

**Р.В. Колодницька, к.т.н., доц.  
В.П. Шумляківський, к.т.н., доц.**  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

### **Автомобілі на водневих паливних комірках: сучасний стан і перспективи**

*У наш час уряди багатьох країн встановлюють все більш амбітні цілі для водневого сектора, що дійсно може відіграти ключову роль у досягненні мети нульових викидів (Net Zero) до 2050 року. Водень може бути використаний як джерело енергії двома різними способами: в електрохімічних паливних елементах (комірках) і за допомогою згоряння. В 2007 році компанія Toyota випустила перший гібридний автомобіль, що працює на водневих паливних комірках (Toyota Mirai) з електричним двигуном потужністю 113 кВт. Замість двигуна внутрішнього згоряння цей автомобіль має стек (блок) паливних комірок, що виробляють електричний струм. Транспортні засоби на паливних комірках (Fuel-cell electric vehicles FCEVs) з використанням водню належать до транспортних засобів з нульовими викидами.*

*У роботі описано автомобіль на водневих паливних комірках, який спроектовано в програмному забезпеченні ADVISOR – програма моделювання на основі MATLAB/Simulink. Моделювання в ADVISOR показує, що автомобіль на водневих паливних комірках викидає лише воду.*

*Визначено переваги автомобілів на водневих паливних комірках: 1) запас ходу може бути досягнутий за допомогою достатньої кількості водневих баків високого тиску. Останні можуть бути розміщені в різних місцях, що дозволяє оптимізувати доступний об'єм, підвищуючи придатність для перевезення пасажирів і місткість багажника; 2) номінальна тягова потужність, отримана за певної маси та швидкості автомобіля та нахилу дороги, досягається при поєднанні потрібної кількості основних систем паливних комірок; 3) заправка баків є простою та швидкою, що дозволяє не тільки зменшити вартість зарядних станцій порівняно з зарядними станціями, призначеними для електромобілів, так і досягти інтенсивного використання водню, в таких транспортних засобах, як таксі чи автобуси; 4) автомобілі на паливних комірках дуже безпечні навіть у разі автомобільних аварій. Безпека в основному базується на тому, щоб отримати витік, який залишається нижче рівня горючості водню. Така конструкція досить проста і орієнтована на бак як ключовий пристрій.*

*Проте водневі паливні комірки достатньо дорогі, оскільки потребують використання платинових матеріалів з високою каталітичною активністю. Перспективними також для України можуть стати паливні комірки з інших матеріалів. Такі комірки, на основі цирконію, розроблені в Київському інституті матеріалознавства ім. Францевича. Також цьому сприяє наявність великої кількості в Україні двоокису цирконію.*

**Ключові слова:** *автомобільний транспорт; автомобілі на паливних комірках; водень; паливні комірки; Advisor Matlab.*

**Постановка проблеми.** В наш час уряди багатьох країн встановлюють все більш амбітні цілі для водневого сектора, що дійсно може відіграти ключову роль у досягненні мети нульових викидів (Net Zero) до 2050 року. Одна з провідних консалтингових компаній PwC нещодавно зазначила: «Багато хто вважає водень “швейцарським армійським ножом” майбутнього зеленої енергетики, який може замінити вуглеводні в багатьох сферах застосування та секторах, де викиди важко зменшити» [1]. У деяких місцях, враховуючи Велику Британію, також посилюється інтерес до блакитного водню в поєднанні зі зниженням викидів вуглецю шляхом спільної розробки методів його уловлювання, використання та зберігання [1]. Так компанія «Hydrogen East» започаткувала Waston Energy Hub в 2021 році.

Глобальний перехід на водневе паливо пропонує великі можливості для декарбонізації цілого ряду різних енергоємних секторів від великомасштабного виробництва електроенергії до опалення будинків. Водень може бути використаний як джерело енергії двома різними способами: в електрохімічних паливних елементах і за допомогою згоряння [2].

