

Шифр: «зелена енергія»

**«Аналіз пожежної небезпеки транспортних засобів  
на альтернативних джерелах енергії»**

2020

## ЗМІСТ

1. Актуальність теми.....	1
2. Мета і задачі дослідження.....	7
3. Розв'язання задачі .....	8
4. Висновки .....	37
5. Список використаних джерел .....	38

## УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

ТЗ – транспортний засіб

ТЗАДЕ – транспортний засіб на альтернативних джерелах енергії

ЕТЗ – електричний транспортний засіб;

ЕА – електричний автомобіль;

АзГД – автомобілі з гібридними двигунами;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

### Актуальність теми.

Світовий запас ЕТЗ між 2005 та 2009 роками складався виключно з ЕА, загалом у 2005 році - близько 1700 одиниць, і майже 6000 у 2009 році. Запас ЕА збільшився до приблизно 12 500 одиниць в 2010 р., з яких 350 – АзГД. Після виходу на ринок ЕА Nissan Leaf та Chevrolet Volt в кінці грудня 2010 року, перші серійні ЕА масового виробництва великих автовиробників, продажі ЕА зросли приблизно до 50 000 одиниць в 2011 році, до 125 000 в 2012 році і майже 213 000 у 2013 році. На початок 2014 року продажі становили понад 315 000 одиниць, що на 48% більше, ніж у 2013 році.

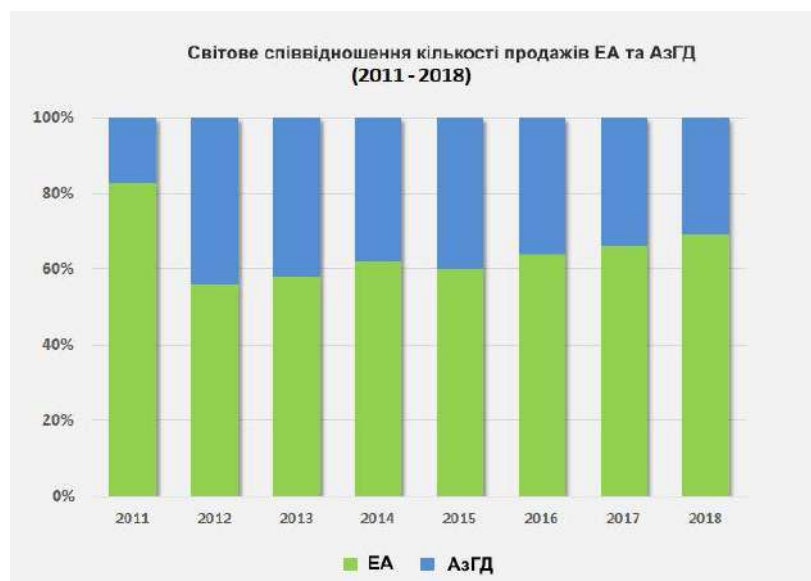


Рис.1. Світове співвідношення кількості продажів ЕА та АзГД  
з 2011 по 2018 роки

У березні 2014 року Норвегія стала першою країною, де згідно статистичних даних на кожні 100 автомобілів припадав 1 ЕА, а до жовтня 2018 року це співвідношення вже було 1 до 10.

За п'ять років глобальний ринок продажу ЕА збільшився більш ніж у десятки разів, що склало понад 565 000 одиниць у 2015 році, що на 80% більше, ніж у 2014 році, в основному за рахунок Китаю та Європи. Близько 775 000 ЕА та мікроавтобусів було продано у 2016 році, а 1,22 мільйона - у 2017 році - на 57% більше ніж у 2016 році - на Китай припадає близько половини світових продажів.[1]

Частка світового ринку ЕА досягла 1,3% у 2017 році, порівняно з 0,86% у 2016 році та 0,38% у 2014 році. Світові продажі ЕА та АзГД, що працюють на альтернативних джерелах енергії, перевищила 3 мільйона у листопаді 2017 року та 5 мільйонів наприкінці 2018 року.

Загальний обсяг продажів у 2018 році становив 2 018247 легкових автомобілів, що на 72% більше, ніж у 2017 році, частка ринку - 2,1%. Співвідношення ЕА та АзГД склало 69:31 відповідно.[2].

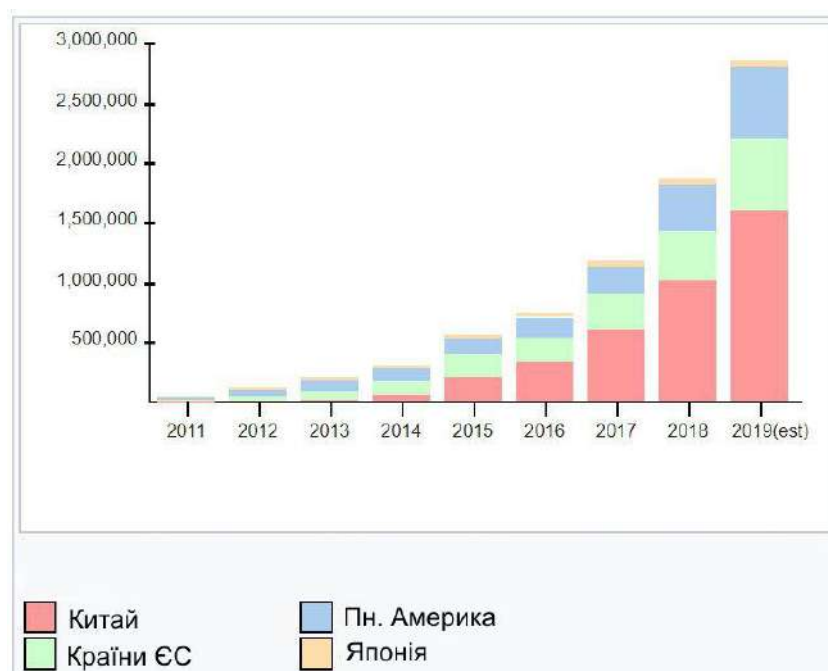


Рис.2. Річні обсяги продажу ЕА в країнах світу в період з 2011 по 2017 роки.

Число використання електричних автомобілів в різних країнах світу відрізняється, оскільки на прийняття у користування подібних автомобілів впливає різноманітна кількість чинників попит споживачів, ринкові ціни та заохочення уряду країн.

Популярність електромобілів швидко зростає завдяки державним субсидіям, їхньому розширеному асортименту та меншим витратам на щоденне використання, а також екологічній безпеці навколишньому середовищу. На грудень 2018 року світове співвідношення подібних автомобілів складало 1 до 250.

Станом на грудень 2018 року в Китаї був найбільший запас ЕТЗ, що налічував більш ніж 2 мільйони пасажирських автомобілів. Китай також домінує в розробці та впровадженні більш габаритного електротранспорту зокрема електро автобусів, їхня кількість складала 343 500 одиниць у 2016 році з загального запасу близько 345 000 транспортних засобів.

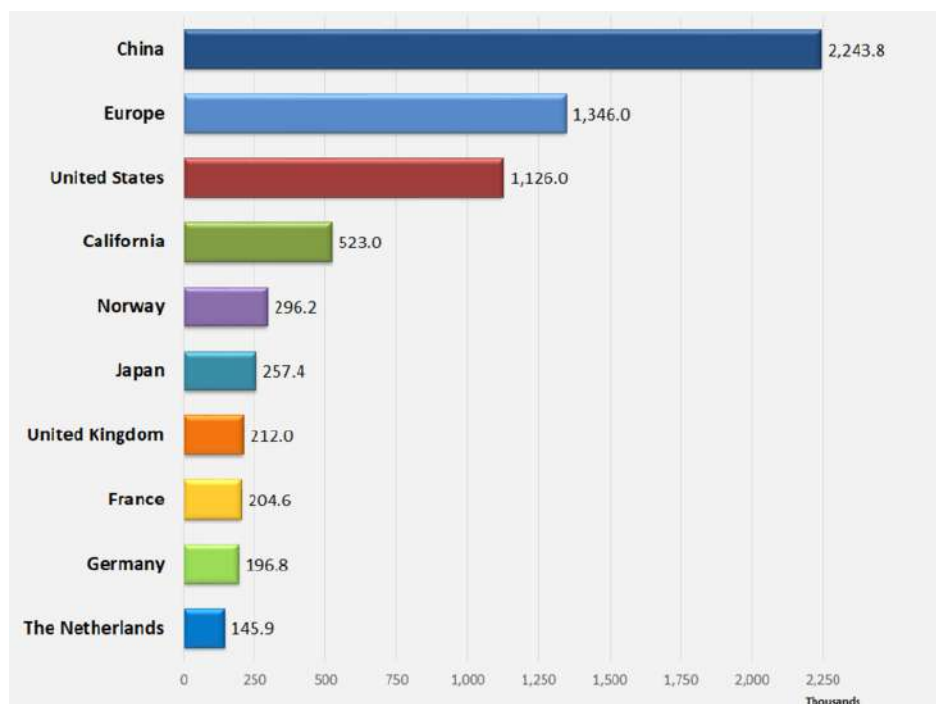


Рис. 3. Країни (регіони) світу за кількістю продажів ЕА (тис.), станом на грудень 2018 року

На вересень 2018 року у Сполучених Штатах Америки було мільйон ЕТЗ, а штат Каліфорнія був найбільшим регіональним ринком в США, 537 208 ЕТЗ було продано до грудня 2018 року.

До червня 2018 року в Європі було зареєстровано понад мільйон ЕТЗ, а Норвегія - провідна країна, зареєстровано понад 296 000 одиниць до кінця 2018 року. Норвегія має найвищий рівень співвідношення ЕТЗ на душу населення в світі, а також має найбільшу в світі частку ринку збуту нових автомобілів 49,1% у 2018 році. Станом на 2018 рік 10% усіх легкових автомобілів на норвезьких дорогах були ЕТЗ.

Статистики використання АВП на сьогодні практично немає, оскільки в порівнянні з ЕА та АзГД використання АВП є досить незначне. Однак провідні країни світу, такі як США, Німеччина, Канада та інші, поступово збільшують кількість використання АВП та здійснюють розвиток відповідної інфраструктури для них.

Основна проблема при використанні АВП це облаштування заправних станцій, де необхідно здійснювати зберігання великої кількості водню під високим тиском, що в свою чергу створює надзвичайну пожежну небезпеку та вимагає додаткових заходів безпеки. Однак, сьогодні подібні заправні станції успішно функціонують в Німеччині, Канаді, Сінгапурі, Японії та США.

