



А. Ф. Гаврилюк¹, Р. С. Яковчук¹, А. В. Субота²

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

²ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

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

<https://orcid.org/0000-0001-5523-5569> – Р. С. Яковчук

<https://orcid.org/0000-0002-8605-3448> – А. В. Субота



gavrilyk3@ukr.net

АНАЛІЗ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВИТОКУ ВОДНЮ З ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Постановка проблеми. Передумови бурхливого розвитку різного роду електромобілів (зокрема за останнє десятиліття) наведено у низці наукових праць. Дослідженнями проблем електромобілів в тому числі і безпековими займаються багато наукових і науково-дослідних установ провідних країн світу. Серед яких Національна асоціація протипожежного захисту (NFPA) міжнародна організація пожежно-рятувальних служб (СТІФ).

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

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

Мета дослідження полягає у розкритті особливостей впливу чинників (діаметра отвору, об'єму та тиску) на час аварійного викиду водню з електромобілів на паливних елементах, які використовують водень. Це створить підґрунтя для подальших досліджень особливостей розвитку та гасіння пожеж FCEV за участю горіння водню.

Опис матеріалу. Проведено дослідження часу витоку водню залежно від діаметра отвору внаслідок аварійної розгерметизації системи при тисках 70 МПа та 35 МПа. Викид водню може відбуватись внаслідок стравлення надлишкового тиску з клапана стравлення або внаслідок порушення герметичності системи, що може бути спричинене дорожньо-транспортною пригодною чи механічною дією інших чинників.

Дослідження проведено на прикладі автомобілів Toyota Mirai, з потужністю електродвигуна 154 к.с., крутним моментом 335 Нм та заявленим пробігом 650 км. Об'єм баків для водню становить 122,4 л та автомобіля BMW iX5 Hydrogen потужністю 170 к.с., крутним моментом 380 Нм та об'ємом баків для водню 160 л. А також для електротягача на прикладі тягача Mercedes-Benz GenH2 потужністю 449 к.с., крутним моментом 2071 Нм з пробігом без дозаправки 1000 км та вантажопідйомністю 25 тонн з об'ємом баків для водню 1000 л. Результати дослідження наведено у вигляді графічних залежностей.

Висновки. Окреслено передумови, тенденції розвитку та зацікавленість наукової спільноти дослідженнях електромобілів на паливних елементах, які використовують водень. Прокласифіковано електромобілі на паливних елементах та описано принцип їхньої роботи. Досліджено витікання водню із електромобілів на паливних елементах залежно від діаметра отвору, тиску та об'єму паливних баків. Результати чисельних експериментів наведено у вигляді графічних залежностей. При діаметрі отвору 1 мм час викиду водню для автомобіля Toyota Mirai з об'ємом баків для водню 122,4 л становитиме 26,6 хв. та 34,7 хв для BMW iX5 Hydrogen з об'ємом баків 160 л. При збільшенні діаметра отвору час викиду різко зменшується і вже при діаметрі 5 мм становить близько 1 хв для обох автомобілів. При зменшенні тиску вдвічі - до 35 МПа, час викиду зменшується лише на 10 % у порівнянні з повністю заправленим баком. Для вантажних електромобілів час викиду водню в середньому у 7-9 разів більший ніж у легкових автомобілів при однаковому діаметрі отвору пошкодження. На прикладі тягача Mercedes-Benz GenH2 для приведенного діаметра отвору 5 мм, при тиску 35 МПа і 70 МПа, час викиду водню становитиме 7,8 і 8,6 хв відповідно. Аналізуючи результати дослідження витоку водню з різного

роду електромобілів на паливних елементах, які використовують водень та час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на місце виклику, стає очевидним, що рятувальникам доведеться стикатись з вибухом чи горінням водню на пожежах чи ДТП за участю FCEV. Це потребує розроблення нових методів та способів реагування на пожежі такого роду, що може стати предметом подальших досліджень.

Ключові слова: електромобіль, паливний елемент, водень, пожежна небезпека електромобілів, чинники впливу на пожежну безпеку електромобілів.

A. F. Gavrilyuk¹, R. S. Yakovchuk¹, A. V. Subota²

¹*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

²*Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine*

RESEARCH THE FIRE HAZARD OF HYDROGEN LEAK FROM FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES

Formulation of the problem. Prerequisites for the rapid development of various types of electric vehicles (especially over the last decade) are given in several scientific works. Many scientific and research institutions in the world's leading countries deal with the problems of electric vehicle research, including safety issues. These include the National Fire Protection Association (NFPA) and the International Organisation of Fire and Rescue Services (CTIF).

Special attention is drawn to electric vehicles powered by hydrogen fuel cells. An electric vehicle with hydrogen fuel cells (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV) is a vehicle in which the torque required for movement is created by electric motors powered by electricity from hydrogen fuel cells. Academic interest in FCEVs is growing rapidly. For example, in 1999 there were only 13 scientific works, and already in 2018, their number has increased to 171.

The peculiarity of these vehicles (FCEVs) with zero emission of harmful substances during operation is the quick recovery of the mileage reserve, i.e. they are filled with hydrogen. The refuelling time is approximately the same as the refuelling time of cars with internal combustion engines. This gives FCEV a significant advantage in terms of range recovery compared to BEV-battery electric vehicles, the time to recover 60% of range with a quick charge can be 45-60 minutes. In addition, in the European Strategic Plan for Energy Technologies, technologies for the use of hydrogen and fuel cells are defined as key technologies for achieving the goals of reducing greenhouse gas emissions by 2050.

