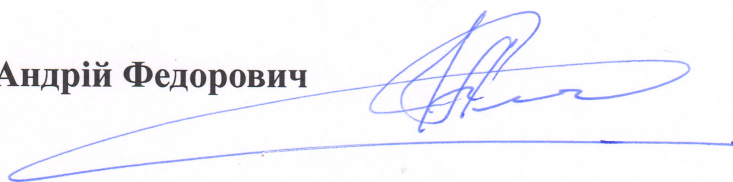


**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

ГАВРИЛЮК Андрій Федорович



УДК 614.841.232+629.064.35

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

Спеціальність 21.06.02 – Пожежна безпека
(261 – пожежна безпека)

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності, м. Львів.

Науковий консультант: доктор технічних наук, доцент
ЯКОВЧУК Роман Святославович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності,
начальник факультету цивільного захисту;

Опоненти: доктор технічних наук, професор
КОСТЕНКО Віктор Климентович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри природоохоронної діяльності;

доктор технічних наук, професор
ПОЗДЄЄВ Сергій Валерійович,
Національний університету цивільного захисту України,
професор кафедри пожежної профілактики в населених
пунктах;

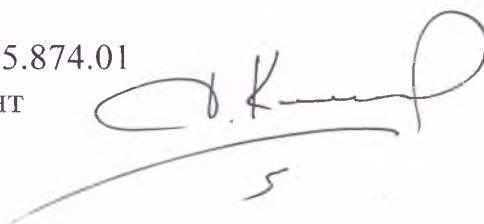
доктор технічних наук, професор
БОЛІБРУХ Борис Васильович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри цивільної безпеки.

Захист відбудеться «12» травня 2025 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35, а також на сайті спеціалізованої ради Д 35.874.01, за електронною адресою: <https://ldubgd.edu.ua/content/zahisti-disertaciy-2>

Реферат розісланий «07» квітня 2025 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01
кандидат технічних наук, доцент



Дмитро КОБИЛКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 згорання, а також урядовими програмами провідних країн світу, які стимулюють придбання власне електромобілів. Згідно із даними міжнародного енергетичного агентства, у 2023 році кожен п'ятий проданий автомобіль у світі був електричним. Загалом автопарк електромобілів станом на 2024 рік перейшов відмітку у 40 млн, що у 8 разів більше ніж у 2019 році 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.

Живлення тягових електродвигунів електромобілів забезпечують силові акумуляторні батареї (АКБ). Серед різноманітних типів АКБ (свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, натрієво-сульфатних) літій-іонні батареї (LІВ) набули найширшого застосування завдяки перевагам: високій щільності енергії (150 – 250 Вт·год/кг і більше), значним струмам розряду/заряду, тривалому терміну служби (понад 10 років) і низькому саморозряду. Водночас суттєвим недоліком LІВ є виникнення у їх корпусі термодеструктивних процесів, що призводять до самозаймання та інтенсивного горіння за умов механічних пошкоджень, відхилень від штатних режимів експлуатації, внутрішнього короткого замикання або впливу зовнішніх джерел тепла.

Під час термодеструктивних процесів відбувається викид суміші газів з вентиляційних отворів LІВ, серед яких горючі, вибухонебезпечні та токсичні гази: водень, метан, фтороводень, ціанистий водень, чадний газ тощо. Разом з тим пожежі електромобілів характеризуються вищими тепловими параметрами порівняно з автомобілями, що обладнані ДВЗ. Зокрема максимальна температура горіння є на 25-30% більшою і може сягати 1200 °С, час горіння від 30 хв до кількох годин, а довжина полум'я може сягати до 5 м.

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.

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

вибуху та поширення пожеж електромобілів. В значній кількості робіт вказано на виникнення займань ЛІВ внаслідок їх механічних пошкоджень.

Інші дослідження спрямовані на розкриття механізму впливу короткого замикання на виникнення займань ЛІВ електромобілів, аналіз теплових і механічних ефектів, які виникають при цьому, а також на розробку стратегій запобігання загорянню шляхом оптимізації охолоджувальних систем і вибору безпечних матеріалів для ЛІВ. Описано вплив надмірного струму заряду/розряду на пожежну небезпеку та тривалість служби ЛІВ. 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 і не розглядається комплексно проблема виникнення та розвитку горіння у електромобілі.

Узагальнення результатів наукових досліджень виявило відсутність комплексного підходу до 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 характеристики, конструктивні та експлуатаційні параметри самої батареї, так і характеристики джерела тепла.

Враховуючи викладене можна стверджувати, що наукові дослідження, спрямовані на розкриття механізму горіння силових літій-іонних акумуляторних батарей від температури їх нагрівання, 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 відповідно до 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 термодеструктивних процесів у електромобілях залежно 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 відповідної нормативної бази, щодо оцінки та особливостей горіння силових АКБ, і 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 їхні технічні характеристики, конструктивні та експлуатаційні параметри, а також розвиток пожеж електромобілів в цілому;

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

- з використанням комп'ютерного моделювання дослідити температурні розподіли пожежі, внаслідок виникнення займань у силовій акумуляторній батареї електромобіля на основі розробленої гідродинамічної моделі в середовищі FDS, яка базується на адаптованих математичних моделях рівнянь теплообміну;

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

- здійснити експериментальні дослідження процесів горіння у елементах та модулях силових АКБ електромобілів, а також їх гасіння, і на основі отриманих результатів виявити та проаналізувати залежності впливу технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів силових АКБ на їх температуру горіння.

- встановити комплекс найбільш значущих взаємозв'язків та чинників (факторів), які впливають на виникнення та перебіг процесів горіння в 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;

- на основі 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 дисертації застосовано експериментальні і теоретичні методи досліджень. Теоретичний підхід передбачав проведення комплексного аналізу та узагальнення відомих наукових праць, присвячених особливостям виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторних батареях, а також пожежам електричних колісних транспортних засобів. Крім того, виконано математичне моделювання теплових процесів нагрівання елементів та модулів силових акумуляторних батарей із використанням методів стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності, а також польових методів. З метою перевірки належності дисперсії результатів досліджень до однієї генеральної сукупності було застосовано критерій Фішера. Для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей використано метод дихотомії. Окрім цього, застосовано табличний метод, спрощений метод, розрахунковий метод із використанням рівнянь нестаціонарної теплопровідності, а також розрахунковий метод на основі польових моделей для оцінювання поширення пожежі між елементами силових батарей електромобілів. Методи математичної статистики слугували для опрацювання результатів експериментальних досліджень.

Експериментальна частина виконана згідно з розробленими здобувачем методиками, що передбачали застосування метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання. Для розв'язання диференціальних рівнянь було залучено метод кінцевих об'ємів, а при моделюванні процесів виникнення та розвитку пожеж в електричних колісних транспортних засобах використано метод Ейлера.

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 залежно від їх технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів.

Здобувачем *уперше* отримані такі 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 впливі 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 змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального (анодом до джерела тепла) на горизонтальне – зростати з $690 \text{ }^\circ\text{C}$ до $810 \text{ }^\circ\text{C}$;

- при горизонтальному просторовому розміщенні джерела тепла та зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – зменшуватись $810 \text{ }^\circ\text{C}$ до $450 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 оксиду $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$):

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

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

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

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

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

- 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 $30 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ до $100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ при дії густини теплового потоку в діапазоні від 10 кВт/м^2 до 200 кВт/м^2 , 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 протікання 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 в обґрунтуванні та розробленні науково-методичного апарату, що інтегрує методики натурних досліджень і табличного методу визначення часу початку виникнення термодеструктивних процесів у силових батареях електромобілів. У поєднанні з обґрунтованими критеріями, які впливають на ефективність систем протипожежного захисту, цей апарат дає можливість визначати безпечні часові умови, які передують процесам виникнення займань електричних колісних транспортних засобів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття 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 реалізовано у розробленому державному стандарті України – ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення», а також у проекті 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).

Досліджені вогнегасні речовини та критичні інтенсивності їх подавання при гасінні пожеж електричних колісних транспортних засобів впроваджені у практичну діяльність оперативно-рятувальних підрозділів Головного управління ДСНС України у Львівській області (акт впровадження від 13.10.2024 року), а також у діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «Експертно-технічна компанія» м. Київ (акт впровадження від 10.12.2024 року). Результати дисертаційного дослідження втілено в розробку двох патентів України на корисну модель (патент №134813 та патент №141239).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків підтверджується відповідністю обраних методів досліджень поставленим в роботі меті та завданням; використанням повірених засобів вимірювальної техніки, а також задовільною збіжністю отриманих теоретичних та експериментальних досліджень; впровадженням та апробацією результатів досліджень.

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, обробці отриманих результатів та їх узагальненні. Дисертація є самостійною роботою автора; усі положення, запропоновані до захисту, результати їх впровадження описано в працях [1 – 55].

Внесок здобувача в наукові роботи, опубліковані у співавторстві, такий. 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 прикладі 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 неактуальність чинних норм оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, установками гасіння і виявлення пожежі та розроблено зміни, покликані підвищити протипожежний захист колісних транспортних засобів в тому числі і електромобілів; у праці [8] – окреслено ймовірні перспективи розвитку електромобілів у найближчому майбутньому, наведено їх загальну класифікацію, а також проблеми їх використання. Проаналізовано найпоширеніші енергетичні елементи, які використовуються для живлення тягових електричних двигунів електромобілів, описано їх переваги та недоліки; у роботі [9] – визначено та прокласифіковано 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 щодо їх пожежної небезпеки при дії відкритого полум'я; у науковій праці [15] – здійснено обробку, узагальнення та опис отриманих експериментальних даних при польовому дослідженні елементів силової батареї електромобіля при дії відкритого полум'я; у [18] – здійснено експериментальні дослідження впливу відкритого полум'я від пропанового пальника на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model s, а також виявлено та описано особливості розвитку термодеструктивних процесів; 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 узагальнено отримані результати; у [22] – розроблено принципову схему 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 провідників бортової електромережі транспортних засобів при дослідженні їх загорянь; у науковій праці [33] – здійснено презентацію результатів принципової схеми аерозольної установки пожежогасіння транспортних засобів; у роботі [35] – систематизовано та узагальнено загальні підходи до забезпечення пожежної безпеки

колісних транспортних засобів та розроблено технічні рішення 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 дано їм оцінку з точки зору пожежної безпеки; у роботі [41] – окреслено безпеку гасіння пожеж за участю літій-іонних батарей та дано рекомендації особовому складу пожежно-рятувальних підрозділів; 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 безпеки до яких призводить використання електромобілів; у [47] – досліджено пожежну безпеку електромобілів на водневому паливі; у науковій роботі [48] – оцінено еквівалентну витрату електроенергії електромобілів та її вплив на пожежну безпеку; у праці [49] – систематизовано основні ідентифіковані причини виникнення пожеж електромобілів; у [52] – досліджено паливну ощадність найпоширеніших 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 безпеки 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, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 рр.); IX, XI Міжнародних науково-практичних конференціях «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2018, 2020 рр.); III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід та перспективи» (м. Львів, 2018, 2021 рр.); 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.); III Międzynarodowy Konferencji «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.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Розвиток науки і техніки: проблеми та перспективи» (м. Київ, 2021 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, 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції «Безпека дорожнього руху в умовах воєнного стану» (м. Кривий Ріг, 2022 р.); 3-тій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2024» (м. Черкаси, 2024 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2024 р.).

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертації увійшли до 55 наукових публікацій, серед яких: 6 статей, проіндексовані у науково-метричних базах даних Scopus; 14 статей у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації; 2 патенти України на корисну модель; 32 матеріалів 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена стисла характеристика дисертації, розкрита актуальність проблеми розвитку наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів, сформульовано мету та визначено задачі дослідження, наведено положення наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів, форми їх апробації та використання, а також публікації результатів роботи.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану досліджень забезпечення протипожежного захисту електромобілів» досліджено стан світового та вітчизняного автопарку електромобілів та передумови його стрімкого розвитку, наведено особливості будови електромобілів в цілому та окремих його елементів, в тому числі і силової батареї. Здійснено аналіз статистичних даних пожеж електромобілів в Україні та у світі, охарактеризовано причини їх виникнення та особливості розвитку. Встановлено, що пожежі електромобілів характеризуються більшими значеннями густини теплового потоку, що вирізняє їх від пожеж

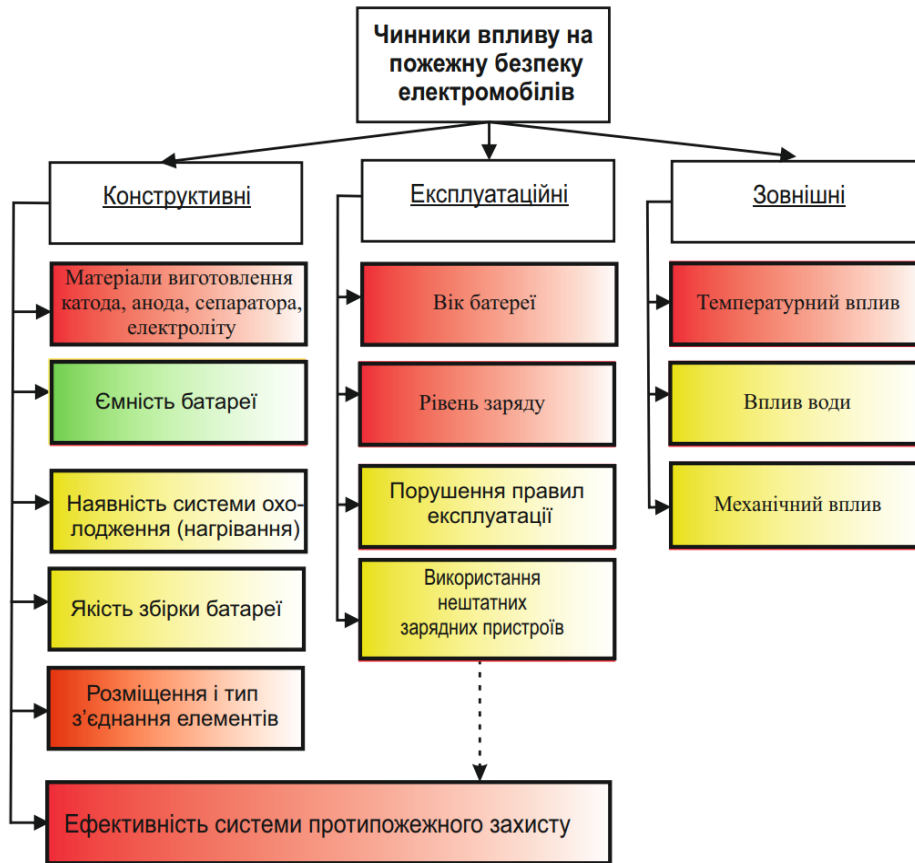
автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Виявлено, що ємність силової акумуляторної батареї (далі – АКБ), стан її заряду, а також матеріал виготовлення катодних елементів, впливатимуть на особливості виникнення займання та розвиток пожеж електричних колісних транспортних засобів загалом.

