



А. Ф. Гаврилюк, А. П. Кушнір

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

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

<http://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір



gavrilyk3@ukr.net

АНАЛІЗ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ЗА ТЕРМІЧНОЮ СТАБІЛЬНІСТЮ СИЛОВОЇ ЛІТІЄВОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Постановка проблеми. Чисельність світового автопарку налічує понад 1 мільярд одиниць і за прогнозами впродовж 50 років їх кількість зросте до 2,5 мільярдів. До складу автопарку входять транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), а також ті транспортні засоби, які використовують альтернативні джерела енергії. Розвиток останніх спричинено вичерпанням запасів нафти та газу, колосальною кількістю викидів відпрацьованих газів від транспортних засобів, які обладнані ДВЗ, а також суворими екологічними стандартами, які накладаються на ДВЗ. Основними забруднювачами повітря у відпрацьованих газах ДВЗ є CO_2 , NO_x , CO , NO_x . Це вкрай погіршує екологічну ситуацію. Така тенденція призвела до бурхливого розвитку електромобілів. Очевидно, що стрімке збільшення кількості електромобілів призводить до збільшення небезпек, якими вони супроводжуються. Однією з таких небезпек є їх пожежна небезпека.

Мета дослідження полягає у виявленні та класифікації чинників впливу на пожежну небезпеку електромобілів, з метою створення підґрунтя для її підвищення.

Опис матеріалу. Незважаючи на те, що в сучасному електромобілі, передбачено систему керування (BSM) силовою АКБ, (контроль заряду/розряду (SOC), контроль за ємністю (SOH) і температурою (SOT) АКБ), використання термозапобіжників, а також запобіжних вентиляційних отворів для стравлення надлишкового тиску з комірки АКБ, виникають несправності, які викликають незворотну екзотермічну реакцію, що закінчується пожежою чи навіть вибухом. Власне контроль та управління температурою силової АКБ є визначальним чинником безпеки електромобіля в цілому. До основних причин виникнення незворотньої екзотермічної реакції силових АКБ відносять порушення правил експлуатації. До порушень правил експлуатації можна віднести: надмірну зарядку АКБ, механічне пошкодження, в тому числі внаслідок ДТП, перевантаження силової установки електромобіля, що призводить до протікання по провідниках струмів перевантаження. Порушення правил експлуатації призводять до перегрівання АКБ, що ініціює незворотню екзотермічну реакцію з подальшим займанням чи вибухом. Механічне пошкодження призводить до короткого замкнення АКБ, що також ініціює незворотню екзотермічну реакцію. Вже при досягненні температури $80\text{ }^\circ\text{C}$ в силовій АКБ можуть виникнути незворотні теплові процеси, а при досягненні $130\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається плавлення сепаратора, що призводить до короткого замкнення (КЗ) АКБ. При повністю зарядженій батареї температура, в одній комірці АКБ при КЗ може сягати $700\text{ }^\circ\text{C}$ і більше. Серед усіх типів батарей, які використовуються у сучасних електромобілях, NCA є найбільш пожежно небезпечними (в той же час NCA має найкращі характеристики, по питомої енергетичної ємності). Після неї більш пожежобезпечною є літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-кобальту (LCO), після неї слідує літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт марганцю (NMC) і літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-марганцю (LMO) Найбільш небезпечною є літій-іонна батарея катод якої виготовлений на основі оксиду літій-ферум-фосфат (LFP).

Висновки. За результатами аналітичних досліджень визначено та про класифіковано чинники впливу на пожежну небезпеку EV. Це конструктивні, експлуатаційні та обслуговувальні чинники. Конструктивні чинники: тип силової АКБ, ємність АКБ, наявність систем безпеки, керування та контролю за силовою АКБ, захищеність АКБ від механічного пошкодження. Експлуатаційні чинники: вік електромобіля та стан SOC. Обслуговувальні чинники: недотримання чи порушення правил технічного обслуговування, використання нештатних зарядних пристроїв. У разі виникнення екзотермічних реакцій з АКБ виділяються (з наступним горінням чи вибухом) легкозаймисті і токсичні гази, серед яких: водень, метан, етан, чадний, вуглекислий гази та ряд інших. АКБ електромобіля при екзотермічній реакції здатна створити смертельну концентрацію CO у салоні електромобіля за кілька секунд. Силова АКБ становить найбільшу небезпеку, маса її може становити 200-600 кг для легкового автомобіля. Вже при досягненні $80\text{ }^\circ\text{C}$ у літій-іонних батареях можуть виникати екзотермічні реакції, які спричиняють різке підвищення температури АКБ з наступним займанням та/або вибухом.