The purpose of this work consists in revealing the peculiarities of the influence of factors (hole diameter, volume and pressure) on the time of the emergency release of hydrogen from electric vehicles on fuel cells that use hydrogen. This will create a foundation for further research into the development and extinguishing of FCEV fires involving hydrogen combustion.

Description of the material. The study of the time of hydrogen leakage depending on the diameter of the hole due to emergency depressurization of the system at pressures of 70 MPa and 35 MPa was carried out. The release of hydrogen can occur due to the release of excess pressure from the release valve or due to a violation of the tightness of the system, which may be caused by a traffic accident or the mechanical action of other factors.

The research was carried out on the example of Toyota Mirai cars, with an electric motor power of 154 hp, a torque of 335 Nm and a declared mileage of 650 km. The volume of hydrogen tanks is 122.4 litres. and the BMW iX5 Hydrogen car with a power of 170 hp, a torque of 380 Nm and a volume of hydrogen tanks of 160 litres. And also for an electric tractor, an example of a Mercedes-Benz GenH2 tractor with a power of 449 hp, a torque of 2071 Nm a mileage of 1000 km without refuelling and a load capacity of 25 tons with a volume of hydrogen tanks of 1000 litres. The results of the study are presented in the form of graphic dependencies.

Results. The prerequisites, development trends and the interest of the scientific community in the study of electric vehicles on fuel cells using hydrogen are outlined. Electric cars on fuel cells are classified and the principle of their operation is described. The leakage of hydrogen from electric vehicles on fuel cells was studied, depending on the diameter of the hole, pressure and volume of the fuel tanks. The results of numerical experiments are given in the form of graphic dependencies. With a hole diameter of 1 mm, the hydrogen release time for a Toyota Mirai car with a volume of hydrogen tanks of 122.4 litres will be 26.6 minutes. and 34.7 min. for BMW iX5 Hydrogen with a tank volume of 160 l. When the diameter of the hole is increased, the emission time decreases sharply, and even with a diameter of 5 mm, it is about 1 minute for both cars. When the pressure is reduced by half to 35 MPa, the ejection time is reduced by only 10% compared to a filled tank. For electric trucks, the hydrogen release time is on average 7-9 times longer than for passenger cars with the same diameter of the damaged hole. In the example of the Mercedes-Benz GenH2 tractor, for the reduced hole diameter of 5 mm, at a pressure of 35 MPa and 70 MPa, the time of hydrogen emission will be 7.8 and 8.6 minutes. in accordance. Analysing the results of the study of hydrogen leakage from various types of fuel cell electric vehicles that use hydrogen and the time of arrival of fire and rescue units at the scene of a call, it is clear that rescuers will have to deal with leakage or burning of hydrogen at fires or accidents involving FCEVs. This requires the development of new methods and ways of responding to fires of this kind, which can become the subject of further research.

Keywords: electric vehicle, fuel cell, hydrogen, fire hazard of electric vehicles, factors affecting the fire safety of electric vehicles.

Вступ. Передумови бурхливого розвитку різного роду електромобілів (зокрема за останнє десятиліття) наведено у низці наукових праць.

Проблемами дослідження електромобілів, в тому числі і безпековими займаються багато наукових і науково-дослідних установ провідних країн

світу, серед яких – Національна асоціація протипожежного захисту (NFPA, всесвітня самофінансована некомерційна організація, заснована в 1896 році, яка займається зменшенням смертей, травм, майнових і економічних втрат через пожежі пов'язані з ними небезпеки) [1], міжнародна організація пожежно-рятувальних служб (СТІФ, місія якої – обмін досвідом та наукові дослідження, пов'язані з пожежами) тощо. А також неакадемічні організації, серед яких – General Motors, Ford Motors і Toyota Motors, результати дослідження яких мають важливий вплив на наукову сферу.

Загальну класифікацію електромобілів, які використовують різні типи і принципи роботи силових акумуляторних батарей, наведено у [2], а методику визначення їх паливної оцадливості – у [3].

Особливу увагу привертають електромобілі на водневих паливних елементах. Електромобіль з водневими паливними елементами (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV) – транспортний засіб, у якому обертовий момент, необхідний для забезпечення руху, створюється електричними двигунами, які живляться електроенергією з водневих паливних елементів.

За даними [4] академічна зацікавленість до FCEV різко зростає. Приміром якщо у 1999 році було лише 13 наукових праць, то вже у 2018 їх кількість зросла до 171.

Особливість цих автомобілів (FCEV) із нульовим викидом шкідливих речовин під час

експлуатації полягає у швидкому відновленні запасу пробігу, тобто заправленні воднем. Час заправки воднем, орієнтовно такий самий, як час заправки автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Це створює FCEV значну перевагу, з позиції відновлення запасу ходу у порівнянні із електричними транспортними засобами, що обладнанні силовою акумуляторною батареєю (АКБ) (BEV-battery electric vehicle). Час відновлення 60% заряду якої може становити 45-60 хв.

Крім цього, у Європейському стратегічному плані енергетичних технологій, технології використання водню та паливних елементів визначено як ключові технології для досягнення цілей скорочення викидів парникових газів до 2050 року [5, 6].