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 відрізняється як за масштабом, так і за конструктивним виконанням, що впливає на отриманні результати випробувань як силових АКБ, так і електромобілів на предмет 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 (табл. 1), де встановлено, що літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі літій-ферум-фосфату (LiFePO_4) – LFP, демонструє найвищу термічну стабільність. Разом з тим літій-іонні батареї, катода яких виготовлені на основі оксиду літій-нікель-кобальт-алюмінію (LiNiCoAlO_2) – NCA, мають якнайвищі показники енергетичної ємності – понад 300 Вт·год/кг, і найвищий рівень пожежної небезпеки серед інших літій-іонних батарей.

Таблиця 1 – Узагальнені результати основних катодних матеріалів силових літій-іонних батарей колісних електричних транспортних засобів за рівнем пожежної небезпеки

Катодний матеріал	Модель електромобіля	Рік випуску
Літій-нікель-кобальт-алюміній оксид (NCA)	Tesla Model S, 3, Y, X	2015 - теперішній час
	Toyota Prius Prime	2017 - теперішній час
	Honda Clarity Electric	2017 - теперішній час
	Toyota Prius Prime	2017 - теперішній час
Літій-нікель-манган-кобальт оксид (NMC)	BMW i3	2013 - теперішній час
	Audi e-tron	2016 - теперішній час
	Hyundai Kona Electric	2018 - теперішній час
	Kia e-Niro	2018 - теперішній час
	Volkswagen ID.3	2020 - теперішній час
Літій-манган оксид (LMO)	BMW i3	2013 - теперішній час
	Nissan Leaf	2010 - теперішній час
	Chevrolet Volt	2010 - теперішній час
Літій-залізо-фосфат (LFP)	BYD e6	2019 - теперішній час
	MG ZS EV	2018 - теперішній час
	NIO ES6	2018 - теперішній час

Визначено, окреслено та систематизовано чинники впливу на ефективність протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів, що приведено на схемі (рис.1).



Рисунк 1 – Систематизація основних чинників впливу на ефективність протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів

Такі чинники як якість збірки батареї, наявність системи охолодження, порушення правил експлуатації тощо (відображені жовтим фоном) впливають на виникнення термодеструктивних процесів і, як наслідок, – джерел займання. Ємність батареї впливає на теплові характеристики пожежі, такі як сумарна енергія тепловиділення та потужність теплового потоку. А матеріали виготовлення катода, анода, сепаратора та електроліту, рівень заряду, розміщення і тип з'єднання елементів у модулі батареї (відображені червоним фоном) поєднують у собі вплив як на виникнення джерел займання, так і на теплові характеристики пожежі силової батареї електромобіля.

У другому розділі «Теоретичні механізми дослідження процесів розвитку пожеж електромобілів та їх вплив на протипожежний захист зазначених об'єктів» на основі отриманих результатів впливу значущих чинників на ефективність протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів запропоновано найбільш характерні сценарії виникнення термодеструктивних процесів з врахуванням конструктивних параметрів та технічних характеристик силових АКБ електричних колісних транспортних засобів.

Адаптовано фундаментальні закони нестационарної теплопровідності під особливості виникнення та перебігу термодеструктивних процесів у силових АКБ електромобілів, зокрема для визначення розподілу температури у силовій АКБ в тому числі під час впливу зовнішнього джерела тепла.

Для визначення енергії Q_r , яка виділяється внаслідок хімічних реакцій, що протікають у силових АКБ електричних колісних транспортних засобів використано рівність (1), яка отримана на основі рівняння Арреніуса:

$$\frac{\partial Q_r}{\partial T} = \frac{E_r}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{E_r}{T-T_0}\right), \quad (1)$$

де: E_r – сумарна енергія, що виділяються всіма реакціями, Дж; T_0 – температура початку реакцій, К; T – поточна температура К; E_r – параметр, який характеризує розвиток реакцій та залежить від температури; τ – предекспозиційний множник, s^{-1} .

Власне сумарна енергія E_r , яка виділяється при протіканні реакцій, розрахована за питомою масою кожного компонента.

Для визначення енергії, яка утворюється внаслідок внутрішнього короткого замикання Q_e між катодом та анодом при повному чи частковому руйнуванні сепаратора, використовувалась рівність (2):

$$\frac{\partial Q_e}{\partial t} = \frac{E_k}{\tau_k} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right), \quad (2)$$

де E_k – сумарна енергія, яка виділяється при короткому замиканні, Дж; τ_k – характеристичний час перехідного процесу, с;

Причому сумарну енергію, яка виділяється при внутрішньому КЗ визначають з рівності (3):

$$E_k = C \cdot a \cdot \Phi, \quad (3)$$

де: C – сумарна енергетична ємність акумуляторної батареї, Вт·с; a – стан заряду (у частці від 1); Φ – коефіцієнт ефективності, який визначає частку накопиченої енергії, яка затрачається на КЗ.

Зміна енергії в часі Q_F , яка виділяється при згоряння горючих матеріалів АКБ, можна розрахувати з рівності:

$$\frac{\partial Q_F}{\partial t} = m'_s \cdot q_s, \quad T > T_i, \quad (4)$$

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

При дії джерела зовнішнього тепла, енергія Q_o , яка передається АКБ, з врахуванням конвекційного та радіаційного теплообміну виражає рівність:

$$\frac{\partial Q_o}{\partial t} = m'_g \cdot q_g + h \cdot A (T_1 - T_2) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

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.

Оскільки силові батареї електричних колісних транспортних засобів складаються зазвичай з елементів формату 18650 або 21700 циліндричної форми, тому рівняння нестационарної теплопровідності в циліндричних координатах матиме вигляд:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (6)$$

де: r – відстань в радіальному напрямку, від заданої точки осі циліндра, м; φ – азимутальний кут – 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 .

Реалізація польового методу здійснювалась на основі розв'язання систем рівнянь Нав'є–Стокса, які складаються з рівнянь руху (7-8) та рівнянь нерозривності (9-10):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q_{rad}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_k. \quad (10)$$

де t – час, с; ρ – густина кг/м³; $\nabla(\rho V)$ – дивергенція густини, помноженої на вектор швидкості V , м/с; $\nabla[\rho V \otimes V]$ – описує конвективний потік імпульсу в рідинах або газах, кг/м·с²; μ – молекулярна динамічна в'язкість, Па·с; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість, Па·с; S – описує гравітаційні сили, Н; h – ентальпія системи, Дж/кг; c_p – теплоємність, Дж/кг·К; λ – теплопровідність, Вт/м·К; Pr_t – турбулентне число Прандтля; Q_{rad} – теплове випромінювання, Дж; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння; Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння; Q_k – масова частка компонента;

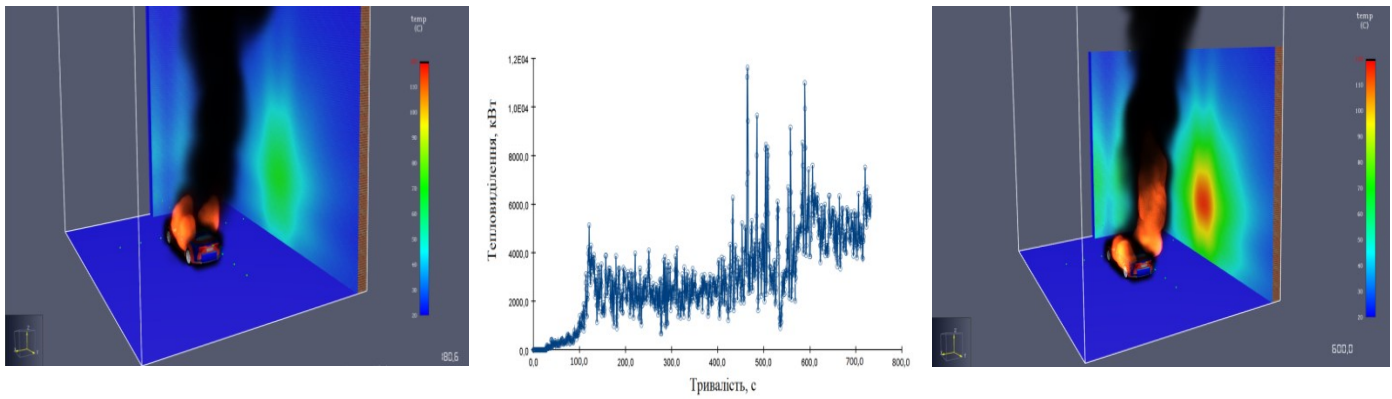
З урахуванням усіх фізико-хімічних властивостей поверхонь кінцевих елементів силових літій-іонних батарей, які обмінюються тепловою енергією, створювалась система нелінійних рівнянь у матричній формі. Дані рівняння адаптувались як до тривимірного простору (при визначенні температури силової літій-іонної батареї в цілому), так і для циліндричної системи координат (при визначенні температури

елементів силової літій-іонної батареї). Разом з тим використовувались додаткові математичні моделі, які враховували супутні явища, такі як рівняння стану ідеального газу, динамічну в'язкість та ентальпію суміші тощо.

У третьому розділі «Оцінювання процесів виникнення та поширення пожежі електромобілів з використанням обчислювальної газогідродинаміки» з метою обґрунтування запропонованих та адаптованих гідро-динамічних моделей виникнення джерел тепла у силових батареях, як передумови виникнення пожеж електромобілів, проведено їх верифікацію та оцінювання. Моделювання динаміки розвитку пожежі проводиться за допомогою комп'ютерної програми FDS (Fire Dynamics Simulator), розробленої Національним інститутом стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology – NIST, США). FDS реалізує обчислювальну гідродинамічну модель CFD (Computational Fluid Dynamics) тепломасопереносу при горінні, чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму й теплопередачі при пожежі. Основним алгоритмом є певна схема методу предиктора – коректора другого порядку точності за координатами і часом.

З врахуванням систематизації основних чинників та особливостей, які впливають на розвиток термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторних батареях електромобілів, проведено дослідження потенційного впливу зазначених процесів на виникнення та розвиток пожежі зазначених транспортних засобів, оцінка її температурних параметрів, а також її можливе поширення на сусідні припарковані автомобілі. Проведено моделювання створеної моделі електромобіля, де за основу взято електромобіль Tesla Model S, з габаритами $4976 \times 1963 \times 1435$ мм та загальною масою 2100 кг, яка обладнана силовою літій-іонною батареєю ємністю 85 кВт·год з врахуванням фізико-хімічних даних конструктивних та конструктивних особливостей елементів як силової батареї так і електромобіля в цілому.

Здійснено моделювання та аналіз впливу термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях на розвиток пожежі електромобіля в цілому. За результатом моделювання визначено, що внаслідок виникнення термодеструктивного процесу з тепловою потужністю 1,2 кВт вже через 180 с полум'я повністю охопило електромобіль, причому температурні поля на відстані 3 м по флангу перевищують значення 120 °С. Розрахункові схеми, що розроблені на основі системи рівнянь Нав'є-Стокса, а також відтворений режим тепловиділення, отриманий під час використання польової моделі, приведені на рис. 2. Отримані результати динаміки розвитку пожежі електромобіля внаслідок виникнення термодеструктивного процесу дали підставу сформулювати гіпотезу про можливість поширення пожежі від електромобіля, що горить, на сусідні припарковані автомобілі, а також обґрунтувати безпечну протипожежну відстань.



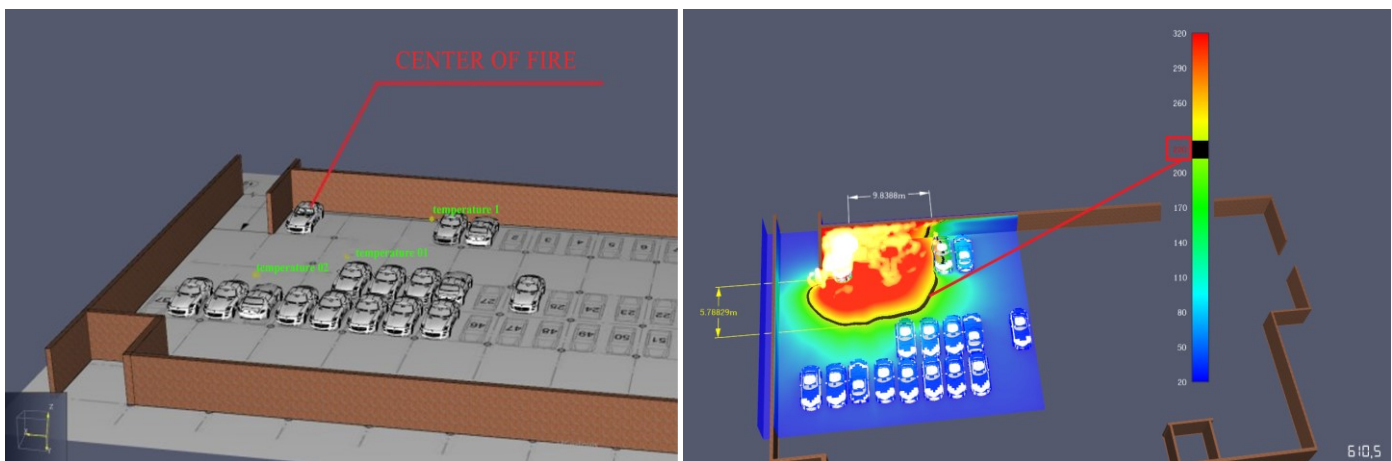
а)

б)

в)

Рисунок 2 – Динаміка розвитку пожежі електромобіля: відтворений режим тепловиділення (б) та розподіл температурних полів на 180 с (а); на 600 с (в) моделювання

Для цього обрано найгірший сценарій з міркувань швидкості поширення полум'я, великої кількості транспортних засобів, обмеженого запасу вогнегасних речовин та складності проведення робіт з пожежогасіння – закритий паркінг (рис 3а). Результати моделювання пожежі 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 зовнішньої конструкції – бампера автомобіля із значенням 220 °С. На 8 хв (420 с) від початку вогневого випробування електромобіль повністю охоплений полум'ям. За результатом проведеного моделювання встановлено, що флангове поширення критичної температури в 220 °С в результаті пожежі електромобіля, за умов моделювання, розповсюджується на відстань до 10 м (рис. 3б).



а)

б)

Рисунок 3 – Фрагмент створеної моделі закритого паркінгу та розміщених в ньому транспортних засобів (а); розподіл температурних полів від пожежі електромобіля у закритому паркінгу на 610 с (б)

Фронтальне поширення температурних розподілів в межах 220 °С становить до 6 м. Враховуючи, що паркування авто може бути як поздовжнім, так і поперечним,

доцільно прийняти найбільше значення протипожежної відстані, а саме 10 м. Різниця протипожежних відстаней по флангу та фронту пояснюється конструктивними особливостями електромобіля. Так як, відстань на закритих паркінгах між транспортними засобами становить в межах 0,5–0,8 м, це створює умови для швидкого поширення пожежі на інші транспортні засоби ще до прибуття пожежно-рятувального підрозділу.

Таким чином, отримані результати підтверджують ідею щодо дослідження термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів, як передумов виникнення пожеж таких транспортних засобів та протипожежного захисту зазначених об'єктів в цілому.

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів» наведено розроблені програми-методики (далі – Програма) на яких ґрунтуються експериментальні дослідження з метою виявлення закономірностей впливу технічних характеристик силових літій-іонних елементів та модулів електричних колісних транспортних засобів та їх просторове розміщення відносно джерела тепла на особливості виникнення та розвитку термодеструктивних процесів.