Ключові слова: електромобіль, силова акумуляторна батарея, пожежна небезпека електромобілів, чинники впливу на пожежну безпеку електромобілів.

A. F. Gavryliuk, A. P. Kushnir
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF FIRE DANGER OF ELECTRIC VEHICLES ACCORDING TO THERMAL STABILITY OF POWERFUL LITHIUM BATTERY

Formulation of the problem. The world's car fleet numbers more than 1 billion units and is projected to grow to 2.5 billion in 50 years. The fleet includes vehicles with internal combustion engines (ICE), as well as those vehicles that use alternative energy sources. The development of the latter is due to the depletion of oil and gas reserves, the colossal amount of exhaust emissions from vehicles equipped with internal combustion engines, as well as strict environmental standards imposed on internal combustion engines. The main air pollutants in the exhaust gases of internal combustion engines are CO₂, NO_x, CO, and NO_x. This greatly worsens the environmental situation. This trend has led to the rapid development of electric vehicles. The rapid increase in the number of electric vehicles leads to an increase in the dangers that accompany them. One of such dangers is their fire danger.

The purpose of this work is to identify and classify the factors influencing the fire hazard of electric vehicles, to create a basis for its improvement.

Description of the material. Even though in modern electric vehicles, there is a control system (BSM) of the power battery (charge/discharge control (SOC), control of capacity (SOH) and temperature (SOT) of the battery), the use of fuses and safety vents for digestion Excess pressure from the battery cell causes malfunctions that cause an irreversible exothermic reaction, which ends in fire or even explosion. Control and management of the temperature of the power battery is a determining factor that directly ensures the safety of the electric vehicle as a whole. The main causes of irreversible exothermic reaction of power batteries include violations of operating rules. Violations of the rules of operation include battery recharging, mechanical damage, including as a result of an accident, and overload of the power plant of the electric vehicle, which leads to leakage of overload currents through the conductors. Violations of operating rules lead to overheating of the battery, which initiates an irreversible exothermic reaction with subsequent ignition or explosion. Mechanical damage leads to a short circuit of the battery, which also initiates an irreversible exothermic reaction. Already at a temperature of 80 °C in the power battery may be irreversible thermal processes and at 130 °C melting of the separator, which leads to a short circuit (CC) of the battery. When the battery is fully charged, the temperature generated by one cell of the battery in the event of a short circuit can reach 700 °C and more. Of all the types of batteries used in modern electric vehicles, the NCA poses the greatest fire hazard (at the same time, the NCA has the best performance in terms of specific energy capacity). It is followed by a more fireproof lithium-ion battery, the cathode of which is based on lithium cobalt oxide (LCO), followed by a lithium-ion battery, the cathode of which is based on lithium-nickel-cobalt oxide manganese (NMC) and lithium-ion battery, the cathode of which is based on lithium-manganese oxide (LMO) The most dangerous is the lithium-ion battery whose cathode is based on lithium-iron-phosphate oxide (LFP).

Results. Based on the results of analytical research, the factors influencing the fire hazard of EV have been identified and classified. These are design, operational and service factors. Structural factors: type of power battery, battery capacity, availability of safety systems, control and monitoring of the power battery and protection of the battery from mechanical damage. Operational factors: age of the electric vehicle and condition of the SOC. Service factors: non-compliance or violation of maintenance rules, use of non-standard factory devices. In the event of exothermic reactions with the battery, flammable and toxic gases are released (with subsequent combustion or explosion), including hydrogen, methane, ethane, carbon monoxide, carbon dioxide and others. The battery of an electric car in an exothermic reaction can create a lethal concentration of CO in the interior of the electric car in a few seconds. Power battery is the greatest danger, the weight of which can be 200-600 kg for a car. As soon as 80 °C is reached, exothermic reactions can occur in lithium-ion batteries, which cause a sharp rise in battery temperature with subsequent ignition and/or explosion.

Keywords: electric car, power battery, fire hazard of electric cars, factors influencing the fire safety of electric cars.