Загалом усі FCEV класифікують залежно від поєднання (або непоєднання) паливного елемента із іншим джерелом енергії. Такими джерелами енергії можуть бути силові батареї (B – batteries), ультраконденсатори (UC –ultracapacitors), сонячні фотоелектричні панелі (SPV – solar photovoltaics), накопичувачі магнітної енергії (SMES – superconducting magnetic energy storage) та маховики (рис 1). Найчастіше використовують силові акумуляторні батареї та ультраконденсатори у поєднанні з паливними елементами [7, 8].

Інші види джерел енергії використовуються рідше [9]. Це зумовлено рядом переваг силових акумуляторних батарей та суперконденсаторів у порівнянні з іншими видами джерел енергії.

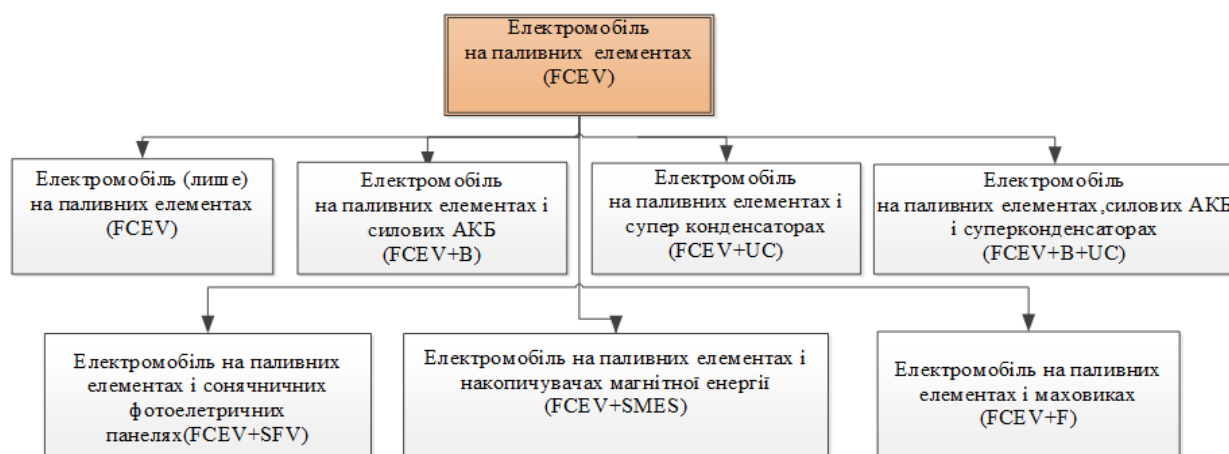


Рисунок 1 – Класифікація електромобілів на паливних системах

Загальний принцип роботи FCEV зображений на рис. 2. Водень, який зберігається у балонах 1, потрапляє у паливний елемент 2, який перетворює хімічну енергію в електричну з виділенням енергії та води [10]. Паливний елемент 2 у своїй найпростішій формі складається катода і анода, які розділені мембраною, що покрита певним каталізатором.

Використовуючи водень з балонів 1 і кисень з навколишнього середовища та завдяки хімічній реакції, яка відбувається у паливному елементі, генерується постійний електричний струм, який подається на інвертор 3. Інвертор 3 трансформує постійний струм у змінний і живить асинхронний двигун (двигуни), який і створює (створюють) обертовий момент,

необхідний для руху автомобіля. Вода, яка утворюється внаслідок хімічної реакції,

викидається через трубопровід 5 у навколишнє середовище.

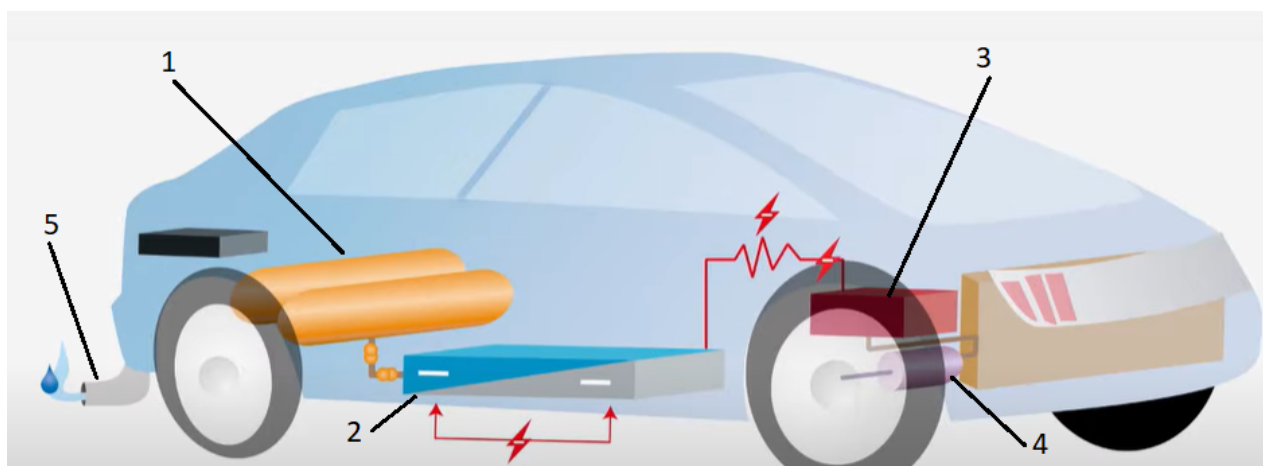


Рисунок 2 – Схематичне зображення будови та принципу роботи FCEV:
1 – балони, 2 – паливний елемент, 3 – інвертор, 4 – електродвигун, 5 – трубопровід

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Дослідження безпеки водню охоплюють вивчення його характеристик [11], механізму дифузії, горіння та можливість вибуху [12, 13]. У науковій праці [14] узагальнено результати дослідження небезпеки водню. Серед основних пожежонебезпечних властивостей водню можна виділити (за нормальних умов): концентраційна межа вибуху – 12-19 % об., широкий діапазон займистості – 4-75 % об., мала густина $0,09 \text{ кг/м}^3$ (у 14 разів менша ніж повітря), висока температура горіння – близько $2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такі фізико-хімічні властивості створюють умови для швидкого викиду водню з резервуара чи ємності, де він знаходиться, розсіювання та можливість горіти чи вибухати при наявності джерела займання.

