

ВІДГУК

опонента, доктора технічних наук, професора БОЛІБРУХА Бориса Васильовича на дисертацію ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича «Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)», яку подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (261 – пожежна безпека)

Актуальність теми. У зв'язку зі зростаючим попитом електромобілів у світі, питання безпечної їх експлуатації стає пріоритетним у дослідницьких та інженерних товариствах. Попри численні переваги електромобілів – від екологічності до зниження рівня шуму, їх експлуатація супроводжується новими ризиками, серед яких ризик виникнення пожежі. Це зумовлено експоненційним збільшення їх кількості та електро-тепловими процесами, які виникають у силових акумуляторних батареях електромобілів під час нештатних режимів їх використання, зокрема при дії зовнішнього теплового потоку. Такі процеси призводять до виникнення пожежі, її швидкого поширення, що супроводжується вибухами та виділенням токсичних продуктів згоряння і створює загрозу для пасажирів, оточуючих, а також і для рятувальних служб. Для прикладу, 2 квітня 2025 року у Мадриді, під час гасіння пожежі електромобіля Porsche Taycan у підземному паркінгу загинули двоє пожежників та один тримав травми, внаслідок інциденту від отруєння токсичними продуктами згоряння постраждали 14 осіб.

З огляду на стрімке збільшення кількості електромобілів та пожеж за їх участі, а також складність та небезпеки їх гасіння, дає підстави стверджувати, що дослідження у сфері протипожежного захисту зазначених транспортних засобів є не лише науково обґрунтованими, але й суспільно необхідними.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020-2025 роки; програм науково-

Л Д У Б Ж Д	
Вх. №	149
21.04.2025 р.	
КІЛЬКІСТЬ АРКУШІВ:	
ОСН. ДОК.	9 ДОДАТ.

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.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації отримано нові науково обґрунтовані результати, які дозволили вирішити актуальну науково-прикладну проблему у сфері пожежної безпеки – 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. При цьому *вперше*:

- 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 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;

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

- 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.

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

Удосконалено:

- 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.

- 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:

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

- 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.

За результатами проведених досліджень обґрунтовано та розроблено науково-методичний апарат, 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.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень 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».

Оцінка змісту дисертації. 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 та 5 додатків.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану досліджень забезпечення протипожежного захисту електромобілів» здійснено комплексний огляд сучасного стану розвитку електромобільного транспорту як в Україні, так і за її межами. Детально проаналізовано конструктивні особливості електромобілів, з акцентом на силову акумуляторну батарею (АКБ) як головне джерело пожежної небезпеки. На основі статистичних даних охарактеризовано основні причини виникнення пожеж в електромобілях, встановлено, що такі пожежі супроводжуються більшими тепловими потоками, які перевищують аналогічні

показники у випадку транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння. Автор обґрунтував вплив низки чинників на пожежну небезпеку силових АКБ, зокрема: ємності, ступеня заряду, хімічного складу катодних матеріалів, якості збірки батарей, наявності систем охолодження та інших конструктивних характеристик.

Другий розділ дисертації під назвою «Теоретичні механізми дослідження процесів розвитку пожеж електромобілів та їх вплив на протипожежний захист зазначених об'єктів» присвячений формалізації фізичних і хімічних закономірностей, що визначають умови виникнення та розвиток пожеж у силових літій-іонних батареях електромобілів. У роботі представлено математичний апарат моделювання теплових процесів, який базується на системі нелінійних рівнянь у матричній формі, адаптованих як до тривимірного простору (для аналізу теплових режимів АКБ у цілому), так і до циліндричної системи координат (для локалізованого опису окремих елементів). У моделі враховано фізико-хімічні властивості поверхонь, тепловий контакт між елементами, а також залучено рівняння стану ідеального газу, характеристики динамічної в'язкості та ентальпії. Важливою складовою є опис розрахунків енергетичних характеристик реакцій, що виникають у результаті термодеструктивного процесу. Зокрема, визначення енергії внутрішнього короткого замикання між катодом і анодом при пошкодженні сепаратора. Окрему цінність становить адаптація законів нестационарної теплопровідності до умов виникнення аварійного теплового режиму в АКБ, включно з випадками впливу зовнішнього джерела тепла. У цьому контексті використано рівняння Арреніуса, як основу для визначення енергії хімічних реакцій, що зумовлюють термодеструкцію.

У третьому розділі «Оцінювання процесів виникнення та поширення пожежі електромобілів з використанням обчислювальної газогідродинаміки» представлено результати чисельного моделювання пожеж електромобілів із використанням обчислювальної газогідродинаміки (CFD) на базі програмного комплексу FDS (Fire Dynamics Simulator). Дослідження здійснюється з метою обґрунтування гіпотез про термодеструктивні процеси у силових літій-іонних батареях, як початковий фактор пожежі та встановлення критичних параметрів

поширення вогню. Найбільш вагомим є моделювання умов пожежі в закритому паркінгу – сценарію, який є найбільш загрозливим з погляду просторової обмеженості, вентиляції та доступу пожежних підрозділів. Розділ є методично вивіреном і технічно глибоким. Автор грамотно інтегрує CFD-моделювання в контекст пожежної безпеки, підкріплюючи аналітичні моделі практично релевантними сценаріями. Особливо важливо, що зроблено спробу не лише змодельовати динаміку пожежі, а й запропонувати конкретні інженерні висновки щодо протипожежних відстаней, які можуть бути корисними для перегляду будівельних норм.

