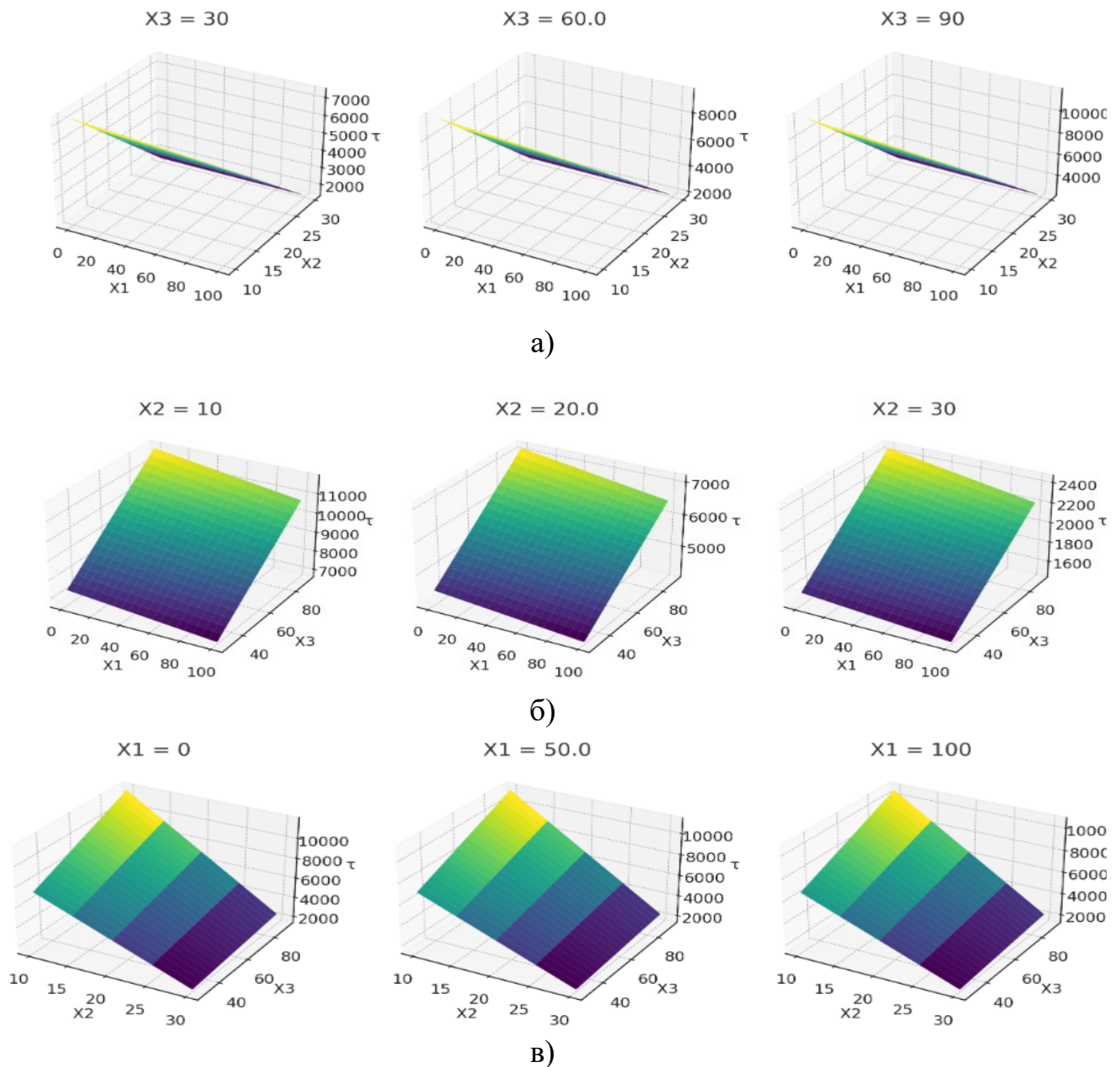


Рисунок 7.7 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом LFP за умови впливу джерела тепла без відкритого полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів.

Таким чином отримані залежності дозволять розробити науково-методичний апарат, який дозволить отримувати розрахункову оцінку часу виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї

електромобіля із врахування потужності джерела випромінювання, технічних та експлуатаційних характеристик електромобіля.

7.2 Розрахунково-табличний метод оцінювання часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів

Використовуючи отримані регресійні залежності, які відображено на рисунках 7.2-7.7 отримано значення часу виникнення термодеструктивного процесу в залежності від катодного матеріалу, ступеня заряду та сумарної енергетичної ємності батареї, беручи до уваги густину теплового потоку, який створюється джерелом тепла з відкритим полум'ям та без відкритого полум'я. Часові параметри систематизовано у таблицях 7.9-7.11

Таблиця 7.9 – Час виникнення незворотнього електро-теплового процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з катодним матеріалом NCM

Ємність кВт·год	Стан заряду, %	Густина теплового потоку з відкритим полум'ям, кВт/м ²			Густина теплового потоку без відкритого полум'я, кВт/м ²			Приклад електромобіля, марка, модель, рік виробництва
		<100	100 - 200	>20 0	<10	10- 20	>20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NCM								
< 30	<25	12,9	8,2	3,9	125,7	84,1	42,5	Renault Zoe (2012- 2016) Volkswagen e-Up
	25- 50	12,6	8,1	3,8	123,8	82,8	41,9	

Продовження Таблиці 7.9

	50-75	12,0	7,7	3,7	119,9	80,3	40,7	(2013-2019) Smart EQ ForTwo
	>75	11,4	7,3	3,5	116,1	77,8	39,5	(2013-2019) Nissan Leaf (2011-2016) Fiat 500e (2019- т.ч.) Mini Cooper SE (2019- т.ч.)
30-60	<25	15,7	10,5	5,4	145,8	97,6	49,4	Nissan Leaf (2016-2020) Kia Soul EV (2018-т.ч.) Peugeot e-208 (2020- т.ч.)
	25-50	15,2	10,4	5,2	143,7	97,2	48,7	
	50-75	14,3	9,6	4,9	139,3	93,4	47,3	
	>75	13,3	9,0	4,7	135,1	90,5	45,9	
60-90	<25	18,1	12,2	6,3	186,1	124,7	63,2	Nissan Leaf Plus (2019-т.ч.)
	25-50	17,4	11,8	6,1	183,4	122,9	62,4	
	50-75	15,9	10,9	5,2	178,2	119,4	60,6	
	>75	14,6	9,9	5,3	173,1	115,9	58,8	
>90	<25	21,3	14,5	7,5	226,4	151,7	77,1	Porsche Taycan (2020- т.ч.) Ford Mustang Mach-E (2020-т.ч.)
	25-50	20,3	13,8	7,2	223,3	149,7	76,1	
	50-75	18,2	12,5	6,6	217,1	145,5	73,9	
	>75	16,1	11,1	6,0	210,9	141,4	71,8	

Час виникнення незворотнього електро-теплого процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з катодним матеріалом NCA приведено у таблиці 7.10

Таблиця 7.10 – Час виникнення незворотнього електро-теплого процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з катодним матеріалом NCA

Ємність , кВт·год	Стан заряду, %	Густина теплого потoku з відкритим полум'ям, кВт/м ²			Густина теплого потoku без відкритого полум'я, кВт/м ²			Приклад електромобіля, марка, модель, рік виробництва
		<100	100 - 200	>20 0	<10	10- 20	>20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NCA								
< 30	<25	11,7	7,8	3,6	112,3	75,2	38,1	Honda Clarity (2017-т.ч.)
	25- 50	11,4	7,6	3,5	110,7	74,1	37,5	
	50- 75	11,0	7,4	3,4	107,6	72,1	36,5	
	>75	10,7	7,1	3,2	104,5	70,0	35,5	
30-60	<25	13,5	9,0	4,6	131,1	87,7	44,4	Hyundai Ioniq Electric (2016-т.ч.) Volkswagen ID.3 (2020- т.ч.)
	25- 50	13,1	8,8	4,5	129,2	86,5	43,8	
	50- 75	12,3	8,2	4,2	125,6	84,1	42,6	
	>75	11,5	7,7	3,9	121,9	81,7	41,4	

Продовження таблиці 7.10

60-90	<25	17,1	11,5	5,8	168,5	112,8	57,1	Tesla Model 3 Audi e-tron (2018-т.ч.) Jaguar I-PACE (2018-т.ч.) Mercedes-Benz EQC (2019-т.ч.)
	25-50	16,3	10,9	5,6	166,1	111,2	56,3	
	50-75	14,7	9,9	5,1	161,5	108,1	54,8	
	>75	13,1	8,9	4,7	156,8	104,9	53,2	
>90	<25	20,6	13,9	7,1	205,9	137,8	69,8	Model S (2012-т.ч.)
	25-50	19,5	13,1	6,8	203,1	135,9	68,9	
	50-75	17,1	11,7	6,1	197,3	132,2	66,9	
	>75	14,8	10,1	5,5	191,7	128,3	64,9	

У таблиці 7.11 приведено час виникнення незворотнього електро-теплого процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з катодним матеріалом LFP.

