

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки
Кафедра автомобілів і транспортних технологій**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до кваліфікаційної роботи
освітнього ступеня
магістр**

**Галузь знань 27 – «Транспорт»
Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»**

**на тему: «Використання зеленого водню як палива для автомобільного
транспорту»**

Виконав: студент групи ААГ-21м



Микола ІМОШЕНКО

Керівник:



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

Завідувач кафедри:



Володимир ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

Рецензент:



Олександр Тимощенко

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет: комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

Кафедра: автомобілів і транспортних технологій

Освітній ступінь: «магістр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 – Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри А і ТТ

Володимир

ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

« 11 » 11 2024р.

З А В Д А Н Н Я

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»
ІМОШЕНКУ Миколі Олексійовичу

1.Тема роботи: «Використання зеленого водню як палива для автомобільного транспорту» затверджена наказом закладу вищої освіти від «06» листопада 2024р. № 636-с

Керівник роботи: к.т.н., доцент Руслана КОЛОДНИЦЬКА

2. Строк подання студентом завершеної роботи 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: наукова література про будову паливних елементів та різновиди. Література по водневим заправним станціям.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Водень, як паливо для автомобільного транспорту. 2. Автомобілі на паливних елементах. 3. Системи заправки автомобіля на паливних комірках воднем. 4. Мобільна заправна станція. Загальні висновки та практичні рекомендації. Перелік посилань. Висновки.

5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) – 19 слайдів.

Дата видачі завдання « 28 » жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Дослідження літературних джерел та робіт по водневій енергетиці	28.10.2024	виконано
2.	Дослідження літературних джерел та робіт по системах паливних елементі і їх застосування в сучасних автомобілях.	04.11.2024	виконано
3.	Дослідження літературних джерел та робіт простої заправки на водню	11.11.2024	виконано
4.	Планування мобільної заправки	25.11.2024	виконано
5.	Аналіз результатів дослідження	02.12.2024	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2024	виконано
7.	Рецензування	01.12.2024	виконано
8.	Попередній захист	04.12.2024	виконано
9.	Захист	9.12-31.12.2024	виконано

Студент



Микола ІМОШЕНКО

Керівник роботи



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

АНОТАЦІЯ

Імошенко М.О. Використання зеленого водню як палива для автомобільного транспорту. – Рукопис.

Магістерська кваліфікаційна робота представлена на здобуття ступеня вищої освіти «магістр», галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт». – Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, 2024 р.

Робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків по роботі, списку використаної літератури, додатку. Повний обсяг роботи становить 76 сторінок, включаючи 22 рисунків, 8 таблиці. Список використаної літератури нараховує 29 посилань і розміщений на 3 сторінках.

У першому розділі «Водень, як паливо для автомобільного транспорту » виділено основні види водню, розповідається як отримати водень з корисних копалин, також розповідається про електроліз і фотоліз.

У другому розділі «Автомобілі на паливних комірках» порівнюються два типи автомобілів на акумуляторних батареях з водневих паливним елементом.

У третьому розділі «Системи заправки автомобіля на паливних комірках воднем.» пояснюється складнощі роботи заправки воднем, розповідається про зберігання водню на заправних станціях, про типи резервуарів, труби, клапани та загальні втрати тиску на транспортуванні водню.

У четвертому розділі «Мобільна заправна станція воднем» було проаналізовано різні схеми мобільних станцій для заправки автомобілів воднем. Було виконано моделювання викидів оксидів азоту для різних альтернативних палив для мобільної станції. В роботі було запропоновано використовувати альтернативне паливо НВО для мобільної станції на водні, як заміну дизельного палива. Було проаналізовано специфіку роботи обладнання для заправних станцій на водні.

Ключові слова: автомобільний транспорт, паливні комірки, паливний елемент, водень, автомобілі на водневих паливних комірках, мобільна заправка на водні, воднева заправка, зелений водень.

ABSTRACT

Imoshenko M.O. Use of green hydrogen as fuel for road transport. - Manuscript.

The master's qualification work is presented for obtaining the degree of higher education "master", field of knowledge 27 "Transport" specialty 274 "Automotive transport". - Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, 2024

The work consists of an introduction, four chapters, general conclusions on the work, a list of used literature, an appendix. The full volume of the work is 76 pages, including 22 figures, 8 tables. The list of used literature includes 29 references and is placed on 3 pages.

In the first chapter "Hydrogen Energy", the main types of hydrogen are highlighted, it tells how to get hydrogen from useful liquids, it also tells about electrolysis and photolysis.

In the second chapter "Cars on fuel cells", two types of cars on rechargeable batteries with hydrogen fuel cells are compared.

The third chapter, "Simple Refueling Procedure", explains the complexities of hydrogen refueling, talks about hydrogen storage at refueling stations, types of tanks, pipes, valves, and general pressure losses in hydrogen transportation.

In the fourth chapter "Mobile refueling station", various schemes of mobile stations for refueling cars with hydrogen were analyzed. Modeling of nitrogen oxide emissions for various alternative fuels for the mobile station was performed. In the work, it was proposed to use alternative HVO fuel for a mobile hydrogen station as a replacement for diesel fuel. The specifics of the operation of equipment for water filling stations were analyzed.

Key words: road transport, fuel cells, fuel cell, hydrogen, hydrogen fuel cell cars, mobile hydrogen refueling, hydrogen refueling station, green hydrogen.

ЗМІСТ

Перелік скорочень і позначень	7
ВСТУП	8
Розділ 1. ВОДЕНЬ, ЯК ПАЛИВО ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ	10
1.1. Виробництво водню.....	10
1.2. Електроліз.	12
1.4. Дозатор водню.....	13
Розділ 2. АВТОМОБІЛІ НА ПАЛИВНИХ КОМІРКАХ.....	17
2.1. Переваги HFCV	20
2.2. Запас ходу автомобілів	27
2.3 Викиди автомобілів на паливних комірках.....	28
Розділ 3. СИСТЕМИ ЗАПРАВКИ АВТОМОБІЛЯ НА ПАЛИВНИХ КОМІРКАХ ВОДНЕМ	33
3.1. Складнощі заправки воднем.	33
3.2. Водневі заправні станції.....	35
3.3. Постачання та зберігання водню.....	36
3.4. Типи резервуарів для зберігання водню.....	37
3.5. Теплопередача.	39
3.6. Система труб для передачі водню.....	40
3.7. Моделювання загальної втрати тиску.....	41
3.8. Клапани регулювання тиску в системі	42
3.8. Компресори, що використовуються для стиснення водню	42
3.9. Модель теплового балансу.....	45
3.10. Термодинамічні припущення	46
3.11. Термодинаміка водню	48
Розділ 4. МОБІЛЬНА ЗАПРАВНА СТАНЦІЯ	52
4.1. Мобільна заправна станція на водні	52
4.2. Газоводнева заправна станція.....	57
4.3. Обладнання для станцій	58
4.3.1. Водневий компресор.....	59
4.3.2. Пристрій попереднього охолодження	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

Перелік скорочень і позначень

FCS – система паливних елементів (Fuel Cell Systems);

FCV – автомобіль на паливних елементах (Fuel Cell Vehicle);

BEV – електромобіль на батареї (Battery Electric Vehicle);

HFCEV- транспортні засоби на водневих паливних елементах (Hydrogen Fuel Cell Vehicle);

FCHEV – гібридний автомобіль на паливних елементах (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle);

FC – паливний елемент (Fuel Cell);

ICEV – автомобіль з внутрішнім згоранням (Internal Combustion Engine Vehicles);

PEMFC – паливний елемент з протонообмінною мембраною (Proton Exchange Membrane Fuel Cell);

ДВЗ - двигун внутрішнього згорання;

ТЗ – транспортних засі

ПГ-парникові гази;

ВСТУП

Актуальність теми. Моделювання і дослідження автомобілів на водневих паливних комірках і заправка на водню дуже важливе на сьогоднішній час. Ця робота має свою актуальність у зв'язку з кількома ключовими факторами:

1. **Екологічне питання:** Водень є чистим джерелом енергії, оскільки при його використанні у паливних комірках утворюється лише вода та тепло. Що робить автомобілі на водневих паливних комірках екологічно чистими з відсутніми викидами вуглекислого газу або інших шкідливих речовин.

2. **Енергетична ефективність:** Технологія водневих паливних комірок може мати високу енергетичну ефективність та високий коефіцієнт використання енергії, що робить їх привабливими для використання в автомобілях.

3. **Зменшення викидів CO₂:** Водень може бути вироблений з використанням відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна чи вітрова енергія (зелений водень), що зменшує викиди вуглекислого газу в навколишнє середовище.

Проте існують і ряд перешкод у використанні автомобілів на водневих паливних комірках, які включають в себе високі витрати на виробництво водню, брак інфраструктури для його зберігання та розподілу. А також потреби у виробництві і утриманні ефективних та стабільних паливних комірок для масового застосування.

Мета магістерської роботи - розробка концепції мобільної станції для заправки автомобілів з паливними комірками воднем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- аналіз водню, як палива для автомобільного транспорту ;
- дослідження роботи автомобілів з паливними комірками на водні;
- аналіз роботи заправних станцій для автомобілів з воднем ;
- розробка концепції мобільної станції на водні.

Об'єкт дослідження – процес заправки автомобільного транспорту воднем.

Предмет дослідження – Мобільна станція водню для автомобілів

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків по роботі, списку використаної літератури, додатків. Повний обсяг роботи становить 78 сторінок, включаючи 22 рисунків, 8 таблиці. Список використаної літератури нараховує 29 найменувань і розміщений на 3 сторінках.

Розділ 1. ВОДЕНЬ, ЯК ПАЛИВО ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Водень - найпоширеніший елемент у Сонячній системі, але на Землі він зустрічається лише у вигляді сполук. Тому його необхідно добувати з молекул, які його містять, таких як вода або вуглеводні, за допомогою певних процесів, зокрема термохімічного перетворення, біохімічного перетворення або електролізу води.

Кольори водню мають вирішальне значення для енергетичного переходу, оскільки кожен шлях виробництва генерує різну кількість викидів парникових газів і призводить до різних виробничих витрат. Сьогодні відновлюваний дорожчий за водень, вироблений з викопного палива. Однак з часом ці витрати зменшуватимуться завдяки інноваціям, економії на масштабах та політиці ціноутворення на вуглецеві квоти.

Крім того, світова залежність від сірого водню має високу ціну вуглецевих викидів. Перехід на блакитний водень дозволив би вдвічі скоротити викиди вуглецю. Хоча заводи на викопному паливі, що використовують технології уловлювання та зберігання вуглецю (УЗВ), добре підходять для зменшення викидів, лише масштабне впровадження відновлюваного водню з його нульовим впливом повністю вирішить проблеми викидів, пов'язані з виробництвом та споживанням водню.

Низьковуглецевий водень - це водень, вироблений з джерел енергії невідновлюваного походження з вуглецевим слідом нижче визначеного порогу, наприклад, блакитний водень.

Чистий водень - це відновлюваний і низьковуглецевий водень. Важливо зазначити, що в той час як водень чисто згорає як паливо в місці його використання, водень, вироблений з викопного палива, просто переміщує викиди з одного місця на інше.

1.1. Виробництво водню

Чорний або коричневий водень - це водень, отриманий шляхом газифікації вугілля. Чорний і коричневий кольори іноді вказують на тип вугілля: бітумінозне (чорне) і буре вугілля (коричневий). Цей процес генерує значні викиди CO_2 ($19 \text{ т CO}_2 / \text{т Н}_2$)

Сірий водень - це водень, вироблений з викопного палива, переважно шляхом риформінгу парового газу або газифікації вугілля. Він генерує значні викиди CO_2 , між 10-19 тонами CO_2 . Понад 95% світового споживання водню - це сірий водень.

Блакитний водень виробляється переважно з природного газу шляхом парового риформінгу в поєднанні з уловлюванням та зберіганням вуглецю (УЗВ). Синій водень має набагато нижчу вуглецеву інтенсивність, ніж сірий водень, з оцінками в межах 1- 4 т CO/tH₂. Хоча використання УЗВ збільшує витрати, блакитний водень залишається найдешевшою "чистою" альтернативою сірому водню.

Зелений або відновлюваний водень виробляється з відновлюваних джерел енергії, таких як вітер і сонце, за допомогою процесу, відомого як електроліз води, коли електролізер розщеплює молекули води на кисень і водень. У процесі виробництва не утворюється жодних викидів CO₂. Сьогодні вартість "зеленого" водню значно вища, ніж вартість "сірого" водню. На нього припадає менше 0,1% світового виробництва водню.

Жовтий водень - це зелений водень, вироблений із сонячної енергії. Він не генерує викидів CO₂. За оцінками, жовтий водень може стати найдешевшою формою відновлюваного водню в середньостроковій перспективі.

Рожевий водень виробляється шляхом електролізу води за допомогою ядерної енергії - чистого, але невідновлюваного джерела енергії, яке не генерує викидів CO₂. Фіолетовий водень виробляється шляхом електролізу води з використанням ядерної енергії та тепла.

Червоний водень виробляється шляхом високотемпературного каталітичного розщеплення води з використанням тепла і пари, що виробляються на атомних електростанціях. Цей процес потребує набагато менше електроенергії, ніж традиційний електроліз.

Бірюзовий водень - це водень, вироблений з природного газу в процесі, відомому як піроліз метану. У цьому процесі природний газ розкладається на водень і твердий вуглець при високих температурах. Наразі бірюзовий водень все ще перебуває на ранній стадії розвитку.

