

А.Ф. Гаврилюк

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ДІЙ ПРИ ПОЖЕЖАХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ВОДНЕВИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Серед багатьох можливостей застосування водню на транспорті, використання паливних елементів для живлення електричних двигунів набуває найбільшого поширення. Загальна кількість FCEV станом на кінець 2021 року становить понад 50 тис. автомобілів. Загалом пожежну небезпеку пов'язану із використанням FCEV можна розділити на небезпеку пов'язану з аварійним витоком водню та електричним струмом.

**Ключові слова:** електромобіль, водневий паливний елемент, пожежна небезпека електромобілів.

### Постановка проблеми

Розвиток технологій призводить до постійного зростання потреби в енергії. Основними джерелами енергії є викопне паливо, а саме нафта та природний газ, які відносяться до невідновлювальних джерел енергії. Використання таких джерел енергії та їх похідних, призводить до колосального забруднення навколишнього середовища. Лише на автомобільний транспорт припадає чверть викидів парникових газів, понад 40% викидів оксиду азоту, а викиди вуглекислого газу постійно зростають і перейшли відмітку 120,8 г/км [1, 2, 3, 4]. Світова спільнота невпинно рухається до пошуку альтернативних джерел енергії, а безпрецедентна та зухвало розв'язана війна росією супроти України, такі процеси лише активізувала та пришвидшила.

Основними критеріями ідеального палива є екологічність, відновлюваність, зручність та доступність. Водню притаманні вище перелічені ознаки і він може стати на заміну викопним паливам не тільки у промисловості, але й у транспорті [5, 6].

Серед багатьох можливостей застосування водню на транспорті, використання паливних елементів для живлення електричних двигунів виглядає найперспективнішим та набуває найбільшого поширення [7, 8, 9].

Електромобіль на водневих паливних елементах (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.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Місце автомобілів з паливними елементами, які використовують водень, у загальній ієрархії

електромобілів наведено у [10], а методику визначення їх паливної економності у [11].

Кількість FCEV з роками зростає. За даними [12] кількість FCEV у Європі становить понад 2,6 тис., у США – 13,3 тис, Китаї – 8,4 тис. та Японії 3,9 тис. [13]. Загальна кількість FCEV станом на кінець 2021 року становить понад 50 тис. автомобілів. Розподіл FCEV станом на 2021 рік приведено на рис. 1.

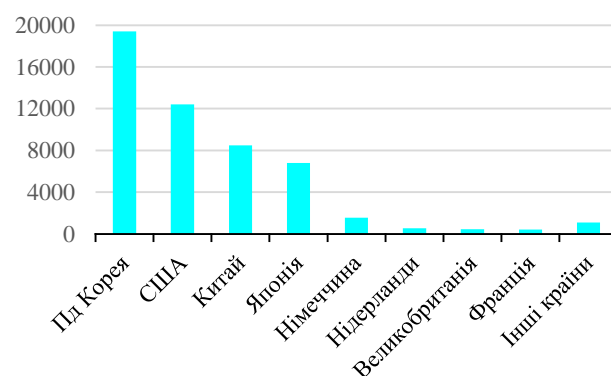


Рис. 1. Розподіл FCEV по країнах світу станом на кінець 2021 року

Аналіз рис. 1 показує, що лише Німеччина, єдина країна Європи, де кількість FCEV понад 1 тис., і дев'ять із десяти FCEV заходяться у одній із чотирьох передових країн, а саме: Південна Корея, США, Китай чи Японія. Загалом на країни Європи припадає лише 7,8 % від загальної кількості FCEV.

На рис. 2 наведено розподіл FCEV за типами. Найбільше таких автомобілів є легковими (82%), на автобуси припадає трохи більше 9 %, а на вантажівки вантажопідйомністю до 12 тонн та понад 12 тонн 7 % та 1,7 % відповідно.