Оскільки провідні автовиробники світу такі як Toyota, Hyundai, Daimler, Audi, BMW, Volvo, Ballard Power Systems, General Motors, and MAN зацікавленні у виробництві АВП і вже здійснюють їх масовий продаж то можна з впевненістю стверджувати, що попит на подібні ТЗ буде тільки збільшуватися.

Також в підтримку розвитку та виробництва АВП є той факт, що уряди країн всіляко заохочують використання ТЗ, що не здійснюють забруднення

атмосфери. Для прикладу, штат Каліфорнія в США виділило фінансування на облаштування 100 автозаправних станцій для АВП, щоб до 2025 року досягнути показника в 1,5 мільйонів АВП.

Також цікавим фактом є те, що Toyota має амбіційний план по розвитку цілого міста, що працюватиме за рахунок використання водню. Розбудова міста планується у підніжжі гори Фудзіяма в Японії. Також автогігант планує розробку близько 100 автобусів, що працюватимуть на водню для забезпечення перевезення пасажирів під час проведення масових заходів на зразок Олімпійських Ігор.

Загалом згідно міжнародних прогнозів ринок АВП до 2050 року складатиме близько 1,3 мл. ТЗ на рік.

#### Статистика електромобілів в Україні

Незважаючи на низькі економічні показники та незадовільні соціальні аспекти розвитку України ринок ЕТЗ в нашій державі показує стабільне зростання з року в рік. Так відповідно до статистичного дослідження станом на вересень 2018 в Україні налічувалося близько 15 696 ЕТЗ різного виду та характеристики, а станом на червень 2019 року їхня кількість складала 25 171, що практично на 10 000 більше. Таким чином практично за рік часу українці збільшили ринок ЕТЗ на 37 %.[1,2].

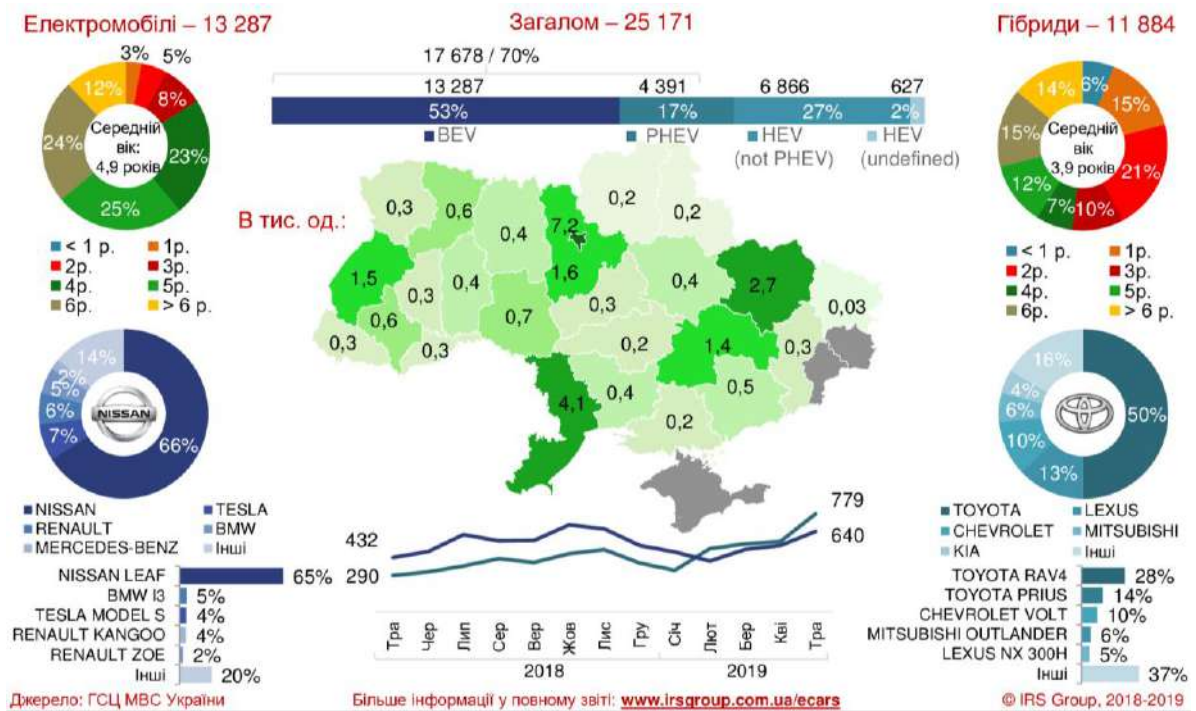


Рис. 4. Кількість зареєстрованих ЕТЗ в Україні, станом на 01.06.2019.

Подальший детальний аналіз (рис.4.) ринку ЕТЗ України показує, що на червень 2019 року лідерами серед регіонів України є м. Київ та Київська область (7,2 та 1,5 тис автомобілів відповідно), Харківська область (2,7 тис автомобілів), Одеська область (4,1 тис автомобілів) та Львівська область (1,5 тис автомобілів).

Аналогічно світовим тенденціям розвитку в Україні спостерігається домінування ЕА над АЗГД, а саме 13 297 проти 11 884 відповідно.

#### Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є проведення аналізу пожежної небезпеки автомобілів на альтернативних джерелах енергії.

Для реалізації поставленої мети було передбачено виконання таких задач:

- проаналізувати сучасний стан використання автомобілів на альтернативних джерелах енергії;
- провести аналіз конструктивних особливостей та принципи роботи автомобілів на альтернативних джерелах енергії;



- провести літературний огляд наукових статей та робіт щодо дослідження пожежної безпеки літій-іонних елементів живлення, автомобілів на водневому паливі;

**Об'єкт дослідження** – автомобілів на альтернативних джерелах енергії (електроавтомобілі та автомобілі на водневому паливі).

**Предмет дослідження** - пожежна безпека літій-іонних елементів живлення та водню.

**Методи дослідження.** Аналітична оцінка та узагальнення результатів наявних наукових досліджень.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Набуття подальшого розвитку щодо безпеки та алгоритму гасіння автомобілів на альтернативних джерелах енергії.

**Постановка задачі.** Для визначення пожежної безпеки автомобілів на альтернативних джерелах енергії необхідно провести аналіз конструктивних особливостей електро-автомобілів та автомобілів на водневому паливі. Отриманий аналіз дасть змогу в подальшому оцінити основні ризики та безпеки пов'язані з автомобілями на альтернативних джерелах енергії.

### **Розв'язання задачі.**

#### *Конструкція та характеристика автомобілів «Tesla»*

Автомобілі марки «Tesla», загалом як і всі інші автовиробники, не мають суттєвих розбіжностей в базовій конструкції кузова автомобіля та розміщенні основних вузлів. Різницю між автомобілями «Tesla Model S та Model 3» буде полягати перш за все в потужності самого автомобіля (потужності акумуляторної батареї), запасу ходу автомобіля на одному заряді, зовнішніх особливостях дизайну кузова та салону.

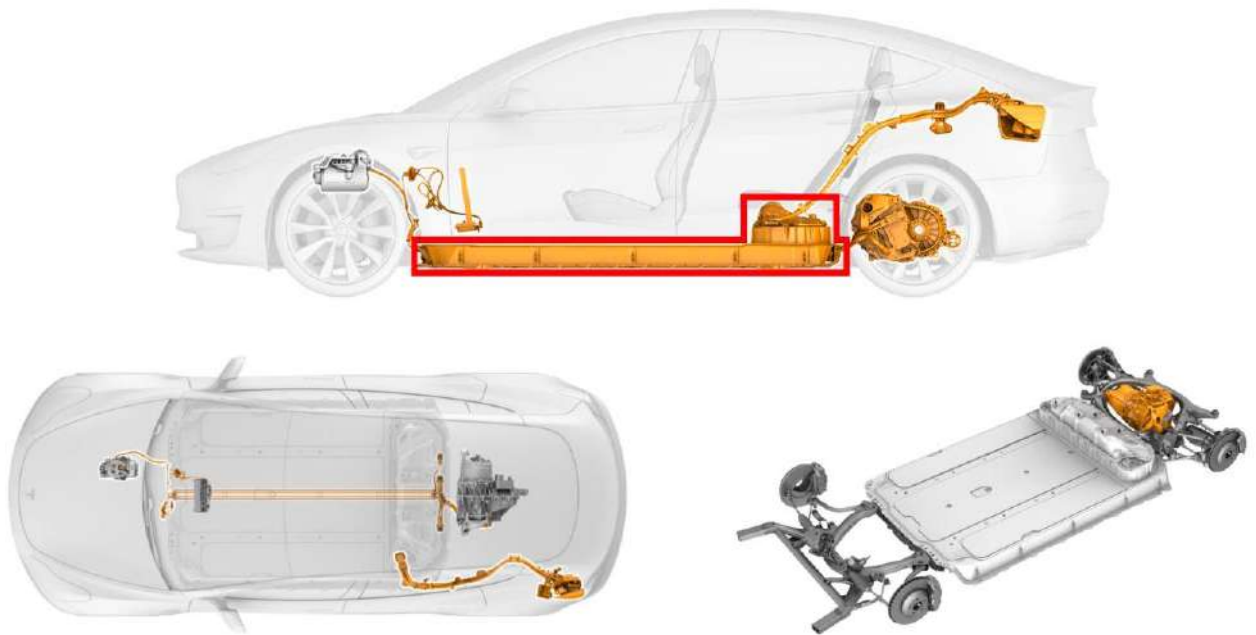


Рис. 5. Базова конструкція та розміщення основних вузлів на автомобілі «Tesla Model 3».

На відміну від Model 3 Model S (в залежності від комплектації та року випуску) має варіанти виконання з двома електродвигунами, що однозначно впливатиме на потужність автомобіля в цілому та акумуляторної батареї. [6].



а) приклад елемента живлення зразка 18650 (18 x 65 мм)



б) акумуляторна батарея Tesla Model S

Рис. 6. Приклад елемента живлення 18650 та їхнього розподілу в акумуляторній батареї.

Електродвигуни автомобілів модифікації «3» та «S» розміщується на осі заднього колеса автомобіля, а в варіантах двох електромоторів на осях переднього та заднього колеса відповідно. Всі інші основні агрегати та вузли автомобілів загалом є схожими.

Акумуляторна батарея автомобілів «Tesla» розміщена в нижній частині кузова і займає практично всю його площу. В останніх моделях автомобілів «Tesla» додатково облаштовується захист акумуляторної батареї з використанням титанової пластини. В конструкції акумуляторної батареї використовуються елементи живлення типу 18650. Для прикладу, в Model S (2012 – 2015 років випуску) розміщено 16 блоків в кожному з яких міститься 444 елементи живлення типу 18650, що дорівнює 7104 елементам живлення .