Помаранчевий водень - це нові процеси, які виробляють водень з пластикових відходів як сировину. Він може запропонувати вирішення як проблеми чистої енергії, так і проблеми утилізації пластикових відходів. Помаранчевий водень перебуває на ранніх стадіях розвитку, оцінюються різні технології та виробничі процеси, зокрема піроліз, мікрохвильовий каталіз і фото реформування.

Білий водень, також відомий як природний водень, природним чином утворюється в земній корі внаслідок взаємодії між молекулами води та багатими на залізо мінералами за високих температур і тиску.

Коли вода реагує з цими мінералами, вона виділяє газ водень. Наразі не існує стратегій використання цього водню

1.2. Електроліз води, як метод виготовлення зеленого водню для автомобілів.

Хоча наразі електроліз води є дорогим, він є перспективним варіантом виробництва водню. Якщо електроенергія, що використовується для електролізу, має майже нульові викиди парникових газів за повний паливний цикл, то HFCV також матимуть майже нульові викиди за повний паливний цикл. Електроліз - це електрохімічний процес, який розщеплює воду на водень і кисень. Цей процес відбувається в апараті, який називається електролізером. Реакція цього процесу така:



Електролізери відрізняються за розмірами, тому їх можна використовувати як для розподіленого виробництва водню в точках роздрібної торгівлі, так і для комерційних водневих установок. На комерційних заводах джерело електроенергії не залежить від загальної електромережі. Вони можуть житися від спеціальних джерел енергії, зокрема, тих, що не мають значних викидів парникових газів, таких як відновлювані джерела енергії або атомні електростанції.

Витрати на виробництво водню електролізом вищі (\$4-6/кг H_2) порівняно з SMR (\$1-2/кг H_2), частково через капітальну вартість електролізера, а частково через вартість електроенергії, що використовується для цього процесу. Стратегія зниження собівартості виробництва водню з електроенергії полягає в тому, щоб обміняти капітальні витрати на електролізер на можливість купувати електроенергію в періоди, коли ціни на неї низькі. Існує дві основні можливості придбати безвуглецеву електроенергію за низькою ціною: 1) у генераторів з відновлюваних джерел енергії, що працюють з перервами, в періоди, коли є надлишок пропозиції порівняно з попитом; і 2) на атомних електростанціях, що працюють цілодобово, коли також є надлишок пропозиції порівняно з попитом і низькі ціни. Ці можливості значною мірою залежать від структури місцевого ринку електроенергії, але загалом, коли електроенергія продається в конкурентну мережу, а ціни на електроенергію дуже низькі, будь-яке джерело електроенергії, ймовірно, скористається можливістю продавати електроенергію комерційній електростанції за умови, що вони взаємопов'язані.

Оскільки завод з виробництва водню шукатиме джерело електроенергії з низьким рівнем викидів парникових газів з різних причин, це означає, що найкращими кандидатами є генератори з відновлюваними джерелами енергії та атомні електростанції, що працюють на змінному струмі. Наразі існує значна кількість дешевої атомної енергії, ціни на яку в конкурентних мережах низькі, і зростає пропозиція вітрової та сонячної енергії, що виробляється з перервами, яка так само стикається з надлишком пропозиції і низькими цінами в конкурентних мережах. Спрямування цієї енергії на комерційні водневі заводи може, залежно від співвідношення капітальних витрат і вартості електроенергії, значно знизити вартість водню, виробленого електролізом, а також принести вигоду виробникам ядерної або відновлюваної електроенергії. Значна частина літератури про "водневу економіку" і HFCV зосереджена на цій можливості.

Фотоліз - це фото електрохімічний метод розщеплення води до сонячного світла у водному електроліті. Цей метод був продемонстрований на першій у світі водневій заправній станції на сонячних батареях, побудованій компаніями VännerEnergi та Nilsson Energy у Марієстаді, Швеція, у 2018 році. На рис. 1 показана схема Фотолізу.

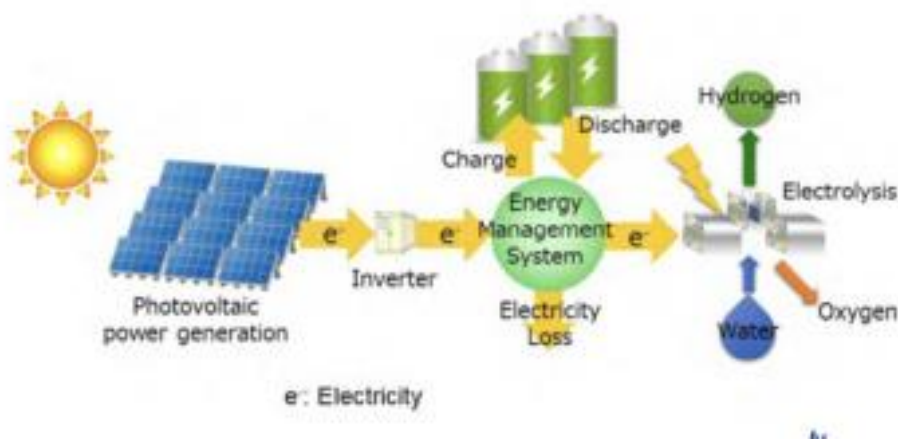


Рис. 1.1. Схема Фотолізу

1.3. Дозатор водню

Система дозаторів знаходиться нижче за системою подачі водню, що включає в себе все обладнання, необхідне для виконання роботи заправки автомобіля, за допомогою якого стиснений водень подається в транспортний засіб. Дозатор водню - це обладнання в системі дозування, яке включає в себе шафу дозатора і опорну конструкцію, яка фізично

розташована в зоні заправки. На рис. 1.2. показаний приклад основних вузлів системи дозування автозаправної станції

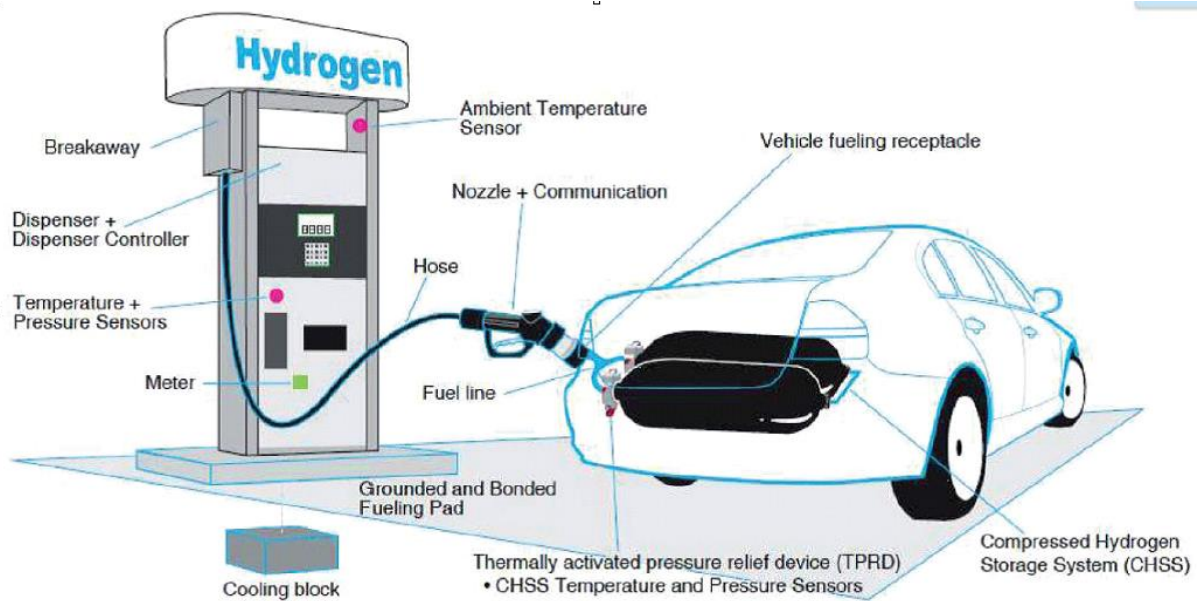


Рис. 1.2. Приклад основних вузлів системи дозування автозаправної станції

Рисунок 1.2 ілюструє приклад ключових компонентів системи дозування заправних станцій, включаючи водневу систему високого тиску FCV, що включає, серед іншого, ємність і систему зберігання стисненого водню (CHSS) з датчиками, а також пристроями скидання тиску. CHSS має термоактивовані пристрої для скидання тиску для захисту від надлишкового тиску через пожежу. На стороні станції розташована автоматизована система управління системою дозування (наприклад, за допомогою програмованого логічного контролера (PLC)) для виконання заправки, а також процедур виявлення несправності і управління. Станція також має пристрій захисту від надлишкового тиску, такий як пристрій для скидання тиску або еквівалент для захисту від надмірного тиску в системі дозування та транспортному засобі.

Дозатор на громадських заправних станціях для автомобілів малої вантажопідйомності зазвичай розроблений з окремими форсунками для заправки транспортних засобів до номінального робочого тиску 35 МПа або 70 МПа. Сопло заправки станції може містити приймач зв'язку, а транспортний засіб може містити передавач зв'язку (наприклад, SAE J2799). Система зв'язку асоціації інфрачервоних даних автомобіля (IrDA) може використовувати протокол SAE J2799 для передачі вимірної

температури та тиску системи зберігання стисненого водню на транспортному засобі на дозатор водню. Система управління системою дозування може використовувати ці дані для системи контролю для управління процесом заправки. Для досягнення максимального робочого тиску (MOP), необхідного для палива CHSS водневого транспортного засобу в повному діапазоні умов експлуатації, рекомендовані мінімальні номінальні показники тиску компонентів, необхідні для системи дозування водню, щодо рівня обслуговування водню дозатора (HSL), класу тиску (як визначено в ISO 17268) та максимально допустимого робочого тиску системи дозування (MAWP) наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Рівні тиску в системі дозування та рекомендовані мінімальні показники тиску компонентів

Водневий рівень сервісу (HSL)	Клас тиску	Максимальний робочий тиск (MOP)	Система дозування максимально допустимого робочого тиску (MABP)
Дорівнює NWP транспортного засобу, що заправляється паливом		$1.25 \times \text{HSL}$ Найвищий тиск під час нормального заправляння паливом	$1.375 \times \text{HSL}$ Найвище допустиме задане значення для захисту системи дозування від тиску
25 МПа	H25	31,25 МПа	34,375 МПа
35 МПа	H35	43,75 МПа	48,125 МПа
50 МПа	H50	62,5 МПа	68,75 МПа
70 МПа	H70	87,5 МПа	96,25 МПа

Якщо використовуються компоненти, які є нижчими за номінальний тиск, то MAWP системи дозування слід знижувати відповідно до компонента з найнижчим номінальним тиском. Система дозування також повинна бути захищена від надмірного тиску. Крім номінального тиску, компоненти в системі дозування водню повинні відповідати наступним вимогам:

- діапазон температур навколишнього повітря від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо місцеві умови не дозволяють або не вимагають інших температурних обмежень;
- сумісність матеріалів, що нормально контактують з воднем;

- зазначений термін служби до технічного обслуговування або заміни.

Цільовий термін служби циклу повинен становити 100 000 циклів для паливної установки, але, незалежно від того, досягнута ця мета чи ні, термін служби циклу повинен бути визначений і вказаний таким чином, щоб заплановані заходи з технічного обслуговування могли запобігти збою.

Компоненти системи дозування водню високого тиску повинні маркуватися класом тиску лише в тому випадку, якщо компоненти розроблені та перевірені на відповідність або перевищення вимог щодо тиску, температури, сумісності матеріалів та терміну служби, як визначено вище. Компоненти високого тиску повинні монтуватися в суворій відповідності до інструкцій постачальника, дотримуючись чітко визначеної процедури складання. Виробник повинен забезпечити, щоб перепад тиску між дозатором, датчиком тиску палива, що контролює тиск в автомобілі, і форсункою не перевищував значення, визначене в протоколі заправки під час надходження водню в транспортний засіб.

Висновок до розділу 1:

1. Розглянутий водень, як вид палива для автомобілів з паливними комірками
2. Розглянуто альтернативні види виготовлення водню.
3. Наведений приклад дозатора водню, який включає в себе все обладнання для заправки автомобіля воднем.

Розділ 2. АВТОМОБІЛІ НА ПАЛИВНИХ КОМІРКАХ

Після багатьох років досліджень, урядових програм і комерційних розробок з'явилися два основні кандидати на заміну автомобілям з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) з метою скорочення викидів парникових газів (ПГ): Електромобілі з акумуляторними батареями (BEV) та транспортні засоби на водневих паливних елементах (HFCV). BEV та HFCV мають нульові викиди вихлопних газів і можуть забезпечити значне скорочення викидів у транспортному секторі завдяки використанню електроенергії або водню, отриманих з джерел з низьким рівнем викидів.

У контексті глобальної стратегії скорочення викидів парникових газів, електромобілі самі по собі могли б забезпечити достатній рівень скорочення викидів для досягнення глобальних кліматичних цілей, якби можна було припустити широке визнання електромобілів споживачами. Однак, BEV не забезпечують запас ходу і зручність заправки, як ДВЗ, що ставить під сумнів їхнє широке визнання на ринку приватних легких транспортних засобів. Крім того, акумуляторно-електрична технологія менш придатна для середніх і важких вантажівок. Отже, може знадобитися інша технологія транспортного засобу з низьким рівнем викидів, яка забезпечить такий самий споживчий досвід, як і транспортний засіб з ДВЗ, і буде більш придатною для більш важких транспортних засобів. Сучасні автомобілі на водневих паливних елементах проходять тест "такий самий, як той, до якого я звик", тоді як сучасні BEV не проходять. Крім того, технологія водневих паливних елементів широко застосовується у важких транспортних засобах. Тим не менш, комерційне використання BEV значно перевищує продажі HFCV, оскільки HFCV відносно пізно з'явилися на ринку, вони наразі дорогі і, перш за все, покладаються на інфраструктуру заправки, яка недоступна, окрім обмежених демонстраційних ринків.