Сутність Програми полягає в дослідженні особливостей виникнення термодеструктивних процесів під дією відкритого полум'я, а також електронагрівальної панелі. Кінцева мета Програми полягає у визначенні теплових та часових параметрів, які описують процеси виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у елементах та модулях літій-іонних акумуляторів електричних колісних транспортних засобів.

При дослідженні елементів літій-іонних акумуляторів відкритим полум'ям створювалось модельне вогнище класу В. Для цього у деку діаметром 140 ± 5 мм, висотою борта 100 ± 5 мм та товщиною стінки борта $2,0 \pm 0,5$ мм поміщено 200 мл бензину марки А-95. Така кількість пального забезпечує горіння в деці зазначеного розміру впродовж 6-7 хв з діапазоном температури $600-1000$ °С, а також густиною теплового потоку в діапазоні $300-320$ кВт/м².

Для вимірювання температури на дослідному зрізці використовуються термопари типу хромель-алюмель (далі – ТХА). Фіксація температури здійснювалась з використанням перетворювача вимірювального інтелектуального ПВІ-111 А, який фіксував температуру термопар частотою 0,2 Гц. Розміщення термопар на випробувальних зразках та загальна схема проведення експерименту зображені на рисунку 4.

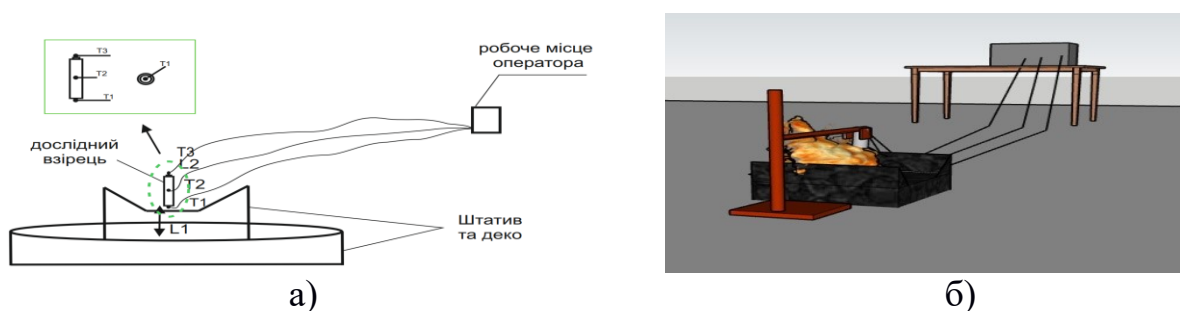


Рисунок 4 – Розміщення термопар на випробувальних зразках (а), та загальна схема проведення експерименту (б) при дії відкритого полум'я

Термопара Т1 фіксує температуру модельного вогнища, що діє на дослідні взірці, а також температуру нагрівання батарей на межі полум'я–батарея. Термопара Т2 кріпиться посередині батареї та фіксує температуру нагрівання батарей. Термопара Т3 розміщується на відстані L_2 ($L_2=7$ см) від верхнього краю силових АКБ і фіксує температуру полум'я, створеного модельним вогнищем пожежі та полум'ям, яке може утворитись внаслідок горіння силових АКБ.

Розміри дека, кількість пального, а також кількість та розміщення термопар на дослідному взірці обґрунтовано експериментальним шляхом з міркувань забезпечення часу горіння модельного вогнища, а також охоплення дослідних взірців полум'ям. З метою дослідження теплового впливу джерела тепла на виникнення та розвиток термодеструктивних процесів без відкритого полум'я застосовувалась електронагрівальна панель, яка забезпечувала потужність 1 кВт та густину теплового потоку 30 кВт/м^2 . Оскільки при використанні електронагрівальної панелі переважаючим способом передачі тепла є теплопровідність, на відміну від використання модельного вогнища класу В, це вплинуло на розміщення термопар, схема яких наведена на рисунку 5.

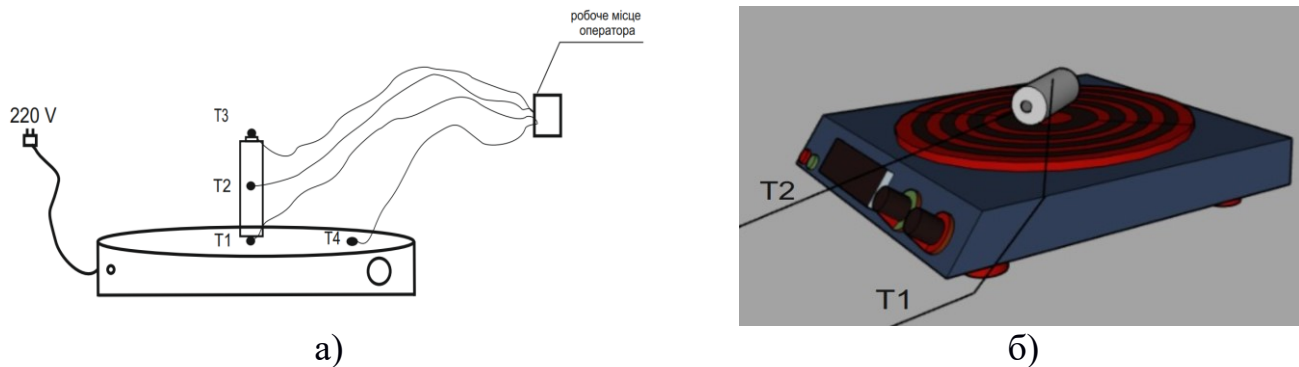


Рисунок 5 – Розміщення термопар на випробувальних зразках: а) при вертикальному просторовому розміщенні; б) при горизонтальному просторовому розміщенні при дії електронагрівальної панелі

Причому при горизонтальному розміщенні досліджуваного взірця достатньо використовувати дві термопари, так як дисперсія температур по вертикалі при горизонтальному просторовому розміщенні літій-іонної батареї відносно джерела тепла є незначною.

Особливість дослідження модулів силових батарей електричних колісних транспортних засобів полягає в тому, що виникнення термодеструктивних процесів бере свій початок з одного елемента та поширюється на інші елементи маючи стохастичний характер. Тому досліджуючи модуль важливо створити умови для дії джерела тепла лише на декілька елементів, які розташовані поруч. З метою забезпечення такої умови була створена установка (рис 6а) та обґрунтовано розміщення термопар у досліджуваному модулі (рис 6 в).

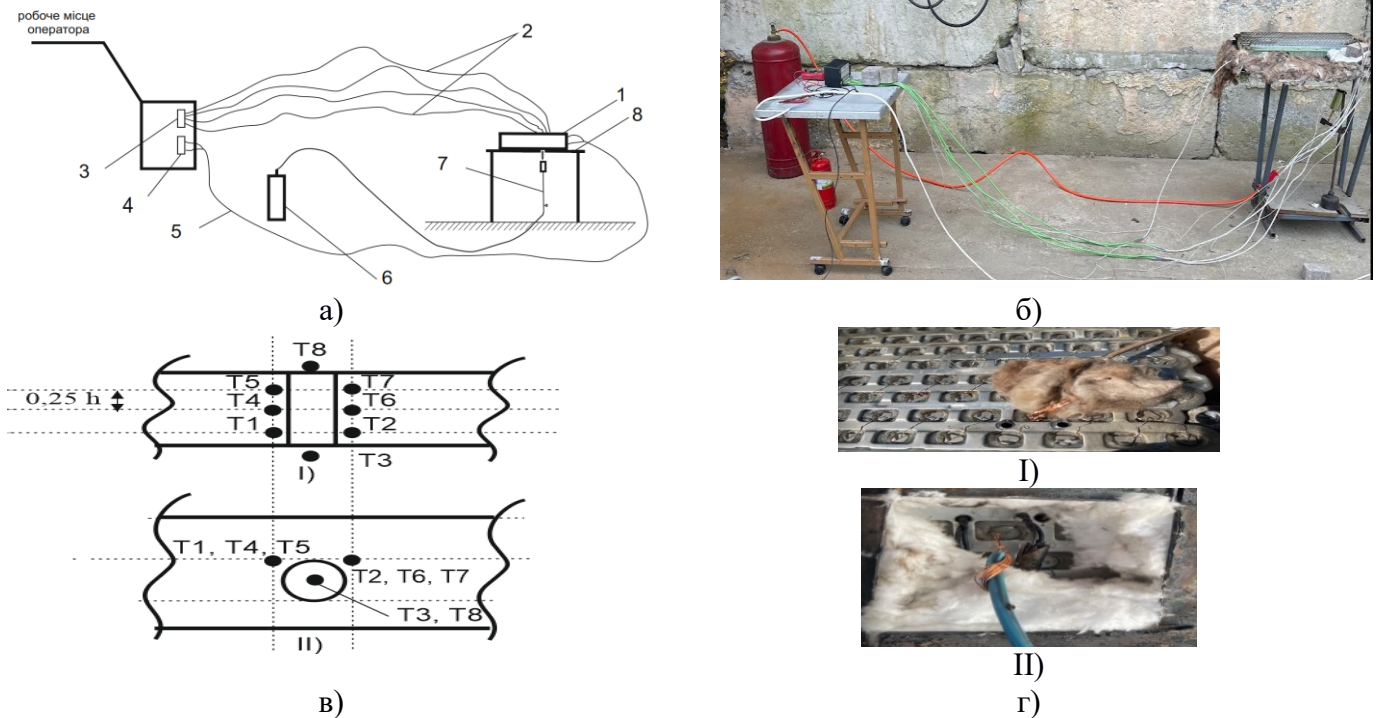


Рисунок 6 – Дослідження модулів силових батарей електромобілів: а) схематичне розміщення обладнання та засобів вимірювальної техніки; б) натурний вигляд обладнання та засобів вимірювальної техніки перед початком проведення експерименту; в) схематичне влаштування термопар; г) натурний вигляд влаштування термопар

Де 1 – модуль літій-іонної батареї електричного колісного транспортного засобу, що піддавався 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; 8 – металева основа для розміщення дослідного взірця на штативі. Для розміщення термопар здійснювались 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 3 а (точка 1). Здійснення отвору більшим ніж 3 мм в діаметрі призводить до руйнування корпусу елементів літій-іонних батарей та створення 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.

Таким чином, розроблена Програма досліджень закладає в основу новий підхід, який ґрунтується на проведенні натурних експериментальних досліджень літій-іонних силових батарей електричних колісних транспортних засобів в масштабі елемента та модуля з використанням, джерела тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього.

У п'ятому розділі «Результати експериментальних досліджень натурних випробувань силових батарей електромобілів» наведені отримані результати експериментальних досліджень, а саме: закономірності впливу технічних параметрів силових літій-іонних батарей електричних колісних транспортних засобів та їх просторове розміщення відносно джерела тепла на особливості виникнення в них

термодеструктивних процесів. Створення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електричних колісних транспортних засобах, а також розміщення засобів вимірювальної техніки здійснювалось згідно з розробленими методиками. Дослідженню піддавались літій-іонні елементи живлення, які були відібрані із силової батареї електромобіля TESLA MODEL S 2019 р.в. Анод цих елементів живлення виконаний з графіту, а катод – з $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA). Номінальна ємність одного елемента становила 3,2 А·год, номінальна напруга живлення 3,6 В, напруга відключення зарядки 4,2 В, напруга розряду 2,8 В. Були підготовлені елементи із ступенем заряду 100 %, 50 % 0%, які розміщувались вертикально (катодом/анодом) та горизонтально до обігрівальної поверхні. На прикладі елемента живлення, зарядженого на 100% і розміщеного вертикально анодом до обігрівальної поверхні, наведено кінограму розвитку термодеструктивного процесу, який супроводжувався горіння (рис.7).

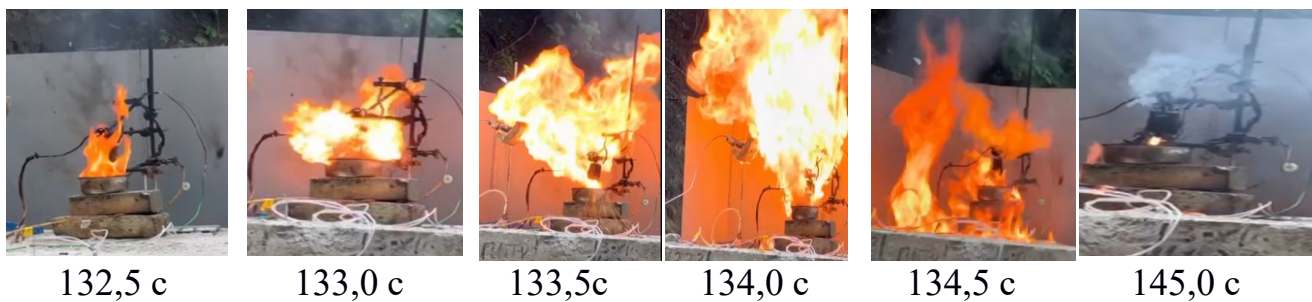


Рисунок 7 – Кінограма розвитку термодеструктивного процесу під дією модельного вогнища

На рисунку 8 наведено динаміку зміни температури елементів силових літій-іонних батарей, заряджених на 100%, у вертикальному просторовому розміщенні анодом до обігрівальної поверхні.

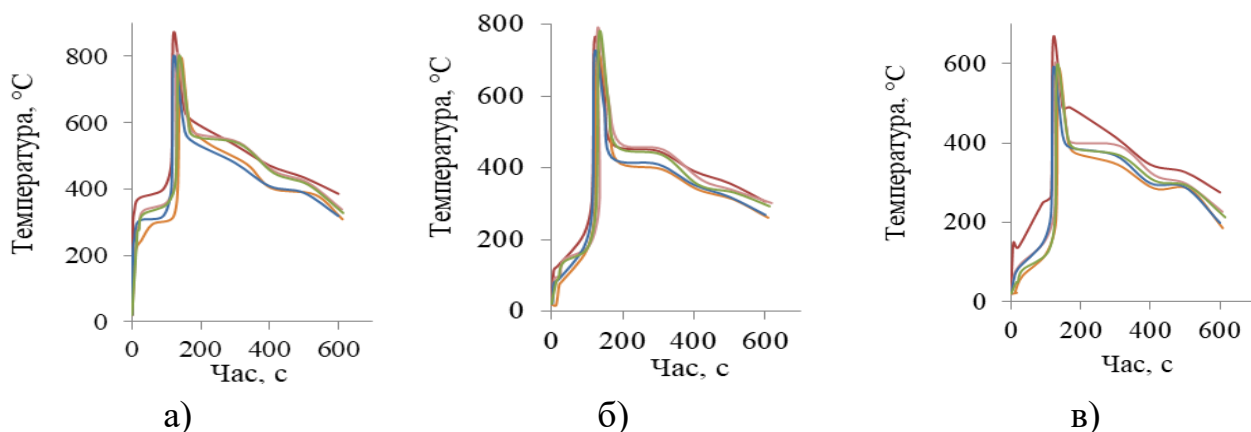


Рисунок 8 – Результати експериментальних досліджень силових літій-іонних батарей, заряджених на 100% і розміщених вертикально анодом до обігрівальної поверхні для серії з п'яти експериментів для термопар: а) Т1, б) Т2, в) Т3.

Отримані експериментальні дані за кожним експериментальним дослідженням оцінені використовуючи статистичні критерії Грабса та Фішера, а також абсолютні,

відносні та середньоквадратичні відхилення. Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 100%, відображено на рисунку 9.