Таблиця 7.11 – Час виникнення незворотнього електро-теплого процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з різним катодним матеріалом LFP

Ємність , кВт·год	Стан заря ду, %	Густина теплого потoku з відкритим полум'ям, кВт/м ²			Густина теплого потоку без відкритого полум'я, кВт/м ²			Приклад електромобіля, марка, модель, рік виробництва
		<100	100- 200	>20 0	<10	10-20	>20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
LFP								
< 30	<25	13,5	9,1	4,7	129,7	86,8	43,9	Chery eQ (2015-т.ч.)
	25-50	13,2	8,9	4,6	127,9	85,7	43,5	
	50-75	13,0	8,7	4,5	124,5	83,1	41,7	

Продовження таблиці 7.11

	>75	12,7	8,5	4,3	121,0	81,5	40,1	
30-60	<25	15,6	10,5	5,5	151,7	101,5	51,3	BYD e6 (2010-т.ч.)
	25-50	15,2	10,3	5,3	149,7	100,2	50,8	Great Wall Ora R1 (2019-т.ч.)
	50-75	14,4	9,8	5,1	145,5	97,6	49,7	GAC Aion S (2019-т.ч.)
	>75	13,6	9,2	4,9	141,4	95,1	48,2	
60-90	<25	19,9	13,5	7,1	195,7	130,9	66,2	BYD Tang EV (2020-т.ч.)
	25-50	18,9	12,9	6,8	192,9	129,0	65,4	XPeng P7 (2020-т.ч.)
	50-75	17,1	11,7	6,3	187,6	125,6	63,4	
	>75	15,4	10,5	5,8	182,2	122,1	62,0	
>90	<25	24,1	16,4	8,7	239,7	160,4	81,2	Tesla Model 3 (2021-т.ч.)
	25-50	22,7	15,5	8,3	236,3	158,2	80,1	(Ринок Китаю)
	50-75	19,9	13,7	7,5	229,7	153,7	77,7	Nio ET7 (2022-т.ч.)
	>75	17,1	11,9	6,7	223,1	149,1	75,4	Rivian R1S (2022-т.ч.)

З врахуванням експериментальних даних, отриманих у розділі 5, які стосуються різного просторового розміщення силових літій-іонних батарей електромобілів, а також числових експериментів запропоновано ввести безрозмірні емпіричні коефіцієнти α , який буде враховувати просторову зміну розміщення літій-іонної батареї відносно джерела випромінювання для теплового потоку, який створений відкритим полум'ям, а також емпіричний коефіцієнт β – при тепловому потоці без відкритого полум'я.

В таблиці 7.12 наведено значення безрозмірних емпіричних коефіцієнтів α та β для окремих випадків просторового розміщення: вертикального анодом

до джерела тепла, вертикального катодом до джерела тепла для 100 % заряду, 50 % та повністю розрядженої літій-іонної батареї.

Таблиця 7.12 – Значення емпіричних коефіцієнтів α (чисельник) та β (знаменник), які враховують просторове розміщення літій-іонної батареї відносно джерела теплового потоку

Просторове розміщення відносно джерела теплового потоку та зміні катодного матеріалу (LFP/NCM)	Ступінь заряду, %		
	0	50	100
Вертикальне анодом до джерела теплового випромінювання	<u>1,07</u> 1,02	<u>1,09</u> 1,05	<u>1,12</u> 1,08
Вертикальне катодом до джерела теплового випромінювання	<u>1,29</u> 1,05	<u>1,28</u> 1,10	<u>1,21</u> 1,12

Методика використання розрахунково-табличний метод оцінювання часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів полягає визначенні зазначеного часу виходячи з відомих технічних значень батареї і також потужності теплового потоку, який буде діяти на літій-іонну батарею: 1. Визначення технічних характеристик літій-іонної батареї а саме, катодний матеріал та енергетична ємність. 2. Визначення експлуатаційних параметрів до яких відноситься стан заряду батареї (%). 3. Визначення особливостей джерела тепла (наявність відкритого полум'я), а також густини теплового потоку. 4. По заданих технічних характеристиках та експлуатаційних параметрів визначають прогнозований час виникнення термодеструктивних процесів. Для отримання біль точних результатів з використанням розроблених таблиць рекомендується використовувати метод інтерполяції.

Разом з тим, потрібно прийняти до уваги, що розрахунково-табличні методи дають певну неточність. Також табличні методи обмежені діапазонами параметрів, які впливають на кінцевий результат.

7.3. Алгоритм роботи максимально-динамічного давача контролю температури силових літій-іонних батарей електромобілів

З метою контролю температури силової літій-іонної батареї електромобілів розроблено алгоритм роботи максимально-динамічного давача температури, який змінював би значення мінімальної статичної температури спрацювання давача температури (ДТ) та значення швидкості підвищення температури його спрацювання, в залежності від температурних впливів навколишнього середовища, внаслідок режимів роботи (заряджання) силової літій-іонної акумуляторної батареї, автоматично змінює значення мінімальної статичної температури спрацювання ДТ та значення швидкості підвищення температури його спрацювання.

Це дозволить зняти навантаження з силової батареї шляхом припинення експлуатації колісного електричного транспортного засобу або від'єднання його від зарядної станції та запобігти руйнування (плавлення) сепаратора, що збереже не лише технічні характеристики батареї, але й запобіжить можливого виникнення термодеструктивного процесу в ній. Також це дозволить збільшити час до ймовірного займання, а значить час слідування пожежо-рятувальних підрозділів, алгоритм визначення якого описаний у [386].

Для розроблення моделі запропонованого алгоритму роботи теплового ДТ із змінними параметрами спрацювання використовували MATLAB (США). MATLAB – спеціалізований пакет прикладних програм призначений для числового аналізу в різноманітних галузях, наприклад електромеханіці чи енергетиці. MATLAB має власну мову програмування. Система MATLAB була створена компанією The MathWorks і є сучасним засобом для роботи з функціями, матрицями, логікою, роботи з алгоритмами. В пакеті передбачене

створення робочих проектів (user interfaces) з використанням програм з інших мов програмування, наприклад Fortran. Пакет спеціалізується на чисельному обчисленні процесів. В поєднанні з різноманітними вбудованими математичними функціями та великими бібліотеками різноманітних моделей пакет є повноцінною системою аналізу та проектування різноманітних систем [365-367]. Для працездатності алгоритму роботи максимально-динамічного теплового ДТ становлено параметри спрацювання, які будуть змінюватися в залежності від температурного впливу режимів роботи. Цими параметрами є мінімальна статична температури спрацювання ДТ $T^{\circ\text{спр}}$ та значення швидкості підвищення температури його спрацювання $T^{\circ\text{спр}'}$. Для зміни параметрів спрацювання ДТ необхідно встановити, коли саме повинні відбуватися ці зміни. Для цього введено два часові параметри. Перший параметр – це час, за який температура в місці розміщення ДТ досягне значення технологічної температури (робочої температури) внаслідок роботи електродвигунів або заряджання батареї $\tau_{\text{тех}}$. Другий параметр – це час, за який здійснюється корекція значень мінімальної статичної температури спрацювання ДТ та швидкості підвищення температури його спрацювання $t_{\text{кор}}$. Тобто час, протягом якого температура батареї сягне значення температури навколишнього середовища після його вимкнення.