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів» представлено детально структуровану експериментальну програму, спрямовану на вивчення теплових і часових характеристик термодеструктивних процесів у літій-іонних акумуляторах (АКБ) електричних колісних транспортних засобів. Дослідження виконано як на рівні окремого елемента, так і на рівні модуля, що є важливим з точки зору адекватного масштабування результатів. Важливим є включення обох типів джерел тепла – відкритого полум'я і електронагрівання, що дає змогу розрізнити вплив різних механізмів теплопередачі на ініціацію термодеструкції. Програма є універсальною для подальших випробувань елементів різних форматів (18650, 21700) та модулів на їхній основі і демонструє практичну цінність запропонованого підходу для промислових застосувань.

У п'ятому розділі наведено 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. Отримані експериментальні дані за кожною серією експериментальних досліджень оцінені з використанням статистичних критеріїв Грабса та Фішера, а також визначено абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення.

В шостому розділі «Розроблення комп'ютерної газогідродинамічної моделі та оцінка її адекватності» представлено результати побудови, верифікації та порівняння чисельної CFD-моделі, створеної у середовищі Fire Dynamics

Simulator (FDS) для симуляції термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів. Ця модель була реалізована на основі натурних експериментів, виконаних згідно з Програмою, розробленою в попередніх розділах. Автор не лише відтворює складні сценарії термодеструкції, а й кількісно порівнює симуляційні та натурні дані з задовільною точністю. Варто підкреслити практичну значущість отриманої моделі, яка дає змогу проводити безпечні віртуальні випробування та оцінювати вплив варіацій конструктивних і хімічних параметрів батарей без загрози вибуху чи займання в реальних умовах.

У цьому розділі «Розроблення методичного забезпечення для розрахункової оцінки часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів» розроблено науково-методичний підхід до прогнозування часу виникнення термодеструктивного процесу у батареях електромобілів на основі повнофакторного експерименту та регресійного моделювання. Розділ є завершальним етапом інтеграції теоретичних, чисельних і експериментальних результатів. Його важливість полягає у створенні інструментів, які можуть бути використані на практиці: від швидкої оцінки часу розвитку пожежі до рекомендацій для виробників, рятувальників і проєктантів зарядної інфраструктури. Високий рівень формалізації (через багатофакторний регресійний аналіз) та застосування сучасних інструментів автоматизації (Simulink) надають роботі вагомий інженерний потенціал.

В дисертації не виявлено академічного плагіату та фальсифікації, а також не використовувались результати кандидатської дисертації Гаврилюка А.Ф.

Повнота викладу наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях. Основні наукові результати дисертаційного дослідження повністю відображено в 20 фахових наукових статтях, 6 з яких опубліковано у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації, 32 матеріалах конференцій різного рівня та наукової специфіки, а також 2 патентах України на корисну модель. Кількість та науковий рівень опублікованих наукових праць повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій.

Дискусійні моменти та зауваження до роботи.

1. У першому розділі проаналізовано причини виникнення пожеж, однак не розкрито рівень розвитку технічних засобів виявлення та локалізації пожежі в конструкціях електромобілів. Доцільно додати огляд існуючих систем пожежогасіння у серійних моделях електромобілів.

2. З роботи не зрозуміло чи проводилось узагальнення за типами конструкцій акумуляторних батарей електромобілів (наприклад, модульна, призматична тощо) і чи розглядається їхній вплив на динаміку розвитку пожежі?

3. Яким чином враховується тип системи охолодження акумуляторних батарей електромобілів (рідинна, повітряна, фазового переходу) у їх класифікації за пожежною небезпекою?

4. Із розділу 3 роботи не зрозуміло чому для моделювання обрано саме Tesla Model S і чи враховано можливість екстраполяції результатів на інші моделі електромобілів?

5. У сьомому розділі «Розроблення методичного забезпечення для розрахункової оцінки часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів» висунута гіпотеза, що час виникнення термодеструктивного процесу відображається лінійною залежністю від найбільш значущих чинників, таких як: тип матеріалу катода (T), заряд батареї (k), тепловий потік (q) та ємність літій-іонної батареї (c). Однак невідомо і не обґрунтовано чому залежність має саме лінійний характер?

Зазначені зауваження не мають принципового характеру і не зменшують науково-практичне значення роботи.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Дисертаційна робота ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича на тему «Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)» є завершеною самостійною науковою працею, яка містить наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, яка за змістом та структурою відповідає паспорту спеціальності 21.06.02 – пожежна безпека та вимогам п. 6, 7, 8, 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від

17.11.2021 року № 1197, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека.

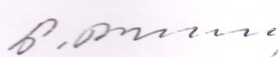
Опонент:

професор кафедри

цивільної безпеки Національного університету

«Львівська політехніка»

доктор технічних наук, професор

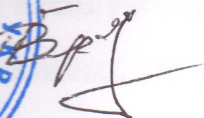


Борис БОЛІБРУХ

Підпис професора **Б.В. БОЛІБРУХА** засвідчую

Вчений секретар Національного університету

«Львівська політехніка»



Р.Б. БРИЛИНСЬКИЙ

21.04.2025