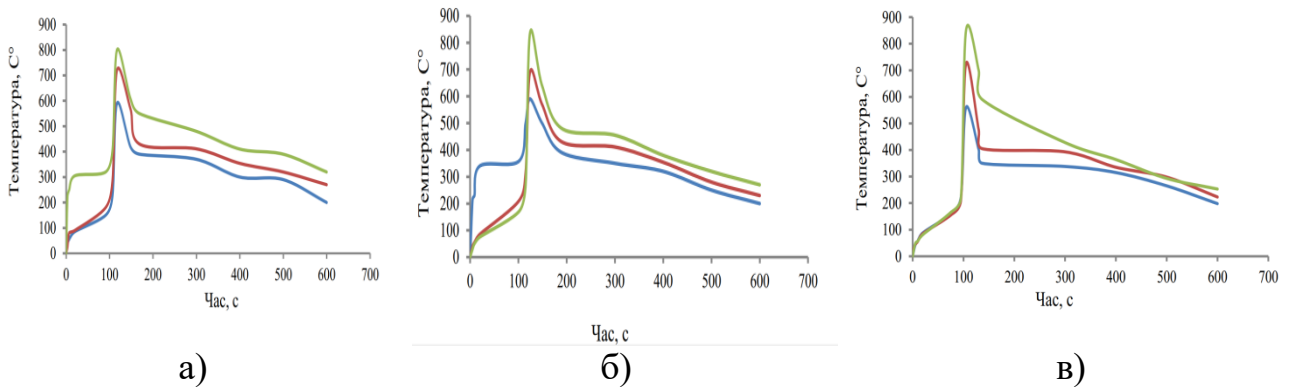


Рисунок 9 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей заряджених на 100% просторово розміщених до нагрівальної поверхні (**T1, T2, T3**): а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально.

На 110-113 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 165-195 °С, що пояснюється бурхливим розвитком термодеструктивного процесу, і як наслідок, генерації великої кількості тепла, яке починає нагрівати батарею зсередини. На 118-121 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційний газів призвело до різкого стрибка температури на термопарі T1, розміщеній над батареєю, з 428-437 °С до 738-766 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкривання) 241-255 °С. Викид тривав у всіх трьох експериментах орієнтовно 5-8 с. При цьому температура батареї досягла значення близько 583-593 °С, через 3-5 с після закінчення викиду відбувся вибух, при якому температура батареї становила 743-759 °С.

На рис. 10 приведено оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 50%.

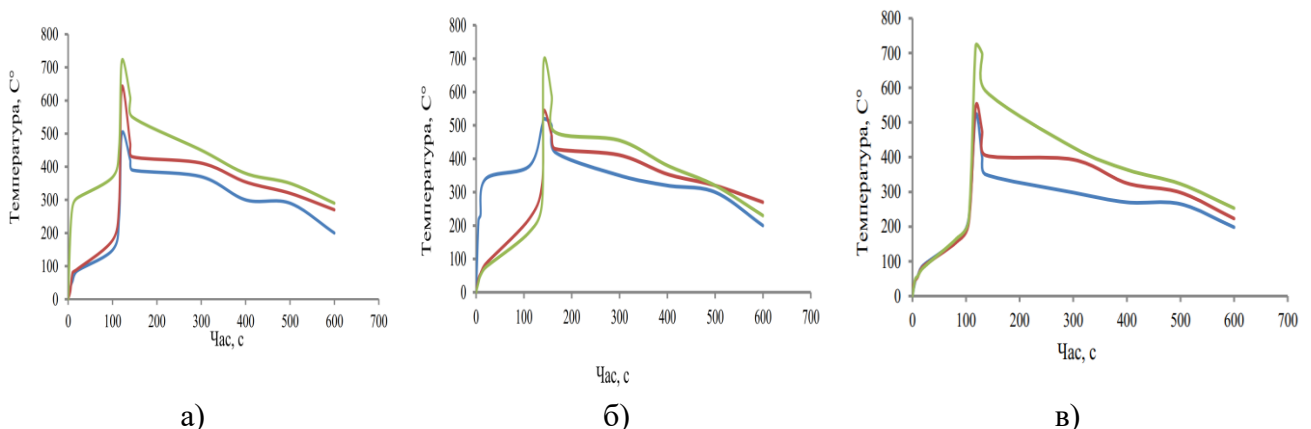


Рисунок 10 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 50%, просторово розміщених до нагрівальної поверхні (**T1, T2, T3**): а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально.

На 113-117 с після початку випробування, температура батареї починає стрімко зростати. Це відбувається при досягненні температури 165-195 °С, що пояснюється бурхливим розвитком термодеструктивного процесу і, як наслідок, генерації великої кількості тепла, яке починає нагрівати батарею зсередини. На 121-125 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, розміщеній над батареєю, з 455-470 °С до 720-736 °С. Температура батареї при цьому становила (на момент відкриття) 263-289 °С. Викид тривав у всіх трьох експериментах орієнтовно 4-6 с. При цьому температура батареї досягла значення близько 553-573 °С на момент закінчення викиду і через 3-5 с стався вибух, при якому температура батареї становила 678-689 °С

Розряджені взірці літій-іонних батарей продемонстрували найбільшу теплову інерційність (рис.11).

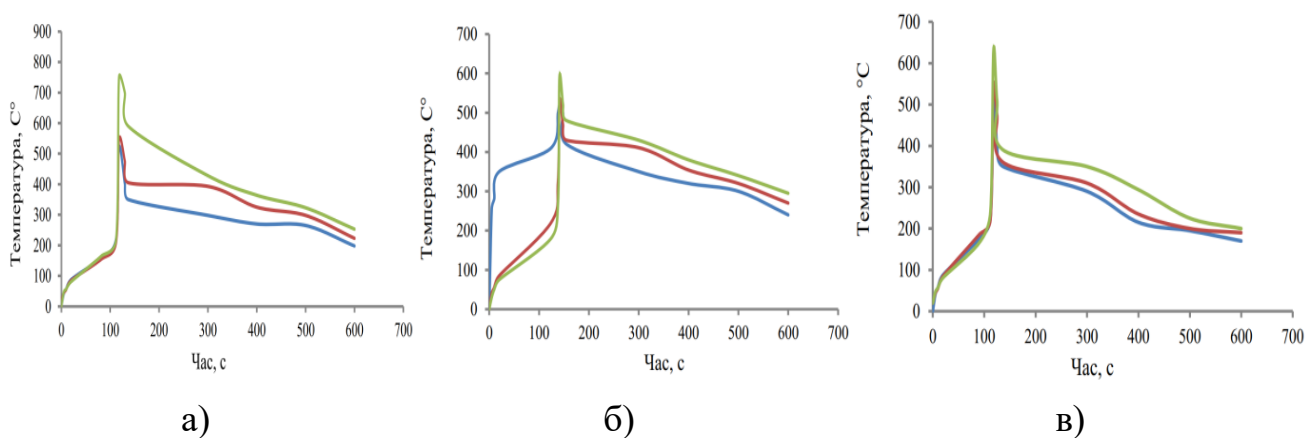


Рисунок 11 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей розряджених, просторово розміщених до нагрівальної поверхні (Т1, Т2, Т3): а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально

Отже при вертикальному розміщенні силової батареї анодом вниз і дії на неї відкритого полум'я модельного вогнища класу В, який забезпечує температурний режим в зоні розміщення батареї 470-500 °С, термодеструктивний процес почався 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°C. Причому температура полум'я над батареєю зростає від 460-480 °С до 620-635 °С. У випадку горизонтального розміщення початок термодеструктивного процесу відбувся на 108-115 с після початку випробування. На 118-121 с від початку випробувань відкрився вентиляційний отвір, з якого почали виходити гази, які горіли. Горіння вентиляційних газів призвели до різкого стрибка температури на термопарі Т3, яка розміщувалась під батареєю з 355-375 °С до 725-735 °С. Це пояснюється викидом та горінням вентиляційних газів струменем вниз, власне на термопару Т3, яка розміщувалась під батареєю.

Наступним етапом було дослідження закономірностей процесів виникнення та розвитку термодеструктивних процесів з використанням джерела тепла без відкритого полум'я. На прикладі елемента живлення, зарядженого на 100% розміщеного вертикально анодом до обігрівальної поверхні, наведено кінограму розвитку термодеструктивного процесу та його горіння рис.12.

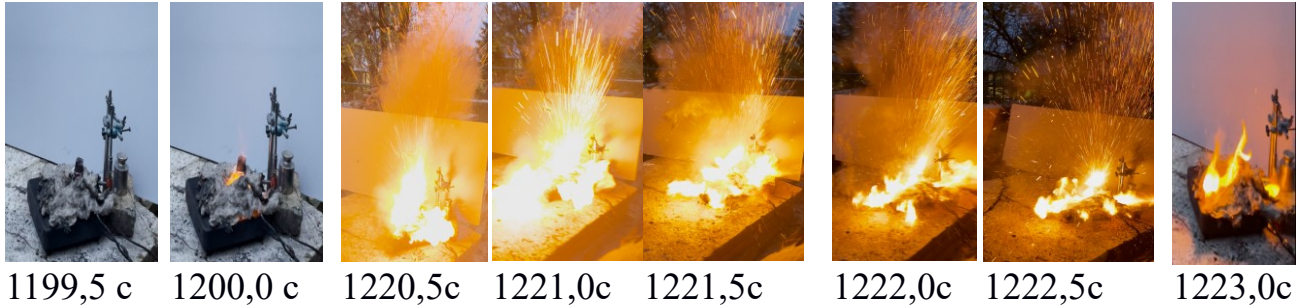


Рисунок 12 – Кінограма розвитку термодеструктивного процесу під дією електронагрівальної панелі

З врахуванням статистичних критеріїв, а також наявність викидів та квазівикидів за критерієм Грабса, оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 100%, наведені на рис. 14. При горизонтальному просторовому розміщенні при досягненні 79-80 °С відбувається стрибок температури до 118-123 °С впродовж 6-7 с, що супроводжується свистом та шумом. Після цього температура батареї продовжує монотонно зростати завдяки роботі електронагрівальної панелі. При досягненні температури 228 °С спрацьовує вентиляційний клапан і йде виділення вентиляційних газів.

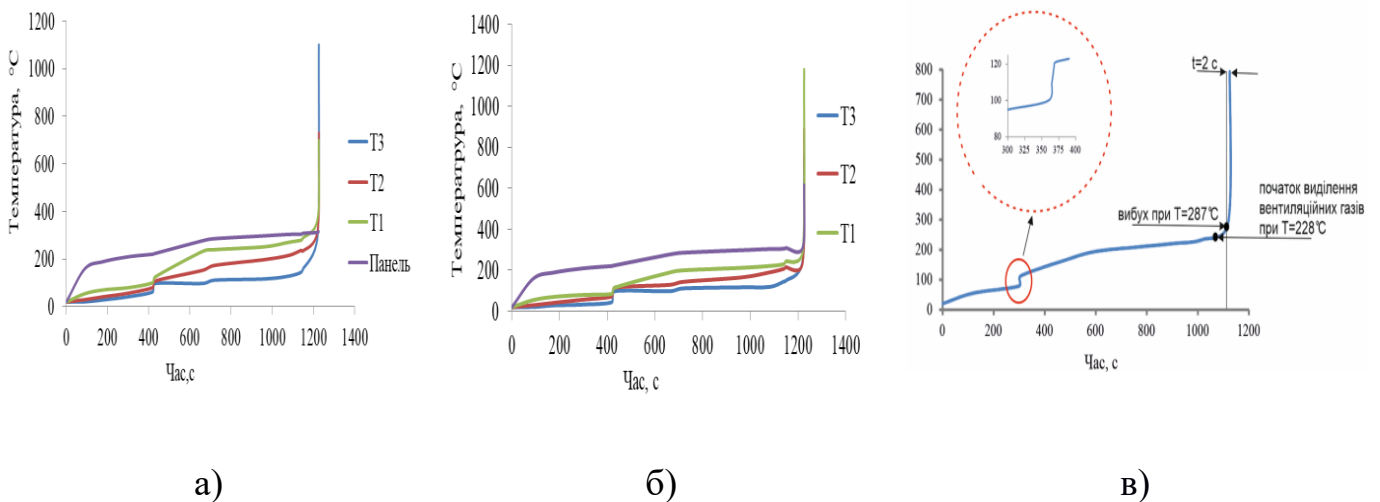


Рисунок 14 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 100%, просторово розміщених до нагрівальної поверхні а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально.

І вже при температурі 287 °С відбувається вибух на 1155 с від початку випробувань, із горінням вентиляційних газів. Це спричиняє зростання температури батареї до 793-810 °С впродовж 3 с. Натомість при горизонтальному просторовому

розміщення катодом до нагрівальної поверхні вибух та горіння відбувається за час, що 9 % більший від вертикального розміщення, а час за якого відбувається плавлення сепаратора, – на 35-40 % більшим. Зменшення заряду дослідних взірців до 50 % призводить до збільшення часу виникнення термодеструктивного процесу на 5-8 % для усіх випадків просторого розміщення. Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 50 %, наведено на рис 15.

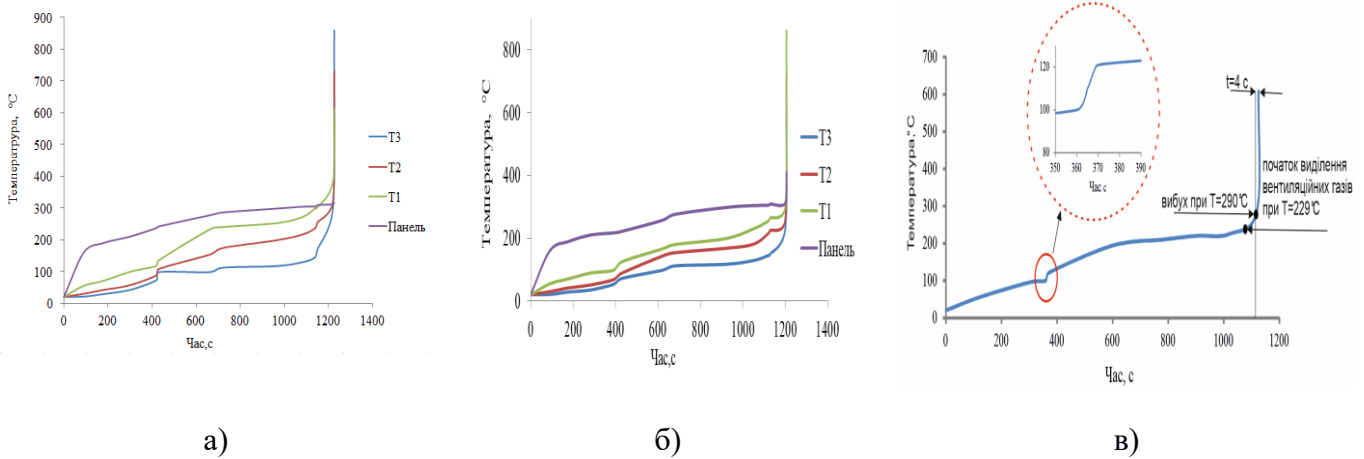


Рисунок 15 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей, заряджених на 50%, просторово розміщених до обігрівальної поверхні а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально.