У [15] наведено експериментальне дослідження виділення та горіння водню у гаражі для автомобілів, де зазначено, що займання водню відбувалось лише у діапазоні від 8 до 29 % об'ємних, хоча у теоретичних дослідженнях цей діапазон значно ширший і становить від 4 до 76 % об'ємних [16].

У роботі [17] досліджено процеси витікання та аварійне горіння водню та суміші водню з оливою, що викидається у корпусу турбогенератора АЕС.

Власне особливості зберігання і транспортування водню, а також його фізичні властивості визначатимуть безпекові умови та стандарти до виробництва, експлуатації і обслуговування FCEV.

Мета дослідження полягає у розкритті особливостей впливу чинників (діаметра отвору та тиску) на час аварійного викиду водню з електромобілів на паливних елементах. Це

створить підґрунтя для подальших досліджень особливостей розвитку та гасіння пожеж FCEV за участю горіння водню.

У FCEV (легкових, категорія М1) водень зберігають у балонах ємністю 40-180 літрів в газоподібному стані при тиску від 35 до 70 МПа. Від балонів через редуктор водень подається по магістралях до паливного елемента з витратою близько 100 г/хв при тиску до 1 МПа. Для запобігання збільшення тиску водню в балонах (під час дії теплового потоку ззовні внаслідок пожежі чи іншої ситуації) передбачено клапан стравлення, який зазвичай спрацьовує при досягненні температури понад $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [18].

У роботі [19] проведено експериментальне дослідження витіку водню при витратах 200, 400 та 600 л/хв (об'ємна витрата водню приймається за нормальних умов) з тривалістю витіку 600 с. Дослідження показали, що при витраті 600 л/хв спостерігалась ударна хвиля 15 кПа, а тепловий потік становив $14,2 \text{ кВт/м}^2$.

У праці [20] наведено дослідження поширення пожежі від FCEV на інші припарковані поруч автомобілі на відстані 0,85 м. Був підпалений водень, який виходив із клапана для ставлення тиску (рис. 3 а). Особливістю дослідження є те, що після завершення горіння водню сусідній автомобіль не загорівся (рис. 3 б). Після розгоряння першого автомобіля (вже без участі горіння водню), при досягненні температури на поверхні другого автомобіля близько $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (через 36 хв від початку займання першого автомобіля) відбулось його займання (рис 3 в). Тобто займання сусіднього автомобіля відбулось не полум'я водню, а власне від горіння оздоблювальних матеріалів, після того як водню завершилось.

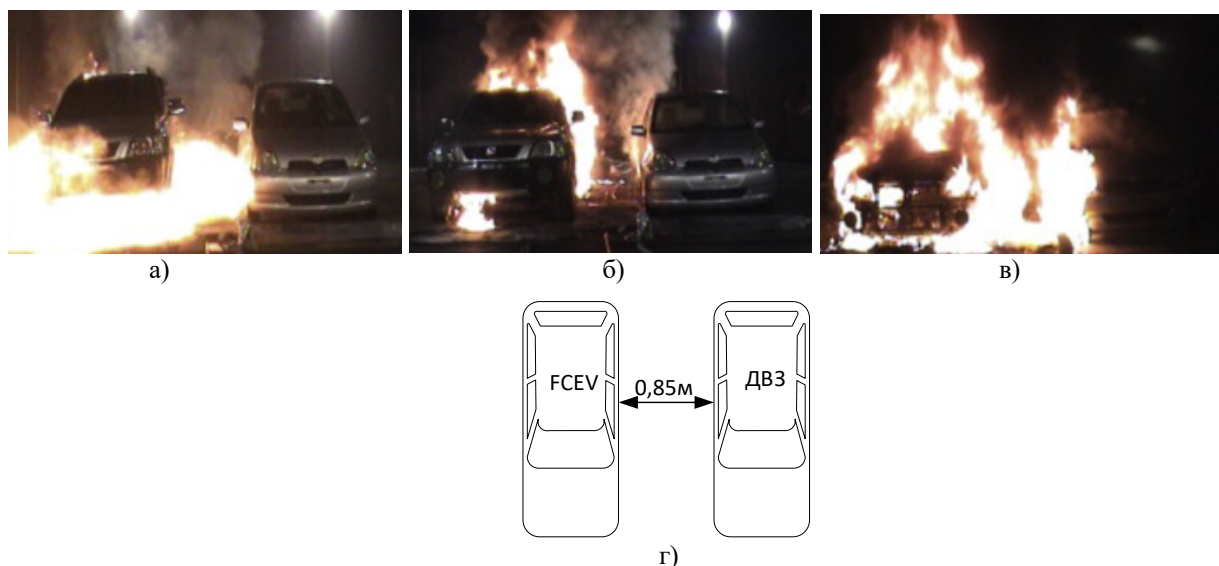


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд динаміки розвитку та поширення пожежі від FCEV на поруч припаркований автомобіль з ДВЗ та їх схематичне розміщення:

а) горіння автомобіля за участі водню б) горіння автомобіля без участі водню в) займання автомобіля на відстані 0,85м

При зменшенні відстані до 0,3 м відбувається займання поруч припаркованого автомобіля власне від полум'я горіння водню, що виходить із клапанна стравлення тиску.