Вступ. Світовий автопарк налічує понад 1 мільярд одиниць і за прогнозами впродовж 50 років їх кількість зросте до 2,5 мільярдів [1]. До складу автопарку входять транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), а також ті транспортні засоби, які використовують альтернативні джерела енергії. Розвиток останніх спричинений вичерпанням запасів нафти та газу, колосальною кількістю викидів відпрацьованих газів від транспортних засобів, які обладнані ДВЗ, а також суворими екологічними стандартами, які накладаються на ДВЗ [2].

Основними забруднювачами повітря у відпрацьованих газах ДВЗ є CO₂, NO_x, CO, NO_x [3, 4]. Це вкрай погіршує екологічну ситуацію. Така тенденція призвела до бурхливого розвитку електромобілів, географічна динаміка яких представлена на рисунку 1.

Аналізуючи графічні залежності бачимо, що кількість електромобілів, з кожним роком стрімко зростає. Найбільше таких автотранспортних засобів зосереджено у Китаї, Європі та США, а серед них найбільш поширеними є легкові пасажирські автомобілі та автобуси.

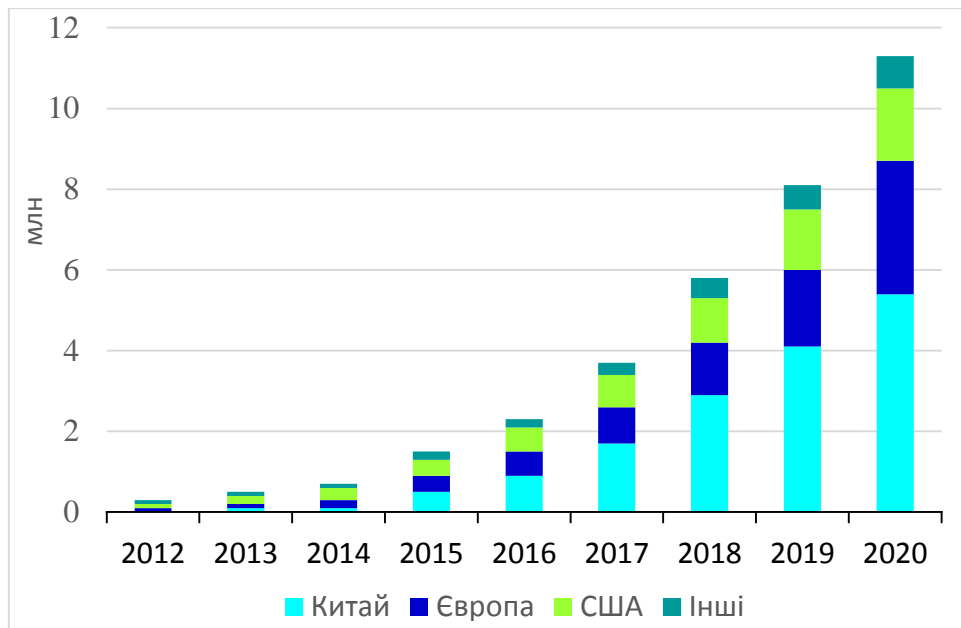


Рисунок 1 – Динаміка кількості електромобілів за регіонами світу

Очевидно, що стрімке збільшення кількості електромобілів призводить до збільшення факторів небезпеки. Одним з таких видів небезпеки є пожежна. У працях [5-11] описано пожежну небезпеку автотранспортних засобів, які обладнанні ДВЗ, причини виникнення, динаміку розвитку таких пожеж, а також можливі шляхи боротьби з ними.

Натомість пожежній безпеці автотранспортних засобів, які використовують альтернативні види пального, в науковій літературі, приділено недостатньо уваги.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Проналізуємо класифікацію електромобілів (рис 2). Загалом електромобіль (EV- Electric vehicles) – це колісний транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричним двигуном (двигунами).

Для забезпечення живлення електричних двигунів можуть використовуватись різні джерела електричної енергії: силові акумуляторні батареї (АКБ), паливні елементи, генератори тощо. Електричний транспортний засіб з силовою акумуляторною батареєю (АКБ) (BEV-battery electric vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з силових АКБ. Електромобіль з розширеним діапазоном дії (REEV - range-extended electric vehicle, or an E-REV extended-range electric vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з силових АКБ, а невеликий ДВЗ приводить в дію генератор для заряджання силових АКБ.