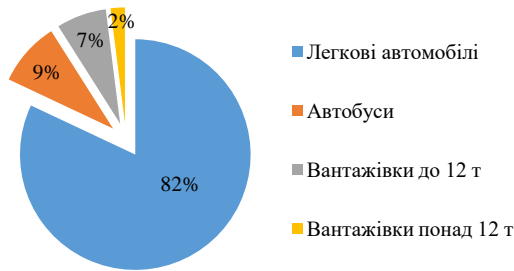


Рис. 2. Розподіл FCEV по країнах світу станом на кінець 2021 року

Аналізуючи дані автовиробників, а також різноманітних організацій, які ведуть реєстрацію FCEV [14, 15, 16, 17] можна дійти висновку, що дані автомобілі представлені такими моделями як: Hyundai ix35 (та наслідником Nexa), Toyota Mirai та Honda Clarity. Загальна будова та розміщення основних вузлів та агрегатів FCEV приведено на рисунку 3.

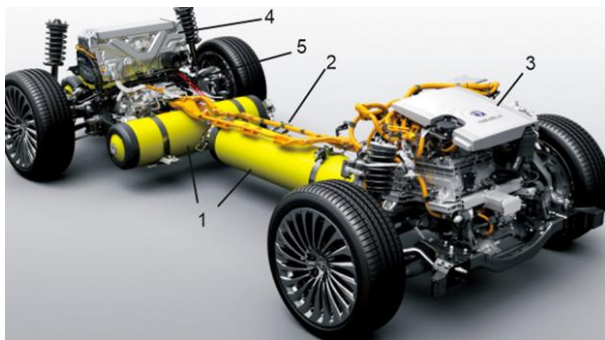


Рис. 3. Загальна будова та розміщення елементів FCEV:

1 – балони з воднем, 2 – магістралі подачі водню, 3 – паливний елемент, 4 – інвертор, 5 – електродвигун і трансмісія

До складу входять балони з воднем 1, який зберігається у стиснутому стані при тиску 35 або 70 МПа [18], магістралями подачі водню 2, паливний елемент 3, інвертор 4, клапан, для аварійного ставлення тиску водню, електродвигун і трансмісія 5 та різноманітні системи забезпечення роботи вище перелічених елементів і комфорту водія та пасажирів. Водень, який зберігається у балонах 1 потрапляє по магістралях 2 у паливний елемент 3, який перетворює хімічну енергію в електричну з виділенням теплової енергії та води [19]. Паливний елемент 3 у своїй найпростішій формі складається катода і анода, які розділені мембраною, що покрита певним каталізатором. Використовуючи водень з балонів 1, та кисень з навколишнього середовища в

наслідок хімічної реакції, яка відбувається у паливному елементі, генерується постійний електричний струм, який подається на інвертор 4. Інвертор 4 трансформує постійний струм у змінний і живить асинхронний двигун 5 який і приводить в рух автомобіль.

Водень найлегший газ (у 14 разів легший за повітря) з густиною  $0,09 \text{ кг / м}^3$ , має широкий діапазон займистості від 4 - 75% об, питома теплота згоряння водню у 2,2 рази більша ніж у природнього газу і становить 120 МДж/кг, має низьку енергію займання 0,02 мДж та здатність до вибуху. Полум'я водню майже невидиме у повітрі, а його температура сягає 2000 °C [20, 24].

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

Таким чином зважаючи на пожежно-небезпечні властивості водню, а також збільшення кількості FCEV, окреслюються підстави стверджувати, що реагування на дорожньо-транспортні пригоди чи пожежі за участю таких транспортних засобів створюють нові виклики для пожежно-рятувальних служб.

### Мета дослідження

Полягає у розкритті особливостей горіння та небезпек, які виникають внаслідок пожеж та ДТП за участю FCEV, що створить підґрунтя для нових підходів реагування на такі події, а також безпечні умови праці рятувальників.

### Виклад основного матеріалу

Загалом пожежну безпеку пов'язану із використанням FCEV можна поділити на безпеку пов'язану з аварійним витоком водню та електричним струмом. Дослідження пожежної безпеки електромобілів, спричинене електричним струмом наведено у праці [21]. До цієї небезпеки можна віднести пошкодження струмопровідних частин силової лінії, яка живить інвертор чи електродвигун. Таке пошкодження може виникнути внаслідок механічної дії, удару, при ДТП а також при пожежі.