При проведенні аналізу досліджень пожеж FCEV за участю горіння водню не зрозуміло, чим обґрунтовувався час виходу водню, що горів з клапана стравлення тиску, що стало основою задекларованої мети досліджень.

Результати досліджень.

Аварійний витік водню можливий внаслідок розгерметизації системи зберігання та подачі водню до паливного елемента або внаслідок спрацювання клапана стравлення надлишкового тиску. Розгерметизація системи подачі водню можлива внаслідок механічної дії на будь-який компонент системи або технічної несправності. Механічна дія може бути зумовлена дорожньо-транспортною пригодою за участі FCEV. Технічна несправність може виникнути внаслідок неякісного ремонту, технічного обслуговування або його проведення не за регламентом. Клапан ставлення надлишкового тиску стравлює водень в навколишнє середовище з метою запобігання понаднормовому збільшенню тиску в балоні. Такий процес відбувається при збільшенні температури газу в балоні. Це може трапитись внаслідок підвищення температури навколишнього середовища через, приміром, пожежу поруч припаркованого автомобіля. Зважаючи на те, що мінімальна енергія займання водню становить лише 0,02 мДж, цілком очевидно, що ймовірність горіння водню є дуже високою.

Дослідимо процеси витікання водню із електромобілів на паливних елементах. Знаючи об'єм балонів для зберігання водню та тиск, скориставшись рівнянням Менделєєва-

Клапейрона можемо визначити масу водню, яка зберігається:

$$m = \mu_i \cdot \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{p \cdot V}{R_i \cdot T}, \quad (1)$$

де: p – тиск газу, Па; V – сумарний об'єм балонів, m^3 ; μ_i – молярна маса речовини, $кг/моль$;

$R = 8,314$ – універсальна газова стала, $\frac{Дж}{К \cdot кг}$;

R_i – газова стала, $\frac{Дж}{К \cdot кг}$; T – температура водню в балонах, К.

Масова витрата водню Q (кг/с), що буде викидатись з пошкодженої системи залежатиме від площі отвору ω (m^2) та швидкості витікання газу v (м/с):

$$Q = \rho \cdot \omega \cdot v, \quad (2)$$

Швидкість витікання водню можна визначити за формулою Сен-Венана:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_{H_2}} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

де p_1 – тиск водню в корпусі балона, Па; p_2 – атмосферний тиск, Па; $k = 1,405$ – показник адіабати; ρ_{H_2} – густина водню, $кг/м^3$.

Підставивши вираз (3) в (2), отримаємо

$$Q = \omega \cdot \frac{p_1}{R_{H_2} \cdot T_1} \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R_{H_2} \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

де $R_{H_2} = \frac{R}{\mu_{H_2}} = 4157 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$ – газова стала для водню;

T_1 – температура газу в балоні, K .

Оскільки тиск водню в корпусі балонів зменшується в процесі його витікання, то буде зменшуватися й швидкість витікання та масова витрата водню. Запишемо (1) в диференційній формі:

$$dm = \frac{V}{R_i \cdot T} dp, \quad (5)$$

Враховуючи, що $M = \frac{dm}{d\tau}$ і (5), отримаємо таке співвідношення

$$M = \frac{V}{R \cdot T} \frac{dp}{d\tau}, \quad (6)$$

З останнього виразу (6) визначаємо тривалість витікання водню з балонів електромобіля на паливних елементах:

$$\tau(d) = \frac{4V}{\pi \cdot d^2 \cdot R_{H_2} \cdot T_1} \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\sqrt{2 \cdot \left[\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p^2}{R_{H_2} \cdot T_1} \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]}}$$

(7)
де V – сумарний об'єм балонів, m^3 ; p – змінний тиск у корпусі балонів, Pa , d – діаметр отвору, m .

Проведемо дослідження часу витікання водню залежно від діаметра отвору внаслідок аварійної розгерметизації системи подачі при тисках 70 МПа та 35 МПа. Витікання водню може відбуватись внаслідок стравлення надлишкового тиску з клапана або внаслідок порушення герметичності системи, що може бути спричинене дорожньо-транспортною пригодою чи механічною дією інших чинників.

Дослідження проведемо на прикладі автомобіля Toyota Mirai, з потужністю електродвигуна 154 к.с., крутним моментом 335 Нм та заявленим пробігом 650 км. Об'єм баків для водню становить 122,4 л. А також для автомобіля BMW iX5 Hydrogen потужністю 170 к.с., крутним моментом 380 Нм та об'ємом баків для водню 160 л (рис 4).



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд автомобілів на водневих паливних елементах Toyota Mirai та BMW iX5 Hydrogen

Результати чисельних експериментів при тиску водню 70 МПа наведено на рис 5. При діаметрі отвору 1 мм час викиду водню для автомобіля Toyota Mirai з об'ємом баків для водню 122,4 л становитиме 26,6

хв та 34,7 хв для BMW iX5 Hydrogen з об'ємом баків 160 л.

При збільшенні діаметра отвору час викиду різко зменшується і вже при діаметрі 5 мм становить близько 1 хв для обох автомобілів.