#### *Конструкція та характеристика автомобілів «Nissan Leaf»*

Електрокар «Nissan Leaf» є найрозповсюдженішим ЕА на теренах Європи та особливо України. На відміну від попереднього ЕА «Nissan Leaf» має принципові конструктивні відмінності в будові акумуляторної батареї та конструкції і розміщенні електродвигуна.

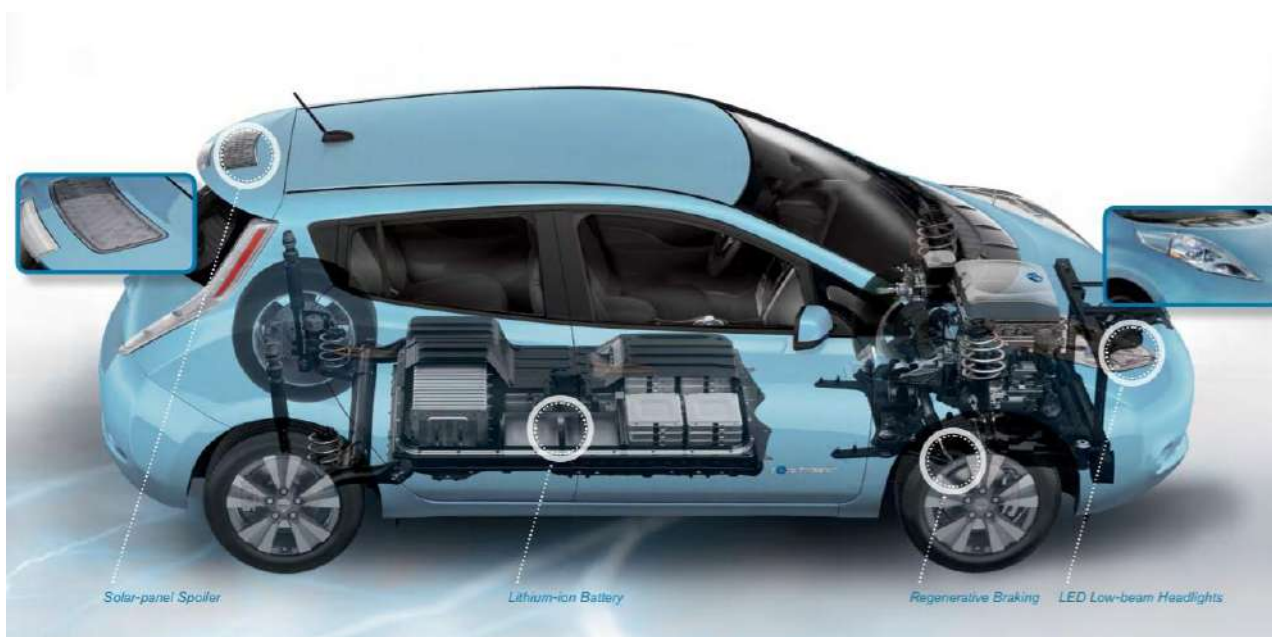


Рис.7. Базова конструкція та розміщення основних вузлів на автомобілі «Nissan Leaf».

Аналогічно попередній моделі акумуляторна батарея автомобіля (модельного ряду 2018 року) розміщується у днищі автомобіля, однак займає дещо меншу площу. Принципова відмінність акумуляторної батареї полягає у використанні інших елементів живлення, а саме пакетних полімерних та як наслідок їхнього подальшого улаштування в корпусі акумуляторної батареї.



*а) пакетний полімерний елемент  
живлення*



*б) акумуляторна батарея  
Nissan Leaf*

Рисунок - 8. Приклад пакетного полімерного елемента живлення та їхнього розподілу в акумуляторній батареї Nissan Leaf.

Для отримання необхідної ємності акумуляторної батареї електрокара і захисту самої батареї від механічних пошкоджень елементи живлення батареї поміщають в металеві блоки. Так наприклад, акумуляторна батарея Nissan Leaf складається з 48 алюмінієвих блоків (в кожному з яких розміщено 4 пакетних полімерних елементів живлення – модельний ряд 2010-2017 рр.). Однак, з 2017 року було здійснено удосконалення структури елементів живлення і дещо перероблено розподіл кількості елементів живлення (було зроблено 24 блоки по 8 пакетних полімерних елементів живлення) при цьому загальна кількість елементів живлення залишилась сталою і складала 192 шт. покращення конструкції елементів живлення дало змогу підвищити запас ходу автомобіля на 67%. Електродвигун цього автомобіля розміщується в капотному відділенні.

Загальна будова та принцип роботи автомобілі на водневому паливі



## Системи автомобіля на водневому паливі

АВП досить цікаві, складні в будові та водночас небезпечні ТЗ. В іноземній термінології найчастіше АВП позначаються як **FCEV – fuel cell electric vehicles, тобто** електроавтомобіль на паливних елементах (елементах).

В АВП використовується спеціальний паливний елемент, що за своєю будовою та принципом роботи досить схожий з елементом живлення ЕА. АВП мають електричний привід, що живиться від паливного елемента, який виробляє електроенергію за рахунок електрохімічних реакції, що протікає з використанням водню. Для АВП характерні наступні ключові системи: • система подачі водню, • система накопичення водню; • система подачі водневого палива; • система паливних елементів; • електрична силова установка; • система управління потужністю.

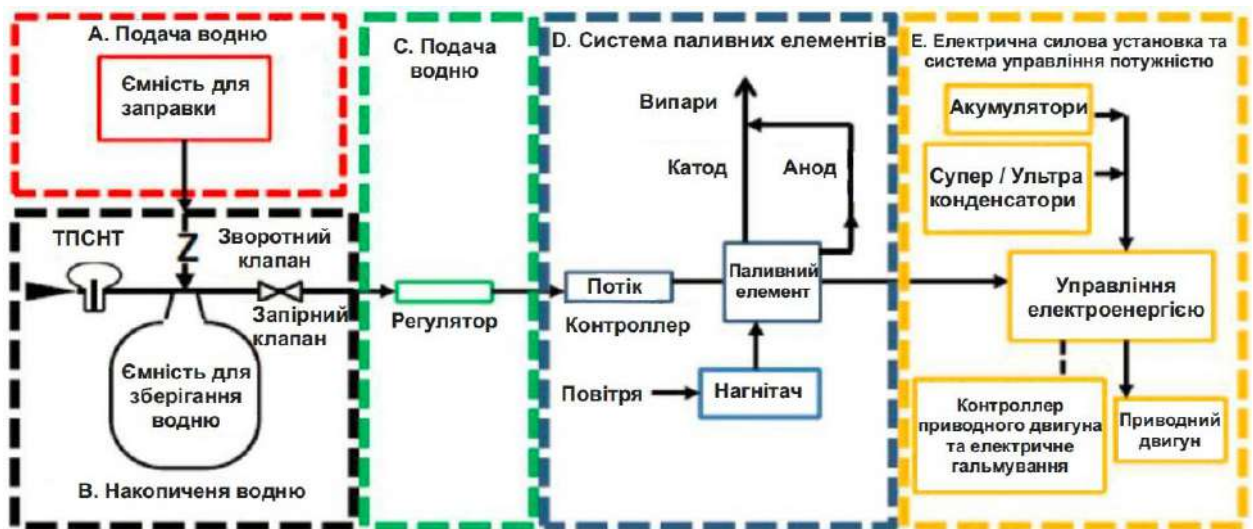


Рис.9. Схематичний розподіл основних вузлів та систем АВП

Під час заправки водень подається до автомобіля через паливний бак (А) і надходить до системи накопичення водню (В). Водень, що подається і зберігається в системі накопичення водню, як правило, у стислому газоподібному вигляді. Коли автомобіль на паливних елементах заводиться, газ водню виділяється із системи зберігання. Регулятори тиску та інше обладнання в системі подачі водню (С) знижують тиск до рівня, відповідного

для роботи паливних елементів. Водень за допомогою електрохімічної реакції поєднується з киснем у системі паливних елементів (D) для отримання високовольтної електричної енергії. Ця електроенергія подається до системи керування електроенергією (E), де вона накопичується в акумуляторних батареях та в подальшому використовується для живлення електродвигунів, живлення різноманітних елементів автомобіля.

Малюнок (рис. 9) ілюструє типову схему основних компонентів типового автомобіля на паливних елементах. Отвір для заправки розташований на задній панелі автомобіля, як і в інших звичайних автомобілях. Як і у бензинових автомобілях, ємності для зберігання водню зазвичай встановлюються поперечно в задній частині автомобіля, але можуть бути встановлені і по-іншому, наприклад вздовж у середньому тунелі автомобіля. Паливні елементи та допоміжні елементи, як правило, розташовані під пасажирським відділенням разом із системою управління живленням, контролером двигуна та самим двигуном. Враховуючи розміри та вагу тягових акумуляторів та ультраконденсаторів, ці компоненти, як правило, розташовані в машині, щоб зберегти бажаний баланс ваги для належного керування автомобілем.

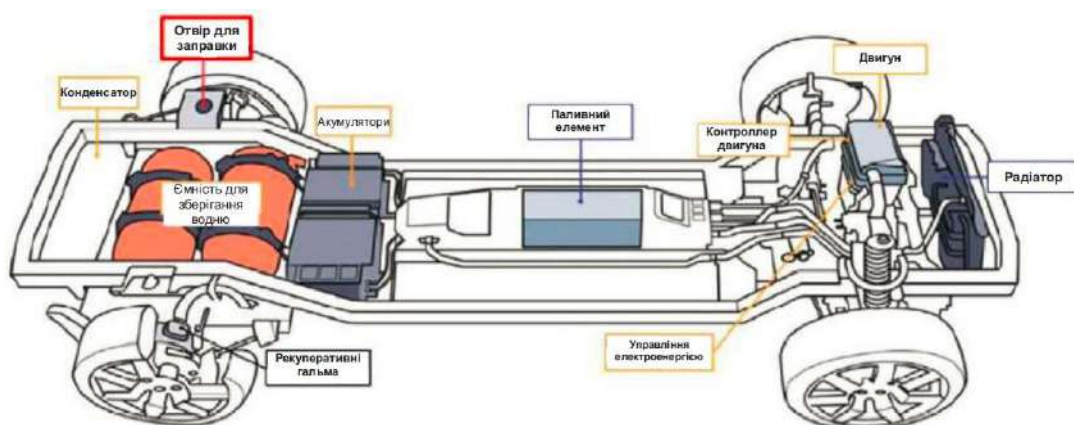


Рис.10. Загальний принцип роботи АВП

Система подачі водню автомобілів на водневому паливі

Водень може подаватися в машину на спеціальній заправній станції. АВП заправляються через спеціальний заправний штуцер (отвір) на заправній станції шляхом герметичного під'єднання, щоб забезпечити передачу водню до автомобіля без доступу сторонніх газів. Заправний штуцер містить зворотний клапан або інший пристрій, що запобігає витоку водню з автомобіля при від'єднанні паливного шлангу.