У 2002 році представлено Honda FCX – перший транспортний засіб на водневих паливних комірках, який сертифікований агенцією EPA (Агенція з охорони навколишнього середовища США) для щоденного використання. В 2007 році компанія «Toyota» випустила перший гібридний автомобіль, що працює на водневих паливних комірках (Toyota Mirai) з електричним двигуном потужністю 113 кВт. Замість двигуна внутрішнього згоряння цей автомобіль має стек (блок) паливних комірок, що виробляють електричний струм [3]. Транспортні засоби на паливних комірках (Fuel-cell electric vehicles FCEVs) з

використанням водню належать до транспортних засобів з нульовими викидами. У перспективі майбутнього інтенсивного використання водневої енергії в транспорті дослідження ланцюга поставок H<sub>2</sub> відіграватиме ключову роль як з точки зору екологічних, так і з економічних питань [4]. Кількість електричних транспортних засобів на паливних комірках (FCEV) в Європі зростає еспоненціально і очікується, що воднева інфраструктура суттєво збільшиться протягом кількох наступних років.

Нещодавнє збільшення виробництва було оголошено автовиробниками (Toyota, Hyundai [5]) та виробниками стеків паливних комірок, що становить понад 3,7 млн FCEV еквівалентів на рік до 2030 року [5]. Компанія «Hyundai» (HMG) планує виробляти 700 000 систем паливних комірок щорічно до 2030 року, враховуючи 500 тис. одиниць для FCEV. Відповідно до «FCEV Vision 2030», HMG разом з постачальниками планує створити 51 000 робочих місць до 2030 року з виробництва систем з паливними комірками [5].

Кілька європейських країн ініціювали національну політику впровадження водневих технологій на ринок протягом наступних кількох десятиліть. Європейська комісія планувала, що водень може становити 32 % європейського палива в 2050 році, і чистий водень відіграватиме ключову роль у нещодавно оголошеному Європейському зеленому курсі [5]. До 2030 року в Європі планується відкрити до 4500 водневих заправних станцій [5]. Звичайно, для того, щоб автомобілі на водневих паливних комірках продавалися в Україні, потрібно налагодити виробництво водню в Україні. На жаль, в Україні все ще немає заправних станцій на водні.

**Аналіз останніх досліджень.** Перспективи і сучасний стан автомобілів на паливних комірках описані в роботах [1–6]. Найбільш повно перспективи і проблеми використання автомобілів з паливними комірками представлено в [4]. Моделюванню автомобілів з паливними комірками на водні у середовищі ADVISOR присвячені роботи [3, 7, 8]. Викидам оксидів азоту присвячено [9, 10].

**Метою статті** є аналіз перспективи використання водню у автомобілях з паливними комірками.

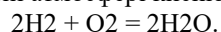
**Викладення основного матеріалу.** *Водень* є паливом, яке використовується в більшості паливних елементів (хоча можуть використовуватися й інші палива, такі як метанол і мурашина кислота). Це найлегший елемент у Всесвіті, який складається з одного протона (позитивно зарядженого) і одного електрона (негативно зарядженого). Газоподібний водень складається з двох атомів водню, пов'язаних разом, H<sub>2</sub>. Хоча понад 75 % маси Всесвіту складається з водню, такого газу, як H<sub>2</sub> не існує на Землі в чистому вигляді, і його виробляють з інших джерел, що містять водень, головним чином шляхом взаємодії метану з парою [2].

У паливному елементі водень розщеплюється на протони та електрони і реагує з киснем, утворюючи воду. Оскільки вода – це єдине, що виходить з вихлопних газів паливного елемента, вони дуже чисті. Водень також можна отримати за допомогою пристрою, який називається електролізером. При цьому використовується електрика для розщеплення води (H<sub>2</sub>O) на водень і кисень. Якщо для цього процесу використовується відновлювана електроенергія (а не метан і пара), водень може бути дуже чистим паливом [2]. Але навіть використовувати електрику для виробництва водню, щоб потім виробляти електроенергію? У міру того, як з'являється все більше відновлюваних джерел електроенергії, що використовують вітер і сонце, стає важко розподілити попит і пропозицію на електроенергію, оскільки іноді вітер не дме або сонце не світить [2]. Якщо водень виробляється, коли дме вітер, його можна зберігати та використовувати пізніше. Водень також можна транспортувати по всій країні для використання в інших місцях, звідки виробляється електроенергія [2].

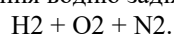
Як вважають автори [2], технічно водень не є паливом, а швидше носієм енергії. Енергія витрачається на воду, що розщеплюється, а потім водень реагує в паливному елементі, утворюючи енергію і більше води, утворюючи цикл. Більшість видів палива, яке людство все ще використовує, таких як бензин або природний газ, містять енергію, мільйони років тому замкнену в землі, поки вона не згорить, і ця енергія не буде втрачена протягом дуже тривалого часу. Цикл для того, щоб відновити, становить близько мільйонів років, а не кількох секунд.