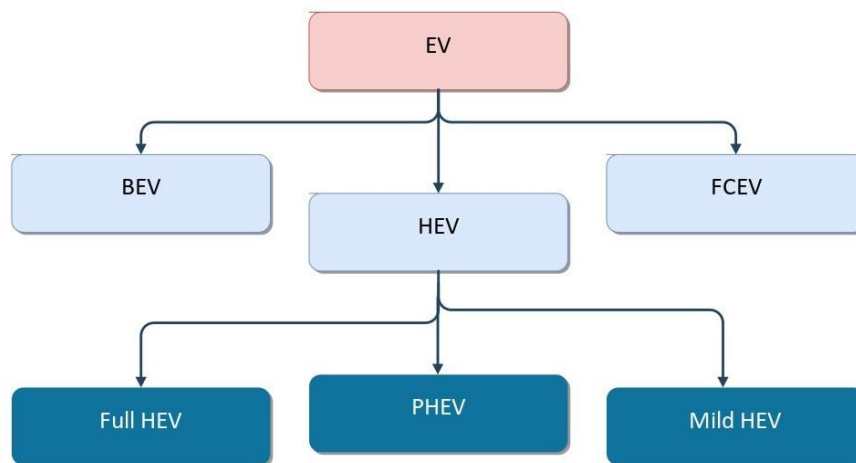


Рисунок 2 – Класифікація електромобілів

Таблиця 1

Орієнтовна маса та ємність силової АКБ
для різних типів автотранспортних засобів

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

Масовий відсоток горючого електроліту становить в межах 10-15 % від загальної маси силової АКБ.

При перегріванні силової АКБ з неї може виділятися ряд токсичних, легкозаймистих і вибухонебезпечних газів, серед яких водень, метан та етан. Відсоткове об'ємне виділення (від об'єму АКБ) таких газів наведено у таблиці 2. Залежно від типу силової батареї, відсоткове відношення таких газів може змінюватись в незначних межах [13, 23].

Таблиця 2

Відсоткове об'ємне виділення газів
від силової АКБ [13]

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

Мета дослідження полягає у виявленні та класифікації чинників впливу на пожежну безпеку електромобілів.

Результати досліджень. Незважаючи на те, що в сучасному електромобілі, передбачено систему керування (BSM) силовою АКБ, (контроль заряду/розряду (SOC), контроль за ємністю (SOH) і температурою (SOT) АКБ), використання термозапобіжників, а також запобіжних вентиляційних отворів для стравлення надлишкового тиску з комірки АКБ [16], виникають несправності, які викликають незворотну екзотермічну реакцію, що закінчується пожежою чи навіть вибухом. Власне контроль та управління температурою силової АКБ є визначальним чинником безпеки електромобіля в цілому.

До основних причин виникнення незворотної екзотермічної реакції силових АКБ відносять порушення правил експлуатації. До порушень правил експлуатації можна віднести: надмірну зарядку АКБ, механічне пошкодження, в тому числі внаслідок ДТП, перевантаження силової установки електромобіля, що призводить

Електромобіль з водневими паливними елементами (FCEV Fuel Cell Electric Vehicle) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з водневих паливних елементів. Гібридний транспортний засіб (HEV Hybrid Electric Vehicle) – це транспортний засіб у якому обертовий момент необхідний для забезпечення руху, може створюватись ДВЗ і електричними двигунами одночасно або окремо, а зарядження силових АКБ здійснюється лише штатним генератором автомобіля та завдяки рекуперації. Залежно від останнього гібридні електричні транспортні засоби за ступенем «гібридизації» поділяються на: повні гібриди (full hybrid) – електричний двигун може забезпечувати рух транспортного засобу без участі ДВЗ; неповні гібриди (mild hybrid) – електричний двигун не може самостійно забезпечувати рух транспортного засобу без участі ДВЗ. При маркуванні гібридних електричних транспортних засобів вживається префікс «Р» (Plug in), що вказує на те, що силові АКБ можуть підзаряджатися від зовнішньої електричної мережі, наприклад – побутової розетки. Гібридний транспортний засіб (PHEV Plug Hybrid Electric Vehicle) – транспортний засіб у якому обертовий момент необхідний для забезпечення руху може створюватись ДВЗ і електричними двигунами одночасно або окремо, та передбачена можливість зарядження силової АКБ від зовнішньої електричної мережі. Такі транспортні засоби ще називають «гібриди, що підключаються».