Технологічний і комерційний прогрес змінить картину для HFCV і BEV, оскільки кожен тип завоює більшу частку автомобільного ринку. Урядові програми можуть призвести до створення широкомасштабної інфраструктури водневих заправок, а вартість HFCV значно знизиться зі зниженням вартості паливних елементів. Тим не менш, інфраструктура водневих заправок стане широко доступною до 2025 або 2030 року. До того часу BEV і HFCV не будуть статичними продуктами, оскільки вони зазнаватимуть технологічного прогресу. У той час як HFCV вдосконалюватимуться, вдосконалюватимуться і BEV: збільшуватиметься

дальність пробігу, з'являться дешевші акумулятори і, можливо, скоротиться час перезарядки. Як наслідок, відносні споживчі характеристики BEV і HFCV можуть суттєво відрізнятися від сьогоднішніх. Ми не знаємо, яким буде конкурентне порівняння HFCV та BEV у майбутньому, хоча здається малоімовірним, що BEV коли небудь можна буде заряджати так само швидко, як заправляють транспортні засоби, що працюють на рідкому або газоподібному паливі.

Нинішній імпульс до комерціалізації HFCV відображає значний розвиток технології на сьогоднішній день. HFCV проїхали понад 20 мільйонів кілометрів в реальних умовах, використовуючи паливні елементи з полімерною електролітною мембраною (PEMFC). З 2002 року витрати на паливні елементи скоротилися на 80%, а довговічність збільшилася в чотири рази - до понад 120 000 миль. Ці розробки проклали шлях для автомобільних компаній (OEM) до продажу та лізингу HFCV сьогодні. Світовий парк автомобілів HFCV досяг 11 200 одиниць.

На автомобільні вантажні перевезення припадає 75% усіх викидів CO₂ від вантажного транспорту. Завдяки більш сприятливій щільності енергії та питомій потужності водневих паливних елементів порівняно з акумуляторними системами, паливні елементи краще підходять для великовантажних транспортних засобів. Таким чином, транспортні засоби на водневих паливних елементах розробляються для ринку великовантажних транспортних засобів. Окрім вантажівок середньої та великої вантажопідйомності, водневі технології можуть застосовуватися в поїздах, пороммах, морських суднах і на різних нішевих ринках.

Державна підтримка є необхідним фактором для впровадження технологій як BEV, так і HFCV. Ці зусилля включають R&D, стимулювання купівлі та розвиток інфраструктури для заправки або підзарядки. Хоча комерціалізація HFCV, значно відстає від комерціалізації електромобілів, зараз вона йде тим самим шляхом завдяки значній державній підтримці на кількох автомобільних ринках. Оригінальні HFCV є легкодоступними, хоча і за високою ціною. Забезпечення достатньої інфраструктури для заправки воднем є головним викликом для державних демонстраційних програм.

Причиною розробки HFCV як доповнення або заміни BEV була їх потенційна споживча привабливість у порівнянні з BEV. За умови широкої доступності водневих заправок, HFCV забезпечить споживачам досвід експлуатації, більш схожий на досвід експлуатації ДВЗ, ніж BEV, оскільки

запас ходу HFCV і час заправки є набагато ближчими до того, до чого звикли споживачі. Виходячи з наявних моделей, HFCV, як правило, мають достатньо палива, щоб проїхати 600 км або більше до заправки. Значним недоліком БЕВ є обмежений запас ходу, але ця ситуація швидко змінюється. На момент публікації цієї статті сучасна Tesla Model S здатна проїхати близько 525 км у "реальних умовах" (або 580 км на випробувальному полігоні Агентства з охорони навколишнього середовища США), що знімає проблему запасу ходу для цього транспортного засобу, але не знімає загальну проблему "занепокоєння щодо запасу ходу" для електромобілів, оскільки доступність заправок і час заправки все ще ставлять під сумнів придатність використання електромобілів для подорожей на далекі відстані. BEV мають два сегменти ринку: моделі з більшим запасом ходу (приблизно від 400 км до 525 км в реальних умовах) і дешевші моделі з запасом ходу, призначені для місцевих поїздок на відстані від 90 км до 400 км. Технологічний прогрес, ймовірно, збільшить щільність енергії в акумуляторах, збільшуючи дальність пробігу всіх BEV.

Запас ходу FCV може бути збільшений за рахунок паливних баків вищого тиску, більших баків або більш ефективних блоків паливних елементів. Як зазначалося вище, майбутня порівняльна споживча привабливість BEV і HFCV є невизначеною, особливо з огляду на дальність пробігу.

Якщо дальність пробігу відступає як проблема для електромобілів, то інша суттєва проблема для них - час заправки - може залишитися, незважаючи на технологічний прогрес. Час заправки HFCV становить 3-5 хвилин, як і для автомобілів з ДВЗ, тоді як для досягнення 80% заряду за допомогою високовольтного нагнітача потрібно півгодини або більше. Хоча підзарядка вдома та на робочому місці зазвичай займає значно більше часу, ці можливості зарядки зменшують частоту підзарядки електромобілів на станціях технічного обслуговування, часто на порядок, порівняно з необхідністю завжди заправляти HFCV або ДВЗ на автозаправці. Тим не менш, для подорожей на далекі відстані забезпечення належної інфраструктури для заряджання електромобілів може бути проблематичним, враховуючи кількість часу, необхідного для заряджання кожного електромобіля, а також те, що він займатиме місце на заправній станції.

При розробці транспортної політики, спрямованої на скорочення викидів парникових газів, слід враховувати різні характеристики викидів парникових газів у BEV та HFCV. Хоча і BEV, і HFCV усувають "вихлопні" викиди вуглекислого газу та інших забруднювачів, викиди повного паливного циклу можуть бути набагато вищими залежно від технологій та джерел енергії, що використовуються для виробництва електроенергії та водню. HFCV, які покладаються на розподілене виробництво водню шляхом електролізу, не обов'язково забезпечать скорочення викидів парникових газів, а можуть навіть збільшити їх, залежно від викидів парникових газів в електричній мережі, з якої виробляється водень. Хоча викиди повного паливного циклу BEV також відображають викиди мережі, BEV виробляє 37% викидів від викидів HFCV, якщо заряджається від тієї ж електромережі, яка використовується для виробництва водню для HFCV. Така висока чутливість викидів HFCV до викидів електромережі означає, що місце розташування і стратегія комерціалізації можуть мати великий вплив на потенційні переваги HFCV щодо скорочення викидів парникових газів. На багатьох ринках використання HFCV, ймовірно, почнеться з розподіленого виробництва водню з електроенергії на станціях технічного обслуговування. У Норвегії це призведе до майже нульових викидів парникових газів у повному паливному циклі HFCV. У Китаї HFCV, що заправляється на типових станціях технічного обслуговування з використанням електролізу, матиме викиди парникових газів за повний паливний цикл, які майже вдвічі вищі, ніж у автомобіля з ДВЗ. Однак BEV, підзаряджений на тій самій заправці, забезпечить скорочення викидів на 37%.

Отже, якщо країна не має енергетичного сектору з низьким рівнем викидів парникових газів, краще виробляти водень на промислових установках, які використовують електроенергію або синтетичний газ, що виробляється з відновлюваних джерел енергії, ядерної енергії або викопного палива з уловлюванням, утилізацією та зберіганням вуглецю. Більш повне обговорення характеристик викидів повного циклу палива HFCV і BEV, включаючи виробництво водню з використанням природного газу і вугілля.

2.1. Переваги HFCV.

З точки зору споживача, HFCV набагато ближчі до сучасних автомобілів з ДВЗ. Запас ходу HFCV, як правило, довший, ніж у багатьох

BEV, а час заправки 3-5 хвилин набагато ближчий до часу заправки автомобіля з ДВЗ. Ці характеристики роблять HFCV більш природним споживчим вибором для заміни універсального автомобіля з ДВЗ, який також підходить для поїздок на великі відстані (звичайно, за умови, що будуть широко доступні водневі заправні станції). Час заправки лише трохи довший, ніж час заправки автомобіля з ДВЗ, і займає набагато менше часу, ніж час, необхідний для підзарядки BEV. Якщо буде створено централізовану систему з виробництвом, транспортуванням і розподілом водню на промислових підприємствах, то роздрібні водневі заправки будуть схожі на автозаправні станції з бензином/дизельним паливом: з підземним сховищем водню і заправними насосами, подібними до тих, що є на будь-якій станції технічного обслуговування. На ранніх стадіях розвитку системи водневих заправок, швидше за все, передбачатиметься розподілене виробництво водню на роздрібних заправках. Для виробництва водню на АЗС використовували б електролізери або реформери природного газу, а резервуари для зберігання водню були б меншими. Привабливі характеристики транспортного засобу BEV зберігаються в HFCV: високий початковий крутний момент від електродвигунів, швидке прискорення і плавна робота.

Hyundai, Toyota, Honda та інші автовиробники продовжують вдосконалювати технологію HFCV. Інші виробники, такі як GMC, Mercedes, Nissan, Ford, Lexus і BMW також працюють над виробництвом власних HFCV. Нещодавно Honda і General Motors створили спільне підприємство для спільної розробки і серійного виробництва системи водневих паливних елементів наступного покоління. Як зазначалося раніше, технологічний прогрес як для HFCV, так і для BEV буде продовжуватися в міру того, як OEM-виробники завершуватимуть освоєння частки ринку BEV, а також у міру того, як вони очікують на появу нового ринку для HFCV.

HFCV - це електромобілі, які використовують електрохімічний процес для перетворення водню в електрику. HFCV зберігають водень (стиснений під тиском 700 бар) у транспортному засобі замість того, щоб зберігати електроенергію в акумуляторах. Сучасні комерційно доступні HFCV від Honda, Toyota та Hyundai використовують технологію паливних елементів з полімерною електролітною мембраною (PEMFC). Це найпоширеніший тип паливних елементів у транспортних засобах. Оскільки паливом для HFCV є H_2 , єдиним викидом в результаті

електрохімічного процесу через паливний елемент є вода (H_2O), що робить їх транспортними засобами з "нульовим рівнем викидів". Акумулятори використовуються для допоміжних функцій, щоб надати двигунам додаткову потужність і скористатися перевагами паливної економічності, такими як рекуперативне гальмування. Як і у випадку з BEV, HFCV не виробляють локальних або глобальних забруднювачів, але електроенергія або водневе паливо, яке вони споживають, може забруднювати навколишнє середовище, якщо вони виробляються з невідновлюваних ресурсів. На рис.2.1 показаний принципи роботи HFCV.

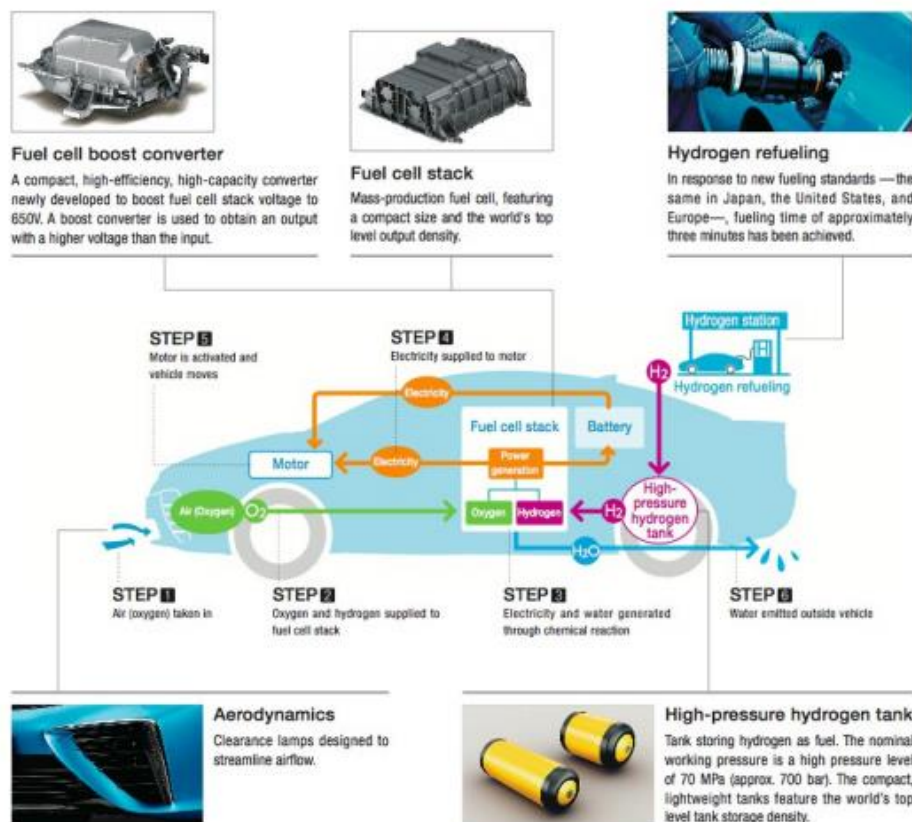


Рис. 2.1. Принципи роботи HFCV

Тверда полімерна мембрана, фактично протонообмінна мембрана, що використовується в PEMFC, виконує подвійну функцію. По-перше, вона використовується як сепаратор для розділення паливного елемента на дві частини. З одного боку (анод) подається водень як паливо, а з іншого боку (катод) - кисень як окислювач. По-друге, мембрана використовується як електроліт. Гази (кисень і водень) не можуть проходити через цю мембрану, але полімерна мембрана може переносити протон від анода до катода, оскільки вона є протонопровідною.