Для того щоб виявити загорання на ранній стадії, коли батарея не використовується і електромобіль не експлуатується, необхідно щоб $T^{\circ\text{спр}}$ і $T^{\circ\text{спр}'}$ були якомога меншими. Найменші значення $T^{\circ\text{спр}}$ і $T^{\circ\text{спр}'}$ при яких ДТ надійно виявляє загорання мають класичні максимально-динамічні теплові ДТ класу А. ($T^{\circ\text{спр}}=+85^{\circ}\text{C}$) з $T^{\circ\text{спр}'}=8^{\circ}\text{C/хв}$. Ці значення будуть початковими. Прийняті з міркувань верхньої критичної межі роботи літій-іонних батарей, яка становить від 85°C [369]. Нижче наведені фактори, при яких температура батареї може підвищуватись: швидка зарядка постійним струмом (DC fast charging) високої потужності від 150 кВт або вище; висока початкова температура навколишнього середовища: наприклад, зарядка при температурі навколишнього середовища вище 30°C ; неефективна або несправна система

охолодження батареї: Охолоджувальна система може бути не в змозі відводити тепло досить швидко; велика кількість циклів зарядки/розрядки: Батарея, яка вже зазнала значної кількості циклів зарядки/розрядки, може мати підвищений внутрішній опір, що спричиняє більше виділення тепла; низький рівень початкового заряду батареї: Початкова стадія зарядки часто супроводжується інтенсивним нагріванням. При таких умовах температура батареї може підвищуватися на 3-5°C за хвилину. Наприклад, якщо зарядка триває 15 хвилин, то температура може зрости на 45-75°C. Це може призвести до критичних значень, особливо якщо початкова температура батареї вже була близькою до верхньої межі безпечного діапазону. При використанні батареї її температура зростає до технологічної температури з певною швидкістю. Щоб не було хибного спрацювання необхідно змінити значення мінімальної статичної температури спрацювання ДТ $T^{\circ}_{\text{спр}}$ та значення швидкості підвищення температури його спрацювання $T^{\circ'}_{\text{спр}}$. Значення $T^{\circ}_{\text{спр}}$ буде залежати від максимального значення температури в місці встановлення ДТ $T^{\circ}_{\text{мак}}$. Значення $T^{\circ}_{\text{мак}}$ визначено в процесі проведення експерименту. Швидкості підвищення температури в різні проміжки часу використання силової АКБ будуть різними. Щоб встановити нові значення $T^{\circ'}_{\text{спр}}$ необхідно знати два параметри $T^{\circ'}_{\text{мак1}}$ і $T^{\circ'}_{\text{мак2}}$. $T^{\circ'}_{\text{мак1}}$, $T^{\circ'}_{\text{мак2}}$ – максимальні швидкості підвищення температури протягом і після часу $\tau_{\text{тех}}$. Їх також визначено в процесі проведення експерименту. $T^{\circ}_{\text{мак}}$, $T^{\circ'}_{\text{мак1}}$ і $T^{\circ'}_{\text{мак2}}$ є більшими від температури та швидкості зміни температури навколишнього середовища внаслідок впливу кліматичних умов. Блок-схема створеного алгоритму роботи теплового максимально-динамічного ДТ показана на рис. 7.8.

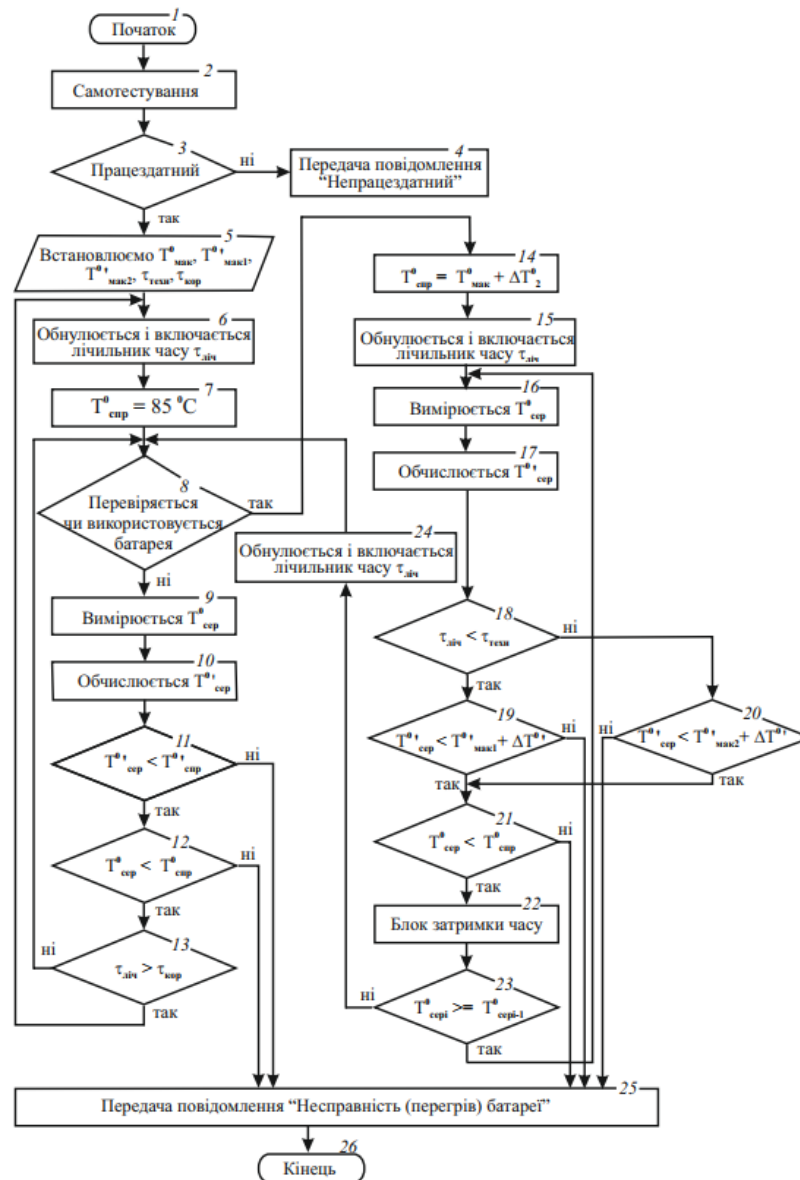


Рисунок 7.8 – Блок-схема алгоритму роботи максимально-динамічного давача температури із змінними параметрами спрацювання

При першому включенні ДТ проводить самотестування працездатності основних своїх елементів, перевіряє наявність зв'язку з блоком керування (блок 2). При виявленні несправності своїх елементів на виході ДТ формується електричний сигнал про несправність (блок 4). В пам'ять мікропроцесора ДТ (блок 5) для конкретного типу батареї на початку експлуатації записуються початкові значення: $\tau_{кор}$, $\tau_{тех}$, $T_{макс}^o$, $T_{макс1}^{o'}$, $T_{макс2}^{o''}$.

На наступному етапі обнулюється і вмикається лічильник часу ДТ $\tau_{ліч}$ (блок 6). Він необхідний для того, щоб можна було здійснити корекцію

значення мінімальної температури спрацювання ДТ $T^{\circ}_{\text{спр}}$ та значення швидкості підвищення температури $T^{\circ\prime}_{\text{спр}}$ за якої він спрацьовує. Дані значення залежать від зміни температури в місці встановлення ДТ, внаслідок впливу роботи ДВЗ та дії кліматичних умов.

В блоці 8 перевіряється чи працює електромобіль. Для цього ДТ повинен мати релейний вхід, щоб завести сигнал з бортового комп'ютера. Якщо електромобіль не працює, відбувається вимірювання значення температури навколишнього середовища в місці встановлення ДТ $T^{\circ}_{\text{сер}}$ (блок 9) та обчислення швидкості її зміни $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}$ (блоки 10). В блоці 11 відбувається порівняння значення швидкості підвищення температури середовища $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}$ із значенням швидкості підвищення температури $T^{\circ\prime}_{\text{спр}}$, при якому ДТ спрацьовує $T^{\circ\prime}_{\text{спр}}=8$ °C/хв. Якщо умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}<T^{\circ\prime}_{\text{спр}}$ не виконується, то тоді на виході ДТ формується сигнал “Пожежа”. В цьому випадку ДТ спрацьовує на швидкість зміни температури, тобто працює як ДТ динамічного типу. Якщо умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}<T^{\circ\prime}_{\text{спр}}$ виконується, відбувається перехід до блока 12. В блоці 12 перевіряється умова $T^{\circ}_{\text{сер}}<T^{\circ}_{\text{спр}}$. Якщо умова $T^{\circ}_{\text{сер}}<T^{\circ}_{\text{спр}}$ не виконується, то тоді на виході ДТ формується сигнал “Несправність (перегрів) батареї”. В цьому випадку ДТ працює, як максимальний тепловий ДТ, тобто швидкість підвищення температури внаслідок пожежі є меншою за швидкість підвищення температури спрацювання ДТ, а значення $T^{\circ}_{\text{сер}}$ збільшується. Якщо умова $T^{\circ}_{\text{сер}}<T^{\circ}_{\text{спр}}$ виконується, відбувається перехід до блока 13, де порівнюється час роботи сповіщувача $\tau_{\text{ліч}}$ з часом корекції $\tau_{\text{кор}}$, відведеним на зміну значення мінімальної статичної температури спрацювання ДТ. Якщо умова $\tau_{\text{ліч}}>\tau_{\text{кор}}$ не виконується, відбувається перехід до блока 8 і знову по циклу (блоки 8–13). Якщо умова $\tau_{\text{ліч}}>\tau_{\text{кор}}$ виконується, відбувається перехід до блока 6, де обнулюється лічильник (блок 7). Блок 13 необхідний, щоб змінити значення мінімальної температури спрацювання ДТ після зменшення температури батареї внаслідок зупинки електромобіля [20].