Відтак для живлення електричних двигунів використовуються джерела електрохімічного накопичення.

Для живлення електродвигунів найчастіше використовують силові АКБ чи паливні елементи. Серед усіх типів АКБ, а це свинцево-кислотні, нікель-металгідридні, нікель-кадмієві найбільшого поширення у електромобілях набули літій-іонні батареї (завдяки ряду технічних переваг).

Батарея в загальному випадку складається з анода, катода та електроліту. Анод найчастіше виготовляється із графіту, а катод на основі літій-кобальт-оксиду (LiCoO₂), літій-манган оксиду (LiMn₂O₄), літій-титан оксиду (Li₄Ti₅O₁₂) тощо.

Електроліт складається з розчинника та солі, завдяки чому забезпечується рух іонів. У літій-іонних батареях у якості розчинників використовують діетилкарбонат, диметилкарбонат, пропілкарбонат тощо [12].

Маса силової АКБ може становити від 20 до 60 % від загальної маси автомобіля. У таблиці наведено орієнтовну масу силових АКБ для різних типів автотранспортних засобів.

до протікання по провідниках струмів перевантаження. Порушення правил експлуатації призводять до перегрівання АКБ, що ініціює незворотну екзотермічну реакцію з подальшим займанням чи вибухом. Механічне пошкодження призводить до короткого замкнення АКБ, що також ініціює незворотну екзотермічну реакцію.

Вже при досягненні температури 80 °С в силовій АКБ можуть виникнути незворотні теплові процеси [14], а при досягненні 130 °С відбувається плавлення сепаратора, що призводить до короткого замкнення (КЗ) АКБ [14]. При повністю зарядженій батареї температура, яка утворюється однієї комірки АКБ при КЗ може сягати 700 °С і більше [15].

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

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

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-марганцю (LiMn_2O_4) – **LMO**. Недоліком таких АКБ є низька питома потужність (150 Вт·год/кг), однак у них краща термічна стійкість порівнянно з LCO. При досягненні температури 190-220 °С відбувається незворотна екзотермічна реакція, з максимальною температурою одного компонента АКБ 580-600 °С і тиском до 17 бар [19].

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

Літій-іонна батарея, катод якої виготовлений на основі оксиду літій-нікель-кобальт-алюмінію (LiNiCoAlO_2) – **NCA**. Власне такий тип АКБ використовує компанія Tesla у всіх свої електромобілях (виробник АКБ – Panasonic) і характеризується найвищою питомою енергетичною ємністю – 300 Вт·год/кг. При досягненні температури 170-220 °С відбувається незворотна екзотермічна реакція, при якій досягається температура одного компонента АКБ 500-1000 °С і тиск до 25-35 бар [21].

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

LFP є відносно безпечною, тобто демонструє найвищу термічну стабільність, оскільки батарея не займається при незворотній екзотермічній реакції, а тиск не перевищує 5 бар [22].

Аналізуючи характеристики, які наведено вище, можна так класифікувати за рівнем пожежної небезпеки літій-іонні батареї, які використовуються у сучасних електромобілях (рис 3):

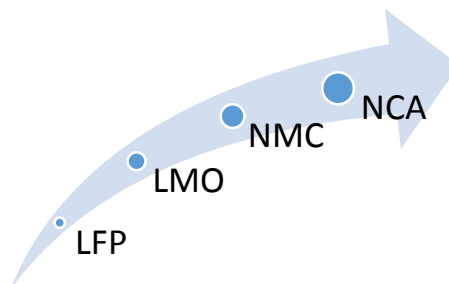


Рисунок 3 – Пожежна небезпека різних типів силових АКБ, які використовуються у EV

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

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

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

Таблиця 3

Електромобілі, які використовують різні типи силових АКБ

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

Для захисту від незворотніх екзотермічних реакцій силових АКБ використовують термозапобіжник та запобіжний вентиляційний отвір. Термозапобіжник для всіх видів літій-іонних

батареї спрацьовує при температурі 90-130 °С залежно від матеріалів, з яких виготовленні катод та анод, а запобіжний вентиляційний отвір відкривається при тиску 5-25 psi (34.5-125 кПа) [17]. Загалом тиск при незворотній екзотермічній реакції може сягати 10-35 бар.

Пожежна безпека таких автомобілів обумовлюється і складністю гасіння через неможливість отримати доступ до джерела займання – силової АКБ. Такі пожежі супроводжуються тривалим горінням і мають здатність до повторного займання впродовж годин чи навіть днів від початкової пожежі [24, 25].