Водень і паливний елемент з полімерною електролітною мембраною (PEMFC).

Застосування водню та паливних елементів широке - від "живлення будівель, автомобілів, вантажівок до портативних електронних пристроїв та систем резервного живлення. Оскільки паливні елементи можуть бути незалежними від електромережі, вони також є привабливим варіантом для критично важливих функцій навантаження, таких як центри обробки даних, телекомунікаційні вежі, лікарні, системи реагування на надзвичайні ситуації і навіть військове застосування для національної оборони". Це було в 1838/1839 роках, коли Крістіан Фрідріх Шенбайн і сер Вільям Роберт Гроув винайшли перший паливний елемент. Після цього винаходу пройшло більше століття, перш ніж почався серйозний інтерес до паливного елемента як практичного генератора. Це був 1962 рік, коли космічна програма США обрала паливні елементи замість більш ризикованої ядерної енергетики та дорожчої сонячної технології для забезпечення енергією космічних місій "Аполлон" та "Джеміні".

Полімерно-електролітний мембранний паливний елемент (ПЕМПЕ) - це електрохімічний пристрій, який перетворює хімічну енергію (накопичену у водні) в електроенергію для живлення електричного двигуна, при цьому вода і тепло є єдиним побічним продуктом, і використовується в транспортних системах, виробництві електроенергії та портативних пристроях. У PEMFC відбуваються дві основні реакції: Анодна і катодна. На аноді відбувається реакція окислення водню, а на катоді - реакція відновлення кисню (рис. 2.2 нижче). Мембранний електрод - це основний компонент паливного елемента, який допомагає проводити електрохімічні реакції, необхідні для розділення електронів, і складається з полімерної електродної мембрани (ПЕМ). В результаті цих реакцій електроенергія виробляється безпосередньо без горіння. Вода і тепло є лише побічними продуктами; ніякого забруднення вихлопної труби. PEMFC є найбільш переважним паливним елементом завдяки своїй високій щільності потужності і особливо підходить для транспортних застосувань завдяки здатності до холодного запуску. На Рис. 2.2 показана схема PEMFC для автомобіля.

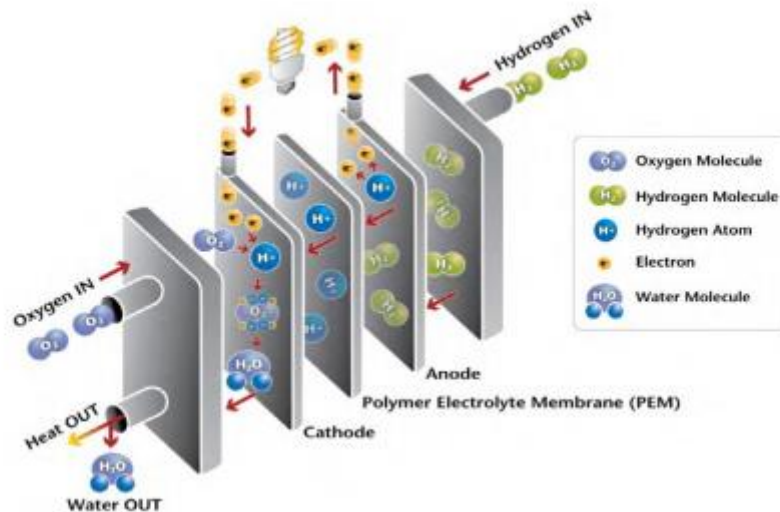


Рис. 2.2 Схема PEMFC для автомобіля

Непаливні експлуатаційні витрати BEV і HFCV можуть бути нижчими, ніж у ДВЗ, через меншу кількість рухомих частин і меншу вібрацію. Однак важливість цих факторів все ще потребує кількісної оцінки після того, як з'явиться більше досвіду експлуатації кожного типу транспортного засобу.

Найбільшою статтею експлуатаційних витрат будь-якого автомобіля є вартість пального. Як показано в Таблиці 2.1 (нижче) для США, поточна вартість пального для BEV нижча, ніж для звичайних автомобілів з ДВЗ і HFCV (вартість пального для аналогічних класів автомобілів). Середній пробіг нового американського автомобіля з ДВЗ у 2019 році становить близько 26 миль на галоні або 11,4 цента на милю при ціні бензину 3 долари за галон. BEV коштує 4,3 цента за милю (за середніми цінами на електроенергію в США), а HFCV - 22,1 цента за милю, виходячи з типових роздрібних цін на водень у США. Значно вищі витрати на паливо для HFCV відображають той факт, що водень є енергоносієм, який отримують з високоякісних джерел енергії (наприклад, електроенергії або природного газу), зі значними термодинамічними втратами, а потім зазнає аналогічних втрат при перетворенні в електрику паливним елементом.

Табл. 2.1: Паливна економічність різних енергетичних установок автомобілю

Середні значення	Миль/галон В еквіваленті	км/галон	цент/км	цент/миля
ДВЗ (бензин)	27	42	7	11.4
ДВЗ (дизельне)	34	54	5.8	9.3

паливо)				
HFCV	63	101	13.8	22.1
BEV	110	177	2.7	4.3
Гібридний автомобіль	48	77.2	3.8	6.2

У країнах з високими податками на бензин і дизельне паливо різниця між споживчими витратами і витратами, наведеними в Таблиці 2.1, була б дуже різною, а електромобілі стали б ще більш привабливими, а HFCV - більш конкурентоспроможними (за умови, що на електроенергію, яка використовується для підзарядки електромобілів або виробництва водню для HFCV, не накладалися б аналогічні податки). Ціна на електроенергію в США, використана в цих розрахунках, становить \$0,13/кВт-год. Країни з нижчими або вищими роздрібними цінами на електроенергію матимуть пропорційно інші витрати на милю пробігу для електромобілів. У розрахунках використано вартість пального у 2019 році: \$2,85/галон для звичайного неетильованого бензину, \$3,50/галон для преміум-класу, \$3,16/галон для дизельного пального. Зміни світових цін на нафту також вплинуть на ці оцінки, але в однаковий спосіб для всіх країн. На рисунку 2.3 показана сукупна вартість ланцюга постачання.

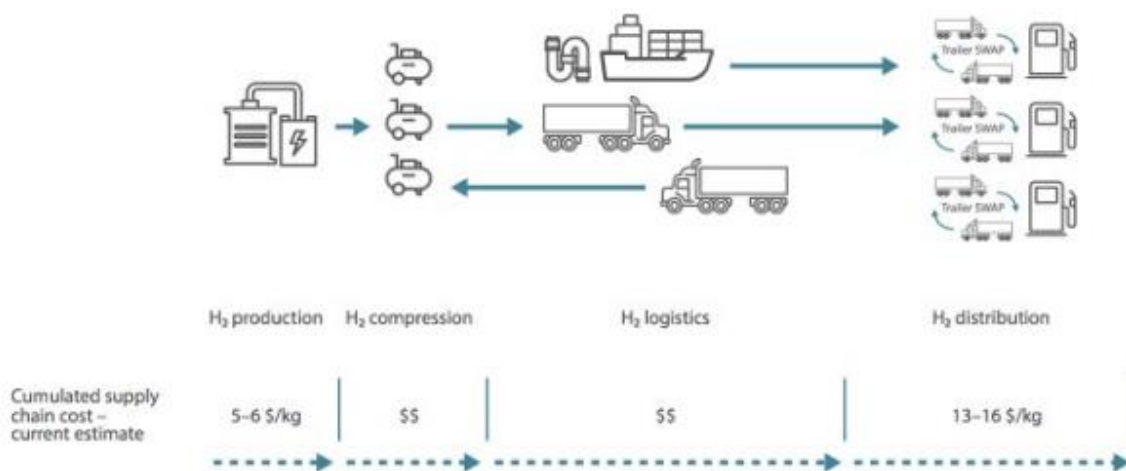


Рис. 2.3. Сукупна вартість ланцюга постачання

У Каліфорнії ціни на водневе паливо коливаються від \$12,85 до понад \$16 за кілограм (кг). Найпоширеніша ціна - \$13,99/кг (0,22 \$/миля). Однак, наприклад, у Санта-Моніці воно дорожче - \$16,63/кг або 0,33 \$/миля. Ці цифри, що узгоджуються з оцінками в Таблиці 2.1, означають,

що поточна вартість пального для HFCV приблизно вдвічі вища, ніж для ДВЗ.

Те, чи буде водень вироблятися на автозаправній станції, чи на комерційних заводах, матиме значний вплив на розташування та пропускну здатність автозаправних станцій для продажу водню для HFCV. Розподілене виробництво водню передбачає використання електролізерів на автозаправних станціях для наповнення резервуарів, які є достатньо великими для обслуговування трафіку продажу автомобілів з високим вмістом вуглеводнів. Промислове виробництво водню вимагатиме від автозаправних станцій лише резервуарів для зберігання водню. Однак ці резервуари повинні бути набагато більшими, щоб вони могли вмістити достатньо водню для обслуговування руху між поставками водню (на відміну від безперервного постачання водню з виробничих установок на місці). Ці великі резервуари були б підземними резервуарами для зберігання водню, а сама станція працювала б майже так само, як і звичайні заправні станції.

Хоча різні звіти про водень можуть свідчити про те, що виробництво водню на промислових установках є більш економічно ефективним, ніж розподілене виробництво, і на це є вагомі причини, перехідні витрати на виробництво і розподіл водню часто не розглядаються. Тим не менш, перехідні витрати можуть мати набагато більше значення для інвестора, ніж оціночна майбутня вартість повністю розвиненої системи, що обслуговує ринок, на якому поширені HFCV. Ось чому багато демонстраційних програм HFCV покладаються на розподілене виробництво водню. Можливо, навіть ймовірно, що розподілене виробництво водню залишатиметься найпоширенішим методом заправки воднем протягом декількох років, незважаючи на потенціал досягнення нижчих витрат за допомогою централізованої моделі виробництва і розподілу. Хоча повністю розвинена централізована модель пропонує нижчі витрати, коли інфраструктура повністю завантажена, витрати в перехідний період відображають ймовірність того, що інфраструктура може зазнати тривалого періоду низьких коефіцієнтів використання. Це правда, що витрати на перехідний період також вищі для моделі розподіленої водневої заправки. Тим не менш, необхідна інфраструктура має набагато менший масштаб (рівень роздрібних заправок). Будучи набагато більш масштабованою, модель розподіленої заправки може

досягти більш високих показників використання потужностей при обслуговуванні нового автопарку HFCV.

2.2. Запас ходу автомобілів

Запас ходу автомобіля з паливними комірками більший, ніж електромобілів. Запас ходу HFCV складає від 500 км до 610 км, як показано в Таблиці 2.2 нижче. Лише одна модель BEV з великим запасом ходу (Tesla Model S Long Range) може подорожувати на таку відстань (понад 500 км), а більшість дешевших моделей BEV мають набагато менший запас ходу. Порівняння вартості між HFCV та BEV є упередженим через нинішню високу вартість паливних елементів та низькі обсяги виробництва HFCV. Наприклад, деякі пропозиції HFCV належать до того ж ринкового класу, що й дешевші моделі BEV, але коштують так само дорого, як Tesla Model S, розкішний автомобіль, який конкурує з більшими моделями Daimler Benz, Audi і BMW. Як обговорювалося вище, технологічний розвиток як для HFCV, так і для BEV буде швидким, оскільки паливна лінійка HFCV витрати знижуються, а щільність енергії батареї BEV та її вартість покращуються. Цілком ймовірно, що витрати на HFCV і BEV стануть приблизно порівнянними в межах кожного класу ринку.

Таб. 2.2: Запас ходу автомобілів на водневих паливних елементах

HFCV (2019)	Діапазон
Hyundai Nexo Blue	380 миль (608 км)
Honda Clarity	366 миль (586 км)
Hyundai Nexo	354 миль (566 км)
Toyota Mirai	312 миль (500 км)

На ринку електромобілів зараз представлено багато моделей з різним запасом ходу - від дуже короткого до понад 500 км. Це може відображати пріоритети різних споживачів електромобілів. Деякі покупці використовують свої електромобілі для місцевих поїздок і покладаються на домашню зарядку. Інші хочуть мати можливість долати більші відстані без підзарядки. Наприклад, моделі Tesla Long Range, які мають реальний запас ходу 450-525 км (або 500-580 км за класифікацією Агентства з охорони навколишнього середовища США). Інші моделі BEV мають запас ходу, що перевищує 300 км. Швидше за все, моделі BEV з більшим запасом ходу з'являтимуться в міру того, як все більше виробників конкуруватимуть на ринку BEV і як технологія акумуляторів

вдосконалюватиметься. Наприклад, VW оголосив про свою модель ID.3 Long Range з оціночним запасом ходу 470 км.

Час заправки електромобілів занадто довгий, щоб забезпечити споживачам звичний досвід заправки, а також створить логістичні та просторові проблеми для роздрібних заправних станцій, щоб розмістити багато електромобілів. Підзарядка електромобілів вдома та на роботі займає значно більше часу, ніж це було б можливо без високовольтного нагнітача.

Тим не менш, довший час заряджання (часто до частково зарядженого акумулятора) на домашніх та робочих зарядних станціях зменшить частоту заряджання електромобілів на автозаправних станціях порівняно із заправкою HFCV або звичайних транспортних засобів. Тим не менш, для подорожей на далекі відстані забезпечення адекватної інфраструктури зарядних станцій для електромобілів буде проблематичним, враховуючи час, необхідний для підзарядки кожного електромобіля, а також те, що вони займатимуть місце на заправній станції.