Якщо електромобіль працює, відбувається перехід до блока 14, де

встановлюється нове значення мінімальної статичної температури спрацювання ДТ $T^{\circ}_{\text{спр}} = T^{\circ}_{\text{мак}} + \Delta T^{\circ}$ (ΔT° може дорівнювати, наприклад, 10°C). В блоці 15 обнулюється і вмикається лічильник часу $\tau_{\text{ліч}}$. В блоках 16 і 17 відбувається вимірювання значення температури в місці встановлення ДТ $T^{\circ}_{\text{сер}}$ та обчислення швидкості її зміни $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}$. В блоці 18 перевіряється умова $\tau_{\text{ліч}} < \tau_{\text{тех}}$. Даний блок необхідний для того, щоб ДТ не спрацював, коли відбувається швидка зміна температури внаслідок роботи електромобіля (в перший період часу) або відчинення дверей багажного відділення або салону. При виході температури батареї на технологічну, швидкість зміни температури в місці встановлення ДТ $T^{\circ\prime}_{\text{сер}}$, як показують дослідження, є не значна. Якщо умова $\tau_{\text{ліч}} < \tau_{\text{тех}}$ виконується, відбувається перехід до блока 19. Це означає, що час, який необхідний для того щоб температура у моторному відсіку досягнула технологічної температури, ще не минув. В блоці 19 перевіряється умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}} < T^{\circ\prime}_{\text{мак1}} + \Delta T^{\circ\prime}$ (наприклад, $\Delta T^{\circ\prime} = 5^{\circ}\text{C/хв}$). Якщо умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}} < T^{\circ\prime}_{\text{мак1}} + \Delta T^{\circ\prime}$ не виконується, тоді на виході ДТ формується сигнал “Пожежа”. Це означає, що температура навколишнього середовища швидко змінюється внаслідок пожежі, а не роботи електромобіля. Якщо умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}} < T^{\circ\prime}_{\text{мак1}} + \Delta T^{\circ\prime}$ виконується, відбувається перехід до блока 21.

Якщо умова $\tau_{\text{ліч}} < \tau_{\text{тех}}$ не виконується, відбувається перехід до блока 20, де перевіряється умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}} < T^{\circ\prime}_{\text{мак2}} + \Delta T^{\circ\prime}$. Якщо дана умова не виконується, на виході ДТ формується сигнал “Несправність (перегрів батареї)”. ДТ спрацює на швидкість підвищення температури (на динамічну складову). Якщо умова $T^{\circ\prime}_{\text{сер}} < T^{\circ\prime}_{\text{мак2}} + \Delta T^{\circ\prime}$ виконується, відбувається перехід до блока 21. В блоці 21 перевіряється чи температура $T^{\circ}_{\text{сер}}$ не перевищує нового встановленого значення мінімальної статичної температури спрацювання $T^{\circ}_{\text{спр}}$. ДТ працює як максимальний. При не виконанні умови $T^{\circ}_{\text{сер}} < T^{\circ}_{\text{спр}}$, на виході ДТ формується сигнал “Несправність (перегрів батареї)а”. Якщо ж умова $T^{\circ}_{\text{сер}} < T^{\circ}_{\text{спр}}$ виконується, відбувається перехід до блока 22. Блок 22 – блок затримки часу. В блоці 23 перевіряється умова $T^{\circ}_{\text{сер}i} \geq T^{\circ}_{\text{спр}i-1}$ (де i – крок інтеграції), чи не

відбувається зменшення температури в місці встановлення ДТ. Якщо температура не змінюється, або збільшується, то відбувається перехід до блока 16 і знову по циклу (блоки 16–23). Здійснюється контроль температури. При зменшенні температури відбувається перехід до блока 8 через блок 24, де перевіряється внаслідок чого відбулося зменшення температури в моторному відсіку, чи працює електромобіль, чи ні. В блоці 24 обнулюється і вмикається лічильник часу ДТ $\tau_{\text{ліч}}$. Якщо температура зменшилася внаслідок впливу кліматичних умов, а електромобіль працює, то відбувається перехід до блока 14. Якщо електромобіль не працює, то через час $\tau_{\text{кор}}$ встановлюється значення мінімальної статичної температури спрацювання $T^{\circ}_{\text{спр}}=54^{\circ}\text{C}$ (клас сповіщувача А2).

Симуляційні дослідження на комп'ютерній моделі розробленого алгоритму роботи максимально-динамічного теплового пожежного сповіщувача

В пакеті Simulink програмного середовища MATLAB розроблена модель алгоритму роботи теплового ДТ із змінними параметрами спрацювання на основі блок-схеми (рис. 1) та модель зміни температури. Вікно з розробленими моделями в пакеті Simulink показано на рисунку 7.9.

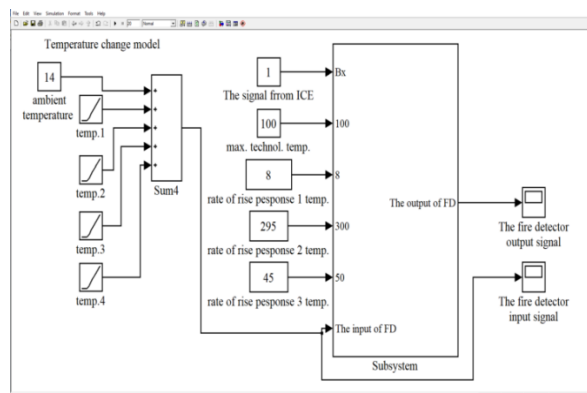


Рисунок 7.9 – Вікно пакету Simulink програмного середовища MATLAB з моделлю теплового пожежного сповіщувача

Дослідимо, як буде реагувати ДТ при різних випадках зміни температури

батарей при різних режимах її роботи. Будемо моделювати зміну температури в найгірших випадках. Вважаємо, що ДТ розміщений зверху по середині батареї електромобіля. Змоделюємо ситуацію, коли електромобіль припаркований на відкритому просторі силова батарея не використовується, а температура в місці встановлення ДТ в моторному відсіку рівна температурі навколишнього середовища, приймемо $T^{\circ}_{\text{ср}}=20^{\circ}\text{C}$. Мінімальна статична температура спрацювання ДТ $T^{\circ}_{\text{ср}}=85^{\circ}\text{C}$. ДТ працює згідно алгоритму роботи в циклічному режимі (блоки 8–13, через час $\tau_{\text{кор}}$ – блоки 6–13) (рис. 7.8). Результати моделювання приведено на рисунку 7.9.

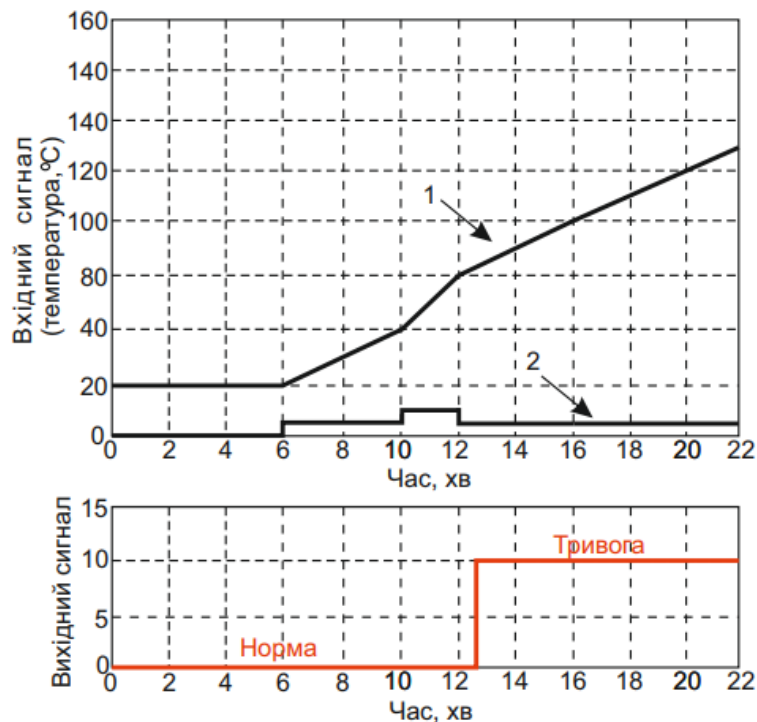


Рисунок 7.10 – Зовнішній вигляд моделі алгоритму роботи датчика температури у пакеті Simulink середовища MATLAB за критерієм досягнення максимальної температури

На рисунку 7.10 прийнято такі позначення: крива 1 – температура в місці встановлення ДТ (вхідний сигнал, який діє на ДТ); крива 2 – швидкість підвищення температури T° ; червона крива – вихідний сигнал ДТ, який відповідає логічному “0” (ДТ знаходиться в черговому режимі), логічний “10” (ДТ знаходиться в режимі “Перегрів (несправність батареї)”. В момент часу $t=6$

хв відбувається підвищення температури, внаслідок прямого попадання сонячних променів на електромобіль, зі швидкістю підвищення температури батареї $T'_{\text{сер}}=2 \text{ }^\circ\text{C/хв}$, яка є меншою від $T'_{\text{спр}}=8 \text{ }^\circ\text{C/хв}$. (рис. 7.10). При цьому йде нагрівання силової батареї. І в певний момент часу (12,4 хв) батарея досягає свого критичного значення температури, а саме $85 \text{ }^\circ\text{C}$, при цьому формується тривожний сигнал “Перегрів (несправність батареї)”, що помітно із червоної кривої.