В даний час водень найчастіше розподіляється в автомобілі у вигляді стисненого газу, що знаходиться під тиском до 125% від номінального робочого тиску (NWP) автомобіля, щоб компенсувати перехідне нагрівання від адіабатичного стиснення під час заправки.[11].

#### Система зберігання водню автомобілів на водневому паливі

Основними функціями системи зберігання водню є отримання водню під час заправки та його подальшого зберігання до моменту його використання. В даний час найпоширенішим способом зберігання та використання водневого палива для потреб автомобіля є стиснений газ (CGH<sub>2</sub>). Як зазначалося вище водень зберігається в спеціальних балонах розрахованих на робочий тиск до 700 бар, що спеціально розроблені для збільшення запасу стисненого газу. Балони можуть бути виконані як з металу (тип III) так і з спеціальних полімерно-композитних матеріалів (тип IV, рис.11 ).



(a)



(б)

Рис.11. Прототипи циліндрів 700 барів, розроблені та випробувані в рамках європейського проекту STORHY: (a) технологія типу III, (b) технологія типу IV

Компоненти типової системи зберігання стисненого водню показані на рис 12. Система включає резервуар та всі необхідні елементи які утворюють «первинну межу тиску», що перешкоджає виходу водню з системи.[12].



Рис. 12. Схематичне зображення балона для зберігання водню з системами безпеки

У складі системи накопичення стисненого водню є три запобіжні пристрої:

- зворотний клапан;
- запірний клапан;
- Термічно активований пристрій для зниження тиску (ТАПЗТ).

Під час заправки водень надходить у систему зберігання через зворотний клапан. Зворотний клапан запобігає зворотному витоку водню. Автоматизований запірний клапан водню запобігає відтоку накопиченого водню, коли машина не працює або коли виявлена несправність, яка вимагає ізоляції системи накопичення водню.

У разі пожежі активується ТАПЗТ, що забезпечує контрольований викид газу з ємностей для зберігання стисненого водню до того, як висока температура вогнища критично нагріє саму ємність, що може спричинити розрив балону з воднем. ТАПЗТ призначений для швидкого видалення всього вмісту балону. Зазвичай, передбачається, що водень у випадку пожежі видаляється за межі транспортного засобу через спеціальну аварійну систему



трубопроводів. Точне розташування цих трубопроводів залежить від виробника ТЗ та моделі АВП, але, як правило, вони знаходяться в задній частині ТЗ, біля резервуару для водню.

Система подачі палива повинна знижувати тиск у системі накопичення водню до значень, необхідних системі паливних елементів. Наприклад, у випадку системи зберігання стисненого водню при тиску 70 МПа, тиск, зменшується до менш ніж 1 МПа на вході в систему паливних елементів. Для цього може знадобитися кілька етапів регулювання тиску для досягнення точного та стабільного контролю та захисту від надлишкового тиску інших систем ТЗ.

Для забезпечення безпеки, в АВП монтуються датчики для контролю вмісту водню в салоні ТЗ. При спрацюванні датчика система автоматично припинить подачу водню до паливних елементів ТЗ. Відповідні датчики монтуються на панелі приладів, безпосередньо біля резервуарів для зберігання водню, біля вихлопної труби, під капотом, на рівні голови водія та пасажирів ( над підголовником у пасажирському салоні). При ввімкненні ТЗ ці датчики постійно контролюють концентрацію водню в цих зонах. Наприклад, у випадку коли концентрація водню виявиться на рівні «попередження» (тобто понад 12% від максимально допустимої норми), водій буде попереджений піктограмою «Н<sub>2</sub>», розташованою на панелі приладів, а на дисплеї комп'ютера з'явиться повідомлення «Виявлено Н<sub>2</sub>». Якщо водень виявляється на рівні «Сигналізація» (понад 50% від максимально допустимої норми), піктограма «Н<sub>2</sub>» блиматиме, пролунає звуковий сигнал, а на комп'ютері з'явиться повідомлення «Виявлено підвищену концентрацію Н<sub>2</sub> – покиньте ТЗ».

#### Система подачі водню автомобілів на водневому паливі

Система подачі водневого палива передає водень з накопичувальної системи в рушійну систему при достатньому тиску та температурі для роботи паливних елементів. Це досягається за допомогою серії клапанів регулювання витрати, регуляторів тиску, фільтрів, паливних труб (труб) та

теплообмінників. Більшість паливних ліній мають сріблястий колір, але іноді вони можуть бути і червоними. Якщо резервуар з воднем перекритий, у випадку аварійної ситуації, в системі подачі водню все ще залишатимуться його залишки під тиском. Таким чином, під час проведення аварійно-рятувальних робіт необхідно бути обережним та зважати це під час проведення робіт з перерізання конструкцій ТЗ.

#### Система паливних елементів автомобілів на водневому паливі

Система паливних елементів виробляє електроенергію, необхідну для роботи приводних двигунів та зарядки акумуляторів та/або конденсаторів автомобіля. Паливні елементи за рахунок протікання електрохімічної реакції поєднують водень і кисень для отримання електричної енергії. Паливні елементи здатні безперервно виробляти електроенергію при постійній подачі необхідних компонентів водню та кисню, одночасно виробляючи електроенергію та воду, не виробляючи вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) або інших шкідливих викидів, характерних для ДВЗ. Загалом паливні елементи у легкому пасажирському транспортному засобі здатні генерувати напругу близько 400 В постійного струму. Спеціальний перетворювач напруги (трансформатор) з'єднує паливний елемент з високовольтною батареєю яка здійснює накопичення виробленої енергії.

#### Електрична силова установка та система управління потужністю автомобілів на водневому паливі

Електроенергія, що виробляється системою паливних елементів, використовується для приводу електродвигунів, що рухають транспортний засіб, а також для живлення повітряного насоса, кондиціонера та інших елементів автомобіля. Значна кількість легкових АВП мають передній привід де електродвигун розташовується традиційно у «моторному відсіку», встановленому поперечно над передньою віссю, однак можливе і ніше їх розміщення.

Акумуляторну батарею за аналогією з ЕА, як правило, поміщають у металевий корпус і міцно вмонтовують у раму. Різні виробники використовують різний тип акумуляторних елементів, але в переважній більшості використовуються літій-іонні або нікель-кадмієві елементи живлення.

Електроенергія з паливних елементів та акумуляторної батареї високої напруги подається до двигунів за допомогою ряду кабелів, які, як правило, розташовані всередині або позаду закритих високовольтних компонентів та під транспортним засобом. Їх можна легко ідентифікувати за характерними помаранчевими кольором.

Результати наукових досліджень по пожежній небезпеці електроавтомобілів

Розглядаючи сучасну конструкцію електромобіля і ґрунтуючись на статистиці загорянь ЕА можна стверджувати, що основна небезпека як з точки зору пожежної безпеки так і безпеки проведення аварійно-рятувальних робіт в даному виді транспорту знаходиться в акумуляторних батареях великої ємності (приблизно 24 - 85 кВт / годин і більше в залежності від моделі автомобіля).

Літій-іонні батареї мають ряд переваг, наприклад, довгий термін служби і можливість швидкої зарядки. Але водночас з великими перевагами літій-іонних батарей є ряд недоліків, які несуть потенційну пожежну небезпеку як транспортному засобу так і людині. Оскільки в середині елемента живлення знаходиться електроліт легко запалюється і може стати причиною незворотної термічної реакції, що надалі приведе до виділення легкозаймистих і токсичних газів, а в деяких випадках і вибуху елемента живлення. Незворотна термічна реакція може статися, в разі порушення стабільного режиму роботи елемента живлення і може бути викликана, наступними причинами:

- коротким замиканням;
- перегрівом;

- перезарядженням;
- механічним пошкодженням.

Відповідно до викладеного вище, метою цього розділу роботи є аналіз результатів актуальних досліджень в галузі пожежної безпеки щодо елементів живлення акумуляторних батарей електрокарів.

Для того щоб літій іонний елемент живлення став джерелом загоряння необхідна наявність трьох складових: кисню, джерела запалювання і горючої речовини.

В роботі було детально описано процес під час якого, при впливі температур  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $74\text{ }^{\circ}\text{C}$  на позитивний електрод  $\text{Li}_{0,5}\text{CoO}_2$  і негативний електрод  $\text{Li}_{0,8}\text{C}_6$  відповідно, відбувається хімічна реакція з виділенням чистого кисню який як наслідок доповнює класичний трикутник виникнення горіння. Також на основі теорії Семенова [9, 10] авторами було розраховано, що при підвищенні температури елемента живлення вище  $65,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  має місце прискорення протікання термохімічних реакцій які можуть спричинити незворотній процес загоряння, а при досягненні температури  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  виникає точка неповернення і подальше загоряння елемента живлення. Загальний процес загоряння і як наслідок поява ланцюгової реакції «ефекту доміно», на думку авторів, можна зобразити таким чином рис.13.