2.3 Викиди автомобілів на паливних комірках.

Як BEV, так і HFCV мають нульові викиди з вихлопної труби. Їх часто називають транспортними засобами з нульовим рівнем викидів (ZEV). ZEV можуть значно зменшити забруднення міського повітря, коли джерела енергії на викопному паливі знаходяться за межами повітряного басейну міста. Однак, майже нульові викиди парникових газів за повний паливний цикл вимагають, щоб енергетичний сектор, який постачає ці транспортні засоби, також мав майже нульові викиди парникових газів.

При розробці транспортної політики, спрямованої на скорочення викидів парникових газів, слід враховувати різні характеристики викидів парникових газів у BEV та HFCV. Хоча як електромобілі, так і HFCV усувають "вихлопні" викиди вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин, викиди повного паливного циклу можуть бути набагато вищими залежно від технологій та джерел енергії, що використовуються для виробництва електроенергії та водню. HFCV, які покладаються на розподілене виробництво водню шляхом електролізу, не обов'язково забезпечать скорочення викидів парникових газів, а можуть навіть збільшити їх, залежно від викидів парникових газів в електричній мережі, з якої виробляється водень. Хоча викиди повного паливного циклу BEV

також відображають викиди мережі, BEV виробляє 37% викидів HFCV, якщо заряджається від тієї ж електромережі, яка використовується для виробництва водню для HFCV. Така висока чутливість викидів HFCV до викидів електромережі означає, що місце розташування та стратегія комерціалізації можуть мати значний вплив на потенційні переваги HFCV щодо скорочення викидів ПГ. На Рисунку 2.3 показано взаємозв'язок між вуглецевою інтенсивністю електромережі та викидами парникових газів транспортного засобу HFCV, який заправляється від електролізерів, що використовують електроенергію з електромережі, та електромобіля BEV, який заряджається від тієї ж самої електроенергії. На Рисунку 2.3 також показано для порівняння викиди повного паливного циклу порівнянного автомобіля з ДВЗ і викиди повного паливного циклу автомобіля з ПГ, який заправляється воднем, виробленим SMR з природного газу (без CCUS).

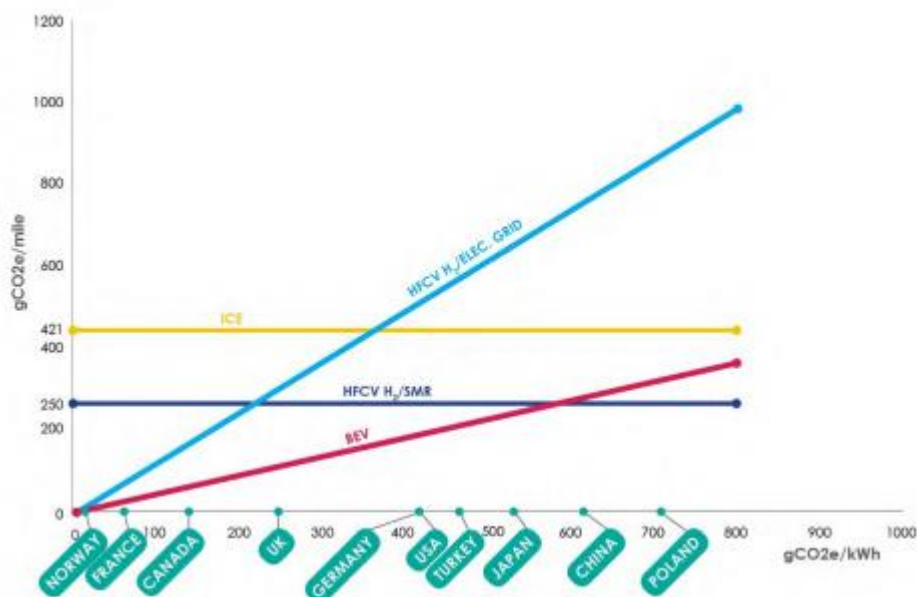


Рис. 2.3: Викиди парникових газів повного паливного циклу HFCV та BEV у порівнянні з викидами парникових газів від електромережі

Якщо і BEV, і HFCV отримують водень з електричної мережі, яка має практично нульові викиди парникових газів за повний паливний цикл (наприклад, Норвегія з її дуже високою часткою гідроенергетики), то і BEV, і HFCV мають майже нульові викиди парникових газів за повний паливний цикл. Оскільки вбудовані викиди парникових газів у мережі зростають, тоді як викиди від електромобілів збільшуються, викиди від HFCV зростають набагато швидше, якщо HFCV заправляються на

автозаправних станціях, що виробляють водень електролізним способом. Наприклад, якщо припустити середній рівень викидів в енергетичному секторі США, то BEV виробляє 190 г CO₂ /міс. порівняно з 522 г CO₂ /міс. для HFCV. Це означає, що для енергосистеми США HFCV виробляє більше викидів парникових газів, ніж звичайний автомобіль з ДВЗ, тоді як BEV має менше половини викидів, ніж ДВЗ. Ситуація стає ще гіршою для китайської електромережі. У Китаї, де HFCV, що заправляється на типових станціях технічного обслуговування з використанням електролізу, має викиди парникових газів за повний паливний цикл удвічі вищі, ніж у автомобіля з ДВЗ, навіть незважаючи на те, що BEV, який підзаряджається на тій самій станції технічного обслуговування, забезпечує скорочення викидів на 28%.

Розподілене виробництво водню шляхом риформінгу природного газу призводить до значно менших викидів, ніж звичайний автомобіль з ДВЗ, навіть без уловлювання та зберігання вуглецю. викиди парникових газів в електромережі повинні бути нижче 200 г/кВт-год, щоб розподілене виробництво водню шляхом електролізу забезпечило нижчі викиди парникових газів за повний паливний цикл, ніж при риформінгу природного газу. Країни з таким низьким середнім рівнем викидів в електромережі, як правило, мають високий відсоток гідроенергетики або атомної енергетики, як, наприклад, Канада і Франція. Якби водень вироблявся з природного газу на промисловому водневому заводі, була б можливість застосувати CCUS і досягти дуже низьких викидів повного паливного циклу. Аналогічно, дуже низьких викидів повного паливного циклу можна було б досягти, якби заводи з виробництва товарного водню використовували електроенергію в обхід електромережі, використовуючи електроенергію безпосередньо з джерел з низьким рівнем викидів, таких як відновлювані джерела енергії або атомна енергетика

Такий підхід також дає можливість знизити собівартість електролізу, якщо відновлювану або ядерну енергію купувати лише тоді, коли ціни на електроенергію дуже низькі. Після реформи ринку електроенергії багато незалежних виробників електроенергії (наприклад, комерційні електростанції) повинні отримувати свої доходи від продажу електроенергії в конкурентній мережі, де ціни на електроенергію диктуються короткостроковим попитом і пропозицією. Змінна відновлювана енергія часто повинна продаватися за дуже низькими цінами через надлишок пропозиції. Аналогічно, атомні електростанції, які

зазвичай стабільно постачають електроенергію протягом 24 годин, також стикаються з низькими цінами на електроенергію в періоди, коли пропозиція в мережі перевищує попит. Комерційна воднева електростанція може обміняти використання своїх потужностей на низьку вартість електроенергії, купуючи електроенергію у відновлюваної та/або атомної електростанції лише тоді, коли ціни в енергосистемі дуже низькі.

Закупівля дешевої електроенергії з відновлюваних як найважливіша можливість знизити вартість виробництва водню для HFCV, а також досягти майже нульового рівня викидів парникових газів протягом повного паливного циклу. Однак, хоча про це рідше згадується, дешеву електроенергію також можна було б купувати у комерційних атомних електростанцій, які працюють у тій самій структурі ринку електроенергетики, що й станції з ВДЕ зі змінною потужністю. Для досягнення скорочення викидів парникових газів немає різниці між тією чи іншою стратегією (відновлювана енергетика чи атомна енергетика). Обидва підходи знижує собівартість виробництва водню і досягає низьких викидів парникових газів за повний паливний цикл. Можна навіть уявити, хоча, можливо, і не на практиці, підключення комерційної водневої електростанції до станції змінної відновлюваної енергії та атомної електростанції, щоб збільшити кількість годин вдень і вночі, коли воднева електростанція може працювати з дешевою електроенергією.

Для країн, які не мають електромережі з дуже низьким рівнем викидів ПГ(парникових газів) або перспектив досягнення низького рівня викидів, використання HFCV, що заправляються за рахунок розподіленого виробництва водню з електроенергії, є поганою стратегією скорочення викидів ПГ, якщо тільки немає підстав припускати, що інфраструктура розподіленого виробництва незабаром буде замінена централізованою системою. Система розподіленої генерації з природного газу дає набагато кращі результати, але скорочення викидів ПГ все одно не буде помітно відрізнятися від того, що було б досягнуто за рахунок гібридних електромобілів з підзарядкою від електромережі. Розглядаючи стратегію розподілу водневого палива, державна політика повинна враховувати високі інвестиційні витрати, необхідні для придбання обладнання для електролізу або риформінгу в точках роздрібної торгівлі, яке згодом доведеться демонтувати і замінити набагато більшими резервуарами для зберігання водню, щоб розмістити централізовану водневу мережу. Будь-який підхід, розподілене чи централізоване виробництво водню,

передбачає перехідні витрати, які є значно вищими, ніж витрати "кінцевого стану", коли існує баланс між заправними станціями та HFCV. На початковому етапі інфраструктура заправних станцій має бути недозавантажена, оскільки споживачі не купуватимуть перший HFCV, якщо не буде зручних можливостей для заправки транспортного засобу. Вирішення цієї проблеми за допомогою двох послідовних стратегій заправки, розподіленої та централізованої, може зменшити витрати на перехідний період порівняно з початком роботи з централізованою системою.

Висновок до розділу 2:

1. Було порівняно електроавтомобілі з автомобілями на водню, а також двигуном внутрішнього згорання.
2. Перевірив паливну економічність між двигуном внутрішнього згорання, електроавтомобіля, автомобіля на водні, гібридного автомобіля.
3. Порівняв викиди парникових газів повного паливного циклу HFCV та BEV у порівнянні з викидами парникових газів від електромережі.

Розділ 3. СИСТЕМИ ЗАПРАВКИ АВТОМОБІЛЯ НА ПАЛИВНИХ КОМІРКАХ ВОДНЕМ

Заправка водню в бак автомобілю може здійснюватися двома різними способами: або шляхом стиснення безпосередньо в бак, або за допомогою резервуара з вищим тиском. Якщо розглядати бак під вищим тиском, то різниця тиску використовується для витіснення водню з баку з вищим тиском в бак з нижчим тиском. Найпростіший спосіб заправки водневих транспортних засобів - це використання резервуарів з високим тиском. На рис. 3.1 показано схематичне зображення найпростішого способу заправки водневого баку автомобіля.

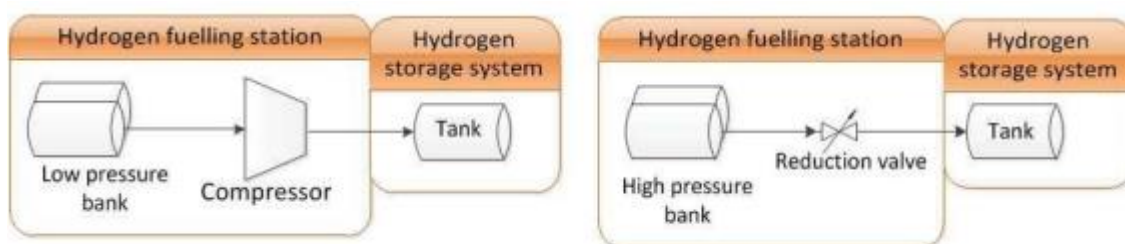


Рис. 3.1. Схематичне зображення найпростішого способу заправки водневого баку автомобіля.

В лівій частині рис. 3.1 показана компресорна заправка з баку низького тиску в бак високого тиску. В правій частині рис.3.1 показано примусове заправлення під тиском між баком високого і низького тиску з баку низького тиску в бак високого тиску, водень потрібно нагнітати в бак високого тиску за допомогою компресора. Перевага заправки з вирівнюванням тиску полягає в тому, що вона дозволяє заправляти паливо з високою масовою витратою. Для компресорної системи масова витрата обмежується потужністю компресора. Обидві показані системи можуть заправляти водневий транспортний засіб, але через властивості водню і стиснення заправка займе багато часу для того, щоб бути безпечною.

3.1. Складнощі заправки воднем.

Складнощі заправки воднем транспортних засобів з паливними комірками пов'язані з наступними факторами. По-перше, водень вибухонебезпечний і потребує обережного поводження. По-друге, властивості водню та його високий робочий тиск ускладнюють безпечний процес заправки. Тиск для зберігання водню повинен бути високим. Для

того, щоб отримати пристойний запас ходу, водень повинен зберігатися в транспортному засобі під тиском 350-700 бар. Основна причина зберігання під високим тиском полягає в тому, що водень зберігається у вигляді газу, а не рідини. Зберігання його у вигляді рідини вимагало б, щоб він був охолоджений до -253°C . Крім того, водень має найнижчу густину серед усіх елементів - $0,089 \text{ кг/м}^3$ при атмосферному тиску і 0°C . Тому для зберігання від 3 до 7 кг водню в автомобілі потрібен або великий об'єм, або високий тиск. Великий об'єм не може бути використаний в автомобілі для особистого транспортування. Тому водень зберігається під тиском 350 або 700 бар у балонах об'ємом до $0,172 \text{ м}^3$, що відповідає 7 кг при тиску 700 бар.