Змодельюємо ситуацію, коли температура батареї змінюється внаслідок впливу кліматичних умов, та внаслідок експлуатаційних режимів. Результат моделювання показано на рис. 5.

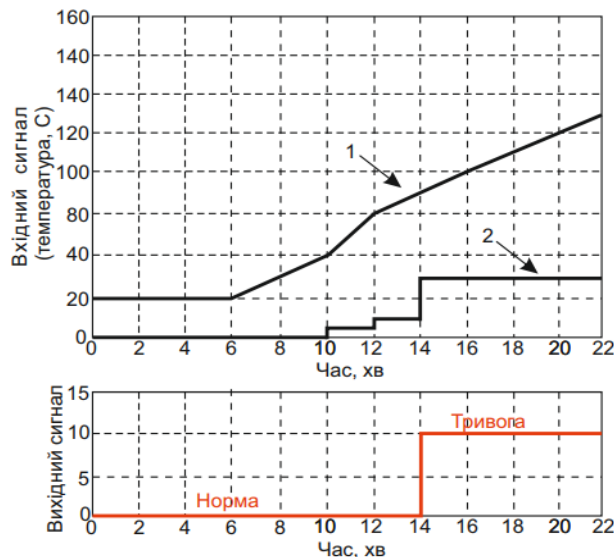


Рисунок 7.11 – Зовнішній вигляд моделі алгоритму роботи датчика температури у пакеті Simulink середовища MATLAB за критерієм досягнення швидкості зростання температури

Позначення на рисунку 7.11, аналогічні як на рисунку 7.10 Температура навколишнього середовища $T^{\circ}_{\text{сер}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$. В момент часу $t=6 \text{ хв}$ відбувається підвищення температури силової батареї внаслідок дії кліматичних умов, або стороннього джерела тепла зі швидкістю підвищення температури $T'_{\text{сер}}=2 \text{ }^\circ\text{C/хв}$, яка є меншою від $T'_{\text{спр}}=8 \text{ }^\circ\text{C/хв}$. ДТ працює згідно алгоритму

роботи в циклічному режимі (блоки 8–13) (рис. 7.8). В момент часу $t=10$ хв починає використовуватись силова батарея для живлення тягових електродвигунів. Відбувається підвищення температури внаслідок руху зі швидкістю $T'_{\text{сер}}=10$ °С/хв. Згідно алгоритму роботи, коли використовується батарея, переходимо до блока 14. Встановлюється нове значення $T^{\circ}_{\text{спр}}=85$ °С+10 °С=110 °С. ДТ не спрацьовує, умови $T'_{\text{сер}} < T'_{\text{мак1}}+\Delta T'$ (20 °С/хв $<$ 85 °С/хв+10 °С/хв) і $T^{\circ}_{\text{сер}} < T^{\circ}_{\text{спр}}$ (блоки 19 і 21) виконуються. ДТ працює згідно алгоритму в циклічному режимі (блоки 16–19, 21–16). Після встановлення технологічної температури батареї 45 °С протягом зазначеного часу, умова $\tau_{\text{ліч}} < \tau_{\text{техн}}$ не виконується. ДТ працює згідно алгоритму роботи в циклічному режимі (блоки 16–18, 20–16). В момент часу $t=14$ хв відбувається підвищення температури із $T'_{\text{сер}}=20$ °С/хв відбувається спрацювання ДТ, що помітно із червоної лінії, яка при цьому формується тривожний сигнал “Перегрів (несправність батареї)” [368].

Таким чином апробований алгоритм роботи максимально-динамічного ДТ із змінними параметрами спрацювання, який коректно працює як на досягнення максимальної температури силової батареї так і на понаднормове її підвищення, при цьому враховує експлуатацію власне самого електромобіля.

7.4. Система аварійно відключення силової батареї електромобіля та ствол для її гасіння

Із використанням алгоритму роботи давача температури розроблено систему аварійно відключення силової батареї електромобіля.

Існують різні способи гасіння електромобілів. Це використання вогнегасної ковдри [375-376, 382-383] (рис. 7.12). Коли електромобіль повністю охоплений вогнем, теплове випромінювання створює труднощі накрити повністю електромобіль ковдрою, що є недоліком даного технічного рішення. Також реактивне полум'я від АКБ виривається з під ковдри.



Рисунок 7.12 – Використання вогнегасної ковдри для гасіння електромобілів [375, 376]

Ефективним способом пожежогасіння є використання контейнера для гасіння (рис. 7.13). Електромобіль, що горить за допомогою лебідки поміщається у контейнер, який заповнюється водою. Однак недоліком є те, що автомобіль після цього стає непридатним до використання і йде на утилізацію. Разом з тим, важко застосувати такий контейнер приміром на закритих паркінгах, де є обмежений простір [377].

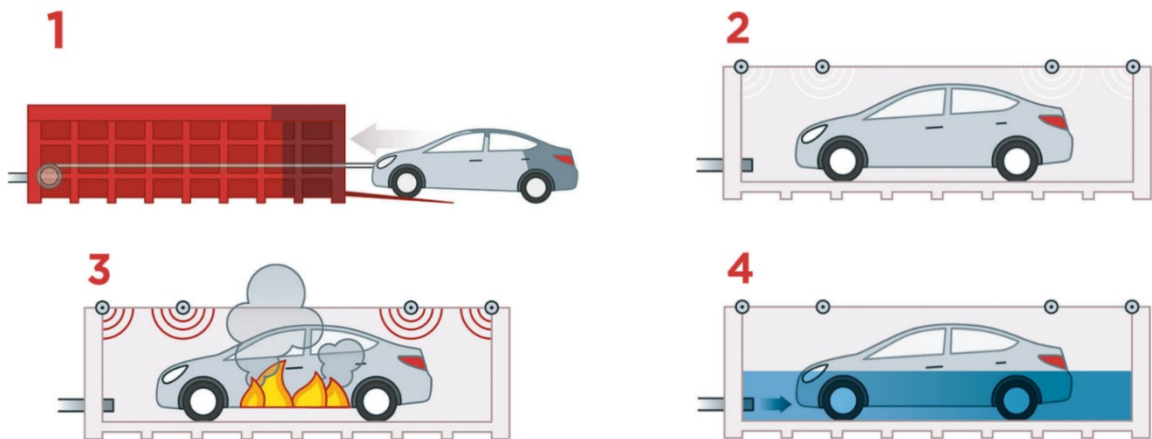


Рисунок 7.13 – Використання вогнегасного контейнера [11]

Також існує система пожежогасіння “Кобра” (Cobra Cold Cut Systems) та інші аналогічні систем (WJFE 300 MODULAR. WJFE 300 MODULAR) [378]. Принцип полягає у тому, що вода з абразивом під тиском 350 бар пробиває корпус кузова електромобіля, корпус силової АКБ та здійснює таким чином

гасіння. Недоліком такого рішення є те, що силова АКБ складається з окремих елементів, які формують модулі, а модулі, у свою чергу, формують власне силову АКБ. Також існують інші технічні рішення, які описані у ніукових роботах [137, 140].

Загалом ступінь захисту силової АКБ – IP 67, тобто механічне проникнення з однієї сторони АКБ не забезпечить подачу (а значить і гасіння) вогнегасних речовин у іншу сторону АКБ. В основу завдання поставлено завдання створити пристрій, який забезпечував аварійне від'єднання силової акумуляторної батареї (АКБ) від кузова електромобіля чи іншого транспортного засобу, який містить такі батареї при пожежі чи термодеструктивному процесі [130, 135, 379-381]. Поставлене завдання вирішується тим, що запропонований пристрій аварійного від'єднання містить корпус, датчі температури, датчі газів, електромагнітні замки та з'єднання, блок керування, роз'єм рятувальників, кнопку ручного пуску з індикатором та вогнестійкі провідники. На рисунку 7.14 відображено загальний вигляд пристрою аварійного від'єднання силової АКБ при пожежі електромобіля, де 1 – корпус, 2 – датчі температури, 3 – датчі газів, 4 – електромагнітні замки, 5 – електромагнітне з'єднання, 6 – блок керування, 7 – роз'єм рятувальників, 8 – кнопка ручного пуску з індикатором та 9 – вогнестійкі провідники.