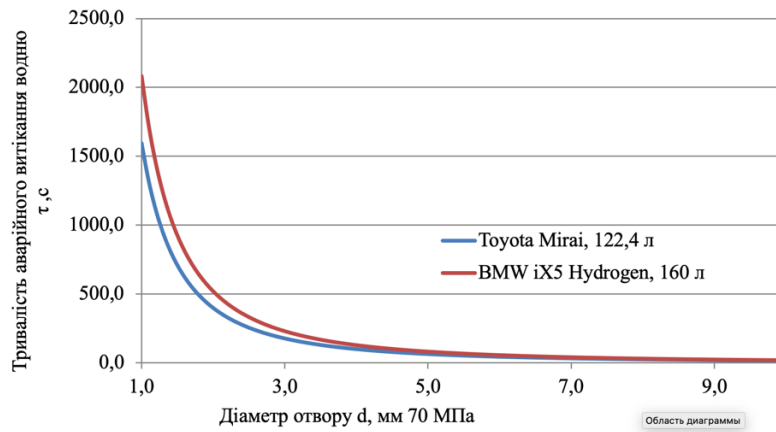


Рисунок 5 – Залежність тривалості аварійного витікання водню від діаметра отвору на прикладі автомобілів Toyota Mirai та BMW iX5 Hydrogen при тиску 70 МПа

На рис. 6 наведено тривалість аварійного витікання водню від діаметра отвору на прикладі автомобілів Toyota Mirai та BMW iX5 Hydrogen при тиску 35 МПа. Внаслідок зменшення тиску

вдвічі час викиду водню при діаметрі отвору 1 мм становить 23,8 хв для Toyota Mirai та 31,2 хв BMW iX5 Hydrogen, що лише на 10 % менше, ніж у випадку із повністю заправленими баками.

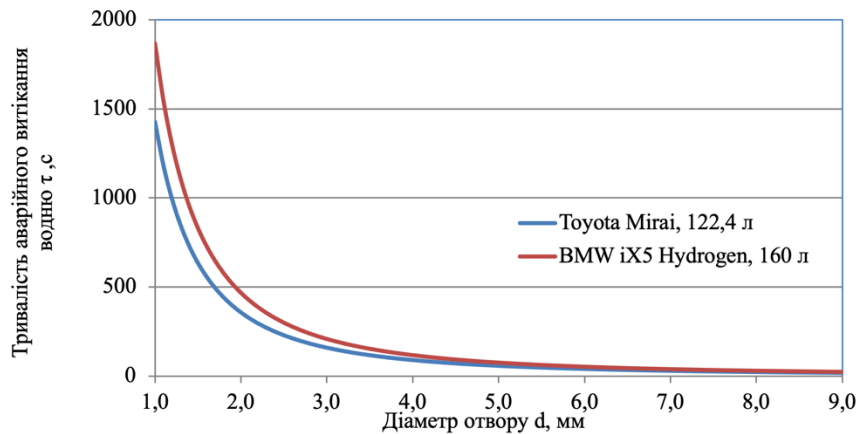


Рисунок 6 – Залежність тривалості аварійного витікання водню від діаметра отвору на прикладі автомобілів Toyota Mirai та BMW iX5 Hydrogen при тиску 35 МПа

Тенденція використання паливних елементів знайшла місце і у вантажних автомобілях, де динамічні параметри двигунів значно вищі, що потребує більшої потужності паливного елемента, а відтак запасу водню. Дослідимо час аварійного витіку водню при

тиску 35 МПа та 70 МПа на прикладі тягача Mercedes-Benz GenH2 потужністю 449 к.с., крутним моментом 2071 Нм з пробігом без дозаправки 1000 км та вантажопідйомністю 25 тонн. Об'єм баків для водню 1000 л.

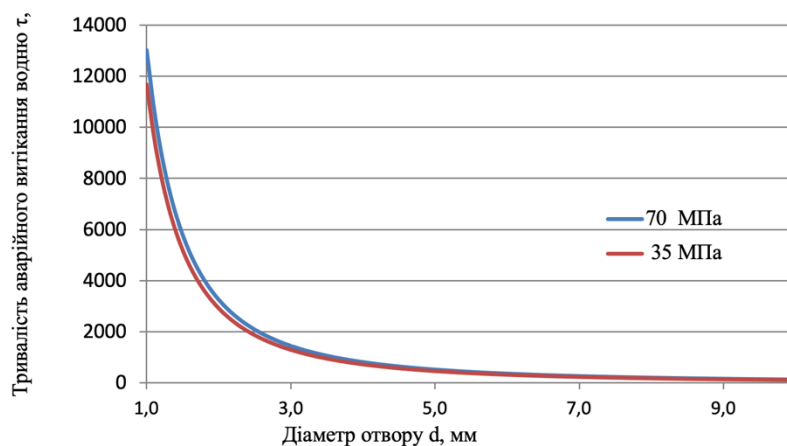


Рисунок 7 – Залежність тривалості аварійного витікання водню від діаметра отвору на прикладі тягача Mercedes-Benz GenH2 при тиску 35 МПа і 70 МПа

Аналіз графічної залежності (рис. 7) показує, що час викиду при діаметрі отвору 1 мм та тиску 70 МПа становить 217 хв, що є на 11,5 % більше у порівнянні із часом викиду при тиску 35 МПа, а при діаметрі 5 мм – 8,6 хв 7,8 хв відповідно.