Варто відмітити, що максимальна температура, яка утворюється при горінні вентиляційних газів, також зменшується на 25%–35%. У цьому випадку горизонтального просторового розміщення при досягненні температури 229 °C спрацьовує вентиляційний отвір і йде виділення вентиляційних газів. І вже через 45-50 с при досягненні температури 290 °C відбувається вибух із горінням газів. Розрядженні взірці літій-іонних батарей продемонстрували найбільшу інерційність (рис.16). Час виникнення термодеструктивного процесу є більшим на 15-21 % порівнянно із відповідним просторовим розміщенням заряджених батарей.

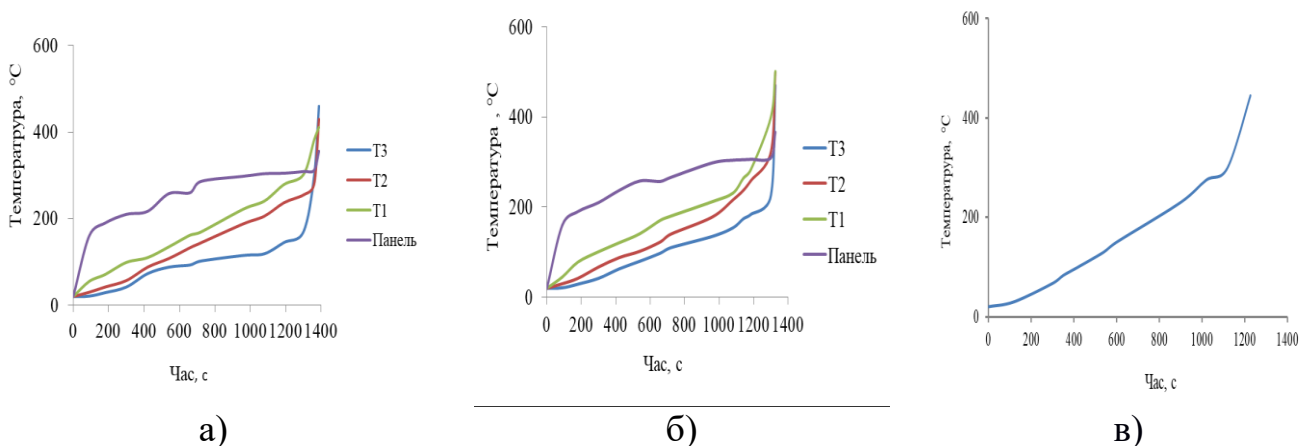


Рисунок 16 – Оброблені результати динаміки зміни температури літій-іонних батарей розряджених просторово розміщених до обігрівальної поверхні а) вертикально анодом; б) вертикально катодом; в) горизонтально.

Варто відзначити, що у цьому випадку викид вентиляційних газів не супроводжувався горінням, причому ріст температури становив для горизонтального розміщення – 420 °С, а для вертикального розміщення – 450-490 °С.

У наступній серії експериментів дослідженню піддавались модулі силових літій-іонних батарей. Кінограма розвитку термодеструктивного процесу в літій-іонному модулі зі ступенем заряду 50 % приведено на рисунку 17.



Рисунок 17 – Кінограма розвитку термодеструктивного процесу у модулі з ступенем заряду 50%

Аналіз отриманих даних показав, що максимальна температура літій-іонних елементів під час розвитку термодеструктивного процесу у складі модуля є на 90-110 °С вищою ніж при дослідженні окремо взятого елемента.

Подальші екстремуми температури характеризують розвиток термодеструктивних процесів сусідніх елементів, які мали стохастичний характер. При цьому температура на поверхні модуля становила понад 470 °С (рис. 18).

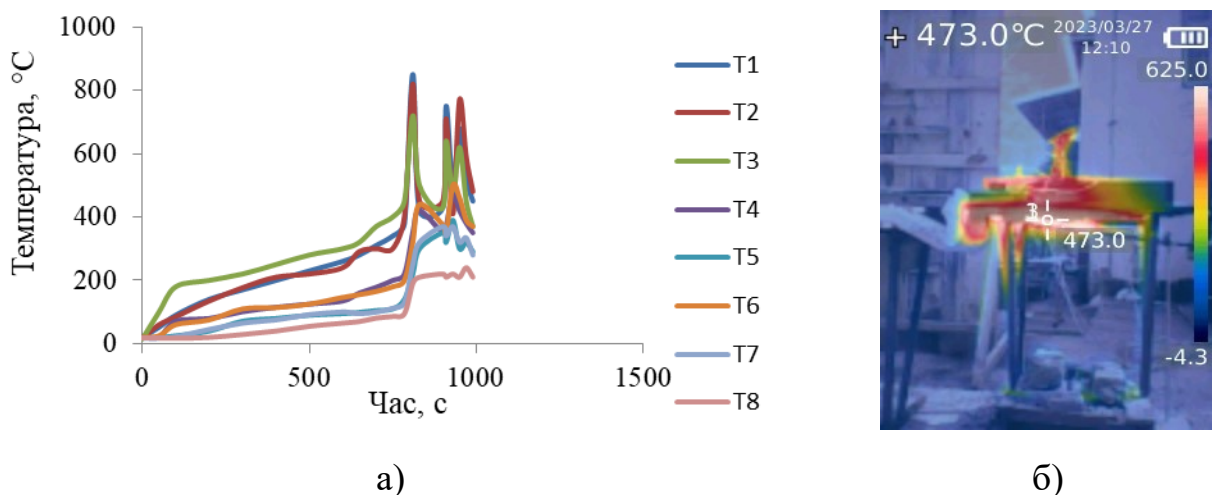


Рисунок 18 – Динаміка зміни температури літій-іонних елементів під час розвитку термодеструктивних процесів у складі модуля зі ступенем заряду 50% (а); візуалізація температурних полів у модулі (б)

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.

Таблиця 3 – Узагальнені результати перевірки адекватності проведених серій досліджень із виявлення закономірностей виникнення і перебігу термодеструктивних 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

Таким чином, абсолютні відхилення між середніми значеннями експериментальних досліджень та кожною серією досліджень не перевищують 30,5 °C для відкритого полум'я та 12,5 °C для електронагрівальної панелі, що становить не більше 16,4 % та 10,0 % у відсотковому вираженні. Середньоквадратичні відхилення знаходяться в межах 34,5÷54,7 °C для відкритого полум'я та 10,6÷19,6 °C для електронагрівальної панелі. Це вказує на те, що результати кожного

експерименту є максимально наближеними до середніх значень, підтверджуючи загальну збіжність даних кожного окремого експериментального дослідження.

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 із гасіння зазначених об'єктів. Згідно із методикою проведення експериментального дослідження, гасіння модуля відбувалось після спрацювання сумарно 40-50 елементів, що становить 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 такими вогнегасними речовинами: вогнегасний порошок загального призначення, вуглекислота, повітряно-механічна піна низької кратності та дрібнорозпилена вода з сольовими добавками відповідно.

На підставі експерименту встановлено, що гасіння літій-іонного модуля з використанням переносного вогнегасника ВВК-5 є найменш ефективним серед інших досліджуваних вогнегасників. Відновлення полум'яного горіння відбувається вже через 3-4 с після закінчення подачі вуглекислоти в осередок горіння. Під час застосування переносного вогнегасника ВП-5(з) полум'яне горіння досліджувального модуля відновлювалось через 18-20 с. Бажаний ефект гасіння досягнутий завдяки застосуванню повітряно-механічної піни низької кратності з вогнегасника ВВП-5, а також розпиленої води з сольовими добавками з вогнегасника ВВ-5(з). Переносні водопінні та водяні вогнегасники з зарядом вогнегасних речовин по 4 кг (ВВП- 4(з), ВВ- 4(з)) за умов проведення експерименту не справились із гасінням.

У шостому розділі «Розроблення комп'ютерної газогідродинамічної моделі та оцінка її адекватності» наведено результати досліджень щодо розроблення газогідродинамічної моделі, що відтворює умови натурних випробувань згідно з розробленою Програмою експериментальних досліджень елементів та модулів літій-іонних батарей електромобілів. Реалізація такої моделі дала змогу здійснити комплексний підхід до можливості прогнозування виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у літій-іонних елементах батарей електромобілів залежно від варіювання чинників, які на це впливають.

Під час створення газогідродинамічної комп'ютерної моделі забезпечено відтворення конструктивних та масштабних параметрів конструкції електронагрівальної панелі. На рисунку 19 зображено візуалізацію відтвореного фрагмента дослідної установки та зовнішній вигляд створеної її FDS-моделі. Щоб забезпечити виконання розрахункових операцій було визначено зону створення розрахункової сітки моделі, в межах якої проводилися обчислення тепломасопереносу.

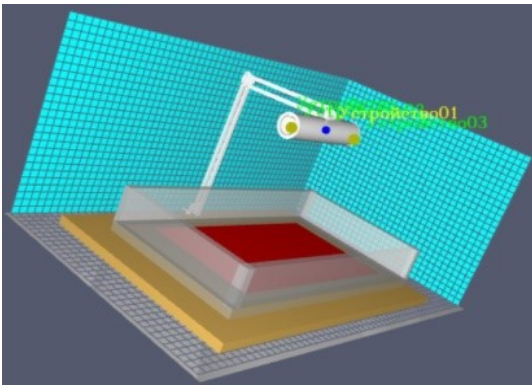


Рисунок 19 – Відтворення
натурного експерименту
у середовищі FDS

Для цього був розроблений відповідний чисельний алгоритм, який дозволяє моделювати цей процес з урахуванням змін ступеня заряду та просторового розміщення досліджуваних взірців. Для моделювання натурних досліджень було прийнято такі розміри комірок розрахункової сітки: $0,02 \text{ м} \times 0,02 \text{ м} \times 0,02 \text{ м}$, що складає загалом 33 600 розрахункових комірок.

Під час створення моделі джерела тепла задавались розміри та потужності, ідентичні як при проведенні натурних

випробувань, а саме: для вогневого впливу квадратне деко із стороною 12,5 см, що відповідає площі дзеркала дека діаметром 14 см. Перехід з круглої на прямокутну форму зумовлений особливостями розрахункових процесів програми FDS, яка вимагає кубічну форму розрахункових комірок. Під час моделювання приймалось, що уся електрична енергія, яка є акумульована в батареї, перетворюється у теплову енергію.

Компоненти батареї, які були враховані при моделюванні, та їх масова частка наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Матеріал компонентів LIB та їх масова частка

Складник батареї	Матеріал	Масова частка, %
Анод	Графіт	20,8
Катод	$\text{LiNi}_x \text{Co}_y \text{Al}_z \text{O}_2$	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

За результатом проведених розрахункових дій та експериментальних досліджень, та з метою визначення збіжності результатів для FDS-моделі та натурного експерименту побудовано графіки порівнянь для кожної термопари. Приклад результатів порівнянь для температури силових літій-іонних батарей, заряджених на 100% та просторово розміщених вертикально анодом до полум'я для термопар: а) T1, б) T2, в) T3, наведено на рис 20.

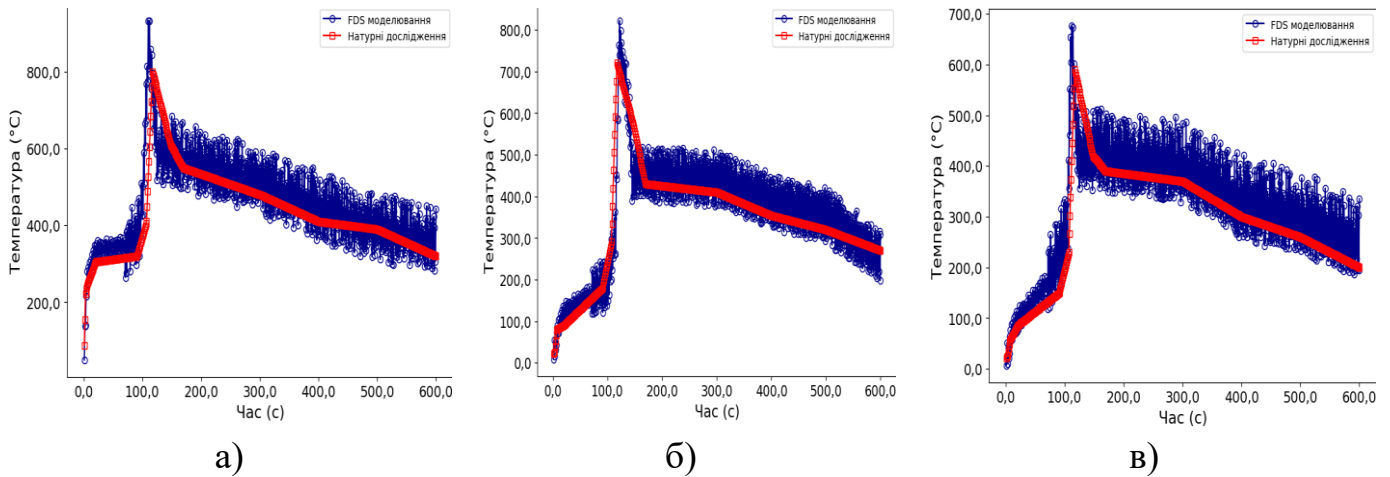


Рисунок 20 – Порівняння результатів експериментальних досліджень створеної газогідродинамічної моделі та натурних досліджень температури силових літій-іонних батарей від часу, заряджених на 100% і просторово розміщених вертикально анодом до модельного вогнища для термопар: а) T1, б) T2, в) T3

За результатом проведених обчислень, встановлено, що середнє абсолютне відхилення між результатами отриманими з використанням створеної газогідродинамічної моделі та натурального експерименту у випадку використання модельного вогнища пожежі, не перевищують 79,2 °С, а відносне відхилення – 14,2 %.

Наступним етапом верифікації розробленої газогідродинамічної моделі для термодеструктивних процесів у літій-іонних елементах батарей електромобілів під дією джерела тепла без відкритого полум'я є дослідження та порівняння температурних розподілів, отриманих на основі створеної комп'ютерної моделі, та експерименту за аналогічних умов дослідження.

Візуалізація відтвореного фрагмента дослідної установки та зовнішній вигляд створеної її FDS-моделі наведено на рисунку 21.

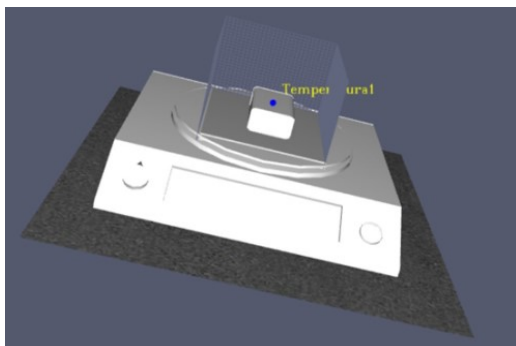


Рисунок 21 – Відтворення натурального експерименту у середовищі FDS

За результатом проведених розрахункових дій та експериментальних досліджень і з метою визначення збіжності результатів для FDS-моделі та натурального експерименту, побудовані графіки порівнянь для кожної термопари. Приклад результатів порівнянь для температури силових літій-іонних батарей заряджених на 100% і просторово розміщених вертикально анодом до електронагрівальної панелі для термопар: а) T1, б) T2, в) T3 наведено на рисунку 22.