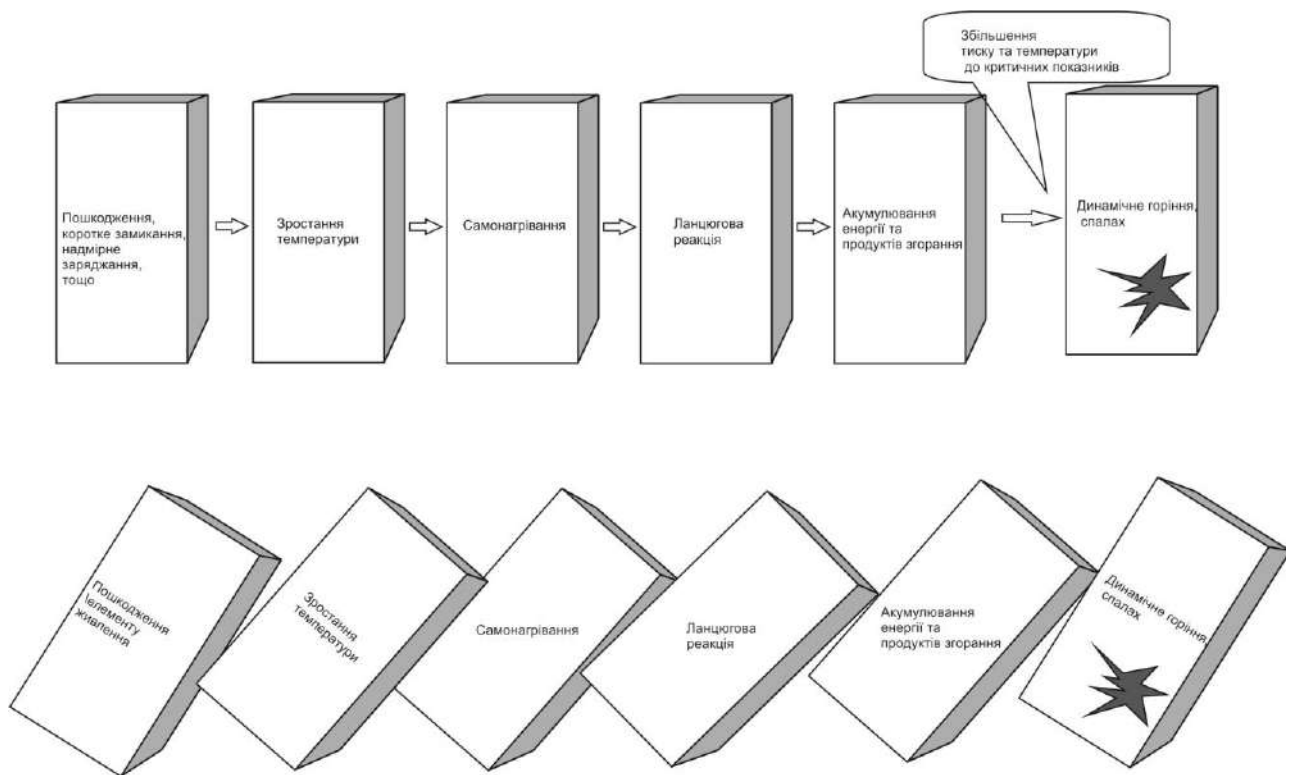
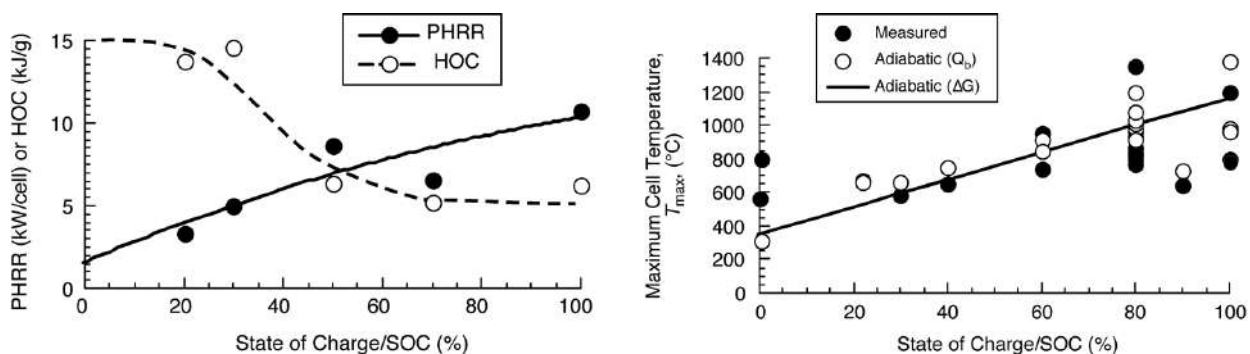


Рис.13. Ефект доміно в літій-іонному елементі живлення

Під час протікання термохімічної реакції в літій іонному елементі живлення виділяється значна кількість теплової енергії і небезпечних продуктів горіння в роботах було детально досліджено і визначено ці величини.

Авторами було досліджено близько дев'яти різних елементів живлення серед яких найбільшу увагу було приділено циліндричним елементів живлення формату 18650 і пакетним полімерним елементам живлення. Для представлених елементів живлення були проведені дослідження по визначенню величини енергії, що виділяється з використанням калориметра, що працює за принципом споживання кисню. У цих тестах елементи живлення піддавалися впливу променистого теплового потоку від 10 до 75 кВт/м<sup>2</sup>. Для тестування бралися елементи живлення з різною величиною заряду від 20 до 100%, що також впливало на результати дослідження. В результаті проведених досліджень були отримані наступні дані для елементів живлення виду 18650 рис.14.



а) результати досліджень по визначенню величини теплоти (кВт) і теплоти згорання (кДж/гр) в залежності від величини заряду (%) елемента живлення  
 б) результати досліджень з визначення максимальної температури (°C) елемента в залежності від величини його заряду (%)

Рис. 14. Результати досліджень по визначенню небезпек літій-іонних елементів живлення 18650.

Результати досліджень для пакетних елементів живлення були отримані лише при величині заряду 50% де середній показник величини виділеної теплоти склав 6,1 кВт.[6].

У дослідженнях було проведено ряд експериментів по визначенню температури елементів живлення типу 18650 в залежності від величини його заряду і типу укладання елементів. Для експериментів було вибрано два варіанти укладання елементів живлення рис.14. вертикальна і горизонтальна. У кожному з варіантів укладання розміщувався один елемент живлення, який піддавався нагріву шляхом підключення до електричного трансформатора, і служив джерелом тепла для іншого активного елемента живлення. Інші ж елементи живлення були лише імітацією, але які в той же час представляли собою конструкцію максимально схожу на активний елемент живлення з вмонтованими термодатчиками.

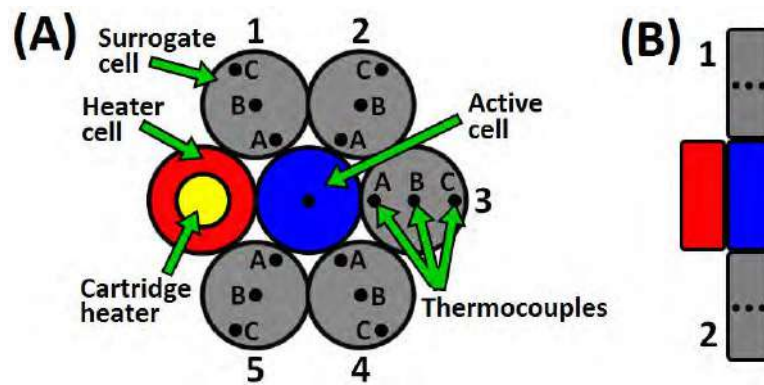


Рис. 15. Приклад розміщення елементів живлення виду 18650: горизонтальне або шестикутне (А) і (В) вертикально

Як було сказано раніше експеримент проводився також при різній величині заряду активної батареї: 30%, 100% і більше 100%. В результаті проведених експериментів були отримані наступні результати Таблиця 1.,

де:  $T_{акт}^{нов}$  - температура поверхні активного елемента,  $T_{пр.эл}^{ср}$  - середній показник температури прилеглих імітаційних елементів живлення.

Таблиця 1.

Результати досліджень в залежності від величини заряду елемента живлення і їх розміщення

Величина заряду активного елемента живлення	Вертикальне розміщення елементів живлення	Горизонтальне розміщення елементів живлення
30%	$T_{акт}^{нов} = 126 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{пр.эл}^{ср} = 148-236 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{акт}^{нов} = 127 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{пр.эл}^{ср} = 70-75 \text{ }^{\circ}\text{C}$
100%	$T_{акт}^{нов} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{пр.эл}^{ср} = 155-231 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – для елементів 2, 3, 4; $T_{пр.эл}^{ср} = 250-418 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – для елементів 1, 5.	$T_{акт}^{нов} = 129 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{пр.эл}^{ср} = 64-68 \text{ }^{\circ}\text{C}$
> 100%	$T_{акт}^{нов} = 141 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{акт}^{нов} = 107 \text{ }^{\circ}\text{C}$

	$T_{np.ел}^{cp} = 114-259 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{акт}^{нов} = 805 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальна температура. $T_{np.ел}^{cp} = 91-109 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – для елемента 1; $T_{np.ел}^{cp} = 89-96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – для елементів 2.
--	---	---

Також необхідно відзначити що при величині заряду активного елемента живлення 100% і більше при досягненні критичних температур спостерігалось рясне іскро і газовиділення, що в кінцевому підсумку було сигналом для завершення експерименту.

Також уваги заслуговує робота в якій автори провели ряд експериментів, за аналогією з попередньою роботою, відразу з декількома елементами живлення (5 штук) виду 18650. В ході експерименту було визначено величину виділеної теплоти елементами живлення, вид і кількість небезпечних газів які виділяються вчасно їх горіння в залежності від величини заряду елементів живлення.

Результати експерименту показали, що величина випромінювання безпосередньо залежить від ступеня заряду елемента живлення рис.15.



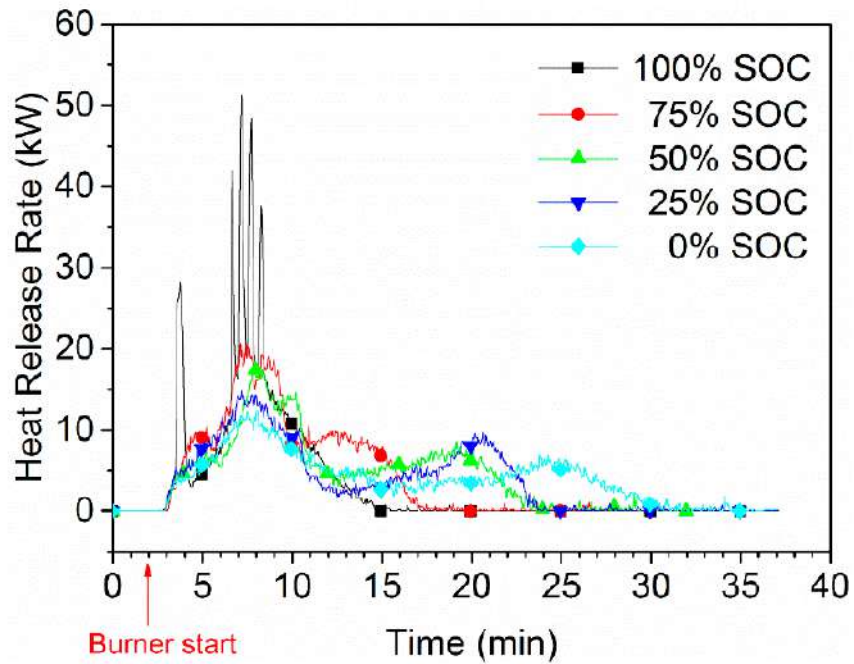


Рис.16. Величина випромінювання для п'яти елементів живлення в залежності від ступеня їх заряду (0% - 100%)

Як було заявлено раніше в наслідок горіння літій-іонних елементів живлення виділяється не тільки значна кількість теплоти але і значна кількість токсичних продуктів горіння серед яких автори виділяють фтористий водень (HF) і оксифторид фосфору ( $\text{POF}_3$ ). Однак в наслідок проведення експериментів авторам не вдалося заміряти концентрацію і величину  $\text{POF}_3$ , а швидкість виділення HF представлено на рис.16.