Небезпеки пов'язані із воднем виникають через розгерметизацію магістралей та аварійного викиду водню у навколишнє середовище. Викид водню може бути тривалим у часі, або миттєвим внаслідок вибуху. Проаналізуємо систему подачі водню, яка використовується у FCEV. Загалом її можна розділити на підсистему зберігання водню, підсистему подачі до паливного елемента та безпосередньо підсистему паливного елемента (рис. 4).

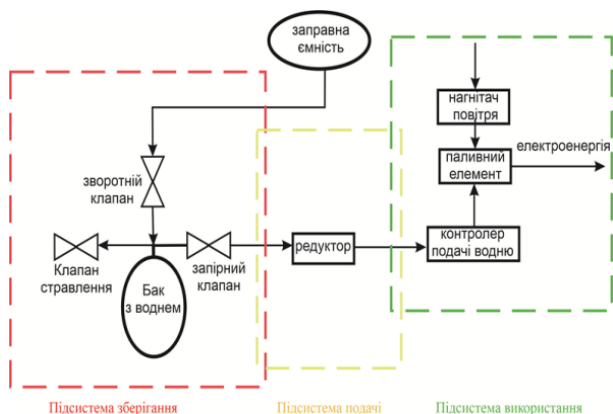


Рис. 4. Схематичне зображення компонентів підсистем зберігання, подачі та використання водню у FCEV

Як вже було описано вище у паливному елементі відбувається перетворення хімічної енергії в електричну, внаслідок використання водню з баку та кисню з атмосфери. У разі пошкодження паливного елемента і поєднання водню і кисню відбудеться зупинка подачі водню з баку. Навіть при ініціюванні запалення водню у паливному елементі стороннім джерелом, його кількість є надто малою, щоб завдати шкоди чи руйнування. Тому підсистема паливного елемента несе найменшу пожежну небезпеку.

Підсистема подачі водню до паливного елемента несе більшу пожежну небезпеку небезпеку у порівнянні із підсистемою паливного елемента. При розгерметизації магістралі спрацьовує механізм покривання подачі водню із бака, і витік припиняється. Однак при займанні запасу водню, що міститься у магістралях буде достатньо, щоб стати джерелом займання для інших матеріалів автомобіля.

Система зберігання водню несе найбільше пожежну небезпеку. Для запобігання вибуху внаслідок нагрівання балону з воднем використовується клапан стравлення, спрацювання якого ініціює тепловий давач при досягненні температури понад 90 °С. Аварійне стравлення водню може супроводжуватись горінням. І при несправному клапані стравлення може виникнути найгірша ситуація з точки зору пожежної безпеки – вибух. З даними [22] такий вибух супроводжується вогняною кулею. У роботі [23] наведено небезпечні відстані при вибуху балона з воднем об'ємом 62,4 л та тиску 70 МПа, а саме при відстані до 1,68 м наслідки матимуть летальний характер, при відстані до 13,4 м травми можуть бути важкими, а в діапазоні від 13,4 до 76 м легкими.

Автори роботи [25] досліджували факел полум'я внаслідок горіння водню, що викидається з клапана стравлення тиску. Зазвичай клапан

стравлення тиску розміщується під днищем автомобіля перпендикулярно вниз, або під кутом 45°. При діаметрі отвору 4,2 мм і тиску водню 70 МПа, довжина факела полум'я при витocy водню у напрямку перпендикулярно до поверхні землі становитиме 6,4 м при витocy під кутом 45° – 8,8 м, і за умови безперешкодного горіння, тобто автомобіль перекинутий – 10,2 м. При збільшенні діаметру отвору довжина факела полум'я збільшується.

Тепловий потік, який утворюється внаслідок горіння водню, що входить із бака автомобіля може складати 20 кВт/м<sup>2</sup> і більше на відстані 2-3 метри від місця викиду.

При тепловому потоці 1,6 кВт/м<sup>2</sup> впродовж тривалого впливу будь які больові ефекти є відсутні. При збільшенні теплового потоку до 4-5 кВт/м<sup>2</sup> у людини, яка немає засобів захисту, вже через 20 с утворюється опік 1 ступеня; при дії теплового потоку 9,5 кВт/м<sup>2</sup> через 20 с утворюється опік 2 ступеня; 12,5-15 кВт/м<sup>2</sup> теплового випромінювання спричиняють опік 3 ступеня [27].