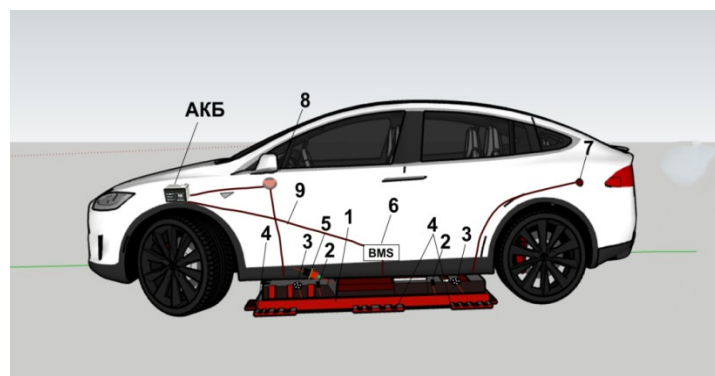


Рисунок 7.14 – Зовнішній вигляд та будова пристрою аварійного від'єднання силової АКБ

Запропонований пристрій аварійного від'єднання силової АКБ електромобіля працює в автоматичному, ручному чи примусовому режимі.

Автоматичний режим роботи. Коли датчик температури 2 фіксує понаднормове підвищення температури, та/або датчик газів 3 фіксує виділення газів тоді формується і передається сигнал через вогнетійкі провідники 9 на блок керування 6. Після цього блок керування 6 замикає контакти і струм від акумуляторної батареї електромобіля (не силової) через вогнетійкі провідники 9 потрапляє на електромагнітне з'єднання 5 та електромагнітні замки 6. Під дією електричного струму відбувається механічне роз'єднання провідника, що з'єднує силову АКБ із бортовою мережею електромобіля, а також відкриття електромагнітних замків 4. Внаслідок цього корпус 1 разом із силовою АКБ, яка закріплена у ньому падає на дорожнє покриття під дією сили тяжіння (тобто власної маси)

Причому блок керування 6 подає електричний струм електромагнітне з'єднання 5 та електромагнітні замки 6 на від'єднання силової АКБ лише коли автомобіль зупинився. Якщо аварійна ситуація відбулась під час руху то водій буде повідомлений через миготіння індикатора на кнопці ручного пуску 8.

Ручний режим роботи. Якщо водій електромобіля побачив ознаки теплового розбігу силової АКБ чи займання (вихід газів, диму, полум'я тощо) то при натисканні кнопки ручного пуску 8 замикається контакт і електричний струм від акумулятора електромобіля по вогнетривких провідниках 9 передається на електромагнітне з'єднання 5 та електромагнітні замки 4 та відбувається аварійне від'єднання силової акумуляторної батареї від днища електромобіля.

Примусовий режим роботи. У разі виникнення займання на закритому паркінгу, під час стоянки, у разі відсутності водія, і не спрацюванні системи аварійного від'єднання силової АКБ у автоматичному режимі рятувальники під'єднують джерело струму (12 В) до роз'єму рятувальників 7. Струм по вогнетривких провідниках 9 передається на електромагнітне з'єднання 5 та електромагнітні замки 4 та відбувається аварійне від'єднання силової акумуляторної батареї від днища електромобіля (рис. 7.15).

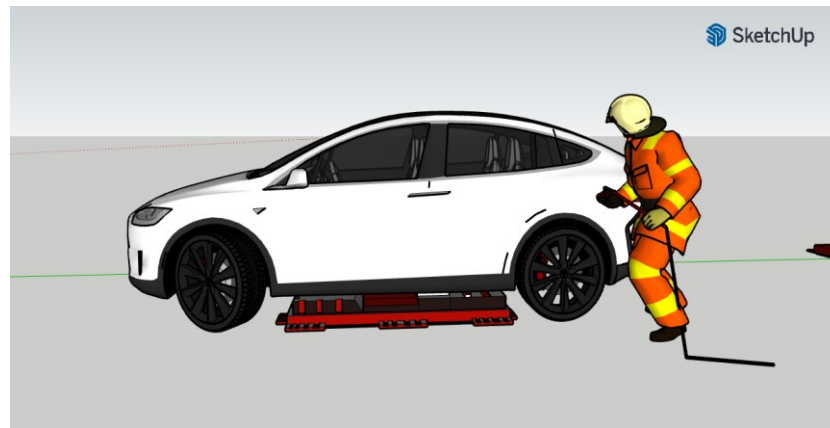


Рисунок 7.15 – Зовнішній вигляд використання примусового режиму пристрою аварійного від'єднання силової АКБ

Слід відмітити, що корпус виготовлений з листової сталі товщиною 3 мм, в який поміщається та закріплюється силова АКБ. Причому ширина корпуса повинна бути меншою ніж внутрішня відстань між колесами, що закріпленні на одній осі. Це дозволить безперешкодно відбуксирувати автомобіль, коли АКБ буде від'єднано та знаходитись на дорожньому покритті (рисунок 7.16).

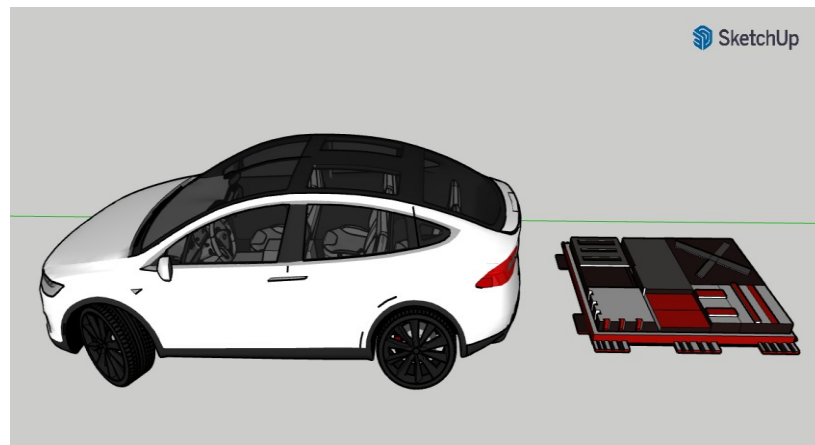


Рисунок 7.16– Зовнішній вигляд від'єднаної силової АКБ завдяки використанню системи аварійно відключення

Давачі температури контролюють температуру силової АКБ, а давачі газу стежать за наявністю газів, які можуть виділяться із силової АКБ при виникненні термодеструктивного процесу.

Електромагнітні замки кріплять корпус де знаходиться силова АКБ до кузова (днища) електромобіля. Їх кількість підбирається в залежності від маси силової АКБ, але не менше ніж шість одиниць.

Електромагнітне з'єднання слугує для з'єднання/роз'єднання бортової електромережі електромобіля від провідника силової АКБ.

Блок керування аналізує сигнали, що надходять від датчиків температури і газів та подає електричний струм на електромагнітні замки та з'єднання у разі перевищення їх порогових значень. Роз'єм рятувальників, дозволяє подати струм на електромагнітні замки та з'єднання від зовнішнього джерела живлення. Кнопка ручного пуску з індикатором, що розміщена на панелі приладів електромобіля та дозволяє запустити пристрій аварійного від'єднання у ручному режимі. Вогнестійкі провідники, із ступенем вогнестійкості не менше EI30, забезпечують провідність струму від АКБ (не силової) до електромагнітних замків та з'єднання через систему керування, кнопку ручного пуску чи роз'єму рятувальників, а також з'єднують датчі температури і газів із системою керування.

У всіх випадках після від'єднання силової АКБ від днища, електромобіль можна відбуксирувати від силової АКБ у якій відбувається термодеструктивний процес чи займання.

Застосування пристрою аварійного від'єднання силової акумуляторної батареї при пожежі електромобіля дозволить швидко та ефективно від'єднати силову АКБ від кузова електромобіля та отримати доступ до силової АКБ, а значить здійснити успішне їх гасіння.

Через відкритий доступ до силової АКБ кількість води чи інших вогнегасних речовин необхідних для гасіння буде зменшено. Разом з тим, це дозволить запобігти поширенню пожежі на електромобіль шляхом від'єднання силової акумуляторної батареї від його днища.

Разом з тим постала задача розробити ефективні способи гасіння силових літій-іонних батарей електромобілів.

На сьогоднішній день відомі стволи та стволи-пробійники, які

призначенні для проникнення та гасіння пористих матеріалів, яких як торф, зерно, сміття тощо.

Відтак, відомий спеціальний пожежний ствол для гасіння підземних пожеж [384] виготовлений на основі гвинтової палі з отворами та фланцем, містить припаяну суцільну спіраль з наконечником, як додатковий елемент містить ручки вентильного типу та кутове з'єднання з двома з'єднувальними головками.