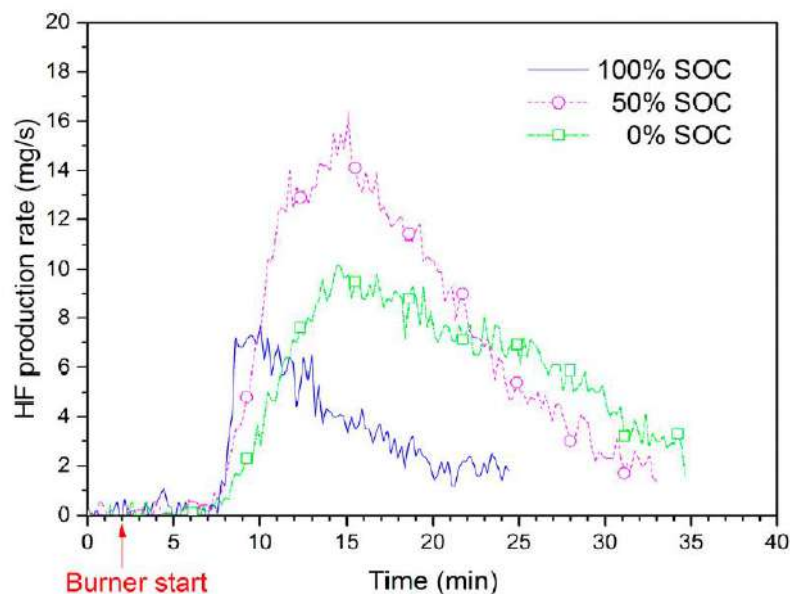


Рис.17. Швидкість виділення фтористого водню (HF) для п'яти елементів живлення в залежності від ступеня їх заряду (0% - 100%) під час їхнього горіння .

Важливо відзначити, що швидкість виділення HF набагато вище при ступені заряду елементів живлення 50%, а при 100% показники найменші.

Представлені вище результати досліджень стосувалися лише окремих елементів живлення акумуляторної батареї але як говорилося раніше акумуляторна батарея електрокара складається з 192 - 7000 тисяч таких елементів (в залежності від марки автомобіля). Така кількість елементів живлення, виходячи з представлених раніше результатів, під час пожежі має виділяти надзвичайно велику кількість енергії, а якщо розглядати даний вид пожежі з боку тактики його гасіння то для ліквідації подібної пожежі необхідно затратити значну кількість вогнегасного засобу.

Завдяки проведеним повномасштабним вогневим експериментам щодо визначення величини виділеної теплоти, під час згоряння справжньою акумуляторної батареї, і тактики її гасіння нам доступні унікальні результати.

Для проведення експерименту було взято два види акумуляторних батарей. Акумулятор «А» призначений для гібридних автомобілів, який містить герметичні літій-іонні акумулятори. Акумуляторна батарея з ємністю 4,4 кВт/г укладений в металевий корпус і жорстко встановлений в нижній частині задньої частини автомобіля, за заднім сидінням, Рис. 17а. Металевий корпус ізольований від високої напруги, прихований і відокремлений від пасажирського салону литою пластмасовою кришкою та накритий килимовим покриттям. Електроліт, який використовується в літій-іонних акумуляторах, є легкозаймистою органічним електролітом.



*а) Акумуляторна батарея типу «А»      б) Акумуляторна батарея типу «В»*

Рис. 18. Приклад акумуляторних батарей для проведення повномасштабних вогневих експериментів акумуляторної батареї «А» від гібридного автомобіля

Акумулятор «В» призначений для електрокарів з ємністю 16 кВт/г укладений в корпус зі скловолокна. Т-подібної форма акумулятора охоплює майже всю довжину транспортного засобу від задньої осі до передньої осі і жорстко змонтована під піддоном автомобіля (рис.17 б).

На першій стадії експерименту було досліджено кількість теплоти яку виділятиме акумуляторна батарея типу «В» попередньо розігріта від стороннього джерела тепла (пропанові пальники) потужністю приблизно 400 кВт.

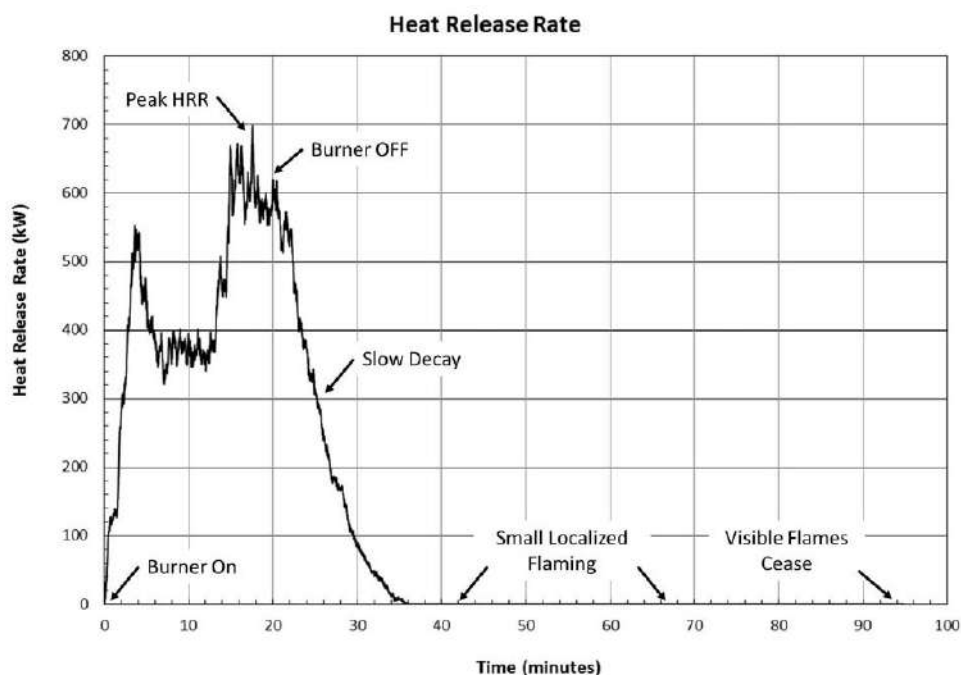


Рис.19. Результати проведення експериментів з визначення кількості теплоти під час згоряння акумуляторної батареї типу «В»

Вимірювання температури і теплового потоку реєструвалися на зовнішній і внутрішній стороні батареї, а також на відстані 1,5 і 3 метрів від батареї. Зразки продуктів згоряння збирали для аналізу на токсичні або корозійні сполуки. Експеримент вважався завершеним після повного самовигорання акумуляторної батареї без сторонньої допомоги.

Максимальний величина теплового випромінювання становила 300 кВт (при відніманні потужності пропанового пальника), із застосуванням випробувального часу 17 хвилин і 30 секунд а температура корпусу 684-1155 °С. Максимальні температури на відстані 1,5 і 3 метрів від батареї становила від 94 - 110 °С і 41 - 52 °С відповідно. У той же час максимальна величина теплового випромінювання на аналогічному відстані становила від 17,1 до 18 кВт/м<sup>2</sup> і 3,7 до 4,7 кВт/м<sup>2</sup>.

Після відключення пальників, приблизно на 20-хвилині величина теплового випромінювання поступово спадала, після позначки в 36 хвилин, полум'я значно зменшилася і величина теплового випромінювання практично була нульовою.

Невеликі локальні осередки загоряння на батареї тривали приблизно протягом ще однієї години. Коли видиме горіння припинилося, зовнішня максимальна температура батареї становила приблизно 400 °С. Ще через три години максимальна температура становила приблизно 155 °С.

Також під час першого етапу досліджень було взято чотирнадцять зразків продуктів горіння з використанням мішків «Tedlar». Відбір проб проводили кожні 5 хвилин, починаючи з 5 хвилин випробування. Кожен зразок проби робили протягом 1 хвилини. Потім мішки аналізували на HCl, HF, HBr, HCN, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, акролеїн і формальдегід з використанням інфрачервоного спектрометра з перетворенням Фур'є. Результати показали тільки наявність CO і CO<sub>2</sub>. Кожен спектр був безпосередньо досліджений на наявність HCN і HF - не виявлено; однак, автори визнають, що в ході випробувань могло мати місце певна похибка яка вплинула на кінцеві результати.

На другому етапі досліджень були проведені повномасштабні дослідження основним завданням яких було визначити кількість часу, вогнегасної речовини (води) необхідної для гасіння акумуляторних батарей виду «А» і «В». При цьому умови розміщення акумуляторних батарей були максимально наближені до реальних:

- батарея розміщувалася в кузові автомобіля;
- батарея додатково накривалася захисним листом металу;
- в кузов автомобіля додатково містилися елементи інтер'єру та декору.

Результати проведених тестів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Сумарні результати кількості витраченої води під час гасіння  
акумуляторних батарей в автомобілі

Вид батареї / серія тестів	Час витрачений на гасіння, хв	Час подачі води, хв	Загальна кількість води, л	Примітка
A1	5,88	2,20	1040	Тільки батарея
A2	36,60	3,53	1673	Тільки батарея
A3	49,67	9,77	4012	Батарея з елементами декору
B1	26,52	14,03	6639	Тільки батарея
B2	37,60	21,37	9989	Тільки батарея
B3*	13,88	9,32	4410	Батарея з елементами декору

\* час і кількість витраченої води для гасіння пожежі значно відрізняється в наслідок того, що пожежники вже мали досвід гасіння на прикладі попередніх спроб.

Аналогічно з першим етапом під час другого етапу вимірювалася величина теплового випромінювання на відстань 1,5 та 3 метри і таким чином склала 2,1-3,7 кВт/м<sup>2</sup> (під час горіння однієї батареї) і 8,1-11,9 кВт/м<sup>2</sup> (під час горіння батареї з елементами декору).

Після закінчення кожного варіанта гасіння акумуляторних батарей бралися проби води для подальшого аналізу на наявність шкідливих речовин. Зразки води, зібрані під час випробувань, вказують на присутність хлориду і фториду (ймовірно, в формі HF і хлористого водню HCl). Однак концентрація хлориду в розчині була тільки в 2-3 рази вище нормальних реєстрованих рівнів, тоді як концентрація фториду була більш ніж в 100 разів вище, ніж нормальні виявлені рівні. Ніякі інші корозійні або токсичні сполуки в зразках води не виявлено.