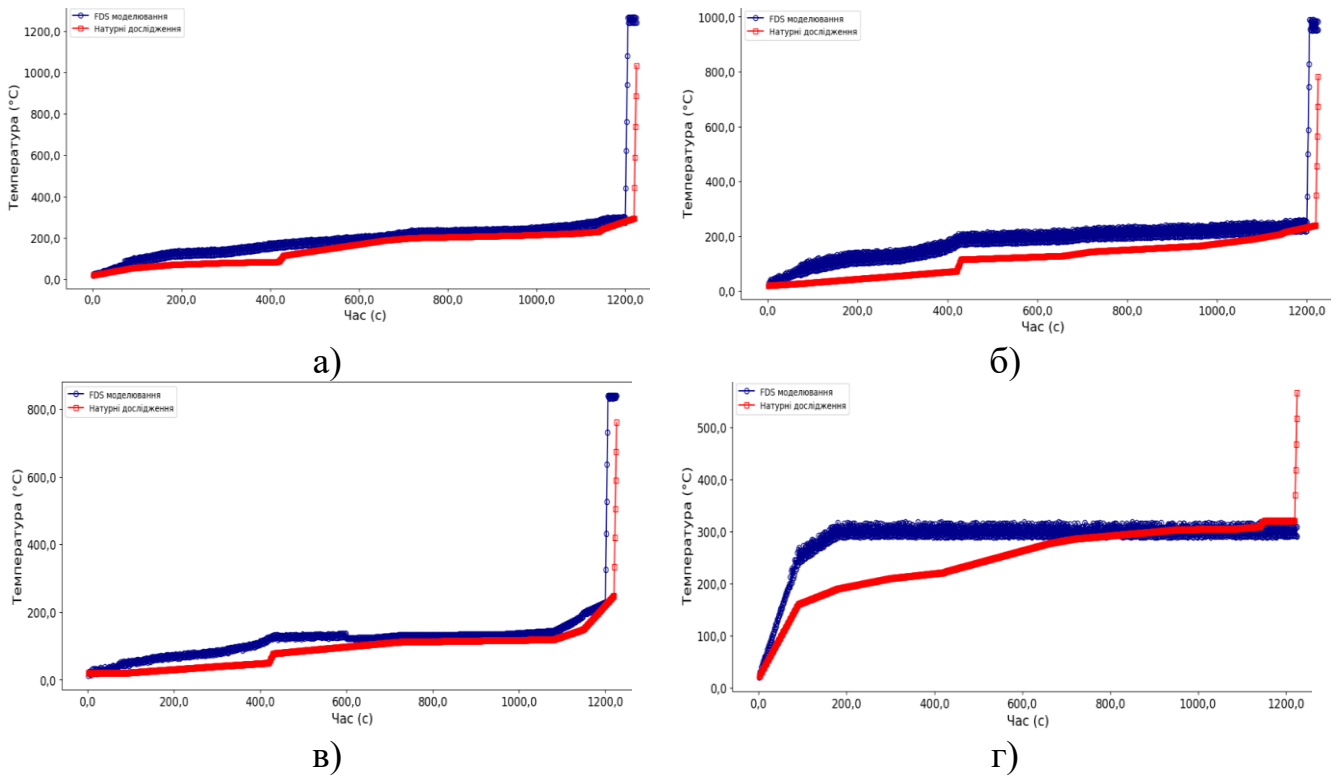
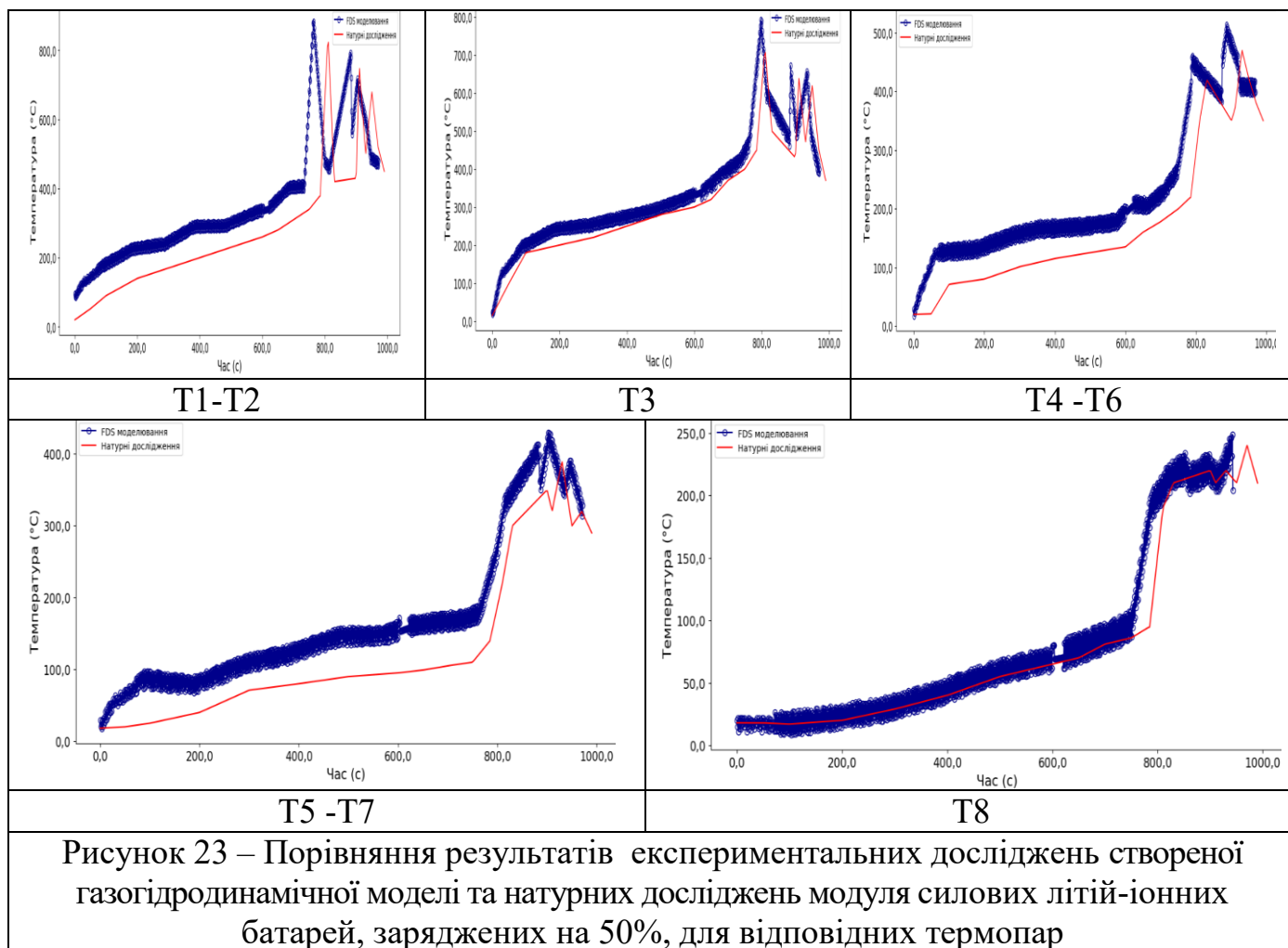


Рисунок 22 – Порівняння результатів експериментальних досліджень створеної газогідродинамічної моделі та натурних досліджень температури силових літій-іонних батарей заряджених на 100% і просторово розміщених вертикально анодом до електронагрівальної панелі для термопар: а) T1, б) T2, в) T3 г) T4

За результатом проведених обчислень, встановлено, що середнє абсолютне відхилення між результатами, отриманими з використанням створеної газогідродинамічної моделі та натурального експерименту у випадку використання модельного вогнища пожежі не перевищують $45,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносне відхилення – $9,8\%$.

Верифікація розробленої газогідродинамічної моделі для термодеструктивних процесів у літій-іонних модулях силових батарей електромобілів під дією джерела тепла з відкритого полум'я приведена на рисунку 23, де накладені температурні параметри, отримані внаслідок FDS моделювання та натурального експерименту за аналогічних умов.

Аналіз результатів дослідження показує, що температурні параметри отримані з використанням розробленої газодинамічної моделі є на $30\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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 $65,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносне – $12,9\%$ у порівнянні із натурним експериментом. 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.



Тому можна підсумувати, що комп'ютерне моделювання виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях дає прийнятну точність результатів і може бути використане для дослідження зв'язків параметрів силових літій-іонних батарей на час виникнення розвитку термодеструктивних процесів в них, а також температурних параметрів, які ці процеси описують.

У цьому розділі «Розроблення методичного забезпечення для розрахункової оцінки часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів» з врахуванням даних, отриманих на підставі розробленої газогідродинамічної моделі проведений повнофакторний експеримент. Висунута гіпотеза, що час виникнення термодеструктивного процесу відображається лінійною залежністю від найбільш значущих чинників, таких як: тип матеріалу катода (Т), заряд батареї (к), тепловий потік (q) та ємність літій-іонної батареї (с). Тепловий потік приймався для випадку відкритого полум'я та без нього.

З огляду на лінійну залежність гіпотези, її математична модель виражається рівністю:

$$\tau = \sigma_0 + \sigma_1 X_1 + \sigma_2 X_2 + \sigma_3 X_3 + \sigma_4 X_1 X_2 + \sigma_5 X_1 X_3 + \sigma_6 X_2 X_3 + \sigma_7 X_1 X_2 X_3, \quad (11)$$

де τ – час виникнення термодеструктивного процесу, c ; $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7$ – коефіцієнти регресії.

Коефіцієнти регресії отримано за результатами числових експериментів згідно із план-матрицею проведення експерименту, яка зображена у вигляді таблиці 5.

Таблиця 5 – Матриця планування повнофакторного експерименту для побудови математичної моделі

Номер експерименту	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Інтервали діапазонів, в межах яких змінювались фактори під час числового повнофакторного експерименту для відтворення математичної моделі, наведені у таблиці 6.

Таблиця 6 – 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, k_-	Середнє значення, k_0	Найбільше значення, k_+	Найменше значення, q_-	Середнє значення, q_0	Найбільше значення, q_+	Найменше значення, q_-	Середнє значення, q_0	Найбільше значення, q_+
			Відкрите полум'я			0	50	100	100	200	300
Без полум'я			0	50	100	10	20	30	30	60	90

Варіюючи факторами, які зазначені в таблиці 6, та враховуючи план-матриці повнофакторного експерименту, отримано числові значення часу виникнення термодеструктивного процесу у силовій літій-іонній батареї електричних колісних транспортних засобів. Узагальнені результати експерименту на прикладі силовій літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCA наведено у таблиці 7.

Таблиця 7 – Час виникнення термодеструктивного процесу у силівій літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCA

	1	2	3	4	5	6	7	8
Відкрите полум'я	211	247	778	1094	136	153	631	745
Без полум'я	2129	2347	10153	11157	1344	1462	6380	7071

За результатом повнофакторного експерименту, враховуючи дані таблиці 1 та 2, отримано залежності впливу кожного із факторів на час виникнення термодеструктивного процесу у силівій літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCA при дії теплового потоку, створеного відкритим полум'ям, наведено на рисунку 24.

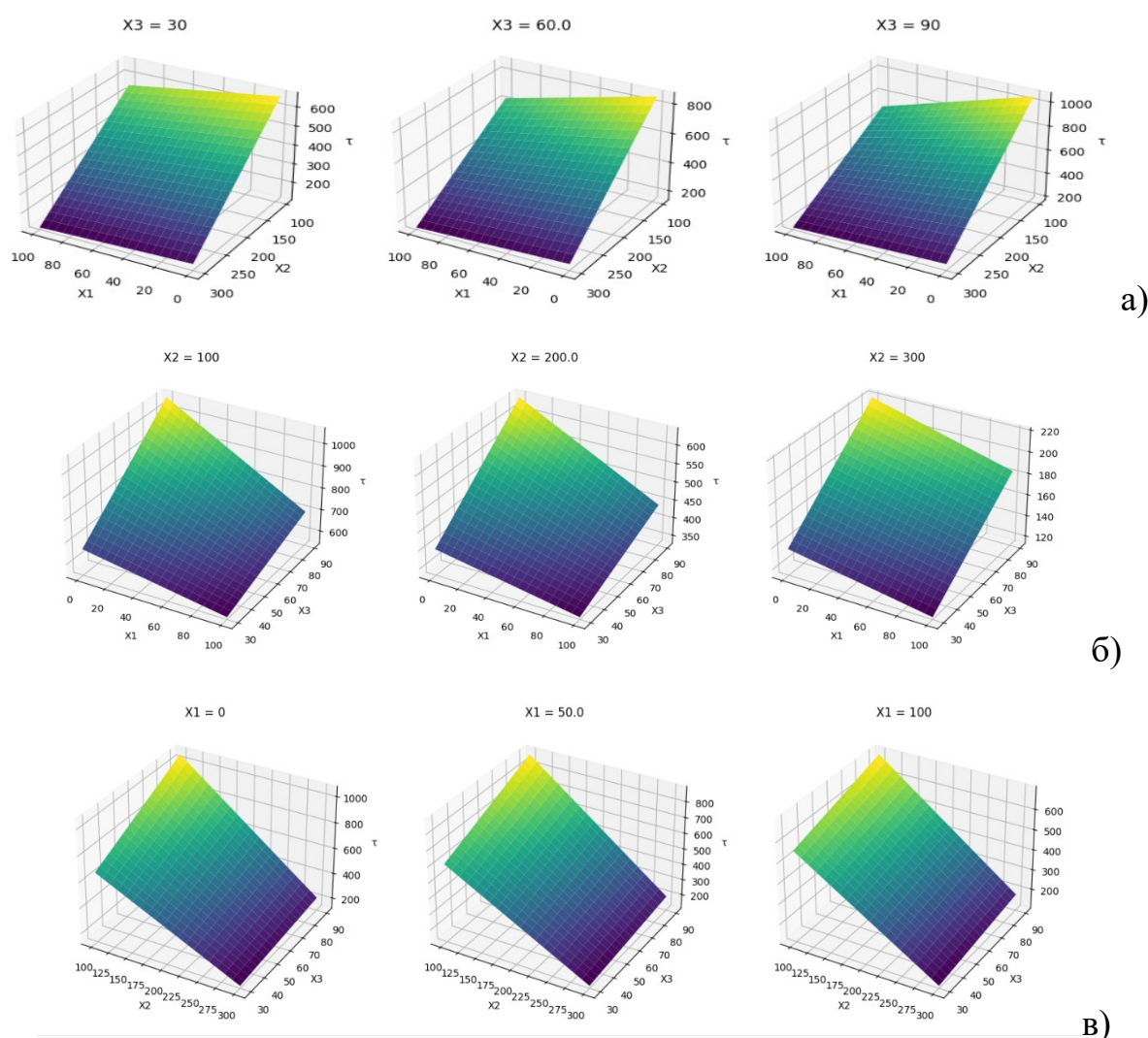


Рисунок 24 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодом NCA за умови впливу відкритого полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів

У випадку створення теплового потоку без відкритого полум'я вплив досліджуваних факторів на час виникнення термодеструктивного процесу матиме вигляд, зображений на рис. 25.