Відомий також ручний пожежний ствол для гасіння палаючого сміття [385] виготовлений з металевої труби з отворами-розпилювачами, та складається з наконечника, містить корпус, стакан, вкладиш, перекриваючий пристрій, перекриваючу ручку, з'єднувальну головку, термоізоляційний чохол та дві опорні ручки.

Недоліками даних технічних рішень, є те, що дані пристрої можна використовувати для гасіння лише пористих матеріалів: торфу, зерна, сміття тощо.

Разом з тим відомий пристрій, та вибраний як найближчий аналог, ствол-пробійник для гасіння пожеж [386], що містить корпус у вигляді металевого циліндра, на одному кінці якого розташовано пробійник, на другому кінці з'єднувальна головка для подачі вогнегасної речовини, а також отвори для витоку вогнегасної речовини, згідно з корисною моделлю, містить ударний механізм, який поступально рухається у заданому діапазоні між обмежувальними фланцями.

Недоліком такого технічного рішення є малоефективне використання ударного механізму для пробиття кузова електромобілів та корпусу силових АКБ, а також фізичною неможливістю застосувати даний ствол зі сторони дорожнього покриття для пробиття днища електромобіля, де розміщуються і можуть горіти силові АКБ.

В основу задачі поставлено завдання створити ствол-пробійник для гасіння силових АКБ електромобілів, в якому нове конструктивне виконання форми ствола та особливості його застосування дозволило б ефективно проникати в

корпус силових АКБ, а відтак проводити їх ефективне гасіння та охолодження, а також через прямий контакт вогнегасної речовини з горючим середовищем значно зменшити використання вогнегасних речовин, необхідних для гасіння. Поставлене завдання вирішується тим, що запропонований ствол-пробійник виготовлений із металевої товстостінної труби та містить корпус, наконечник-пробійник, перекиривний пристрій з важелем для перекиривання, з'єднувальну головку, отвори-розпилювачі, обмежувач та підп'ятник.

Наконечник-пробійник дозволяє проникнути в корпус силової АКБ, що створює прямий контакт вогнегасної речовини із горючим, тим самим значно зменшуючи витрату вогнегасної речовини необхідної для гасіння та охолодження, а нове конструктивне виконання дозволяє застосовувати ствол для гасіння силових АКБ зі сторони дорожнього покриття шляхом пробиття днища електромобіля.

На рисунку 7.17 подано загальний вигляд ствола де 1 – корпус ствола-пробійника, 2 – наконечник, 3 – перекиривний пристрій, 4 – важіль перекиривного пристрою, 5 – з'єднувальна головка, 6 – отвори-розпилювачі, 7 – обмежувач проникнення ствола-пробійника та 8 – підп'ятник.

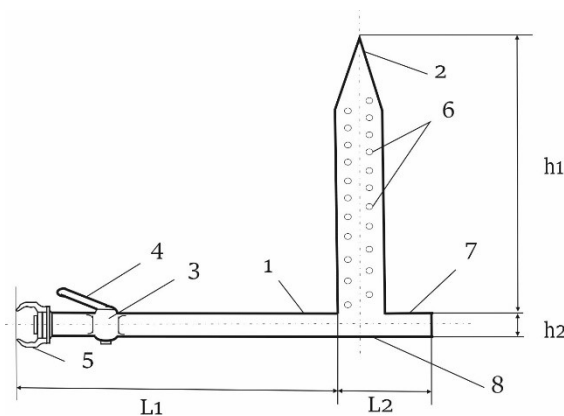


Рисунок 7.17 – Загальний вигляд та будова ствола-пробійника для гасіння силових АКБ електромобілів

Наконечник-пробійник 2 забезпечує пробиття днища електромобіля та корпусу силових АКБ з метою проникнення ствола-пробійника у порожнину АКБ. Вогнегасна речовина подається від пожежного автомобіля по рукавній

лінії через з'єднувальну головку 5 та перекиривний пристрій 3 у корпус ствола-пробійника 1 і через отвори-розпилювачі 6, які розміщені по всій площі ствола, на гасіння чи охолодження силової АКБ. Перекиривний пристрій 3 за допомогою руху важеля 4 забезпечує подачу або припинення подачі вогнегасної речовини. Підп'ятник 8 має прямокутну форму та забезпечує стійкості ствола-пробійника.

Запропонований ствол-пробійник використовується наступним чином (рис. 7.18).

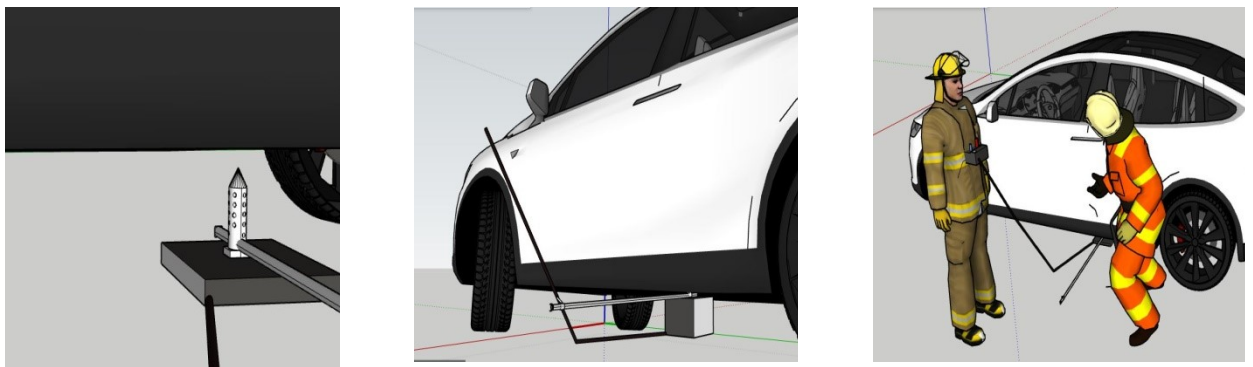


Рисунок 7.18– Загальний вигляд та будова ствола-пробійника для гасіння силових АКБ електромобілів

Коли полум'я електромобіля, що горить пригашене, або відсутнє на початковій стадії розвитку пожежі і є необхідність здійснити гасіння чи охолодження силової АКБ ствол-пробійник розміщується перпендикулярно до днища електромобіля, наконечником 2 вгору. Під підп'ятником 8 розміщується пневматичний домкрат, а саме його складова - пневматична подушка високого тиску. Пневматична подушка приводиться в дію шляхом подачі стисненого повітря від балона стисненого повітря через редуктор та пульт керування до подушки. Завдяки зусиллю, що створює пневматична подушка відбувається проникнення ствола-пробійника у порожнину силової АКБ.

Якщо електромобіль перевернутий на бік, або на дах застосовувати ствол-пробійник можна шляхом нанесення ударів кувалдою по підп'ятнику 8

притримуючи ствол-пробійник за корпус 1, з врахування перпендикулярного розміщення наконечника 2 до днища електромобіля (рис. 7.19).



Рисунок 7.19 – Загальний вигляд застосування ствола-пробійника для гасіння силових АКБ електромобілів

З врахування кліренсу електромобілів, середньої товщини силових АКБ, а також початкових розмірів пневмоподушки, які становлять 27 мм [387] ствол може виготовлятися у наступних розмірах: $h_1=80-90$ мм, $h_2=15$ мм, $L_1=800-1100$ мм, $L_2=100$ мм.

Застосування запропонованого ствола-пробійника, нового конструктивного виконання, для гасіння електромобілів, дозволить ефективно проникати в корпус силових АКБ, а відтак проводити їх ефективно гасіння та охолодження, а також через прямий контакт вогнегасної речовини з горючим середовищем значно зменшити використання вогнегасних речовин, необхідних для гасіння та охолодження.

7.5. Висновки до розділу 7.

Результати досліджень, які наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. За результатами проведення серії чисельних експериментів із використанням комп'ютерних моделей газогідродинаміки 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'ям (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):

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

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

2. 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/м² до 200 кВт/м² для джерел тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього.

3. Розроблено методику використання розрахунково-табличний метод оцінювання часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів яка полягає визначенні зазначеного часу виходячи з відомих технічних значень батареї і також потужності та особливостей джерела тепла, який буде діяти на літій-іонну батарею електромобіля.

4. 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 спрацьовує. 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.

5. Із використанням алгоритму роботи давача температури розроблено систему аварійно відключення силової батареї електромобіля, дозволить швидко та ефективно від'єднати силову АКБ від кузова електромобіля та отримати доступ до силової АКБ, а значить здійснити успішне їх гасіння. Через відкритий доступ до силової АКБ кількість води чи інших вогнегасних речовин необхідних для гасіння буде зменшено. Разом з тим, це дозволить запобігти поширенню пожежі від силової батареї на електромобіль в цілому.