### 1. Що відбувається при згоранні водню?

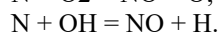
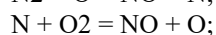
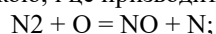
Горіння водню є однією з найпростіших хімічних реакцій, про що більшість людей знають зі шкільної хімії. У чистій атмосфері кисню горіння протікає таким чином:



За винятком невеликої кількості спеціалізованих високоенергетичних застосувань, таких як ракетні двигуни, переважна більшість процесів згорання водню відбувається за наявності повітря. Точніше, під час спалювання водню задіяна суміш являє собою деяку комбінацію:



Для розщеплення нормально стабільних молекул під час горіння водню температура полум'я має бути досить високою, і це призводить до реакцій [2]:



## 2. Викиди оксидів азоту

Викиди оксидів азоту – одні із найбільш небезпечних викидів під час роботи автомобільного транспорту, що викликають захворювання серця та інші серйозні захворювання. Саме викиди оксидів азоту є причиною того, що автомобілі з дизельними двигунами все більше і більше забороняються в Європі, що, на жаль, приводить до збільшення їх кількості в Україні.

Згоряння водню також може призвести до термічного утворення оксидів азоту через механізм, який також застосовується до згоряння викопного палива.  $\text{NO}_2$  є ключовим забруднювачем повітря, який сам собою є шкідливим і є попередником інших забруднюючих речовин, таких як дрібні тверді частинки та озон. Мінімізація  $\text{NO}_x$  як побічного продукту водневих котлів і двигунів внутрішнього згоряння можлива за рахунок контролю умов згоряння, але це може призвести до зниження вихідної потужності та продуктивності. Можлива подальша обробка та видалення оксидів азоту, але це збільшує вартість та складність приладів. Тому згоряння водню вимагає оптимізації та потенційно нижчих стандартів викидів водню, якщо найбільші переваги якості повітря будуть отримані від зростання використання водню.

Комбінований процес утворення оксидів азоту називається «тепловим  $\text{NO}$ », або «механізмом Зельдовича» і має місце у всьому полум'ї паливної суміші (повітря + паливо), температура якого більше, ніж  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . За нижчої температури, близько  $750\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NO}_x$  практично не утворюється [2].

Тепловий  $\text{NO}$  також виробляється газовими котлами, які спалюють метан, або двигунами внутрішнього згоряння, що спалюють бензин або дизельне паливо. Автор [2] зауважує, що згоряння викопного палива також може призвести до утворення  $\text{NO}$  за іншими механізмами, «швидкого  $\text{NO}_x$ » через реакцію  $\text{CH} + \text{N}_2 / \text{HCN} + \text{N} / \text{NO}$ , і «паливного  $\text{NO}_x$ », який походить від слідів органічного азоту в деяких рідких видах палива. На спалювання водню ці два ефекти істотно не впливають [2]. В [10] моделюються викиди оксидів азоту для такого альтернативного палива, як дизельне біопаливо.

Як вже зазначалося вище, водень можна використовувати як паливо не тільки шляхом його згоряння. Він може подаватися на електрохімічні паливні елементи для безпосереднього вироблення електроенергії, і такий підхід не генерує  $\text{NO}$  як побічний продукт відходів, як вважає автор [2].

## 3. Автомобілі на паливних комірках

Автомобілі, що працюють на водні, використовують певний тип паливної комірки, яку називають протонно-обмінною мембраною PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). PEMFC – це низькотемпературний тип паливних елементів, що використовувалися в космосі компанією General Electric, США [6].

На рисунку 1 показано схематичний вигляд системи паливних комірок FCS (fuel cell system), що адаптовано з [4].