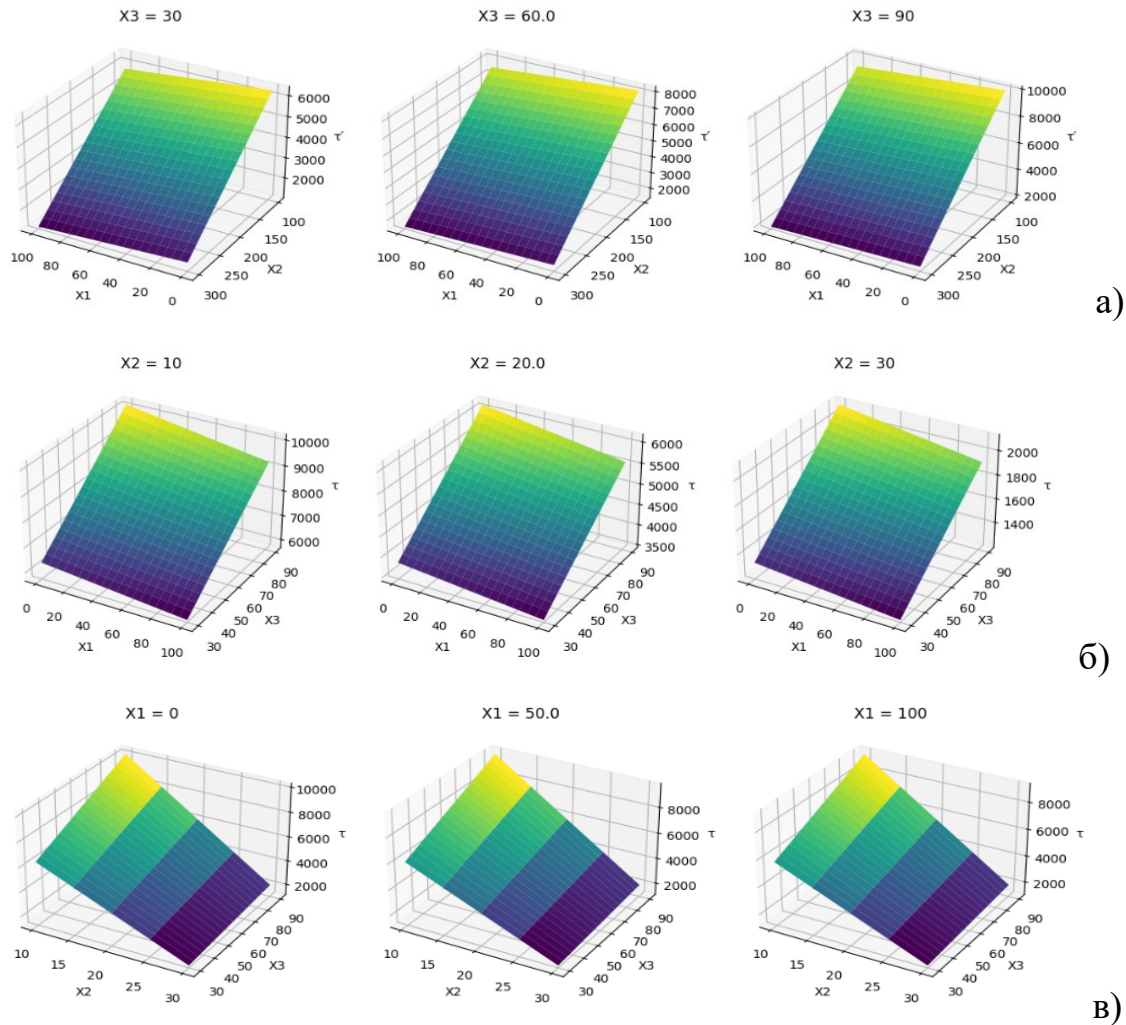


Рисунок 25 – Дисперсія часу виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонних батареях з катодним матеріалом NCA за умови впливу теплового потоку без відкритого полум'я при: а) сталій ємності (фактор 3) та варіації інших факторів; б) сталій густині теплового потоку (фактор 2) та варіації інших факторів; в) сталому ступеню заряду (фактор 1) та варіації інших факторів

Отримані коефіцієнти регресії для обчислення часу виникнення термодеструктивних процесів на прикладі літій-іонних батарей з катодним матеріалом NCA наведено у таблиці 8.

Таблиця 8 – Константи рівняння числової регресії для літій-іонної батареї з катодним матеріалом 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

Аналогічно були отримані константи числової регресії для літій-іонної батареї з катодними матеріалами NCM та LFP. За результатом опрацювання всіх даних виявлено закономірність залежності часу виникнення термодеструктивного процесу від найбільш значущих параметрів: типу матеріалу катода (T), заряду батареї (k), теплового потоку (q) та ємності літій-іонної батареї (c). Для усіх типів досліджуваних літій-іонних батарей регресійні залежності матимуть вигляд:

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

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

$$\tau_{\text{NCA}} = 453 - 66 \cdot k - 286 \cdot q + 86 \cdot c + 51 \cdot k \cdot q - 32 \cdot k \cdot c - 49 \cdot q \cdot c + 29 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (3)$$

$$\tau_{\text{NCA}'} = 4750 - 225 \cdot k - 3112 \cdot q + 1096 \cdot c + 147 \cdot k \cdot q - 51 \cdot k \cdot c - 717 \cdot q \cdot c + 34 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (4)$$

$$\tau_{\text{LFP}} = 540 - 75 \cdot k - 329 \cdot q + 103 \cdot c + 59 \cdot k \cdot q - 46 \cdot k \cdot c - 55 \cdot q \cdot c + 36 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (5)$$

$$\tau_{\text{LFP}'} = 5520 - 249 \cdot k - 3612 \cdot q + 1276 \cdot c + 177 \cdot k \cdot q - 78 \cdot k \cdot c - 848 \cdot q \cdot c + 31 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (6)$$

де τ_{NCM} – час виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCM при тепловому потоці що створений відкритим полум'ям; $\tau_{\text{NCM}'}$ – час виникнення термодеструктивного процесу у літій-іонній батареї з катодним матеріалом NCM (далі за аналогією) при тепловому потоці що створений без відкритого полум'я.

Усереднений коефіцієнт детермінації для усіх отриманих регресійних залежностей становить 0,998, що добре відтворює варіацію τ .

У таблиці 9 наведено розроблений науково-методичний апарат, що дозволяє визначити часові умови виникнення термодеструктивних процесів при заданих параметрах силових літій-іонних батарей електромобілів та густині теплового потоку. Використовуючи обґрунтовані критерії, які впливають на виникнення та розвиток термодеструктивних процесів, дані натурних експериментальних досліджень, а також комп'ютерного моделювання, постало завдання систематизувати взаємозв'язки чинників, що впливають на такі процеси, та реалізувати параметричний метод, який би обґрунтовував час виникнення термодеструктивного процесу у силових літій-іонних батареях.

Таблиця 9 – Визначення часу виникнення термодеструктивного процесу (хв) у силових літій-іонних батареях з різним катодним матеріалом

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 випуску
		<100	100-200	>200	<10	10-20	>20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NCM								
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	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
60-90	50-75	15,9	10,9	5,2	178,2	119,4	60,6	Nissan Leaf Plus (2019-т.ч.)
	>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.)
	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	Ford Mustang Mach-E (2020-т.ч.)
	>75	16,1	11,1	6,0	210,9	141,4	71,8	
NCA								
60-90	<25	17,1	11,5	5,8	168,5	112,8	57,1	Tesla Model 3, S, Y (2018-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	Audi e-tron (2018- т.ч.)
	>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	
LFP								
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	
	50-75	17,1	11,7	6,3	187,6	125,6	63,4	XPeng P7 (2020- т.ч.)
	>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	Nio ET7 (2022-т.ч.) Rivian R1S (2022- т.ч.)
	25-50	22,7	15,5	8,3	236,3	158,2	80,1	
	50-75	19,9	13,7	7,5	229,7	153,7	77,7	
	>75	17,1	11,9	6,7	223,1	149,1	75,4	

Для створення методу розрахункової оцінки часу виникнення та розвитку термодеструктивного процесу у силових літій-іонних батареях використовувались регресійні залежності, описані у сьомому розділі.

З метою реалізації табличного методу розрахунку часу виникнення термодеструктивного процесу у силових літій-іонних батареях з різним катодним матеріалом за різних умов просторового розміщення літій-іонних батарей відносно джерела тепла розроблено додаткову таблицю 10 із значеннями безрозмірних емпіричних коефіцієнтів α (чисельник) та β (знаменник), які враховують просторове розміщення літій-іонної батареї відносно джерела теплового потоку.

Таблиця 10 – 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	Ступінь заряду, %		
	0	50	100
Вертикальне анодом до джерела	<u>1,07</u>	<u>1,09</u>	<u>1,12</u>

теплового випромінювання	1,02	1,05	1,08
Вертикальне катодом до джерела теплового потоку	<u>1,29</u> 1,05	<u>1,28</u> 1,10	<u>1,21</u> 1,12

Емпіричні коефіцієнти ϵ буде враховувати просторову зміну розміщення літій-іонної батареї відносно джерела випромінювання для теплового потоку який створений відкритим полум'ям, а також емпіричний коефіцієнт та λ , – при тепловому потоці без відкритого полум'я.

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. 26).

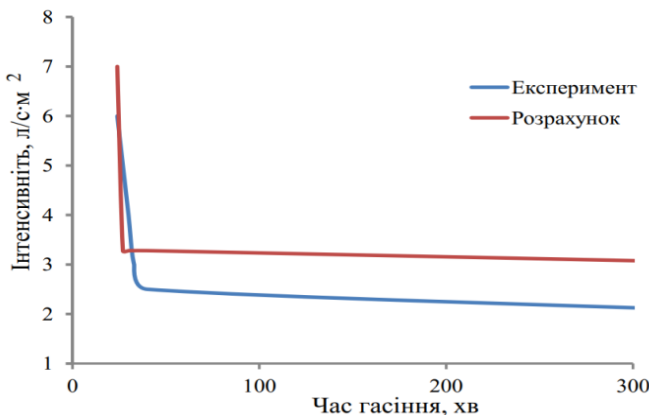


Рисунок 26 – Критична інтенсивність подачі змочуючого розчину або розпиленої води з сольовими добавками для гасіння літій-іонних модулів силових батарей електромобілів з катодним матеріалом NCA

Для літій-іонних батарей з катодним матеріалом NCA розрахункова критична інтенсивність для площі пожежі 1 м^2 становить $3,28 \text{ л/с}$, що є на 13% більше, порівняно з експериментальною інтенсивністю, яка становить $2,5 \text{ л/с}$. 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 наведені у таблиці 11.

Таблиця 11 – 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 $\text{л/с}\cdot\text{м}^2$		
	Розрахункова	Експериментальна	Уточнена
NCM	2,72	-	2,2
NCA	3,28	2,5	2,5
LFP	2,14	-	1,7

Також з метою контролю температури силової літій-іонної батареї

електромобілів розроблено алгоритм роботи максимально-динамічного датчика температури, який змінював би значення мінімальної статичної температури спрацювання датчика температури (ДТ) та значення швидкості підвищення

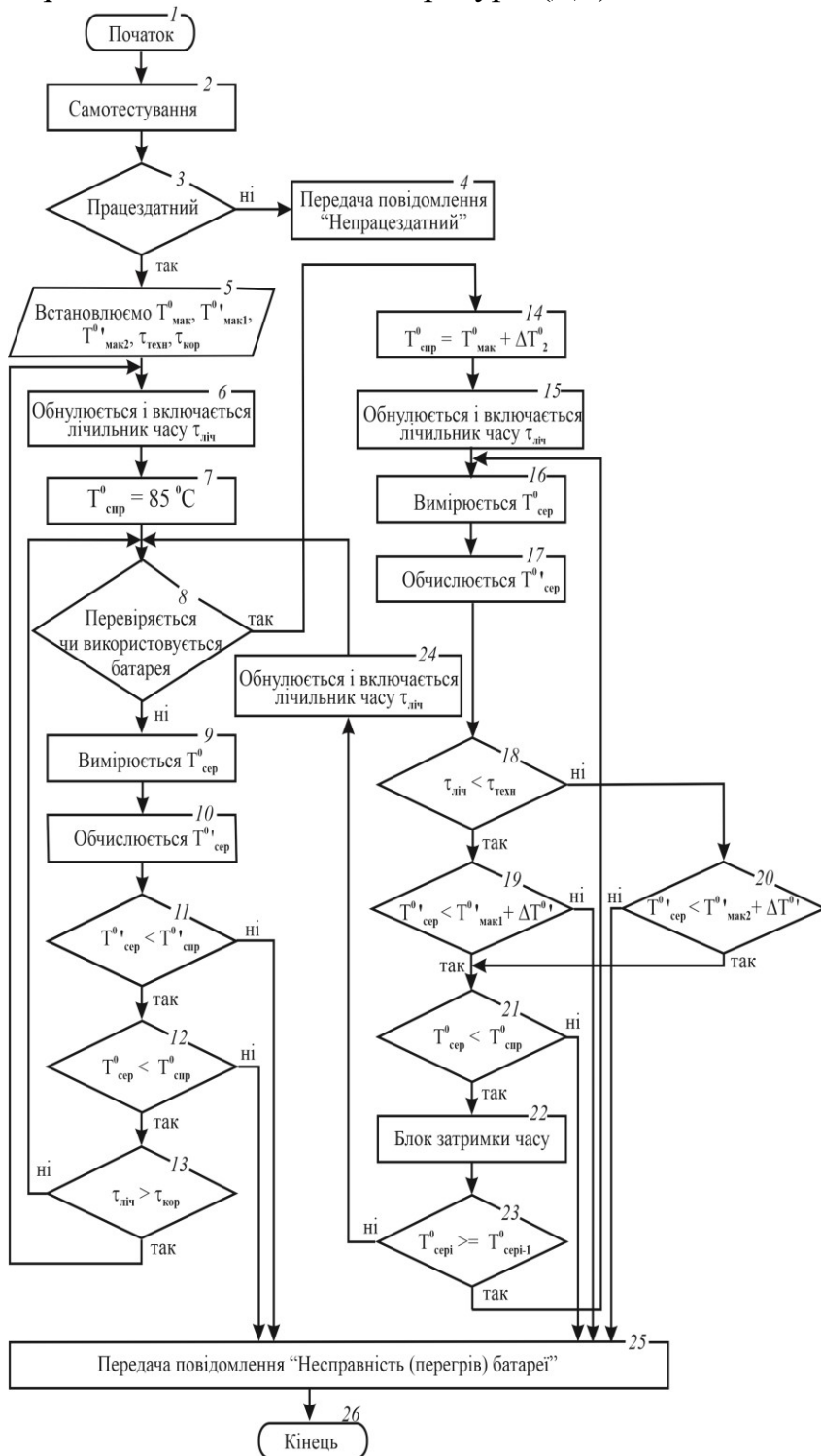


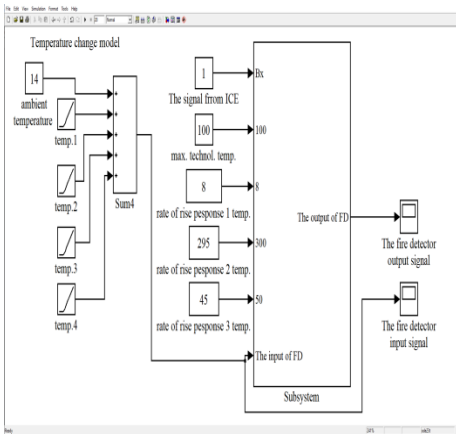
Рисунок 27 – Блок-схема алгоритму роботи максимально-динамічного датчика температури із змінними параметрами спрацювання

також результати моделювання роботи датчика температури за розробленим алгоритмом наведені на рисунку 28.