За даними [26] при зменшенні ємності (SON) АКБ до 80% вона стає непридатною для тягових цілей (хоча ємності ще цілком достатньо для експлуатації електромобіля). Цей чинник також потрібно враховувати, як такий, що впливає на безпеку.

Ще одним дуже важливим фактором безпеки є виділення внаслідок термічної реакції чадного газу. Відтак займання літій-іонної батареї

ємністю 0,2 Квт·год у приміщенні об'ємом 50 м³ здатне створити смертельну концентрацію СО впродовж 5 хв. Газ СО може надходити і в салон автомобіля, де перебувають пасажирів, і з врахуванням об'єму салону та ємності силової АКБ смертельна концентрація СО може бути досягнута вже за кілька секунд!

У праці [27] досліджено безпеку вибуху горючих газів, які виділяються при незворотній тепловій реакції літій-іонного акумулятора залежно від рівня заряду. За результатами експериментів встановлено, що найбільша безпека вибуху таких газів існує при заряді батареї 50-60%.

Разом з тим, у електромобілях є також різного роду оздоблювальні матеріали які використовуються і у автомобілях з ДВЗ і які є горючими. Масова частка таких матеріалів може становити близько 10 % [7] від зальної маси автомобіля, що і складає пожеже навантаження під час пожежі.

Аналізуючи дані, можна виділити основні групи чинників, які впливають на пожежну безпеку електромобілів (рис. 4).

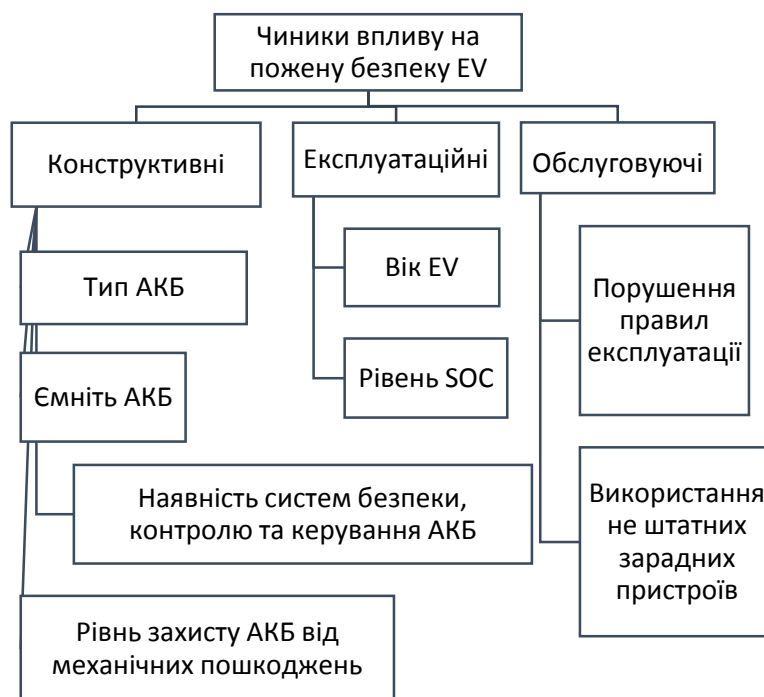


Рисунок 4 – Чинники впливу на пожежну безпеку електромобілів (EV)

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

Висновки

1. Маса силової АКБ для електромобіля – 200-600 кг і становить найбільшу пожежну безпеку. Вже при досягненні 80 °С у літій-іонних батареях можуть виникати екзотермічні реакції, які спричиняють різке підвищення температури АКБ з наступним займанням та/або вибухом.

2. При виникненні екзотермічних реакцій з АКБ виділяються (з наступним горінням чи вибухом) легкозаймисті і токсичні гази, серед яких: водень, метан, етан, чадний, вуглекислий та ряд

інших. АКБ електромобіля у результаті екзотермічної реакції здатна створити смертельну концентрацію СО у салоні електромобіля за кілька секунд.

3. Гасіння пожеж електромобіля ускладнюється через труднощі доступу до силової АКБ, небезпеку ураження електричними струмом, а також здатність до повторного самозаймання АКБ після повної ліквідації пожежі. Проміжок повторного займання може становити дні чи навіть тижні.