6. З метою підвищення ефективності гасіння за визначені інтерсивності подачі вогнегасних речовин (змочуючого розчину) на гасіння силових літій-іонних АКБ електромобілів, яка знаходиться в межах 1,7-2,2 дм³/с·м² розроблено ствол-пробійник для гасіння електромобілів. Застосування запропонованого ствола-пробійника, нового конструктивного виконання, для гасіння електромобілів, дозволить ефективно проникати в корпус силових АКБ, а відтак проводити їх ефективне гасіння та охолодження, а також через прямий контакт вогнегасної речовини з горючим середовищем значно зменшити використання вогнегасних речовин, необхідних для гасіння та охолодження.

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 силових 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 силових 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'ям (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 спрацьовує. 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-ІХ. *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-carmakerselectric-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., Sauvant-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: https://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 Riskfaktorер 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 –1 7.

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 o 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. *Пожезна 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., Föbleitner 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 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ 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., Neunhoeffler 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., Lougheed 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. *V: 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., Wiltsche 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. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <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”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <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/istcm2019.03.021.

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., Neunhoffer 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. *Пожезна 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., Muzichuck 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 LiFePO_4 cathode material. *Electrochimica Acta*. 2005. 50(26). P. 5658–5665.

352. Hurley M., Gottuk D., Hall Jr J., Harada K., Kuligowski E., Puchovsky M., Wieczorek 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-oftware/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. Соловійов 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., Muzichuck 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 витoku 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 еквівалентноїощадливості 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.** Установа 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 ІХ 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 ХІ 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-технічна 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-практична конференція 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 конференція «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.

ДОДАТОК В

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Тимчасово виконуючий обов'язки
Директора Департаменту запобігання
надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС

Олександр ЧЕКРИГІН

_____ 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича на тему:
«РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
(ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ)»

Цей акт складений про те, що результати дисертаційних досліджень Гаврилюка А.Ф. апробовано та впроваджено в роботу Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Розроблений науково-методичний апарат, який 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-марганець-кобальт оксид, літій-залізо-фосфат при дії теплового потоку густиною від 10 кВт/м² до 200 кВт/м² для джерел тепла як з відкритим полум'ям так і без нього що забезпечує реалізацію параметричного методу нормування у будівництві під час розрахункової оцінки поширення пожежі на закритих паркінгах будівель використаний під час розроблення проекту національного стандарту ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення».

Також результати дисертаційних досліджень були використані під час розроблення рекомендацій щодо заходів безпеки під час використання акумуляторних батарей у житлових приміщеннях, де Гаврилюк А.Ф. був виконавцем.

Начальник відділу організації заходів
безпеки критичної інфраструктури
управління державного пожежного нагляду
Департаменту запобігання надзвичайним
ситуаціям апарату ДСНС

Олег КОШЕЛЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник ГУ ДСНС України
у Львівській області
генерал-майор служби ЦЗ

Юрій КАПТІН
«15» жовтня 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича на тему:

«Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)»

Комісія у складі:

голови – заступника начальника ГУ ДСНС України у Львівській області з реагування на надзвичайні ситуації, полковника служби ЦЗ Миколи ГУМЕНЮКА;

членів комісії: начальника управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Львівській області, полковника служби ЦЗ Ігоря УЦАПІВСЬКОГО, начальника оперативно-координаційного центру ГУ ДСНС України у Львівській області, полковника служби ЦЗ Юрія МАРУСЯКА

розглянувши матеріали дисертаційної роботи Андрія ГАВРИЛЮКА склала цей акт про те, що досліджені критичні інтенсивності гасіння літій-іонних силових батарей використовуються пожежно-рятувальними підрозділами ГУ ДСНС України у Львівській області при розрахунку необхідної кількості сил і засобів для гасіння пожеж електромобілів. Зокрема, при горінні силових батарей з катодним матеріалом літій-нікель-кобальт-алюміній оксид (NCA) критична інтенсивність гасіння становить $2,5 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$; для катодного матеріалу літій-нікель-марганець-кобальт оксид (NMC) $2,2 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$, а для літій-залізо-фосфат (LFP) – $1,7 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ при подачі розпиленого струменя змочуючого розчину з об'ємною концентрацією піноутворювача загального призначення у діапазоні 1-2%.

Цей акт не може бути підставою для отримання грошових премій та інших винагород.

Голова комісії

Микола ГУМЕНЮК

Члени комісії

Ігор УЦАПІВСЬКИЙ

Юрій МАРУСЯК

СУДОВИЙ ЕКСПЕРТ
Пулатов Вадим Салімжонович

Свідоцтво № 19-24/П від 12 березня 2023 року, видане на підставі рішення
Центральної експертно-кваліфікаційної комісії при Міністерстві юстиції України
вул. Лісова, 1, с. Олешин, Хмельницький район, тел.:+38 (063) 255-32-83,
e-mail: pasternak2023@ukr.net

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Гаврилюка Андрія
Федоровича за темою: «РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛІСНИХ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ (ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ)»

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Гаврилюка Андрія за темою «Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)» впроваджені та використовуються під час досліджень причин пожеж автотранспортних засобів, які використовують електричні та гібридні приводи.

Зокрема визначені у дисертаційній роботі 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.

Разом з тим методики, описані у роботі використовувались при дослідженні причини пожежі силової батареї автомобіля марки Tesla Model S у рамках проведення дослідження причини виникнення пожежі, що сталась 20.11.2023 р. в приміщенні ФОП Кулик Володимир Борисович за адресою: м. Хмельницький, вул. Степана Бандери, 80/1.

Особливу увагу, з практичної сторони, заслуговує розроблений науково-методичний апарат, який об'єднує методики проведення натурних досліджень та обґрунтовані критерії, які характеризують умови виникнення горіння, що дозволяє визначати безпечних часові умови до виникнення горіння силових акумуляторних батарей автотранспортних засобів, які використовують електричні та гібридні приводи.

Судовий експерт



В.С. Пулатов

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

«ЕКСПЕРТНО - ТЕХНІЧНА
КОМПАНІЯ»04112, м. Київ, вул. Авіаконструктора Ігора Сікорського, буд. 8
+38 (096) 361-86-96
etcompanymail@gmail.com
www.facebook.com/expertly.technical.company
ЄДРПОУ 40506735**АКТ****про впровадження результатів дисертаційної роботи**

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційних досліджень Гаврилока Андрія Федоровича за темою «Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)», а саме: результати досліджень процесів гасіння пожеж літій-іонних систем акумулявання електроенергії в масштабі елементів та модулів з використанням різних вогнегасних речовин первинних засобів пожежогасіння використовуються товариством з обмеженою відповідальністю «Експертно-технічна компанія» у своїй діяльності.

Акт не призначено для використання під час комерційних чи фінансових операцій.

Директор

10.12.2024



Богдан БОГДАНЕЦЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчально-методичної роботи
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності ДСНС України
кандидат технічних наук, доцент,
полковник служби цивільного захисту



Олександр ПРИДАТКО

2 грудня 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича за темою: «Розвиток наукових основ протипожежного
захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)»

Комісія у складі: голови комісії – начальника навчально-методичного центру, полковника служби цивільного захисту Миколи СИЧЕВСЬКОГО та членів комісії – начальника кафедри цивільного захисту к.т.н., доцента, полковника служби цивільного захисту Василя ЛОЙКА, начальника кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки к.т.н., доцента підполковника служби цивільного захисту Олега НАЗАРОВЦЯ, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи, а саме:

- розроблені методами комп'ютерного моделювання моделі виникнення та динаміки розвитку пожеж електромобілів за різних початкових умов використовуються при плануванні організації проведення аварійно-рятувальних робіт та гасіння пожеж такого роду;

- науково-прикладні засади, які базуються на інтеграції чисельного моделювання та експериментальних досліджень, щодо прогнозування та оцінювання можливості виникнення процесів горіння у силових літій-іонних АКБ, як підґрунтя удосконалення конструкції транспортних засобів з електричним та гібридним приводами;

впроваджені у навчальний процес 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)».

Голова комісії:
начальник навчально-методичного
центру, полковник служби
цивільного захисту


Микола СИЧЕВСЬКИЙ

Члени комісії:
начальник кафедри цивільного захисту,
к.т.н., доцент, полковник
служби цивільного захисту


Василь ЛОЙК

начальник кафедри експлуатації
транспортних засобів та пожежно-
рятувальної техніки
к.т.н., доцент, підполковник
служби цивільного захисту


Олег НАЗАРОВЕЦЬ

ДОДАТОК Г

Патентна корисну модель «Установка автоматичного пожежогасіння електромобілів»

ДОДАТОК Д

**Патент на корисну модель «Автоматична аерозольна установка
пожежогасіння транспортних засобів»**