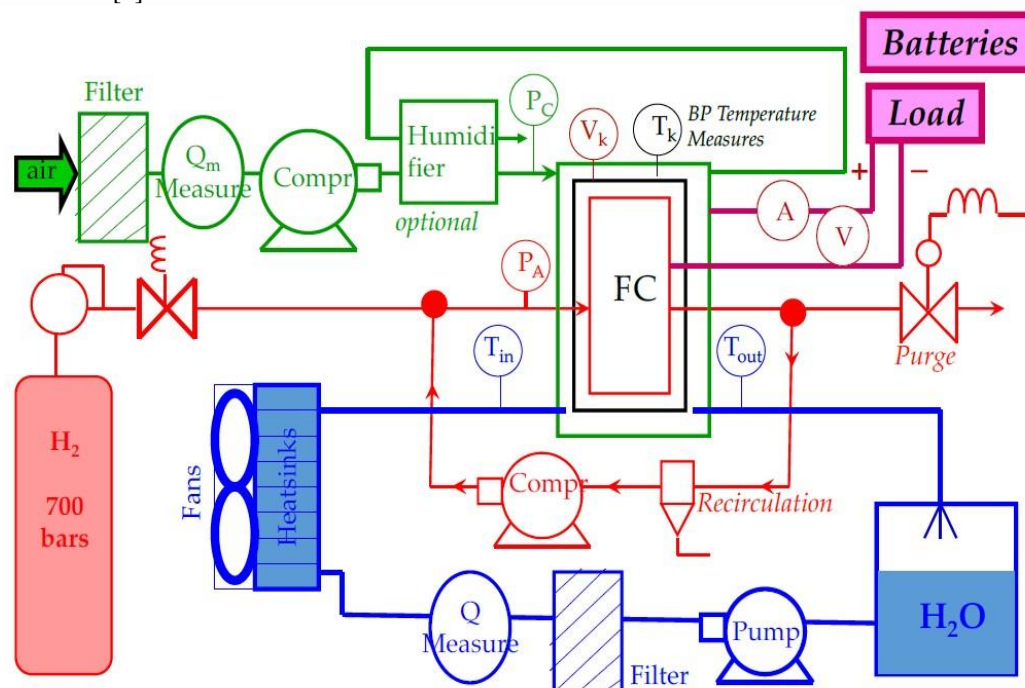


Рис. 1. Схематичний вигляд системи паливних комірок FCS (fuel cell system) (адаптовано з [4])

Повітря (air), що забирається ззовні, фільтрується, для того щоб уникнути отруєння катода і, зокрема, його каталізатора, чутливого до монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) та сажі, навіть в дуже малій кількості. Оскільки

сухе повітря складається в основному з азоту (78,08 %), повітряний компресор приводить в рух дуже велику масу повітря, для того щоб подати достатню кількість кисню (20,95 % сухого повітря) до катода [4]. На відміну від повітря, яке має природну подачу, подача водню ( $H_2$ ) починається з технологічного бака циліндричної форми. Враховуючи дуже низьку молярну масу водню, він зберігається за високого тиску (700 бар) протягом усього терміну служби транспортного засобу [4].

#### 4. Проектування автомобіля в середовищі Advisor

Автомобілі на водневих паливних комірках можна спроектувати в програмному забезпеченні, яке має назву Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). ADVISOR – це програма моделювання на основі MATLAB/Simulink для швидкого аналізу ефективності та витрати палива легких і важких транспортних засобів (ТЗ) зі звичайними (бензин / дизель), гібридно-електричними, повністю електричними силовими агрегатами та ТЗ на паливних елементах (комірках).

Як приклад, в ADVISOR було змодельований автомобіль на паливних комірках з вихідними даними, що представлені на рисунку 2. Для моделювання був обраний середньорозмірний автомобіль на водневих паливних комірках потужністю 110 кВт, оснащений літій-іонною батареєю, з передніми ведучими колесами і механічною коробкою передач.