Отримані на сьогоднішній день результати досліджень щодо літій-іонних елементів живлення акумуляторних батарей дають нам чітке розуміння того, що таке технічне пристосування одночасно з позитивним ефектом несе людству велику небезпеку.

Отримані результати досліджень показують, що елементарний літій-іонний елемент живлення під час горіння здатний продукувати від 6 до 10 кВт енергії і досить велику кількість небезпечних продуктів горіння, особливо HF, POF<sub>3</sub>, хоча останнє твердження вимагає подальших досліджень. Також показані результати досліджень однозначно підтверджують, що кількість енергії, що виділяється літій-іонним елементом живлення безпосередньо залежить від ступеня її заряду.

Повномасштабні результати по дослідженню гасіння акумуляторних батарей електрокарів показали досить непередбачений результат щодо кількості води необхідної для гасіння подібної пожежі. Виходячи з результатів експерименту середня кількість води необхідне для гасіння подібного загоряння коливається від 2500 до 6000 л, що може перевищувати обсяг вивезеної води одним пожежним автомобілем. Таким чином постає гостра необхідність в удосконаленні тактики гасіння подібних пожеж та тренування особового складу.

У зв'язку з постійним розвитком і вдосконаленням технологій представлені результати будуть відрізнятися від нових видів батарей [16-20]

тому в цьому напрямку завжди буде необхідність проводити додаткові дослідження.

### **Рекомендації по гасінню електроавтомобілів**

Розглядаючи первинні дії керівника гасіння пожежі (КГП) з прибуттям на місце пожежі (горіння електрокара) та взявши до уваги сучасний досвід гасіння подібних пожеж, особовий склад та КГП повинні:[7].

1. З прибуттям на місце пожежі перш за все визначити тип та марку автомобіля. У різних марок та моделей електрокарів розміщення силових кабелів, акумуляторних батарей тощо може суттєво відрізнятися. Правильне визначення розміщення основних елементів електромобіля створить сприятливі та безпечні умови для подальшої ліквідації пожежі та рятування постраждалих.

2. За можливості, перемістити автомобіль в безпечне місце або забрати припарковані поруч транспортні засоби, майно, тощо.

3. Знерухомити автомобіль та створити умови для унеможливлення його подальшого руху. Виконання цього етапу є обов'язковим для забезпечення особового складу від випадків неконтрольованого руху транспортного засобу та випадкового наїзду. Для забезпечення можливе використання спеціального обладнання та підручних засобів.

4. Обов'язково відключити системи електроживлення електрокара. Як правило в кожному електромобілі заводом-виробником передбачена система аварійного відключення акумуляторної батареї, однак досить часто під час оперативної роботи можуть виникати труднощі з віднаходженням централізованого місця відключення електроживлення. При виникненні подібних ситуацій виникає необхідність у перерізанні силових кабелів та механічному вилученні акумуляторної батареї. Для реалізації вище зазначених завдань особовий склад та КГП повинні виконати пункт №1 та знати технічні особливості автомобіля.

5. КГП в обов'язковому порядку у випадку необхідності проведення гасіння повинен забезпечити безперебійну подачу води у великій кількості,



саме тому з прибуттям автоцистерну необхідно встановити на вододжерело. Під час проведення гасіння у разі необхідності потрібно проводити заходи із запобігання ураженню електричним струмом особового складу шляхом застосувань діелектричного комплекту, заземлення пожежного ствола. По можливості для гасіння необхідно використовувати сучасні перекривні пожежні стволи (Protect, TFG тощо) з можливістю подачі розпиленого струменя води та регульованої витрати (від 3,7 до 7,4 л/с).

6. Під час безпосереднього гасіння пожежі особовий склад повинен використовувати засоби індивідуального захисту (апарати на стисненому повітрі). Як зазначалося раніше горіння акумуляторної батареї супроводжується виділенням специфічних та небезпечних хімічних речовин тривалий вплив яких спричиняє сильне отруєння людського організму і саме тому використання апаратів на стисненому повітрі є обов'язковим.

7. Після ліквідації пожежі необхідно розібрати акумуляторну батарею та пролити її розпиленими струменями води. Розбирання акумуляторної батареї необхідно здійснювати з використанням діелектричного комплекту та спеціального моторизованого інструменту. Можливе використання тепловізора для визначення найбільш нагрітих ділянок для подальшого їх охолодження.

8. Після проведення всіх робіт потрібно попередити відповідні служби, власника про можливість повторного самозаймання автомобіля. Для запобігання подібній ситуації необхідно здійснювати постійний нагляд за електромобілем протягом доби після ліквідації загорання.

*За можливості та у відповідності до закордонного досвіду гасіння на подібні пожежі необхідно залучати (викликати) техніку з маніпулятором вантажопідйомністю до 5 тонн та мобільні резервуари. Відповідно, для економії часу та сил гасіння електроавтомобіля можливо здійснювати шляхом його безпосереднього занурення у воду на термін до 24 годин. Подібний спосіб гасіння безперечно має свої переваги, однак в наших умовах потребуватиме певної законодавчої бази.*

Результати наукових досліджень по пожежній небезпеці автомобілів на водневому паливі

Основними особливостями водню, з точки зору пожежогасіння та пожежної небезпеки, по відношенню до інших, а зокрема вуглеводневих газів, є:

- температура горіння водню на відкритому повітрі може сягати близько 2000 °С. Водень горить практично безбарвним полум'ям;

- концентрація пароповітряної суміші для гідрогену, що призведе до його подальшого горіння є вкрай широка від 4 до 75%, що в порівнянні з іншими горючими газами набагато більше (пропан 2,1 – 10 %, бензин 1 – 7,8%). Однак, ключовим параметром є нижня межа займистості, яка у водню в два рази вища ніж у пропану і в чотири рази – ніж у бензину;

- нижня вибухова межа водню (13-18%), яка також є набагато нижчою за концентрації пароповітряних сумішей бензину та інших газів;

- через малу щільність, в'язкість та коефіцієнт дифузії водень здатний витікати практично в три рази швидше ніж інші гази. Для порівняння швидкість витікання водню становить 1308 м/с, а природного газу – 449 м/с.

Наведений опис лише деяких основних характеристик водню та все більш зростаюча зацікавленість виробників автомобілів у застосуванні стисненого водню у якості палива для автомобілів без зміни їх конструктивних особливостей дає можливість спрогнозувати такі надзвичайні ситуації, пов'язані з АВП:

- пожежа або вибух паливних резервуарів з воднем;
- витікання, горіння водню з паливопроводів (резервуара) під високим тиском;
- факельне горіння водню під високим тиском;
- витікання водню в приміщенні (гараж, закритих паркінгів) без подальшого горіння.

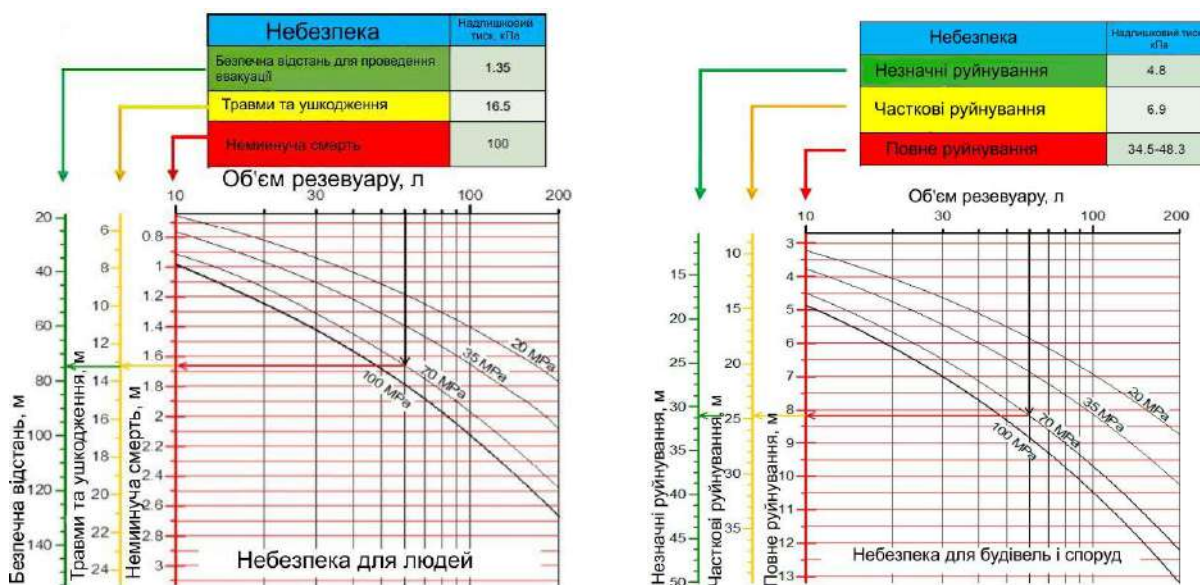
*Пожежа або вибух паливних резервуарів з воднем.* Відповідно до властивостей горіння водню, аварійно-рятувальним підрозділам для

першочергової ідентифікації імовірного горіння необхідно використовувати для аналізу зображення з пожежного тепловізора (рис.20) та газоаналізatori.



Рисунок 20 – Приклад горіння водню в АВП та його зображення на моніторі пожежного тепловізора

Враховуючи надзвичайно високий тиск зберігання стисненого водню в резервуарах автомобіля оперативно-рятувальні підрозділи повинні враховувати можливість вибуху та руйнівну дію надлишкового тиску, що утворюватиметься внаслідок цього (рис.21).



а)

б)

Рисунок 21 – Зони ураження надлишковим тиском вибуху балонів з воднем в АВП (м):

а) – небезпека для людини; б) – небезпека для будівель і споруд

Враховуючи показники, наведені на рис.21, керівник гасіння повинен завчасно встановити безпечні межі роботи та перебування цивільних осіб, а за необхідності навіть провести евакуацію з прилеглих будівель та споруд.

*Витікання водню з паливопроводів (резервуара) під високим тиском.* Під час витікання водню під високим тиском (20МПа- 70 МПа) струмінь газу може завдати значних пошкоджень оголеним ділянкам тіла або навіть проникати через захисний одяг. Захисний одяг рятувальника не може на 100% гарантувати безпеку, згідно з дослідженнями газ під тиском 20 МПа легко проникав через захисні рукавиці та одяг. Проникнення газів через шкірний покрив може призвести до зупинки кровообігу та некрозу тканин. Тиск газу 4,4 МПа достатній, щоб спричинити порізи шкірного покриву людини. Таке явище потрібно братися до уваги рятувальникам під час проведення робіт з ліквідації надзвичайної ситуації, де відбувається витік газу під великим тиском.