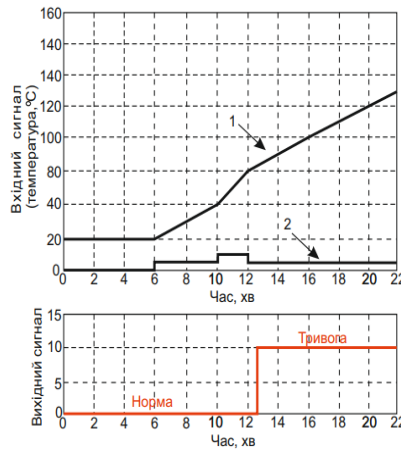
температури його спрацювання, залежно від температурних впливів навколишнього середовища, внаслідок режимів роботи (заряджання/розряджання) силової літій-іонної акумуляторної батареї, автоматично змінює значення мінімальної статичної температури спрацювання ПС та значення швидкості підвищення температури його спрацювання.

Це дозволить зняти навантаження з силової батареї шляхом припинення експлуатації електричного транспортного засобу або від'єднання його від зарядної станції та запобігти руйнуванню (плавленню) сепаратора, що збереже не лише технічні характеристики батареї, але й запобіжить виникненню термодеструктивного процесу в ній.

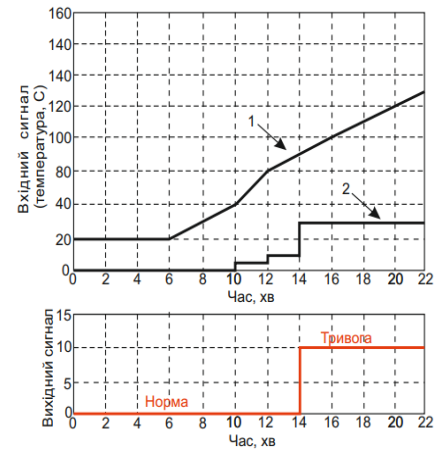
В пакеті Simulink програмного середовища MATLAB розроблена та досліджена модель алгоритму роботи ДТ із змінними параметрами спрацювання на основі блок-схеми (рис. 28) та модель зміни температури. Вікно з розробленими моделями в пакеті Simulink а



а)



б)



в)

Рисунок 28 – Зовнішній вигляд моделі алгоритму роботи датчика температури у пакеті Simulink середовища MATLAB а); результати моделювання роботи датчика температури за розробленим алгоритмом наведені за критерієм: максимальної температури б); швидкості зростання температури в)

Із використанням алгоритму роботи датчика температури розроблено систему аварійно відключення силової батареї електромобіля. Коли датчик температури 2, 3 (рис. 29) фіксують понаднормове підвищення температури, тоді формується і передається сигнал через вогнестійкі провідники 9 на блок керування 6. Після цього блок керування 6 замикає контакти і струм від акумуляторної батареї електромобіля (не силової) через вогнестійкі 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 під дією сили тяжіння (тобто власної маси) на дорожнє покриття. Також передбачена можливість аварійного від'єднання силової літій-іонної акумуляторної батареї у разі подачі струму (12 В) до роз'єму рятувальників 7.

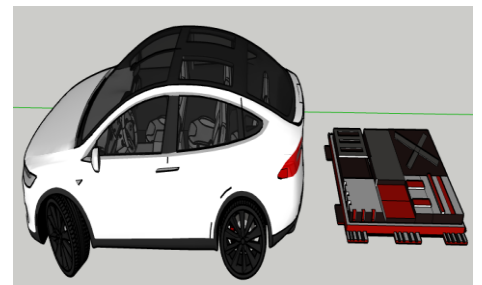
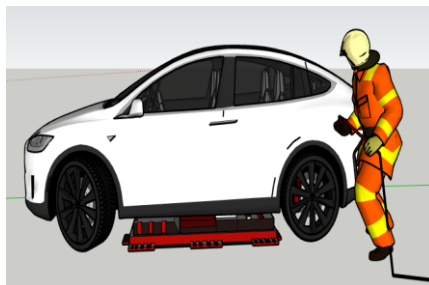
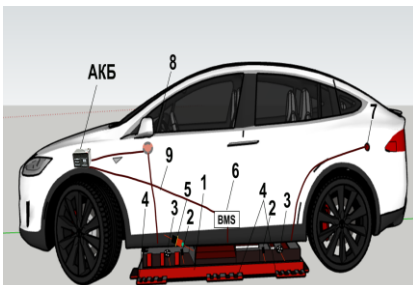


Рисунок 29 – Візуалізація використання запропонованої системи аварійно відключення силової батареї електромобіля

Для гасіння силових АКБ розроблено та запропоновано ствол-пробійник, який забезпечує подачу обґрунтованої вище інтенсивності вогнегасної речовини.

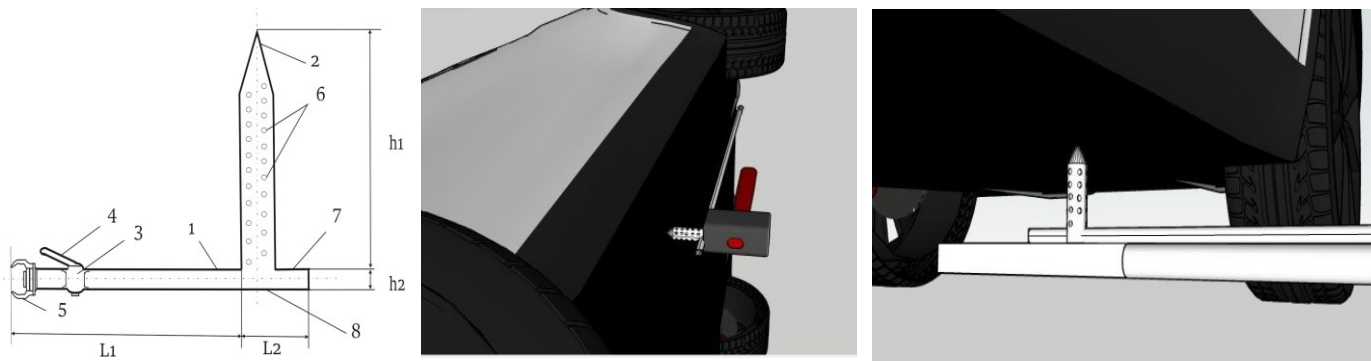


Рисунок 30 – Візуалізація використання запропонованого ствола-пробійника для гасіння силових літій-іонних батарей електромобілів

Таким чином, на підставі комплексу теоретичних та експериментальних досліджень розроблено низку технічних рішень, які забезпечуватимуть протипожежний захист електричних колісних транспортних засобів шляхом контролю температури силової літій-іонної батареї електромобіля із застосуванням розробленого та апробованого алгоритму роботи датча температури, доступу рятувальників до аварійної силової батареї з використанням запропонованої системи її аварійно відключення, а також застосуванням ствола-пробійника та обґрунтованої критичної інтенсивності подачі вогнегасних речовин для ефективного гасіння зазначених об'єктів.

ВИСНОВКИ

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 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. З використанням розробленої гідродинамічної моделі у середовищі FDS, обґрунтовано та визначено температурні розподіли пожежі, внаслідок виникнення займань у силовій акумуляторній батареї та її поширення по електромобілі в найскладніших умовах – закритого паркінгу, а також визначено безпечні протипожежні відстані, які становлять по фронту електромобіля, що горить, 6 м, а по фланзі – 10 м, за умови часу вільного розвитку пожежі 600 с.

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

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

7. Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що температура горіння літій-іонних елементів силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м^2 може змінюватись: зростати з 690°C до 810°C для 100 % заряджених літій-іонних елементів при зміні 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-ферум-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 дає підґрунтя формувати методологію прогнозування пожежної безпеки електромобілів.

11. 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 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 давача температури розроблено систему аварійного відключення силової батареї електромобіля, що створить умови доступу в контексті її гасіння.

**Список публікацій, що
відображають основні наукові результати дисертації**

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

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

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

7. **Гаврилюк А. Ф.**, Лин А. С. Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*. 2017. №31. С. 11–17.
8. **Гаврилюк А. Ф.**, Лемішко М. В. Аналіз еквівалентної паливної ошадливості електромобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2019. №20. С. 85–89.
9. **Гаврилюк А. Ф.**, Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літєвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. №40. С. 31–39.
10. **Гаврилюк А. Ф.**, Яковчук Р. С., Субота А. В. Аналіз пожежної небезпеки витоку водню з електромобілів на паливних елементах. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 47–56.

11. **Гаврилюк А. Ф.** Визначення параметрів і дій при пожежах електромобілів на водневих паливних елементах. *Комунальне господарство міст.* 2023. №1 (175). С.118–124.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

21. **Гаврилюк А. Ф.** Дослідження паливної та 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. Установка автоматичного пожежогасіння електромобілів. *Патент України на корисну модель* №141239 , опубл. 25.03.2020, Бюл. №6.

23. **Гаврилюк А. Ф.**, Домінік А. М., Товаряньський 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 безпечних умовах»*. Київ, 2017. С. 70–73.

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

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

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

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

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

32. **Гаврилюк А. Ф.**, Назаровець О. Б. Застосування мікроструктурного фазового аналізу провідників бортової електромережі транспортних засобів при дослідженні їх загорянь *Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики – запорука*

підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням». Харків, 2019. С. 28–30.

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

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

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

36. **Гаврилюк А.,** Лемішко М. Електромобілі: конструювання та експлуатація *Матеріали Другої Всеукраїнської науково-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.**, 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.

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.

АНОТАЦІЯ

Гаврилюк А. Ф. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів). – Рукопис.

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.

Дисертація присвячена розв’язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – 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.

Обґрунтовано та 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-ферум-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 дає підґрунтя формувати методологію прогнозування пожежної безпеки 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 principles for fire protection of electric road vehicles (electric vehicles). – Manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences in the specialty 21.06.02 – fire safety. Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to solving a current scientific and applied problem in the field of fire safety — revealing the patterns of influence of technical characteristics and design parameters of lithium-ion power batteries on irreversible electro-thermal processes, as well as their combustion processes, which serve as the scientific basis for enhancing the fire protection of electric wheeled vehicles.

The growth in the number of electric wheeled vehicles in the world is one of the key trends in the modern automotive industry. As of 2024, the total fleet of electric vehicles has passed the 40 million mark, which is 8 times more than in 2019, and is projected to reach more than 150 million by 2030. This rapid growth creates new challenges for engineers and scientists in terms of safe operation of electric vehicles.

An analysis of domestic and foreign theoretical and experimental studies, as well as the relevant regulatory framework regarding the assessment and features of the development of fires in electric wheeled vehicles, was conducted. This analysis identified ways to improve prevention and response systems for such incidents, which will enhance the effectiveness of fire protection for these vehicles and their surroundings. Based on the analysis and generalization of technical and physical characteristics, as well as the review of known scientific research, a summary of the main cathode materials used in lithium-ion power batteries for electric wheeled vehicles was made according to their level of fire hazard. This allowed the systematization, generalization, and justification of the criteria base that enables the prediction of conditions for the onset of irreversible electro-thermal processes in lithium-ion power batteries. Methodologies for conducting experimental studies of irreversible electro-thermal processes in elements and modules of lithium-ion batteries in electric vehicles, considering technical and structural parameters as well as the heat flux density of the heating source, were developed and proposed.

Experimental studies were conducted to determine the patterns of influence of the technical parameters of lithium-ion power batteries in electric wheeled vehicles and their spatial placement relative to the heat source on the characteristics of irreversible electro-thermal processes. The research was carried out using an open flame and an electric heating panel. Based on the assessment of discrepancies for each series of experiments, absolute, relative, and root mean square deviations of the average experimental data were determined. The belonging of variances to a single general population of results was verified using Fisher's criterion. Grubbs' test was used to assess the experimental data for outliers and quasi-outliers.

The experimental studies established the patterns of temperature change in the heating of lithium-ion power cells over time, which allow determining the period of separator failure leading to an internal short circuit between the cathode and anode and the time of onset of irreversible electro-thermal processes.

A gas-hydrodynamic model was developed in the Fire Dynamics Simulator environment to replicate the conditions of field tests according to the developed Experimental Research Program for the elements and modules of lithium-ion batteries in electric vehicles. The implementation of this model enabled a comprehensive approach to the possibility of predicting the onset and development of irreversible electro-thermal processes in lithium-ion battery cells of electric vehicles, depending on varying influencing factors.

Using the developed gas-dynamic model in the Fire Dynamics Simulator environment, the temperature distributions of a fire caused by the ignition of a traction battery and its propagation throughout an electric vehicle under the most challenging conditions — specifically, in an enclosed parking facility — were substantiated and determined. Safe fire separation distances were established: 6 meters in the frontal

direction of the burning electric vehicle and 10 meters in the lateral (flank) direction, under the condition of a free-burning fire development time of 600 seconds.

The study investigated the effectiveness of the most common portable fire extinguishers in Ukraine for extinguishing lithium-ion battery modules. Based on the experimental results obtained, recommendations were developed regarding the selection, norms of suitability, and application of portable fire extinguishers. Additionally, a methodology was developed, and the critical intensity of the supply of extinguishing agents by fire and rescue units for extinguishing electric vehicles was determined, depending on the cathode materials of the lithium-ion power battery.

Taking into account the data obtained from the developed gas-hydrodynamic model, a full factorial experiment was conducted. A hypothesis was proposed that the time to onset of an irreversible electro-thermal process is linearly dependent on the most significant factors, such as the type of cathode material, battery charge, heat flux, and capacity of the lithium-ion battery. As a result of the full factorial experiment, dependencies were obtained regarding the influence of technical and structural factors on the time of onset of the irreversible electro-thermal process in lithium-ion power batteries with different cathode materials when subjected to a heat flux generated by an open flame and without it. Using substantiated criteria that influence the onset and development of irreversible electro-thermal processes, data from field experimental studies, as well as computer modeling, a task was set to systematize the interrelationships of factors affecting these processes and to implement a parametric method that would justify the time of onset of the irreversible electro-thermal process in lithium-ion power batteries.

A model of the algorithm for the operation of a thermal fire detector with variable triggering parameters was developed and studied in the Simulink package of the MATLAB software environment. Using the temperature sensor algorithm, a system for emergency shutdown of the electric vehicle's power battery was developed, and a breaker nozzle was proposed along with a justification for the intensity of extinguishing agent delivery.

Based on a complex of experimental and theoretical scientific research, a scientific-methodical apparatus was developed. This apparatus is a system that combines developed methodologies for field tests, models using computational gas hydrodynamics, and a tabular method for determining the time of onset of irreversible electro-thermal processes in lithium-ion batteries with different cathode materials, serving as a scientific basis for enhancing the effectiveness of fire protection in electric wheeled vehicles.

Key words: fire safety, electric vehicle fire, electric vehicle fire protection, lithium-ion battery, thermdestructive process, cathode, temperature, heat flow, fire.