Беручи до уваги час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів, який має не перевищувати в умовах міста 10 хв та за його межами 20 хв [21], при виїзді на пожежі чи ДТП FCEV рятувальниками доведеться стикатися з витіканням чи горінням водню, що створює особливості та складності гасіння пожеж такого роду, уникнення вибухонебезпечної концентрації тощо. Тому розвиток наукових досліджень у цій царині є актуальним.

Висновки

1. Окреслено передумови, тенденції розвитку та зацікавленість наукової спільноти у дослідженнях електромобілів на паливних елементах, які використовують водень. Прокласифіковано електромобілі на паливних елементах та описано принцип їх роботи. 2. Аварійний витік водню можливий внаслідок розгерметизації системи зберігання та подачі водню до паливного елемента або внаслідок спрацювання клапана стравлення надлишкового тиску. Розгерметизація системи подачі водню можлива внаслідок механічної дії на будь-який компонент системи або технічної несправності. Механічна дія може бути зумовлена дорожньо-транспортною пригодою за участі FCEV. Технічна несправність може виникнути внаслідок неякісного ремонту, технічного обслуговування або його проведення за регламентом. Досліджено витікання водню із електромобілів на паливних елементах, що використовують водень залежно від діаметра отвору, тиску та об'єму паливних баків. Результати чисельних експериментів при тиску водню 70 МПа наведено у вигляді графічних залежностей. При діаметрі отвору 1 мм

і тиску 70 МПа час витікання водню для автомобіля Toyota Mirai з об'ємом баків для водню 122,4 л становитиме 26,6 хв та 34,7 хв для BMW iX5 Hydrogen з об'ємом баків 160 л. При збільшенні діаметра отвору час викиду різко зменшується і вже при діаметрі 5 мм складає близько 1 хв для обох автомобілів. При зменшенні тиску вдвічі до 35 МПа час викиду зменшується лише на 10 % у порівнянні з повністю заправленим баком.

3. Для вантажних електромобілів час викиду водню в середньому у 7-9 разів більший ніж у легкових автомобілів при однаковому діаметрі отвору пошкодження. На прикладі тягача Mercedes-Benz GenH2 для приведеного діаметра отвору 5 мм, при тиску 35 МПа і 70 МПа, час викиду водню становитиме 7,8 і 8,6 хв відповідно.

4. Аналізуючи результати дослідження витікання водню з різного роду електромобілів на паливних елементах, які використовують водень, та час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на місце виклику, стає очевидним, що рятувальникам доведеться стикатися з витіканням чи горінням водню на пожежах чи ДТП за участю FCEV. Це потребує розроблення нових методів та способів реагування на пожежі такого роду, що може стати предметом подальших досліджень.

Список літератури:

1. National Fire Protection Association. URL: <https://www.nfpa.org/> (дата звернення: 01.10.2022).
2. Gavryliuk, A. F., & Kushnir, A. P. (2022). Analysis of fire danger of electric vehicles according to thermal stability of powerful lithium battery. *Fire Safety*, 40, 31-39. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.04.
3. Gavryliuk A. F. (2021). Study of fuel and equivalent economy of transport vehicles, operating on conventional and alternative types of fuel. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. № 2. URL: DOI:10.31649/2307-5376-2021-2-32-39.

4. Alvarez-Meaza I, Zarrabeitia-Bilbao E, Rio-Belver RM, Garechana-Anacabe G. (2020) Fuel-Cell Electric Vehicles: Plotting a Scientific and Technological Knowledge Map. *Sustainability*. 12(6):2334. DOI:10.3390/su12062334.
5. European Commission. Hydrogen and Fuels Cells for Transport|Mobility and Transport. Available online: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/hydrogen_en
6. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. FCH Hydrogen Roadmap Europe; Bietlot: Charleroi, Belgium, 2019.
7. Xiong R., Duan Y., Cao J., Yu Q. (2018). Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle *Appl Energy*, 217, pp. 153-165.
8. Itani K., De Bernardinis A., Khatir Z., Jammal A. (2017). A comparative analysis of two hybrid energy storage systems used in a two front wheel driven electric vehicle during extreme start-up and regenerative braking operations. *Energy Convers Manag*, 144, pp. 69-87, DOI:10.1016/j.enconman.2017.04.036.
9. Iqbal, M.; Becherif, M.; Ramadan, H.S.; Badji, A. (2021). Dual-layer approach for systematic sizing and online energy management of fuel cell hybrid vehicles. *Appl. Energy*, 300, 117345.
10. Pan, R.; Yang, D.; Wang, Y.J.; Chen, Z.H. (2020) Performance degradation prediction of proton exchange membrane fuel cell using a hybrid prognostic approach. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45, 30994–31008
11. Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 105, 86–94. doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051.
12. De Stefano, M.; Rocourt, X.; Sochet, I.; Daudey, N. (2018). Hydrogen dispersion in a closed environment. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 9031–9040. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.099.
13. Prasad, K. (2014). High-pressure release and dispersion of hydrogen in a partially enclosed compartment: Effect of natural and forced ventilation. *Int. J. Hydrogen Energy* 39, 6518–6532. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.189.
14. Hajji, Y.; Bouteraa, M.; Elcafsi, A.; Belghith, A.; Bournot, P.; Kallel, F. (2015). Natural ventilation of hydrogen during a leak in a residential garage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, 810–818. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.060.
15. Pitts, W.M.; Yang, J.C.; Blais, M.; Joyce, A. (2012) . Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 17457–17469.
16. De Stefano, M.; Rocourt, X.; Sochet, I.; Daudey, N. (2018). Hydrogen dispersion in a closed environment. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 9031–9040.
17. Семерак М. М. Субота А. В., Желяк В. І. (2013) Моделювання термогазодинамічних параметрів струменя водню у разі розгерметизації корпусу турбогенератора електричної станції. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності: зб. наук. пр. – Львів : ЛДУБЖД*, 2013. – № 7. – С. 225-229.
18. W.M. Pitts, J.C. Yang, M.G. (2012). Fernandez Helium dispersion following release in a ¼-scale two-car residential garage *Int J Hydrogen Energy*, 37, pp. 5286-5298.
19. Maeda, Y.; Itoi, H.; Tamura, Y.; Suzuki, J.; Watanabe, S. (2007). Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen-Fueled Vehicle. *SAE Trans.*, 2007-01-0428, 232–239.
20. Tamura, Y.; Takabayashi, M.; Takeuchi, M. (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, 6169–6175.
21. Постанова Кабінету Міністрів України №874 від 27.11.2013 р. «Про затвердження критеріїв утворення державних пожежно-рятувальних підрозділів (частин) Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в адміністративно-територіальних одиницях та переліку суб'єктів господарювання, де утворюються такі підрозділи. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Парлам. вид-во, 2013. – 98с. – (Бібліотека офіційних видань).