Безпечна відстань (при потужності теплового потоку не більше 1,6 кВт/м<sup>2</sup>) при діаметрі отвору 4,2 мм буде складати на відстані 13 м від місця викиду.

У праці [26] на підставі експериментальних досліджень виявлена кореляція між тепловим потоком та масовою витратою горіння водню, яка має вигляд:

$$W = \frac{6,41 \cdot 10^5 M^{1,31}}{L^2}, \quad (1)$$

де  $M$  – масова витрата горіння водню, кг/с;  $L$  – відстань до осі полум'я, м.

Найнебезпечніша подія, яка може статись з міркувань безпеки, це вибух бака з воднем. Науковці Кошкарів та Мольков [28] дослідили небезпечні відстані внаслідок вибуху балону з воднем. Так при вибуху балона з воднем об'ємом 100 л при тиску 70 МПа летальні наслідки настають при відстані до 8 м, а зона травм сягає до 28 м. Безпечна відстань для такого випадку складає понад 100 м. Очевидно, що зі збільшення тиску та об'єму балона та такі відстані збільшуються.

Вибух бака з воднем супроводжується вогняною кулею, діаметр якої залежить від маси водню та може бути описано залежністю [29]:

$$D = 7,93(m(H_2))^{1/3}, \quad (2)$$

де  $D$  – діаметр вогняної кулі, м;  $m$  – маса водню, що вибухнула, кг.

Під час реагування пожежно-рятувальними підрозділами на надзвичайні ситуації за участю FCEV можна окреслити наступні події: ДТП, ДТП+

пожежа, пожежа. Залежно від місцевості такі події можуть виникнути під час заправлення воднем на заправній станції, під час стоянки на парковці чи гаражі, а також під час руху на шосе.

Для інформування екстрені служби в тому числі і пожежно-рятувальні, автомобілі, що використовують водень повинні мати розпізнавальні знаки, а це позначення на кузові H<sub>2</sub>, FCEV, Hidrogen, Fuel Cell Electric Vehicle у поєднанні із різного роду синіми стрічками тощо.

ДТП є найбільш поширеною подією, яка виникає. При ДТП у автомобілі завжди знаходяться люди, і нерідко вони не можуть самостійно покинути автомобіль, через деформацію його кузовних елементів або внаслідок отриманих травм. Про класифікуємо та розглянемо можливі сценарії виникнення ДТП.

ДТП за участю FCEV та автомобіля, що використовує традиційні види пального (бензин, дизпаливо) без викиду водню та пожежі. При такому розвитку подій пожежно-рятувальні підрозділи проводять розвідку місця події, визначають небезпечну зону, стабілізують транспортний засіб, проводять роботи із рятування потерпілих та вживають заходів щодо недопущення можливого займання, тобто використовують алгоритм роботи як при ДТП за участі автомобілів, що використовують традиційні види пального.

При викиді водню (а це супроводжується шумом) внаслідок пошкодження системи подачі чи зберігання водню, але без горіння необхідно визначити орієнтовно місце на напрям викиду. Підходити до цього транспортного засобу з протилежного боку до напрямку викиду. За необхідності створити потоки повітря з швидкістю понад 60 м/с та продуктивністю понад 160 м<sup>3</sup>/год що дозволить знизити концентрацію водню нижче нижньої концентраційної межі. Для безпечної та швидкої евакуації пасажирів доцільно розміщувати нагнітач перед транспортним засобом і особливу увагу приділяти простору під днищем автомобіля, а евакуацію проводити в напрямку розміщення нагнітача. Якщо FCEV розміщений не горизонтально, а під кутом, внаслідок з'їзду з урвища тощо, в такому разі необхідно враховувати дифузію водню і нагнітач повітря розміщувати з врахуванням направлення водню від потерпілих.

Якщо викид водню супроводжується горінням, необхідно визначити розміри факела полум'я та з використанням водяних завіс зменшити потужність теплового випромінювання та вжити заходів для недопущення займання автомобіля чи сусідніх об'єктів. Здійснювати гасіння такого факела є малоефективним, враховуючи, що час викиду може складати 5-20 хв в залежності від діаметру отвору і

маси водню, а також важко доступністю до місця пошкодження.