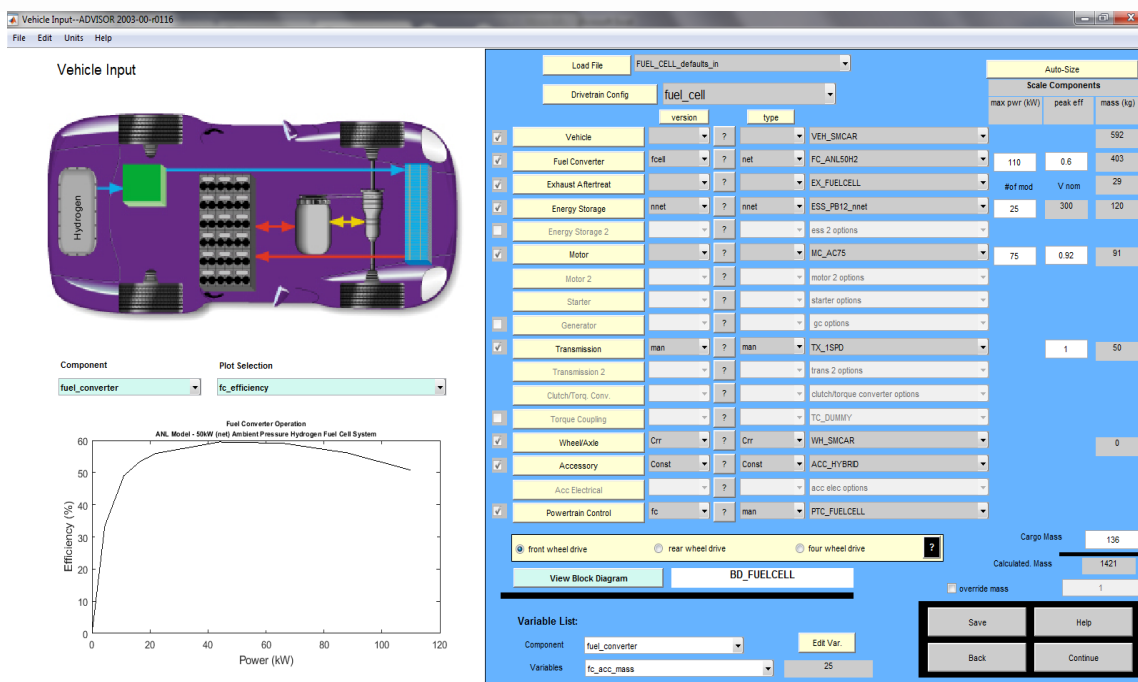


Рис. 2. Вихідні дані для моделювання водневого автомобіля з паливними комірками за міським циклом

Випробування автомобіля на паливних комірках за міським циклом (CYC\_UDDS) показано на рисунку 3. Основні характеристики циклу: час циклу – 1369 с; дистанція – 12 км; максимальна швидкість – 91,2 км/год; середня швидкість – 31,5 км/год.

Автомобілі, що працюють на водневих паливних комірках, – екологічно безпечні, оскільки викидають лише воду, що показує моделювання в Advisor Matlab [2]. Проте водневі паливні комірки достатньо дорогі, бо потребують використання платинових матеріалів з високою каталітичною активністю. Перспективними для України можуть стати паливні комірки з інших матеріалів. Такі комірки, на основі цирконію, розроблені в Київському інституті матеріалознавства ім. Францевича [3]. Також цьому сприяє наявність великої кількості в Україні двоокису цирконію – майже весь, що є у Північній півкулі [3].

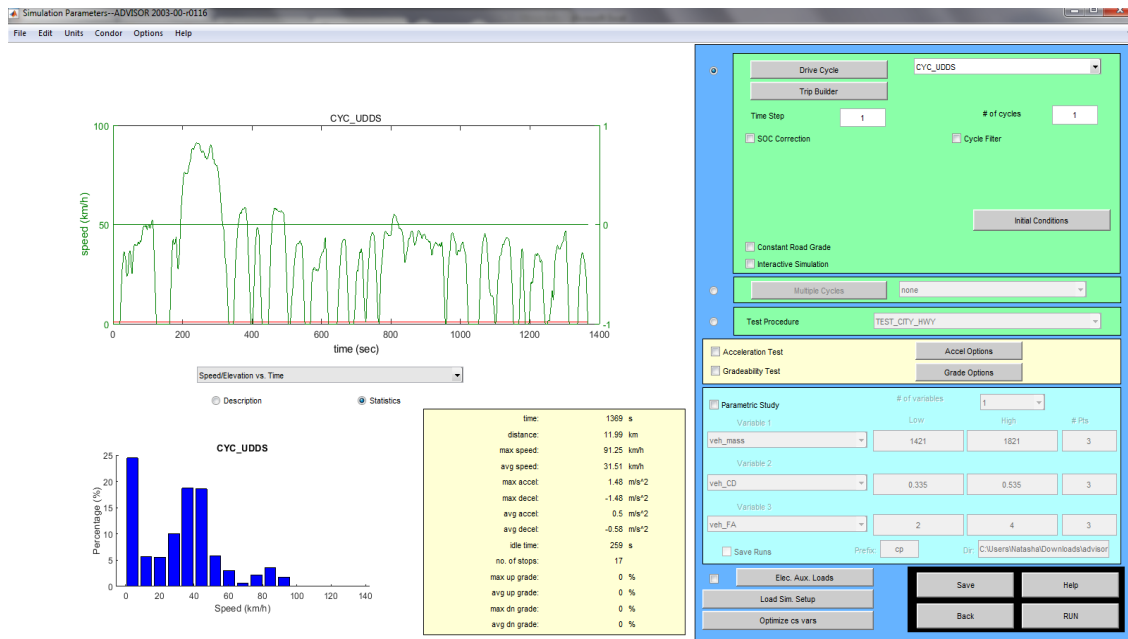


Рис. 3. Результати моделювання водневого автомобіля з паливними комірками за міським циклом