Коли водень заправляється в транспортний засіб, необхідно враховувати кілька факторів. З міркувань безпеки температура водню не повинна перевищувати 85°C . Коли водень стискається в балоні, температура водню підвищується через теплоту стиснення, і якщо заправка відбувається швидко, температура перевищує допустиму межу. Заправка водневого транспортного засобу лише за допомогою баку високого тиску з клапаном, що зменшує тиск у транспортному засобі, займе кілька годин, якщо необхідно передати достатню кількість водню між балонами, не перевищуючи при цьому температурну межу безпеки. Тому водень потребує охолодження перед подачею в транспортний засіб. Розмір баку транспортного засобу варіюється залежно від типу та виробника. Тому необхідно мати можливість безпечного заправлення незалежно від об'єму баку транспортного засобу. Для цього використовується середня швидкість наростання тиску, яка забезпечує заправку з постійним підвищенням тиску на виході зі станції.

Таким чином можна безпечно заправляти всі баки, оскільки підвищення тиску в баку контролюється; отже, масова витрата автоматично регулюється відповідно до об'єму баку. Якщо відомий об'єм цистерни, то відповідно до нього можна встановити і масову витрату, а середня швидкість наростання тиску не потрібна. Найважливішою частиною заправки резервуара воднем є забезпечення того, щоб тиск і температура не перевищували безпечних меж. Відповідно до протоколу заправки, опублікованого «Товариством автомобільних інженерів, SAE» США, безпека заправки забезпечується, і всі транспортні засоби можуть безпечно заправлятися, якщо відомо тип резервуара, температуру навколишнього середовища і початковий тиск в резервуарі.

3.2. Водневі заправні станції.

Водневі заправні станції, що відповідають стандарту SAE J2601, в основному мають вигляд системи, показаної на Рис.3.2. Водень зберігається в каскаді.

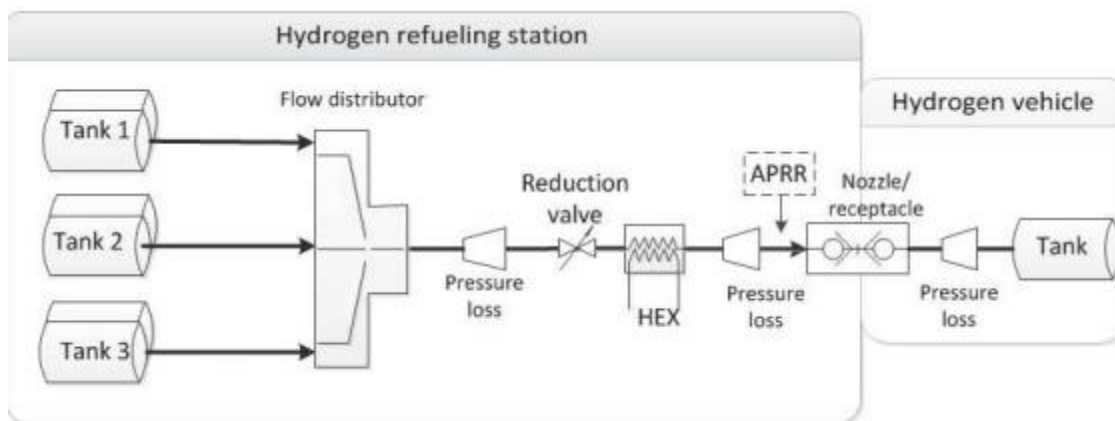


Рис.3.2. Принцип роботи реальної водневої заправної станції, що відповідає стандарту SAE J2601.

Система складається з "резервуара 1" (Tank 1), "резервуара 2" (Tank 2) і "резервуара 3" (Tank 3). Тиск у резервуарах зазвичай становить 400-600 бар для "резервуара 1", 600- 800 бар для "резервуара 2" і 900-1000 бар для "резервуара 3". Заправка відбувається шляхом вирівнювання тиску між резервуаром у транспортному засобі та резервуарами на станції, починаючи з резервуару з найнижчим тиском, і коли тиск через редуктор стає занадто низьким, щоб підтримувати середню швидкість наростання тиску, станція перемикається на наступний резервуар у каскадній системі. На виході зі станції підтримується середня швидкість наростання тиску; це призводить до того, що редукційний клапан повинен компенсувати втрати тиску між ним і виходом. Редукційний клапан контролюється шляхом вимірювання тиску на виході зі станції. Перед тим, як водень покине станцію, його потрібно охолодити. Це відбувається в теплообміннику, розміщеному після редукційного клапана. Причина, по якій його слід розміщувати після редукційного клапана, полягає в тому, що водень нагрівається при дроселюванні, а протокол вимагає, щоб водень, який виходить зі станції, мав попередньо охолоджену температуру на виході зі станції. Зазвичай воднева заправна станція поділяється на дві частини: накопичувальну та заправну. Частина зберігання складається з каскадної

системи і пов'язаних з нею компонентів, таких як компресор і бак, як показано на Рис.3.2. Заправний модуль зазвичай складається з теплообмінника, манометра для контролю редукційного клапана і патрубка для підключення до транспортного засобу. Редукційний клапан може бути розміщений в будь-якій частині системи. Слід зазначити, що це питання проектування. На деяких заправних станціях є окремий модуль заправки, розміщений окремо від решти станції, а на інших - все в одному блоці, і різні системи неможливо розрізнити ззовні.

3.3. Постачання та зберігання водню.

Зберігання водню на заправній станції для автомобільного транспорту здійснюється за низького тиску, порівняно з тиском, необхідним для заправки транспортного засобу. Водень зазвичай зберігається під тиском 200-300 бар у сталевих балонах, які або заправляються ззовні, а потім доставляються на станцію вантажівками, або ж водень з електролізної установки на місці постачається під тиском 10-20 бар, який стискається до 200-300 бар. Сховище для станції з воднем, що доставляється вантажівками, має бути більшим, ніж для станції з безперервним виробництвом на місці, оскільки безперервне виробництво на місці може покрити попит частково або повністю. Сучасні водневі заправні станції, як правило, час від часу доставляють водень на станцію під високим тиском, хоча деякі з них мають електролізні установки для виробництва водню на місці, але його виробництво, як правило, нижче, ніж попит на водень для заправки транспортних засобів.

Прикладом зберігання водню на заправній станції може бути наступний. На заправну станцію доставляється комплект цистерн під тиском 300 бар. На заправній станції резервуари спорожняються до тиску 200 бар. З точки зору стиснення, було б енергетично доцільно розділити пучок на два: один використовується для рекуперації каскадної системи заправної станції, а інший - для підтримки тиску в сховищі, що показано на рис. 3.3. Таким чином підвищується ефективність використання водню в сховищі. Наступний приклад пояснює цей принцип більш детально. 100-метрове сховище під тиском 300 бар доставляється на заправну станцію. Сховище містить приблизно 360 кг водню, що зберігається під тиском від 200 до 300 бар; це відповідає більш ніж 60 заправкам автомобіля. Коли тиск у сховищі досягає 200 бар, 90 м³ демонтується і використовується для живлення інших 10 м³. Потім 10 м³ підтримується під тиском 200-300 бар,

тоді як тиск у 90 м^3 знижується в міру заповнення 10 м^3 . Якщо мінімальний тиск, допустимий у 90 м^3 для живлення 10 м^3 , становить 40 бар, то в наявності є ще 632 кг водню, що відповідає більш ніж 100 заправкам. Загалом 100 м^3 водню, що постачається, можуть заправити понад 160 транспортних засобів.

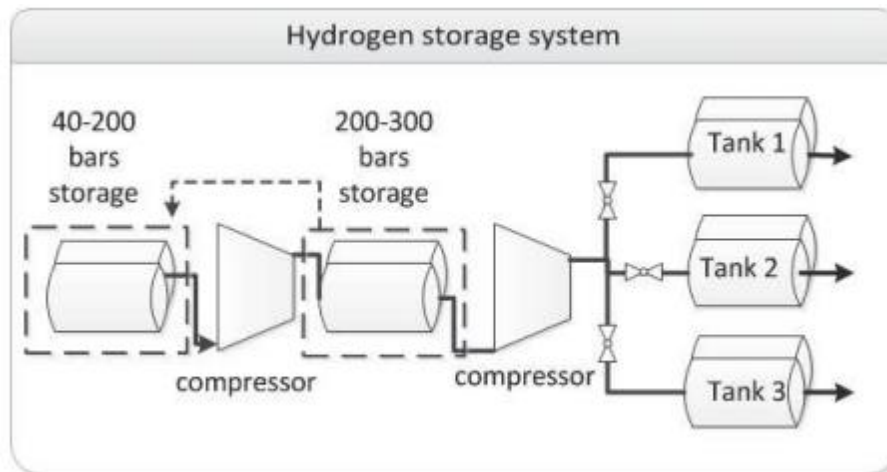


Рис 3.3. Система зберігання водню водневої станції

Об'єм сховища і загальна маса пропорційні, тому при зменшенні об'єму на 50% загальна маса зменшується відповідно. На 25 м^3 поставленого сховища можна заправити приблизно 40 автомобілів. Це справедливо лише для станцій без виробництва на місці, оскільки виробництво на місці збільшує потужність, і якщо потужність достатньо велика, то відпадає потреба у транспортуванні водню вантажівками.

3.4. Типи резервуарів для зберігання водню.

Існує чотири різних типи резервуарів для зберігання водню: тип I, тип II, тип III і тип IV. Як правило, чим вищий номер типу, тим вищий тиск він здатен зберігати і тим дорожчий бак. Тип I виготовляється з нержавіючої сталі і зазвичай витримує тиск 200-350 бар, але є моделі, розраховані на тиск до 500 бар. Тип II виготовляється з алюмінію, він легший за тип I і витримує такий самий тиск. Тип III - це композитний резервуар, виготовлений з тонкого алюмінієвого вкладиша, обгорнутого вуглецевим волокном. Він легший за баки типів I і II і може зберігати водень під тиском до 1000 бар. Тип IV - це композитний резервуар з пластиковим вкладишем, загорнутим у вуглецеве волокно, він легший за інші три типи і може витримувати тиск до 1000 бар. Резервуари типів I і II

зазвичай застосовуються для зберігання водню, коли тиск нижче 350 бар і вага не є проблемою, наприклад, як буферні резервуари на водневій заправній станції або як резервуари нижчого тиску в каскадній системі заправки. Типи III і IV використовуються, коли тиск перевищує обмеження для типів I і II і коли вага є важливим параметром, наприклад, резервуари високого тиску в каскадній системі заправки і резервуари, що використовуються в системі зберігання транспортного засобу.

На рис. 3.4 показано контрольний об'єм навколо резервуара. Стінки є нестисливими і робота над резервуаром не виконується, тому $W = 0$. Баланс імпульсів $p = p_1 = p_2$, так що тиск в резервуарі такий самий; отже, тиск в резервуарі такий самий, як і в резервуарі.

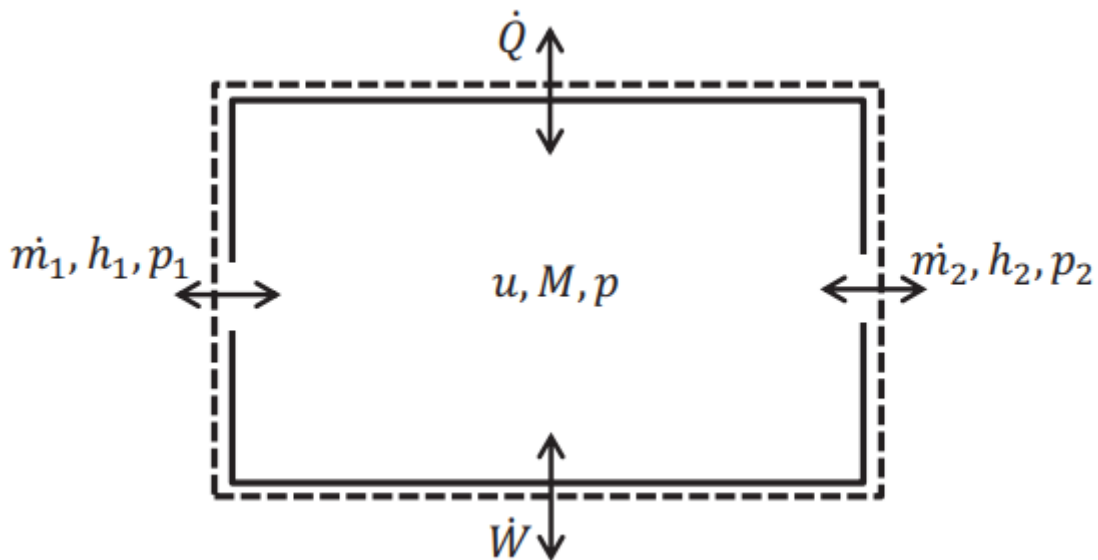


Рис.3.4. Резервуар з визначеним контрольним об'ємом (два входи в резервуар, через які маса може входити або виходити)

Отже, реальний резервуар визначається теплообміном з навколишнім середовищем, але загальна модель резервуара є адіабатичною з можливістю додавання тепловіддачі.