4. На підставі аналізу визначено та про класифіковано чинники впливу на пожежну небезпеку EV. Це конструктивні, експлуатаційні та обслуговувальні чинники. Конструктивні чинники: тип силової АКБ, ємність АКБ, наявність систем безпеки, керування та контролю за силовою АКБ, захищеність АКБ від механічного пошкодження. Експлуатаційні чинники: вік електромобіля та стан SOC. Обслуговувальні чинники: недотримання чи порушення правил технічного обслуговування, використання нештатних зарядних пристроїв.

5. Окреслення та розуміння чинників впливу на пожежну небезпеку створить підґрунтя для її зниження, а також розробку нових, ефективних та безпечних способів гасіння пожеж такого роду, що може стати предметом наступних досліджень.

Список літератури:

1. C.C. Chan, Y.S. Wong Electric vehicles charge forward IEEE Power and Energy Magazine, 2 (6) (2004), pp. 24-33.
2. Гаврилюк, А. Ф. (2021). Дослідження паливної та еквівалентноїощадливості автомобілів з традиційними та альтернативними видами пального. Наукові праці Вінницького національного технічного університету, (2). <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2021-2-32-39>
3. Anenberg, S.; Miller, J.; Henze, D.; Minjares, R. A Global Snapshot of the Air Pollution-Related Health Impacts of Transportation Sector Emissions in 2010 and 2015. Available online: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global_health_impacts_transport_emissions_2010-2015_20190226.pdf
4. European Environment Agency. Climate Change Mitigation. Available online: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory>
5. Hui, Z., Yunji, G., Haidong, G. (2020). Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 22. doi:10.1016/j.csite.2020.100795
6. Li, D., Guoqing, Z., Zhu, H., Yu, Z., Gao, Y., Jiang, X. (2020). Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 10, 315-324. doi: 10.1016/j.csite.2017.08.001
7. Гудим, В., Гаврилюк, А. (2013). Аналіз систем та агрегатів автотранспортних засобів за рівнем пожежної небезпеки. Пожежна безпека, 23,58-63. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/495/488>
8. Hu, Y., Zhou, X., Cao, J., Zhang, L., Wu, G., Yang, L. (2020). Interpretation of fire safety distances of a minivan passenger car by burning behaviors analysis, Fire Technology, Volume 56, 1527–1553. doi:10.1007/s10694-019-00938-1.
9. Gavrilyk A., & Lyn A. (2017). Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. Пожежна безпека, 31, 11-16. Retrieved із <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/98>
10. Halada, L., Weisenpacher, P., Glasa, J. (2012). Computer Modelling of Automobile Fires Chapter 9, 203-228. doi: 10.5772/48600
11. Kushnir, A., Kopchak, B., & Gavryliuk, A. (2021). Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(10(111)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231894>.
12. Hoffmann, L., & Sturk, D. (2013). e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse.
13. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In Lithium-ion batteries (pp. 409-435).
14. Hammami A, Raymond N, Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. Nature. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779
15. S. Santhanagopalan, P. Ramadass, J. Zhang. Power Sources, 194 (2009), pp. 550-557 10.1016/j.jpowsour.2009.05.002
16. J. Swart, A. Arora, M. Megerle, S. Nilsson Product Safety Engineering Society Symposium, 2006 IEEE (2006), pp. 1-4
17. C.C. Lin, H.C. Wu, J.P. Pan, C.Y. Su, T.H. Wang, H.S. Sheu, N.L. Wu Investigation on suppressed thermal runaway of Li-ion battery by hyper-branched polymer coated on cathode Electrochim. Acta, 101 (2013), pp. 11-17, 10.1016/j.electacta.2012.09.097
18. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 127(1), 983-993.
19. Lei, B., Zhao, W., Ziebert, C., Uhlmann, N., Rohde, M., & Seifert, H. J. (2017). Experimental analysis of thermal runaway in 18650 cylindrical Li-ion cells using an accelerating rate calorimeter. Batteries, 3(2), 14.

20. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Thermal runaway on 18650 lithium-ion batteries containing cathode materials with and without the coating of self-terminated oligomers with hyper-branched architecture (STOBA) used in electric vehicles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(3), 1935-1948.

21. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 983-993.

22. Wen, C. Y., Jhu, C. Y., Wang, Y. W., Chiang, C. C., & Shu, C. M. (2012). Thermal runaway features of 18650 lithium-ion batteries for LiFePO₄ cathode material by DSC and VSP2. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 109(3), 1297-1302.