Один із найнебезпечніших сценаріїв є горіння автомобіля, що використовує традиційні види пального чи навіть самого FCEV, однак без викиду водню. Це криє в собі небезпеку вибуху балона, де відстань безпеки становить понад 100 м. За таких умов невідомо чи клапан стравлення тиску ще не спрацював і чи він спрацює взагалі. При спрацюванні клапана стравлення ймовірно різке охоплення полум'ям, яке може складати до 10 м. Тому при такому сценарії необхідно дотримуватись безпечних відстаней та найперше здійснювати гасіння пожежі і зменшувати тепловий вплив на область, де знаходяться ємності з воднем. За можливості здійснити замір температури балонів з використанням тепловізора, виходячи з температури спрацювання клапана стравлення тиску, який зазвичай спрацьовує при досягненні 90-100 °С.

Події, які пов'язані із викидом водню при заправці на заправних станціях стосуються виключно із технічною несправністю чи неналежним технічним обслуговуванням, приміром виходу з ладу зворотнього клапана тощо. Зазвичай при таких обставинах людей у автомобілі немає, натомість присутній обслуговуючий персонал і технічні засоби, в тому числі первинні засоби пожежогасіння, тому такі ситуації несуть чи не найменшу небезпеку.

Що стосується пожеж на пакінгах, автостоянках тощо. Основна небезпека криється у великому пожежному навантаженні та малих відстанях між автомобілями. При пожежі автомобіля, що працює на традиційному пальному, який знаходиться на паркінгу, де поруч припаркований FCEV, необхідно із врахуванням безпечних умов зменшити потужність теплового випромінювання на FCEV, контролювати температуру баків з воднем з використання тепловізорів і за можливості відбуксирувати автомобіль із забезпечення безпеки особового складу.

## Висновки

1. Окреслено передумови, тенденції розвитку та розподіл електромобілів на водневих паливних елементах у провідних країнах світу. Встановлено, що близько 82% від усіх FCEV припадає на легкові автомобілі. Визначено, що у більшості FCEV представлені такими моделями як Hyundai ix35 (та наслідником Nexo), Toyota Mirai та Honda Clarity.

2. На основі всебічного аналізу сучасних наукових праць систематизовано небезпеки, які виникають внаслідок аварійного витікання водню. При діаметрі отвору 4,2 мм і тиску водню 70 МПа, довжина факела полум'я при витоці водню у

напрямку перпендикулярно до поверхні землі становитиме 6,4 м при витоці під кутом  $45^\circ$  – 8,8 м, і за умови безперешкодного горіння, тобто автомобіль перекинутий – 10,2 м. При збільшенні діаметру отвору довжина факела полум'я збільшується. Тепловий потік, який утворюється внаслідок горіння водню, що входить із бака автомобіля може складати  $20 \text{ кВт/м}^2$  і більше на відстані 2-3 метри від місця викиду. Найбільшу небезпеку створює вибух балона з воднем. Так при вибуху балона з воднем об'ємом 100 л при тиску 70 МПа летальні наслідки настають при відстані до 8 м, а зона травм сягає до 28 м. Безпечна відстань для такого випадку складає понад 100 м. Очевидно, що зі збільшення тиску та об'єму балона та такі відстані збільшуються.

3. На основі пожежних небезпек, які можуть виникати внаслідок викиду водню, наведено та проаналізовано типові сценарії подій за участю FCEV, на які будуть залучатись пожежно-рятувальні підрозділи. Встановлено, що один із найнебезпечніших сценаріїв при ДТП є горіння автомобіля, що використовує традиційні види пального чи навіть самого FCEV, однак без викиду водню. Це криє в собі небезпеку вибуху балона, де відстань безпеки становить понад 100 м.

4. З метою забезпечення безпеки рятувальників та успішного проведення робіт із рятування потерпілих та гасіння пожеж доцільно використовувати нагнітачі повітря для зменшення концентрацію водню нижче нижньої концентраційної межі вибуху, використовувати водяні завіси для зменшення теплового випромінювання, контролювати температуру баків з воднем з використанням телевізорів та дотримуватись безпечних відстаней.