Баланс маси для контрольного об'єму має вигляд:

$$\frac{dm}{dt} = m_1 + m_2$$

Вводячи $M=V \cdot \rho$ і припускаючи постійний об'єм резервуара, рівняння можна виразити як:

$$V \frac{dp}{dt} = m_1 - m_2$$

Термодинаміка роботи резервуарів може бути описана на основі першого закону термодинаміки для відкритої системи без додавання роботи. Енергетичний баланс для одного резервуару - це зміна внутрішньої енергії при виході або вході маси в резервуар, а також розсіювання тепла через стінку резервуару. Зміну внутрішньої енергії можна знайти з рівняння:

$$\frac{dU}{dt} = h_1 \frac{dm_1}{dt} + h_2 \frac{dm_2}{dt} + \frac{dQ}{dt}$$

де dU/dt - зміна внутрішньої енергії системи h_1 та h_2 - ентальпія, що виходить або входить в резервуар при кожному відкритті, dm/dt - масова витрата та dQ/dt - кількість теплоти, що надходить або виходить з системи, де вхідна вважається додатною. Використовуючи метод електронного балансу мас до рівняння

$U = Mu = V \rho u$ дає

$$V \frac{d\rho u}{dt} = h_1 \frac{dm_1}{dt} + h_2 \frac{dm_2}{dt} + \frac{dQ}{dt}$$

У моделюванні було використано два різних варіанти запису рівняння. Перший виражає енергетичний баланс через внутрішню енергію з похідними тиску та ентальпії і частковими похідними густини. Другий запис - через зміну ентальпії в резервуарі, але також з похідними тиску та ентальпії за часом.

3.5. Теплопередача водню .

Основною формулою теплопередачі є теплопровідність через стінку. Справедлива для обох резервуарів, в яких зберігається водень і для трубок, по яких тече водень. Як для резервуарів, так і для трубок теплообмін є нестационарним. У резервуарах температура змінюється за рахунок теплоти стиснення або розширення, коли водень надходить до резервуарів або виходить з них. У трубках водень змінює температуру, коли протікає через трубку. Друге зауваження стосується того, чи слід використовувати кускову модель або одновимірну модель теплопровідності. Вивчаючи резервуари для зберігання водню під високим тиском, можна помітити, що вони виготовлені з композитного матеріалу з низькими теплопровідними властивостями і мають товсті стінки. В результаті експериментів було виміряно теплопровідність вкладиша і обгортки резервуарів з вуглецевого волокна. Для труби було розраховано число Біо, яке показало, що використання кускової моделі є недостатнім. Тому необхідна одновимірна модель як для резервуара, так і для труби.

Для заповнення водневого бака не існує відомої математичної кореляції між конструкцією бака і коефіцієнтом тепловіддачі. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від конструкції резервуара, масової витрати в резервуар і сопла на вході. Коефіцієнт тепловіддачі для конкретної конструкції резервуара можна розрахувати за допомогою програмного забезпечення CFD (computer fluid dynamic). Для визначення коефіцієнта тепловіддачі в резервуарі було проведено кілька експериментів, які показали, що коефіцієнт тепловіддачі α_g змінюється між 150 Вт/(м²К) і 500 Вт/(м²К). Експерименти показали, що для спорожнення резервуара співвідношення Дейні дає прийнятне наближене значення. Число Нуссельта для кореляції Дейні визначається рівнянням:

$$Nu = 0,104 Ra^{0,352},$$

де число Релея (Ra) визначається рівнянням:

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_g)d^3}{\nu\alpha},$$

де g - сила тяжіння, β - коефіцієнт теплового розширення, d - внутрішній діаметр резервуара, ν - динамічна в'язкість газу і α -коефіцієнт теплопровідності, який дорівнює $\alpha = k/(\rho_{cp})$, теплопровідність (k) поділена на густину (ρ). Зовнішня стінка резервуара контактує з навколишнім середовищем, і коефіцієнт теплопередачі для зовнішньої поверхні резервуара залежить від різних параметрів, таких як потік повітря, напрямок циліндра і наявність вільної чи примусової конвекції. Балони зазвичай зберігаються всередині або на даху станції, де природна конвекція є звичайним явищем. Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі зазвичай становить від 5 Вт/(м² К) до 30 Вт/(м² К) залежно від умов.

3.6. Система труб для передачі водню

Водень, що протікає по трубі, проводить тепло через стінку труби. Теплообмін між воднем і стінкою відбувається шляхом вимушеної конвекції, оскільки потік є турбулентним. Число тепловіддачі знаходиться з наступного набору рівнянь:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot k}{d_h}$$

$$Nu = 0.23 Re^{4/5} \cdot Pr^{0.3}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k}$$

$$Re = \rho \frac{V}{A_{cross}} \frac{d_h}{\mu}$$

де α - локальний коефіцієнт тепловіддачі, Nu - число Нуссельта, Pr - число Прандтля, яке є параметром властивості, Re - число Рейнольдса. d_h - гідравлічний діаметр, k - коефіцієнт теплопровідності, C_p - питома теплоємність, μ - в'язкість, V - об'ємна витрата, ρ - густина та A_{cross} - площа поперечного перерізу труби. Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої сторони труби можна наближено визначити, використовуючи те саме значення, що і для зовнішньої сторони резервуара.

3.7. Моделювання загальної втрати тиску

Існує три різні компоненти втрат тиску, які мають однаковий баланс енергії, маси та імпульсу, але кінцеве рівняння для розрахунку втрат тиску відрізняється. На Рис 3.5 показана втрата тиску з контрольним об'ємом, намальованим навколо неї. У компонентах втрат тиску немає роботи додається ($W = 0$) і процес є адіабатичним ($Q = 0$). Маса, що надходить до компонента, повинна дорівнювати масі, що виходить ($\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0$), а ентальпія постійна ($h_1 = h_2$). Баланс імпульсів дає різницю тисків $dp = p_1 - p_2$, де dp - це втрата тиску для кожного компонента. Зміни, які відбуваються, коли водень зазнає від'ємної зміни тиску, є властивостями водню. Оскільки ентальпія постійна для всіх компонентів, а тиск змінюється, водень змінює температуру, густину тощо. При дроселюванні водню температура зростає через ефект Джоуля-Томсона, який для водню має від'ємний коефіцієнт. На відміну від більшості газів, водень нагрівається при дроселюванні при температурах вище 200 К.

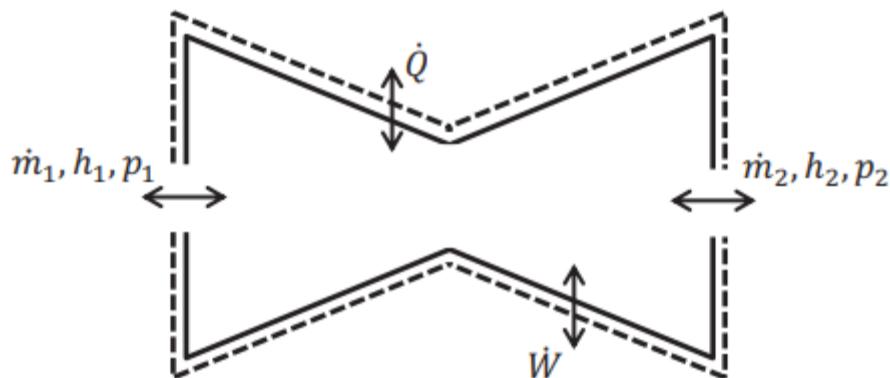


Рис. 3.5: Регульований об'єм навколо втрати тиску

Різниця в температурі становить приблизно $0,04^{\circ}\text{C}$ на 1 бар перепаду тиску. На Рис. 3.5 показано коефіцієнт Джоуля-Томсона для водню. Під час заправки воднем коефіцієнт Джоуля-Томсона знаходиться в межах вікна, яке називається діапазоном HRS.

3.8. Клапани регулювання тиску в системі

Втрати тиску через клапан розраховуються різними способами залежно від типу клапана та інформації, яку можна отримати від виробника. Для клапанів без інформації про їхню константу втрати тиску, як правило, можна розрахувати втрату тиску, еквівалентну довжині, використовуючи формулу для втрати тиску через трубу. Якщо відома константа втрати тиску (k_v) клапана, то більш точний розрахунок втрати тиску можна отримати за формулою:

$$\Delta p = \frac{\rho}{\rho_k \left(\frac{k_v}{v} \right)^2}$$

де k_v - константа втрати тиску, і чим менша константа втрати тиску, тим більша втрата тиску. Густина води ρ_{water} знайдена для води при 15°C . k_v наведено для води і, отже, співвідношення між воднем і густиною води присутня. У рівнянні V - у $\text{м}^3/\text{год}$, а втрата тиску - у барах.

Втрати тиску в масових витратомірах і фільтрах в системі розраховуються інакше, ніж втрати тиску для клапанів. Втрати тиску залежать від константи втрат тиску p_k та площі поперечного перерізу витратоміра або фільтра; оскільки площа поперечного перерізу є постійною, константу втрат тиску можна отримати у виробника. Рівняння дає втрату тиску через компонент з постійною площею поперечного перерізу і заданою константою втрати тиску.

$$\Delta p = 0.5 k_p \rho V^2$$

Об'ємна витрата (V) виражається в $\text{м}^3/\text{год}$, а втрата тиску - в барах. Чим більша константа втрати тиску в рівнянні, тим більша втрата тиску, і якщо масова витрата збільшується в два рази, втрати тиску зростають в чотири рази.

3.8. Компресори, що використовуються для стиснення водню

Основними проблемами при стисненні водню є вибухонебезпечність і витік водню через прокладки. Тому водневі компресори повинні бути вибухобезпечними, а прокладки повинні спеціально випробовуватися, використовуючи водень, щоб переконатися у відсутності витоків.

Діапазон типів компресорів, які використовуються для стиснення водню, дуже широкий. Існує три загальні категорії водневих компресорів, кожна з яких містить кілька різних типів компресорів. У наведеному нижче списку показано поділ компресорів на три основні категорії.

Об'ємне стиснення:

- Поршневі компресори
- Мембранний/діафрагмовий компресор
- Іонний рідинний компресор
- Кріо-насос

Динамічне стиснення:

- Відцентровий компресор

Термічні та електрохімічні методи:

- Електроліз під високим тиском
- Електрохімічний компресор
- Металогідридний компресор

Наведений вище перелік не охоплює всі компресори, які використовуються на водневих заправних станціях. Найпоширенішим типом компресора є об'ємний компресор, який працює за рахунок зменшення об'єму замкненого об'єму з воднем з метою його стиснення. Основні відмінності між ними полягають у тому, що поршковий компресор використовує рухомий поршень у циліндрі, мембранний - нерухому мембрану з воднем з одного боку і нестисливою рідиною з іншого боку, а тиск на мембрану штовхає мембрану в бік водню, зменшуючи площу водневого об'єму. Між поршковим і мембранним компресорами знаходиться іонний рідинний компресор. Він нагнітає нестисливу іонну рідину в циліндр, який містить водень, тобто як мембранний компресор без мембрани. Об'єм водню в циліндрі зменшується за рахунок рідини, тобто рідинного поршня. Водень не може розчинитися в рідині. Об'ємні компресори можна використовувати для тиску понад 1000 бар. Кріо-насос використовує рідкий водень, який він перетворює на водень високого тиску за допомогою насоса з рідиною на стороні всмоктування і газом на стороні нагнітання; потім газ нагрівається до потрібної температури і тиску. Відцентрові компресори зазвичай використовуються для стиснення до середнього тиску, 500 бар. Термічні

та електрохімічні методи стиснення все ще перебувають на стадії досліджень і поки що не застосовуються на водневих заправних станціях. Електролізний компресор високого тиску виробляє водень під високим тиском шляхом електролізу води під високим тиском. Електрохімічний компресор використовує мембрану для розділення водню за допомогою електроенергії для транспортування протона через мембрану до злиття з негативно зарядженим атомом водню під високим тиском. Металогідрид стискається, поглинаючи водень при низькому тиску і температурі, а потім піддається термічному нагріванню, вивільняючи водень при більш високому тиску. Ретельне обговорення методів стиснення та їх порівняння виходить за рамки цієї роботи, тому було застосовано більш загальний підхід. Розглянуто два методи стиснення: зворотно-поступальне стиснення і відцентрове стиснення. Рівняння, що використовується, може бути справедливим і для інших типів компресорів, але це не перевірено.

Розглянуті компресори є поршневыми або відцентровими; для поршневих компресорів тепловтрати залежать від типу та виробництва, але зазвичай вони становлять 5% або менше; тому стиснення було прийнято адіабатичним. На Рис. 3.6 показано контрольний об'єм навколо компресора.

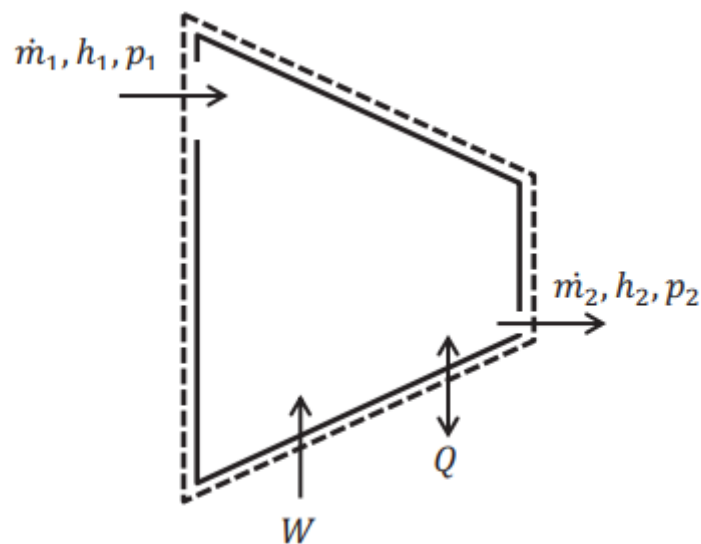


Рис. 3.6: Контрольний об'єм навколо компресора.