### 5. Переваги і недоліки автомобілів на паливних комірках

Що стосується корисної електричної потужності, FCS виявляється менш ефективним, ніж літій-іонний акумулятор: приблизно 50 % порівняно з приблизно 90 %. Однак проектування такої системи, як автомобіль, вимагає дотримання кількох показників продуктивності для досягнення кінцевої функціональності, необхідної споживачеві: великий запас ходу, придатність для життя легкових автомобілів і велика вантажопідйомність для комерційного транспорту, швидка підзарядка, низькі експлуатаційні витрати, безпека та надійність. Використання бортового FCS для забезпечення тягової потужності має кілька ключових переваг [4]:

1. Запас ходу може бути досягнутий за допомогою достатньої кількості водневих баків високого тиску. Останні можуть бути розміщені в різних місцях, що дозволяє оптимізувати доступний об'єм, підвищуючи придатність для перевезення пасажирів і місткість багажника. Отже, короткострокова перспектива полягає у виробництві високостандартизованих водневих резервуарів високого тиску, що спричинить падіння цін і значне підвищення надійності [4]. Використовуючи трициліндрові баки та маючи запас ходу 666 км (за циклом WLTP), Hyundai Nexo є яскравим прикладом високого рівня індексу продуктивності;

2. Номінальна тягова потужність, отримана за певної маси та швидкості автомобіля й нахилу дороги, досягається за поєднання потрібної кількості основних FCS. Це має чотириразову перевагу: (1) зниження глобальної вартості, (2) підвищення ефективності їздового циклу, (3) забезпечення безперервності експлуатації за рахунок роботи в погіршеному режимі, (4) збільшення терміну служби за рахунок розподілу зносу на різні підсистеми [4];

3. Заправка баків є простою та швидкою, що дозволяє як зробити вартість та простір зарядних станцій вигідними порівняно зі швидкими зарядними станціями, призначеними для електромобілів (BEV), так і досягти інтенсивного використання водню, в таких ТЗ, як таксі чи в автобусних парках;

4. FCV дуже безпечні навіть у разі автомобільних аварій. Безпека в основному базується на тому, щоб отримати витік, щоб залишатися нижче рівня горючості H<sub>2</sub>. Така конструкція досить проста і орієнтована на бак, як ключовий пристрій.

Грунтуючись на цих основних характеристиках, Кейт Форрест та інші вчені вивчили перспективи електромобілів середньої та великої вантажопідйомності в контексті Каліфорнії [4]. Вони показали, що FCV можуть легко відповідати специфікаціям вантажівок класу 8 порівняно з акумуляторними електромобілями, отримуючи вигоду від компактного зберігання на борту H<sub>2</sub> та швидкої заправки навіть за високої потужності, необхідної для великих енергетичних потужностей. Наприклад, 100-мильні FCV класу 8 можуть покрити до 8 % пройдених миль автомобіля з домашньою базовою зарядкою порівняно з 8 % для автомобілів з акумуляторними батареями такого ж діапазону. Крім того, не впливаючи на корисне навантаження, цей діапазон можна легко розширити до 200-мильних FCV, на відміну від акумуляторних електромобілів. Цей розширений запас ходу може дозволити задовольнити до 68 % попиту на пробіг автомобіля [4]. Однак FCV все ще потребують удосконалення. В [4] були показані такі недоліки водневих автомобілів з паливними комірками:

1. Зниження витрат. Шляхами можливого вдосконалення є зрушення в матеріалах і процесах, зокрема в каталізаторі (платині) і кислотному електроліті (полімерна мембрана), а також перепроєктуванні FCS з одночасним прагненням спростити і впорядкувати його;

2. Компактність. Зауважимо, що останній може знаходити синергію з попереднім (тобто вартість). Крім того, пошук матеріалів і процесу для виробництва поліморфних резервуарів є ще одним перспективним напрямом для збільшення простору кабіни;

3. Термін служби, який достатній, але все одно нижчий, ніж у автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.