### Література

1. Skirienė, A. F., & Stasiškienė, Ž. (2021). COVID-19 and air pollution: Measuring pandemic impact to air quality in five european countries. *Atmosphere*, 12(3). doi:10.3390/atmos12030290
2. European Environmental Agency. Explaining Road Transport Emissions: A Non-Technical Guide. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions>
3. European Union. Monitoring CO2 Emissions from Passenger Cars and Vans in 2018. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-from-cars-and-vans-2018>
4. Ventura, L. M. B., Ramos, M. B., D'Agosto, M. D. A., & Gioda, A. (2021). Evaluation of the impact of the national strike of the road freight transport sector on the air quality of the metropolitan region of rio de janeiro, brazil. *Sustainable Cities and Society*, 65. doi:10.1016/j.scs.2020.102588
5. Nguyen, T. A., & Mikami, M. (2013). Effect of hydrogen addition to intake air on combustion noise from a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4153-4162. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.082
6. Rodionov, A., Wilkening, H., & Moretto, P. (2011). Risk

assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2398-2406. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.089

7. Aguilar, P., & Groß, B. (2022). Battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles, an analysis of alternative powertrains as a mean to decarbonise the transport sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. doi:10.1016/j.seta.2022.102624
8. Trencher, G., & Wesseling, J. (2022). Roadblocks to fuel-cell electric vehicle diffusion: Evidence from Germany, Japan and California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112. doi:10.1016/j.trd.2022.103458
9. Teimouri, A., Zayer Kabeh, K., Changizian, S., Ahmadi, P., & Mortazavi, M. (2022). Comparative lifecycle assessment of hydrogen fuel cell, electric, CNG, and gasoline-powered vehicles under real driving conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(89), 37990-38002. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.08.298
10. 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.
11. 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. Retrieved from: DOI:10.31649/2307-5376-2021-2-32-39.
12. EAFO. European Alternative Fuels Observatory-Transport Mode n.d. Retrieved from: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road>
13. Samsun, R. C., Rex, M., Antoni, L., & Stolten, D. (2022). Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: A global overview and perspectives. *Energies*, 15(14). doi:10.3390/en15144975
14. Da-sol, K. Hyundai Nexo займає половину світових продажів FCEV. Режим доступу: <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20211230000656>
15. Zhang, J., Hou, F., Wang, J., Song, Z., Baronas, J., Li, H., ... & Li, K. (2022). General Report: Ready to Go, the "Dual Carbon" Goals Are Leading the "Hydrogen Era".
16. Показники продажів Toyota Mirai в США. Режим доступу: <https://carfigures.com/us-market-brand/toyota/mirai>
17. Показники продажів Hyundai Nexo у США. Режим доступу: <https://carfigures.com/us-market-brand/hyundai/nexo>
18. Zhang, C., Cao, X., Bujlo, P., Chen, B., Zhang, X., Sheng, X., & Liang, C. (2022). Review on the safety analysis and protection strategies of fast filling hydrogen storage system for fuel cell vehicle application. *Journal of Energy Storage*, 45. doi:10.1016/j.est.2021.103451
19. 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
20. Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151-1158. doi:10.1016/j.rser.2014.11.093
21. 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.
22. Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., & Molokov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462-6475.
23. Kashkarov, S., Li, Z., & Molokov, V. (2016). Nomograms for assessment of hazard distances from a blast wave after high-pressure hydrogen cylinder rupture in a fire. *In 8th*

*International Seminar on Fire & Explosion Hazards. International Seminar on Fire and Explosion Hazards.*

24. Sun, K., & Li, Z. (2021). Development of emergency response strategies for typical accidents of hydrogen fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(75), 37679-37696.

25. Addai, E. K., Gabel, D., Kamal, M., & Krause, U. (2016). Minimum ignition energy of hybrid mixtures of combustible dusts and gases. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 503-512.