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

24. Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95-131.

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

26. Casals, L. C., García, B. A., & Canal, C. (2019). Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of environmental management*, 232, 354-363.

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

References:

1. C.C. Chan, Y.S. Wong Electric vehicles charge forward *IEEE Power and Energy Magazine*, 2 (6) (2004), pp. 24-33.

2. Gavryliuk, A. F. (2021). Doslidzhennia palyvnoi ta ekvivalentnoi oshchadlyvosti avtomobiliv z tradytsiinymy ta alternatyvnymy vydamy palnoho. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (2). <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2021-2-32-393>.

3. Anenberg, S.; Miller, J.; Henze, D.; Minjares, R. A Global Snapshot of the Air Pollution-Related Health Impacts of Transportation Sector Emissions in 2010 and 2015. Available online: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global>

[_health_impacts_transport_emissions_2010-2015_20190226.pdf](#)

4. European Environment Agency. Climate Change Mitigation. Available online: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory>

5. Hui, Z., Yunji, G., Haidong, G. (2020). Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 22. doi:10.1016/j.csite.2020.100795

6. Li, D., Guoqing, Z., Zhu, H., Yu, Z., Gao, Y., Jiang, X. (2020). Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 10, 315-324. doi: 10.1016/j.csite.2017.08.001

7. Hudym, V., Gavryliuk, A. (2013). Analiz system ta ahreativ avtotransportnykh zasobiv za rivnem pozhezhnoi nebezpeky. *Pozhezhna bezpeka*, 23,58-63. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/495/488>

8. Hu, Y., Zhou, X., Cao, J., Zhang, L., Wu, G., Yang, L. (2020). Interpretation of fire safety distances of a minivan passenger car by burning behaviors analysis, *Fire Technology*, Volume 56, 1527-1553. doi:10.1007/s10694-019-00938-1.

9. Gavrylyk A., & Lyn A. (2017). Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*, 31, 11-16. Retrieved із <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/98>

10. Halada, L., Weisenpacher, P., Glasa, J. (2012). *Computer Modelling of Automobile Fires Chapter 9*, 203-228. doi: 10.5772/48600

11. Kushnir, A., Kopchak, B., & Gavryliuk, A. (2021). Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(111)), 6-18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231894>.

12. Hoffmann, L., & Sturk, D. (2013). e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse.

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

14. Hammami A, Raymond N, Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779

15. S. Santhanagopalan, P. Ramadass, J. Zhang. *Power Sources*, 194 (2009), pp. 550-557 10.1016/j.jpowsour.2009.05.002

16. J. Swart, A. Arora, M. Megerle, S. Nilsson *Product Safety Engineering Society Symposium, 2006 IEEE* (2006), pp. 1-4

17. C.C. Lin, H.C. Wu, J.P. Pan, C.Y. Su, T.H. Wang, H.S. Sheu, N.L. Wu Investigation on suppressed thermal runaway of Li-ion battery by hyper-branched

polymer coated on cathode *Electrochim. Acta*, 101 (2013), pp. 11-17, 10.1016/j.electacta.2012.09.097

18. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 983-993.

19. Lei, B., Zhao, W., Ziebert, C., Uhlmann, N., Rohde, M., & Seifert, H. J. (2017). Experimental analysis of thermal runaway in 18650 cylindrical Li-ion cells using an accelerating rate calorimeter. *Batteries*, 3(2), 14.

20. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Thermal runaway on 18650 lithium-ion batteries containing cathode materials with and without the coating of self-terminated oligomers with hyperbranched architecture (STOBA) used in electric vehicles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(3), 1935-1948.

21. Duh, Y. S., Tsai, M. T., & Kao, C. S. (2017). Characterization on the thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 983-993.

22. Wen, C. Y., Jhu, C. Y., Wang, Y. W., Chiang, C. C., & Shu, C. M. (2012). Thermal runaway features

of 18650 lithium-ion batteries for LiFePO₄ cathode material by DSC and VSP2. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 109(3), 1297-1302.

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

24. Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95-131.

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

26. Casals, L. C., García, B. A., & Canal, C. (2019). Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of environmental management*, 232, 354-363.

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

© А. Ф. Гаврилюк, А. П. Кушнір, 2022.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 19.04.2022.

Прийнято до публікації 17.05.2022.