У підсумку, FCV досягають зрілості і, отже, вже можуть відігравати певну роль у тенденції до автомобілів з нульовим рівнем викидів. Природні ринки – це великовантажні автомобілі на далекі відстані та парки таксі або транспортних засобів доставки. Оскільки FCS все ще дорогі, ці ринки будуть розвиватися на основі розширювача діапазону або м'якої гібридної архітектури.

Звичайно, для того, щоб автомобілі на водневих паливних комірках продавалися в Україні, потрібно налагодити виробництво водню в Україні. На жаль, в Україні все ще немає заправок станцій на водні.

#### Висновки:

1. Водень може бути використаний як джерело енергії двома різними способами: в електрохімічних паливних елементах (комірках) і за допомогою згоряння;

2. Згоряння водню в ДВЗ призводить до термічного утворення оксидів азоту за тим самим механізмом, який застосовується до згоряння викопного палива;

3. Як показує проектування автомобіля з паливними комірками на водні в програмному середовищі Advisor Matlab, цей автомобіль має єдині викиди – воду;

4. Використання бортового FCS для забезпечення тягової потужності має декілька ключових переваг: 1) запас ходу може бути досягнутий за допомогою достатньої кількості водневих баків високого тиску; 2) номінальна тягова потужність, отримана за певної маси, швидкості автомобіля та нахилу дороги, досягається при поєднанні потрібної кількості основних систем з паливними комірками; 3) заправка баків є простою та швидкою; 4) FCV дуже безпечні навіть у разі автомобільних аварій;

5. Для використання автомобілів з паливними комірками на водні в Україні потрібно налагодити виробництво водню в Україні.

#### Список використаної літератури:

1. Summary report Exploring the potential for hydrogen development in the New Anglia region and around the Southern North Sea [Electronic resource]. – Access mode : [https://hydrogeneast.uk/bacton-energy hub](https://hydrogeneast.uk/bacton-energy-hub).
2. Alastair C. Lewis Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NOx emissions / Alastair C. Lewis // Environ. Sci.: Atmos. – 2021. – Vol. 1. – P. 201.
3. Колодницька Р.В. Моделювання автомобіля на паливних комірках у середовищі ADVISOR / Р.В. Колодницька, С.О. Єрмак, О.М. Пилипенко // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій», 16 травня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2023. – С. 15–16.
4. Béthoux O. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives / O.Béthoux // Energies. – 2020. – Vol. 13 (21). – P. 5843. DOI: 10.3390/en13215843hal-0303037.
5. Колодницька Р.В. Проблеми і перспективи використання дизельного біопалива та водню в автомобільному транспорті / Р.В. Колодницька // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту», 14–15 квітня. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 139–144.
6. Колодницька Р.В. Автомобілі на водневих паливних комірках. Мрія чи реальність для України? / Р.В. Колодницька, В.П. Шумляківський // Тези ХІІІ міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 26–28 жовтня. – Житомир, 2020. – С. 34–36.
7. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective / R.Kolodnytska, A.P. Kravchenko, A.V. Pchenko, O.Vasylyev // International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies, 12th–13th of September. – Coventry, UK, 2019. – P. 30.
8. Колодницька Р.В. Автомобілі з паливними комірками на водні / Р.В. Колодницька, Д.Б. Бегерський, В.П. Шумляківський // Матеріали VII міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології», 23–24 листопада. – Харків : ХНАДУ, 2020. – С. 66–68.
9. The Effects of Biodiesel on NOx Emissions for Automotive Transport / R.Kolodnytska, O.Kravchenko, J.Gerlici, K.Kravchenko // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. – 2022. – № 24 (1). – B59–B66.
10. Колодницька Р.В. Викиди оксидів азоту при використанні дизельного біопалива / Р.В. Колодницька // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2018. – № 2. – С. 63–68 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2018\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2018_2_11).