26. Mogi, T., Nishida, H., & Horiguchi, S. (2005). Flame Characteristics of high-pressure hydrogen gas jet.

27. Achance, J., Tchouvelev, A., & Engebo, A. (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2381-2388. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.03.139

28. Kashkarov, S., Li, Z., & Molkov, V. (2020). Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 2429-2446. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.11.084

29. J. Hord Is hydrogen a safe fuel? *Int J Hydrogen Energy*, 3 (1978), pp. 157-176.

### References

1. Skirienė, A. F., & Stasiškienė, Ž. (2021). COVID-19 and air pollution: Measuring pandemic impact to air quality in five european countries. *Atmosphere*, 12(3). doi:10.3390/atmos12030290

2. European Environmental Agency. Explaining Road Transport Emissions: A Non-Technical Guide. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions>

3. European Union. Monitoring CO2 Emissions from Passenger Cars and Vans in 2018. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-from-cars-and-vans-2018>

4. Ventura, L. M. B., Ramos, M. B., D'Agosto, M. D. A., & Gioda, A. (2021). Evaluation of the impact of the national strike of the road freight transport sector on the air quality of the metropolitan region of rio de janeiro, brazil. *Sustainable Cities and Society*, 65. doi:10.1016/j.scs.2020.102588

5. Nguyen, T. A., & Mikami, M. (2013). Effect of hydrogen addition to intake air on combustion noise from a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4153-4162. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.082

6. Rodionov, A., Wilkening, H., & Moretto, P. (2011). Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2398-2406. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.089

7. Aguilar, P., & Groß, B. (2022). Battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles, an analysis of alternative powertrains as a mean to decarbonise the transport sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. doi:10.1016/j.seta.2022.102624

8. Trencher, G., & Wesseling, J. (2022). Roadblocks to fuel-cell electric vehicle diffusion: Evidence from Germany, Japan and California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112. doi:10.1016/j.trd.2022.103458

9. Teimouri, A., Zayer Kabeh, K., Changizian, S., Ahmadi, P., & Mortazavi, M. (2022). Comparative lifecycle assessment of hydrogen fuel cell, electric, CNG, and gasoline-powered vehicles under real driving conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(89), 37990-38002. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.08.298

10. 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.

11. 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. Retrieved from: DOI:10.31649/2307-5376-2021-2-32-39.

12. EAFO. European Alternative Fuels Observatory-Transport Mode n.d. Retrieved from: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road>

13. Samsun, R. C., Rex, M., Antoni, L., & Stolten, D. (2022). Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: A global overview and perspectives. *Energies*, 15(14). doi:10.3390/en15144975

14. Da-sol, K. Hyundai Nexo zaimaie polovynu svitovykh prodazhiv FCEV. Retrieved from: <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20211230000656>

15. Zhang, J., Hou, F., Wang, J., Song, Z., Baronas, J., Li, H., & Li, K. (2022). General Report: Ready to Go, the "Dual Carbon" Goals Are Leading the "Hydrogen Era".

16. Pokaznyky prodazhiv Toyota Mirai v SShA. Rezhym dostupu: <https://carfigures.com/us-market-brand/toyota/mirai>

17. Pokaznyky prodazhiv Hyundai Nexo u SShA. Rezhym dostupu: <https://carfigures.com/us-market-brand/hyundai/nexo>

18. Zhang, C., Cao, X., Bujlo, P., Chen, B., Zhang, X., Sheng, X., & Liang, C. (2022). Review on the safety analysis and protection strategies of fast filling hydrogen storage system for fuel cell vehicle application. *Journal of Energy Storage*, 45. doi:10.1016/j.est.2021.103451

19. 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

20. Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151-1158. doi:10.1016/j.rser.2014.11.093

21. 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.

22. Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., & Molkov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462-6475.

23. Kashkarov, S., Li, Z., & Molkov, V. (2016). Nomograms for assessment of hazard distances from a blast wave after high-pressure hydrogen cylinder rupture in a fire. *In 8th International Seminar on Fire & Explosion Hazards. International Seminar on Fire and Explosion Hazards.*

24. Sun, K., & Li, Z. (2021). Development of emergency response strategies for typical accidents of hydrogen fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(75), 37679-37696.

25. Addai, E. K., Gabel, D., Kamal, M., & Krause, U. (2016). Minimum ignition energy of hybrid mixtures of combustible dusts and gases. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 503-512.