References:

1. National Fire Protection Association. URL: <https://www.nfpa.org/> (дата звернення: 01.10.2022).
2. Gavryliuk, A. F., & Kushnir, A. P. (2022). Analysis of fire danger of electric vehicles according to thermal stability of powerful lithium battery. *Fire Safety*, 40, 31-39. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.04.
3. Gavryliuk A. F. (2021). Study of fuel and equivalent economy of transport vehicles, operating on conventional and alternative types of fuel. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. № 2. URL: DOI:10.31649/2307-5376-2021-2-32-39.
4. Alvarez-Meaza I, Zarrabeitia-Bilbao E, Rio-Belver RM, Garechana-Anacabe G. (2020) Fuel-Cell Electric Vehicles: Plotting a Scientific and Technological Knowledge Map. *Sustainability*. 12(6):2334. DOI:10.3390/su12062334.
5. European Commission. Hydrogen and Fuels Cells for Transport|Mobility and Transport. Available online: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/hydrogen_en
6. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. FCH Hydrogen Roadmap Europe; Bietlot: Charleroi, Belgium, 2019.

7. Xiong R., Duan Y., Cao J., Yu Q. (2018). Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle *Appl Energy*, 217, pp. 153-165.
8. Itani K., De Bernardinis A., Khatir Z., Jammal A. (2017). A comparative analysis of two hybrid energy storage systems used in a two front wheel driven electric vehicle during extreme start-up and regenerative braking operations. *Energy Convers Manag*, 144, pp. 69-87, DOI:10.1016/j.enconman.2017.04.036.
9. Iqbal, M.; Becherif, M.; Ramadan, H.S.; Badji, A. (2021). Dual-layer approach for systematic sizing and online energy management of fuel cell hybrid vehicles. *Appl. Energy*, 300, 117345.
10. Pan, R.; Yang, D.; Wang, Y.J.; Chen, Z.H. (2020) Performance degradation prediction of proton exchange membrane fuel cell using a hybrid prognostic approach. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45, 30994–31008
11. Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 105, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>.
12. De Stefano, M.; Rocourt, X.; Sochet, I.; Daudey, N. (2018). Hydrogen dispersion in a closed environment. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 9031–9040. DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.06.099.
13. Prasad, K. (2014). High-pressure release and dispersion of hydrogen in a partially enclosed compartment: Effect of natural and forced ventilation. *Int. J. Hydrogen Energy* 39, 6518–6532. DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.01.189.
14. Hajji, Y.; Bouteraa, M.; Elcafsi, A.; Belghith, A.; Bournot, P.; Kallel, F. (2015). Natural ventilation of hydrogen during a leak in a residential garage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, 810–818. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.060.
15. Pitts, W.M.; Yang, J.C.; Blais, M.; Joyce, A. (2012) . Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 17457–17469.
16. De Stefano, M.; Rocourt, X.; Sochet, I.; Daudey, N. (2018). Hydrogen dispersion in a closed environment. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 9031–9040.
17. W.M. Pitts, J.C. Yang, M.G. (2012). Fernandez Helium dispersion following release in a ¼-scale two-car residential garage *Int J Hydrogen Energy*, 37 , pp. 5286-5298.
18. Maeda, Y.; Itoi, H.; Tamura, Y.; Suzuki, J.; Watanabe, S. (2007). Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen-Fueled Vehicle. *SAE Trans.* , 2007-01-0428, 232–239.
19. Tamura, Y.; Takabayashi, M.; Takeuchi, M. (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, 6169–6175.
20. Постанова Кабінету Міністрів України №874 від 27.11.2013 р. «Про затвердження критеріїв утворення державних пожежно-рятувальних підрозділів (частин) Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в адміністративно-територіальних одиницях та переліку суб'єктів господарювання, де утворити такі підрозділи. / Verkhovna Rada Ukrainy. – Ofits. vyd. – K. : Parlam. vyd-vo, 2013. – 98s. – (Biblioteka ofitsiinykh vydan).

© А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук,
А. В. Субота 2022.

Оглядова.

Надійшла до редакції 16.11.2022.

Прийнято до публікації 12.12.2022.