#### References:

1. «Summary report Exploring the potential for hydrogen development in the New Anglia region and around the Southern North Sea», [Online], available at: [https://hydrogeneast.uk/bacton-energy hub](https://hydrogeneast.uk/bacton-energy-hub)

2. Alastair, C. Lewis (2021), «Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NOx emissions», *Environ. Sci.: Atmos.*, Vol. 1, pp. 201.
3. Kolodnytska, R.V., Yermak, S.O. and Pylypenko, O.M. (2023), «Modeliuvannia avtomobilia na palyvnykh komirkakh u seredovyshchi ADVISOR», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh «Perspektyvy rozvytku mashynobudivnoi inzhenerii ta transportnykh tekhnolohii»*, 16 travnia, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 15–16.
4. Béthoux, O. (2020), «Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives», *Energies*, Vol. 13 (21), pp. 5843, doi: 10.3390/en13215843hal-0303037.
5. Kolodnytska, R.V. (2021), «Problemy i perspektyvy vykorystannia dyzelnoho biopalyva ta vodniu v avtomobilnomu transporti», *Materialy IX mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu»*, 14–15 kvitnia, VNTU, Vinnytsia, pp. 139–144.
6. Kolodnytska, R.V. and Shumliakivskyi, V.P. (2020), «Avtomobili na vodnevnykh palyvnykh komirkakh. Mriia chy realist dlia Ukrainy?», *Tezy XIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu»*, 26–28 zhovtnia, Zhytomyr, pp. 34–36.
7. Kolodnytska, R., Kravchenko, A.P., Ilchenko, A.V. and Vasylyev, O. (2019), «Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective», *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies*, 12th–13th of September, Coventry, UK, p. 30.
8. Kolodnytska, R.V., Beherskyi, D.B. and Shumliakivskyi, V.P. (2020), «Avtomobili z palyvnymy komirkamy na vodni», *Materialy VII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii»*, 23–24 lystopada, KhNADU, Kharkiv, pp. 66–68.
9. Kolodnytska, R., Kravchenko, O., Gerlici, J. and Kravchenko, K. (2022), «The Effects of Biodiesel on NOx Emissions for Automotive Transport», *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, Vol. 24 (1), B59–B66.
10. Kolodnytska, R.V. (2018), «Vykydy oksydiv azotu pry vykorystanni dyzelnoho biopalyva», *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, Seriya Tekhnichni nauky*, Vol. 2, pp. 63–68, [Online], available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2018\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2018_2_11)

**Колодницька** Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6943-3731>.

Наукові інтереси:

- альтернативні палива для автомобільного транспорту, враховуючи водень;
- автомобілі з паливними комірками; транспортні технології;
- композитні матеріали на основі натуральних волокон.

**Шумляківський** Володимир Петрович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-5418-4736>.

Наукові інтереси:

- водневі технології;
- інтелектуальні транспортні системи;
- дослідження робочих процесів в автомобілі;

**Kolodnytska R.V., Shumliakivskyi V.P.**

#### **Hydrogen fuel cell vehicles: perspectives and state of the art**

Nowadays, many governments are setting increasingly ambitious targets for the hydrogen sector, which can indeed play a key role in achieving the goal of zero emissions (Net Zero) by 2050. Hydrogen can be used as an energy source in two different ways: in electrochemical fuel cells (cells) and through combustion. In 2007, Toyota launched the first hydrogen fuel cell hybrid vehicle (the Toyota Mirai) with a 113 kW electric motor. Instead of an internal combustion engine, this car has a stack with fuel cells that produce electric current. Fuel-cell electric vehicles (FCEVs) using hydrogen are zero-emission vehicles.

The paper describes a hydrogen fuel cell vehicle, which is designed in software, ADVISOR - a simulation program based on MATLAB/Simulink. Simulations in ADVISOR show that a hydrogen fuel cell vehicle only emits water.

The paper highlights the following advantages of hydrogen fuel cell vehicles. (1) Range can be achieved with a sufficient number of high-pressure hydrogen tanks. The latter can be placed in different places, which allows you to optimize the available volume, increasing the suitability for carrying passengers and the capacity of the trunk. (2) The rated towing power obtained at a given vehicle mass and speed and road slope is achieved by combining the required number of major fuel cell systems. (3) Filling the tanks is simple and fast, which not only reduces the cost of charging stations compared to charging stations designed for electric vehicles, but also achieves the intensive use of hydrogen, in vehicles such as taxis or buses. (4) Fuel cell cars are very safe even in the event of car accidents. Safety is mainly based on getting a leak that stays below the flammability level of hydrogen. This design is quite simple and focused on the tank as a key device.

However, hydrogen fuel cells are quite expensive, as they require the use of platinum materials with high catalytic activity. Fuel cells made of other materials can also become promising for Ukraine. Such cells, based on zirconium, were developed at the Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU. This is also facilitated by the presence of a large amount of zirconium dioxide in Ukraine.

**Keywords:** road transport; fuel cell vehicles; hydrogen; fuel cells; advisor Matlab.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2023.