26. Mogi, T., Nishida, H., & Horiguchi, S. (2005). Flame Characteristics of high-pressure hydrogen gas jet.

27. Achance, J., Tchouvelev, A., & Engebo, A. (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2381-2388. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.03.139

28. Kashkarov, S., Li, Z., & Molkov, V. (2020). Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 2429-2446. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.11.084

29. J. Hord Is hydrogen a safe fuel? *Int J Hydrogen Energy*, 3

(1978), pp. 157-176.

**Рецензент:** доктор технічних наук, доцент, головний науковий співробітник відділу організації науково-дослідної роботи Ю.І. Рудик, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна.

**Автор:** ГАВРИЛЮК Андрій Федорович  
кандидат технічних наук, доцент  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
E-mail - gavrilyk3@ukr.net  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950>

## FEATURES OF FIRE IN ELECTRIC VEHICLES ON HYDROGEN FUEL CELLS

A. Gavryliuk

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

*The purpose of the study is to reveal the characteristics of combustion and hazards arising from fires and traffic accidents involving FCEVs, which will create the basis for new approaches to responding to such events, as well as safe working conditions for rescuers.*

*Description of the material. In general, the fire hazards associated with the use of FCEVs can be divided into the hazards associated with accidental hydrogen leakage and electric shock.*

*Hazards associated with hydrogen arise from the depressurization of mains, which leads to the accidental release of hydrogen into the environment. The release of hydrogen can be long-term or instantaneous as a result of an explosion. Let's analyze the hydrogen supply system used in the FCEV. In general, it can be divided into the hydrogen storage subsystem, the supply subsystem to the fuel cell, and the fuel cell subsystem itself. The hydrogen supply subsystem to the fuel cell carries a greater fire hazard than the fuel cell subsystem. When the line is depressurized, the mechanism for covering the supply of hydrogen from the tank is activated, and the leak stops. However, in the event of ignition, the hydrogen contained in the lines will be sufficient to become a source of ignition for other materials of the vehicle.*

*The hydrogen storage system carries the greatest fire hazard. To prevent an explosion due to heating of a hydrogen cylinder, a pressure valve is used, which is triggered by a thermal sensor when the temperature exceeds 90 °C. Accidental handling of hydrogen can be accompanied by combustion. And with a faulty attitude valve, the worst situation from the point of view of fire danger can occur - an explosion.*

*Usually, the pressure release valve is placed under the bottom of the car perpendicularly down, or at an angle of 45°. With a hole diameter of 4.2 mm and a hydrogen pressure of 70 MPa, the length of the flame torch when hydrogen leaks in the direction perpendicular to the surface of the earth will be 6.4 m when it leaks at an angle of 45° - 8.8 m, and under the condition of unobstructed combustion, i.e. the car overturned - 10.2 m. When the diameter of the opening increases, the length of the flame torch increases.*

*The heat flow, which is formed due to the burning of hydrogen coming out of the car tank, can be 20 kW/m<sup>2</sup> or more at a distance of 2-3 meters from the point of emission.*

*With a heat flow of 1.6 kW/m<sup>2</sup>, during long-term exposure, there are no painful effects. When the heat flow increases to 4-5 kW/m<sup>2</sup>, a person who has no means of protection will get a 1st degree burn in 20 seconds; under the action of a heat flow of 9.5 kW/m<sup>2</sup>, a 2nd degree burn is formed after 20 seconds; 12.5-15 kW/m<sup>2</sup> of heat radiation causes a 3rd degree burn. The most dangerous event that can happen for safety reasons is an explosion of a hydrogen tank. Scientists Koshkarov and Molkov investigated the dangerous distances due to the explosion of a hydrogen cylinder. Therefore, in the case of an explosion of a hydrogen cylinder with a volume of 100 l at a pressure of 70 MPa, lethal consequences occur at a distance of up to 8 m, and the zone of severe and medium injuries reaches up to 28 m. The safe distance for such a case is more than 100 m. It is obvious that from the increase pressure and volume of the balloon and such distance increases.*

**Keywords:** electric vehicle, hydrogen fuel cell, fire hazard of electric vehicles.