*Факельне горіння водню під високим тиском.* Безпосереднє гасіння подібної пожежі тактично дуже схоже на гасіння газоповітряної суміші (природний газ, пропан-бутан тощо). Найефективнішим методом гасіння буде контрольоване самовигорання водню якщо відсутня небезпека займання сусідніх будівель і споруд. Одночасно з тим, оперативно-рятувальні підрозділи повинні здійснювати охолодження резервуарів з воднем та інших елементів ТЗ. Додатковим засобом гасіння подібної пожежі може бути використання спеціальної вогнетривкої кошми.



Рисунок 22 – Приклад використання вогнетривкої кошми для гасіння

## автомобіля

За необхідності наближення особового складу оперативно-рятувальних підрозділів до АВП, що супроводжується факельним горінням необхідно використовувати стволи розпилювачі з високою витратою (рис.23). Прикриваючись розпиленим струменем води (під кутом  $150-170^{\circ}$ ) підрозділи здатні наблизитися впритул до ТЗ та провести необхідні дії: перекрити витік водню, збити полум'я з використанням порошкового вогнегасника, провести операцію з гасіння автомобіля з використанням вогнетривкої кошми.



Рисунок 23 – Приклад тактичного використання стволів-розпилювачів для гасіння факельного горіння

*Витікання водню в приміщенні.* Загалом водень безбарвний газ, який не має запаху та не шкідливий для людини. Однак його швидке виділення та накопичення в обмеженому просторі (приміщенні) може спричинити дефіцит кисню в повітрі, що в свою чергу призведе до втрати свідомості і до смерті людей, що перебувають поблизу. При концентрації кисню в повітрі нижче 19% людина відчуватиме помітний негативний ефект. Вплив на людину концентрації водню в повітрі та відповідне зниження концентрації кисню вказано в таблиці 1. Таким чином перед проведення аварійно-рятувальних робіт в приміщеннях з АВП особовий склад повинен обов'язково перевірити концентрацію кисню в повітрі та обов'язково бути включеними в захисний дихальний апарат. Одночасно з тим необхідно пам'ятати, що при витоках

існує загроза виникнення вибуху газоповітряної суміші при досягненні критичних концентрацій, тому використання обладнання, що може спричинити появу іскри необхідно виключити до моменту пересвідчення в повній відсутності небезпечної концентрації водню в повітрі або вентиляції приміщення.

Неконтрольоване та швидке витікання водню в приміщенні може спричинити додаткову та не менш загрозову ситуацію для особового складу та інших мешканців. Зокрема короткочасне та миттєве зростання тиску в приміщенні, що може призвести до його руйнування. Відповідно до системи безпеки резервуарів АВП зі стисненим воднем аварійний термічний клапан для зниження тиску спрацьовує при температурі близько 110 °С. Клапан забезпечує швидке вивільнення водню, таким чином мінімізуючи імовірність вибуху резервуара під час тривалої дії полум'я. Такі умови є досить прийнятними за умови виникнення горіння на свіжому повітрі. Однак небезпека, яка виникає внаслідок швидкого викиду водню в приміщенні, наприклад гаражі, станції технічного обслуговування не прийнятна для забезпечення безпеки та життя оточуючих.

Для прикладу, на рис.24 зображено порівняльну характеристику досягнення максимального тиску в приміщенні (для різних типів газів, зокрема для водню) залежно від часу, за умови однакової швидкості витікання (390 г/с).

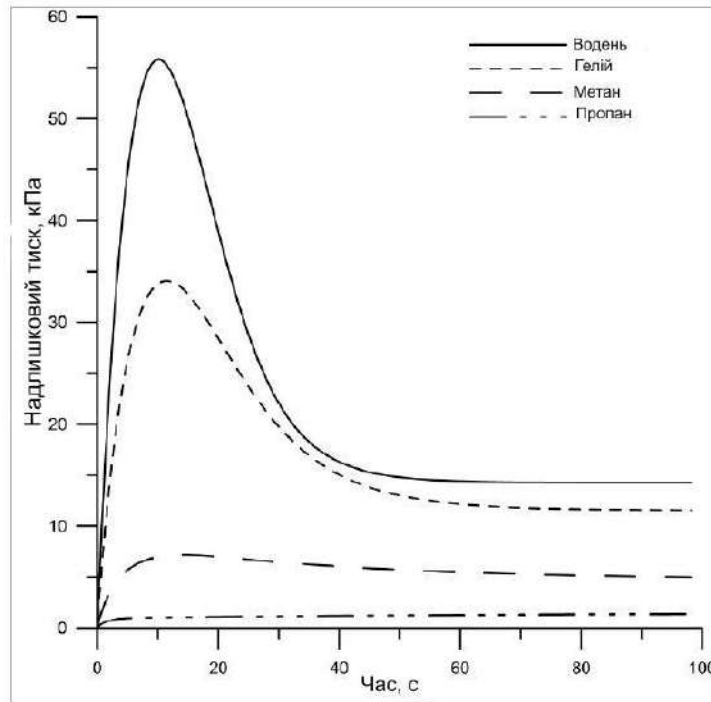


Рисунок 24 – Зображення розподілу тиску в приміщенні об'ємом  $30,4 \text{ м}^3$  при масовій швидкості витікання  $390 \text{ г/с}$  для різних типів газів

Відповідно до рис.24 видно, що водень лише за 10-15 секунд часу збільшить тиск в приміщенні до  $55 \text{ кПа}$ , що призведе до повного руйнування будівлі. Однак, вже за 20 секунд тиск вирівняється до прийнятної в  $15 \text{ кПа}$ . Цікавим є той факт, що ні для метану ні для пропану не характерна така властивість, а лише гелій має подібну до водню характеристику.

## Висновки

За результатами проведеного аналізу конструктивних особливостей та будови автомобілів на альтернативних джерелах енергії було визначено, що на сьогоднішній день існує два основних типів таких автомобілів: електро-автомобілів та автомобілів на водневому паливі. Також відповідно до аналізу можна стверджувати, що основним елементом живлення зазначених транспортних засобів є літій-іонний акумулятор, а у випадку автомобіля на водневому паливі додатково балон(и) зі стисненим воднем під високим тиском (700 атм).

Огляд літературних джерел (наукових статей) показав, що літій-іонні елементи живлення є надзвичайно пожежо-небезпечні за умови утворення короткого замикання, механічного пошкодження, перевантаження електромережі. Горіння літій-іонних елементів живлення відбувається при значних температурах (600 °C) та можливе за відсутності окисника. Гасіння літій-іонних елементів живлення вимагає залучення значної кількості вогнегасних речовин (води в кількості близько 5 тон) та необхідності подальшого спостереження після проведення гасіння оскільки можливі повторні самозаймання.

Горіння автомобілів на водневому паливі може супроводжуватися безбарвним факельним горінням водню при температурі близько 2000 °C, що вимагає використання додаткового оснащення (пожежний тепловізор) та особливої уваги керівника гасіння пожежі. Додаткову небезпеку може представляти собою неконтрольований витік водню в приміщенні, що може спричинити руйнування конструкцій або удушення (асфексію) особового складу, що перебуває в приміщенні без засобів захисту.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Інформаційний інтернет ресурс «Interesting Engineering», 6 Interesting Statistics about Electric Vehicles – режим доступу: <https://interestingengineering.com/6-interesting-statistics-about-electric-vehicles>.
2. Інформаційний інтернет ресурс «Consumer Reports» – режим доступу: <https://www.consumerreports.org/car-safety/tesla-fires-demonstrate-challenges-firefighters-face-with-evs/>.
3. Інформаційний інтернет ресурс «Theverge» – режим доступу: <https://www.theverge.com/2018/7/3/17530646/tesla-battery-fire-electric-vehicles-transportation-science>.
4. Інформаційний інтернет ресурс «IRS Group» – режим доступу: <http://irsgroup.com.ua/ecars>.
5. Інформаційний інтернет ресурс «Tesla» – режим доступу: [https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/en\\_EU/model\\_s\\_2014\\_emergency\\_response\\_guide.pdf?09-2017](https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/en_EU/model_s_2014_emergency_response_guide.pdf?09-2017).
6. Lazarenko O. Research on the Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries / O. Lazarenko, V. Loik, B. Shtain, D. Riegert // Bezpieczeństwo i technika pożarnicza – 2018. – Vol. 52. – Issue 44. – pp.58-67.
7. Лазаренко О.В. Пожежогасіння та проведення інших невідкладних робіт в електрокарах / О.В. Лазаренко, О.Д. Синельніков, І.М. Биков, А.С. Кусковець / Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2019. – №34. – С. 54 - 58.
8. Інформаційний інтернет ресурс «BBC» – режим доступу: <https://www.bbc.com/news/uk-england-merseyside-46290095>.
9. Інформаційний інтернет ресурс «Jalopnik» – режим доступу: <https://jalopnik.com/watch-volunteer-firefighters-in-austria-extinguish-a-fi-1819665352>.

10. Інформаційний інтернет ресурс «Electrek» – режим доступу: <https://electrek.co/2016/09/10/tesla-fire-firefighters-behind-the-scene-disable-battery/>.
11. Frano Barbir Safety issues of hydrogen in vehicles. Режим доступу: <https://courses.engr.illinois.edu/npre470/sp2019/web/readings/Hydrogen%20safety%20issues.pdf>.
12. Sébastien Bertau D6.3 HYRESPONSE European Emergency Response. Режим доступу: [http://www.hyresponse.eu/public\\_deliverables/](http://www.hyresponse.eu/public_deliverables/).
13. D. Cirrone Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spa, 2019. Режим доступу: [https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS\\_D1.2\\_Risks-and-Hazards.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf).
14. Lee C. Cadwallader, Haihua Zhao Personnel Safety with Pressurized Gas Systems, 2016. Режим доступу: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/prs.11850>.
15. A.R. Scott, Occupational high-pressure injection injuries: Pathogenesis and prevention, J Soc Occup Med 33(1983), 56–59.
16. Large fire blanket. Режим доступу: <https://www.leader-group.com/en/firefighting-equipment/fire-blanket/large-fire-blanket-leader-stop>.
17. Molkov, V Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering, 2012. Режим доступу: <https://www.arma.org.au/wp-content/uploads/2017/03/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-i.pdf>.
18. Brennan, S., Molkov, V. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(19), 8159–8166.