Тут показано баланс мас через компресор ($m_1 + m_2 = 0$), стиснення адіабатичне ($Q = 0$), а над воднем у компресорі виконується робота, що відповідає:

$$W = m(h_{out} - h_{in})$$

Тиск на виході з компресора природно вищий, ніж на вході, тому баланс імпульсів дає різницю тисків $dp = p_1 - p_2$, де dp - приріст тиску від стиснення. Для того, щоб знайти ентальпію на виході з компресора, потрібно знати масову витрату і тиск на виході що мають бути відомі. Масова витрата компресора розраховується за об'ємом циліндрів (V_{cyl}), кількістю ходів поршня в секунду (n) і визначеною функцією для об'ємного ККД η_v

$$m = V_{cyl} \cdot \rho_{in} \cdot \eta_v \cdot n$$

Об'ємна ефективність є найвищою при низькому співвідношенні тиску в компресорі і зменшується майже пропорційно зі збільшенням співвідношення тиску. Для цієї моделі об'ємний ККД має найвищий показник у 90% при співвідношенні тиску один до одного і зменшується на 5% при збільшенні співвідношення тиску в компресорі. Енергетичний баланс компресора - це потік енергії, що надходить у компресор, потік енергії, що виходить з компресора, і робота, що додається в компресорах. Залежно від типу компресора, ентальпія на виході може бути знайдена з оцінки ізотропного ККД або політропного ККД. Ентальпія на виході з компресора знаходиться:

$$h_{out} = \frac{h_{out,\eta} - h_{in}}{\eta} - h_{in}$$

де η - ізотропний або політропний ККД, а $h_{out,\eta}$ - ентальпія при ізотропному або політропному стисненні.

3.9. Модель теплового балансу

Модель теплообмінника виконана у вигляді рівняння теплового балансу, що передає все тепло від однієї сторони до іншої. Єдине, що розраховується, - це потужність охолодження, необхідна для досягнення воднем потрібної температури. Цей простий підхід був обраний, хоча інші проекти в ДТУ працювали з охолодженням водню високого тиску, але вони є конфіденційними і тому не можуть бути включені в дисертацію. Крім того, включення всієї холодильної установки було б надто об'ємним і

виходить за рамки цієї роботи. Потужність охолодження розраховується за формулою:

$$Q = m^* (h_{in} - h)_{out}$$

де Q - потреба в охолодженні.

Змішувачі - це компоненти з трьома з'єднаннями, що дозволяють об'єднати два потоки в один або розділити один потік на два. Існує два різних типи змішувачів: ідеальне змішування в точці та ідеальне змішування в об'ємі. Ідеальне змішування в точці змішує потоки в чорному ящику, враховуючи лише масову витрату на вході і виході, ентальпію на вході і виході та тиск. Ідеальне змішування в об'ємі розглядає змішування всередині невеликого об'єму, який відповідає резервуару з трьома входами або виходами.

Баланс мас потоків, що входять до змішувача, дорівнює $m_1 + m_2 + m_3 = 0$. Тиск потоків повинен бути однаковим $p_1 = p_2 = p_3$. Баланс енергії для змішувача визначається з рівняння:

$$dE/dt = mh_{11} + mh_{22} + mh_{33}$$

Змішувач описується балансами маси, енергії та імпульсу для трьох потоків.

Оптимізація водневих заправних станцій з точки зору використання енергії може здійснюватися різними способами. Дослідження різних параметрів, таких як кількість резервуарів у каскадній системі заправних станцій, тиск у резервуарах і об'єм резервуарів, можуть визначити оптимальну структуру станції. Економія енергії, отримана в компресорі та теплообмінниках за рахунок додавання ще одного резервуара або зміни тиску чи об'єму, може бути знайдена безпосередньо, а компроміс між інвестиційними витратами та експлуатаційними витратами може бути використаний для пошуку найкращого налаштування для виробника станції. Інший спосіб оптимізації системи є проведення ексергетичного аналізу паливної системи. Ексергетичний аналіз виявляє компоненти з найбільшими втратами енергії.

3.10. Термодинамічні припущення

Припущення, зроблені при формулюванні компонентної моделі, стосуються рівнянь перших принципів: потенційною енергією нехтують, а кінетичну енергію частково враховують через ентальпію стагнації. Між

резервуаром АЗС і транспортним засобом немає помітного перепаду висот, тому потенційною енергією нехтуємо. Кінетична енергія частково включена в ентальпію стагнації, яка використовується в розрахунках. Різниця висот між сховищем і транспортним засобом.

Перевага використання реальної ентальпії та кінетичної енергії порівняно з ентальпією стагнації полягає в тому, що термодинамічні властивості будуть дещо відрізнятися, оскільки властивості слід шукати за допомогою реальної ентальпії. Використання кінетичної енергії та реальної ентальпії призводить до ітерації, оскільки кінетична енергія залежить від термодинамічних властивостей, а ентальпія залежить від кінетичної енергії. Ентальпія стагнації була використана для того, щоб уникнути ітераційного процесу між знаходженням реальної ентальпії і кінетичної енергії, оскільки кінетична енергія становить максимум 2 % від загальної енергії в потоці водню. Припущення також ґрунтується на тому, що вся кінетична енергія перетворюється на ентальпію, коли водень потрапляє в бак транспортного засобу.

Розглядаючи ексергію (максимальна робота, яку може виконати термодинамічна система при переході від поточного стану до стану термодинамічної рівноваги), було зроблено те саме припущення про кінетичну енергію та ентальпію стагнації. Таким чином, кінетична ексергія частково включається у фізичну ексергію, хоча кінетична ексергія розглядається як чиста ексергія, тоді як фізична ексергія має генерацію ентропії, а отже, втрату ексергії при зміні тиску і температури. Таке узагальнення зроблено на тій самій основі, що й використання ентальпії стагнації для термодинамічних властивостей, оскільки кінетична енергія становить максимум 2% від загальної енергії в потоці.

Температура навколишнього середовища приймається рівною 20 С°, якщо не вказано інше. Температура навколишнього середовища також є початковою температурою водню в резервуарах і стінках резервуарів. Вважається, що теплообмінники мають здатність охолоджуватися до заданої температури протягом всього моделювання, отже, температура на виході з теплообмінника є постійною і не залежить від масової витрати. Об'єм бака транспортного засобу приймається рівним 0,172 м³, що відповідає загальній масі 7кг. Баки на станції зазвичай мають об'єм 1 м³ або менше.

Усі змодельовані водневі заправні станції мають у своїх резервуарах водень під тиском 200-300 бар. Вважається, що водень доставляється

вантажівками, і робота, виконана для створення тиску в резервуарах, не враховується. Враховується лише робота, виконана на станції. Це не впливає на порівняння між різними проектами заправних станцій, оскільки всі вони мають приміщення для зберігання водню.

Таким чином, заправка закінчується, коли тиск на виході з заправної станції досягає кінцевого тиску, зазначеного в протоколі. Кінцевий тиск - це тиск у баку транспортного засобу, але коли заправка відбувається без зв'язку, неможливо знати тиск у баку або падіння тиску в транспортному засобі. Тому, щоб не ставити під загрозу безпеку, припускається, що в баку транспортного засобу тиск такий самий, як і на виїзді з АЗС. У Розділі 8 припускається, що заправка здійснюється за допомогою комунікацій, і заправка триває до досягнення цільової густини $0,0402 \text{ кг/м}^3$. Це може бути нижче або вище кінцевого тиску в залежності від температури водню. При комунікації враховуються межі безпеки як температури, так і тиску, і тому можна навмисно перевищити заданий кінцевий тиск, якщо бак не перегрітий і не перевантажений.

У моделюванні припускається, що середній темп зміни тиску суворо дотримується, хоча протокол дозволяє більшу гнучкість під час заправки, тому можна зупинити заправку під час заміни резервуару в каскадній системі на станції. У моделюванні припускається, що заміна резервуарів відбувається негайно, без переривання заправки.

3.11. Термодинаміка водню

Документація щодо заправки воднем обмежена, а повний термодинамічний аналіз заправки воднем із застосуванням стандарту SAE J2601 ще не опублікований. Розуміння термодинаміки процесу заправки і впливу протоколу заправки є першим кроком до проектування та оптимізації водневих заправних систем.

У першому аналізі розглядається АЗС А70 з одним резервуаром високого тиску, що заправляє бак автомобіля вагою 7 кг з початковим тиском 20 бар. Температура навколишнього середовища становить 25°C , а заправка здійснюється без зв'язку;

Втрата тиску в автомобілі досягає максимуму при 200 бар, що є найвищим допустимим значенням. Аналіз показує розвиток тиску і температури в системі, а також масовий потік і потребу в охолодженні. Це дає термодинамічне розуміння заправки воднем.

Наступна частина містить варіації параметрів втрати тиску в транспортному засобі. Це важливо, оскільки різні транспортні засоби мають різні втрати тиску. Вплив втрати тиску в транспортному засобі на процес заправки показано на кінцеву температуру в баку транспортного засобу, кінцевий тиск в баку транспортного засобу, масову витрату в процесі заправки та потребу в охолодженні під час заправки. Метою цієї частини є з'ясування впливу транспортного засобу на процес заправки.

Термодинамічний аналіз використання декількох резервуарів на станції замість одного. Система аналізується з точки зору розвитку тиску і температури в системі під час заправки. Енергоспоживання системи з декількома резервуарами порівнюється з реалізацією з одним резервуаром. Термодинамічний аналіз показує відмінності між заправкою з одного та декількох резервуарів.

Воднева заправна станція - це система високого тиску, в якій тиск і температура водню змінюються з часом у різних компонентах. Схема концептуальної водневої заправної станції показана на рисунку 3.7. Це спрощена модель, створена для того, щоб показати термодинамічну еволюцію з часом.

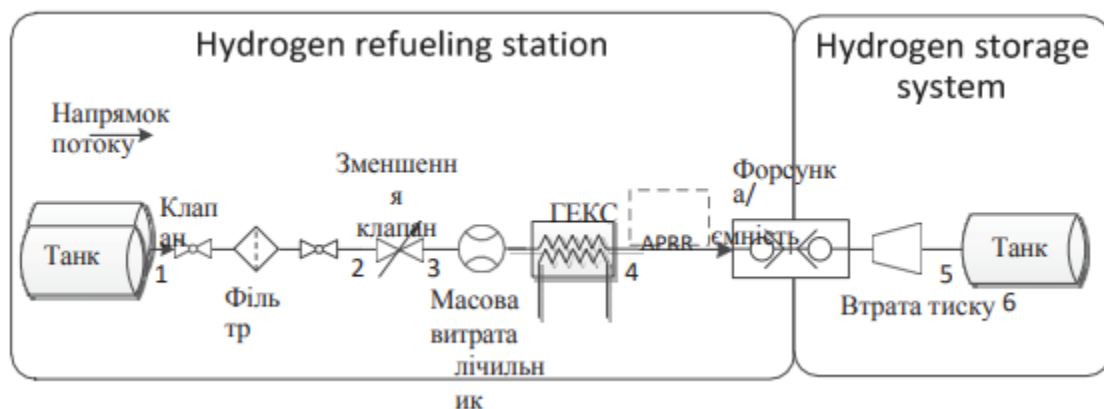


Рис. 3.7 : Проста воднева заправна станція

Модель має один водневий балон з тиском 90 МПа на вході водню заправна станція. Регулювання здійснюється на виході зі станції. Однак редукційний клапан розміщений перед теплообмінником; отже, редукційний клапан компенсує втрати тиску на компонентах між ним і соплом. Втрати тиску в системі зберігання водню описуються тим же рівнянням, що і втрати тиску в масовому витратомірі. Оскільки втрата тиску в системі зберігання водню відрізняється для різних моделей транспортних засобів, її неможливо передбачити в цілому, хоча вона не повинна перевищувати 20 МПа в будь-який момент часу. Термодинаміка

повної заправки згідно з J2601 . Температура і тиск в різних точках нанесені на графік і відповідають номерам на рис. 3.8: на виході з резервуару водневої заправної станції (1), до і після редукційного клапану (2 і 3), після теплообмінника (4), на вході в резервуар в системі зберігання водню (5) і в резервуарі в системі зберігання водню (6). Ці точки були визначені як критичні місця в загальній системі.

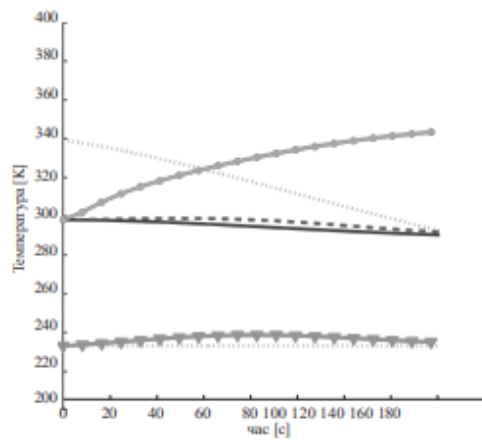
На рисунку 3.8(a) показані температури по всій системі. Температура на виході з резервуару (T1) на водневій заправній станції зменшується в міру видалення маси. Температура зростає в тих компонентах, де є втрати тиску. Це пов'язано з від'ємним коефіцієнтом Джоуля-Томсона водню; це особливо помітно на редукційному клапані (точки 2-3). Підвищення температури (точки 4-5) є параболічним, оскільки падіння тиску є функцією масового потоку; отже, підвищення температури зумовлене коефіцієнтом Джоуля-Томсона. Температура газу водню на вході в резервуар в системі зберігання водню набагато нижча, ніж температура газу водню всередині резервуару; це відбувається за рахунок теплоти стиснення всередині резервуару.

На рис. 3.8(б) показано тиск в системі; тиск на виході з резервуару на водневій заправній станції зменшується в міру того, як маса покидає резервуар. І навпаки, тиск в резервуарі системи зберігання водню збільшується через те, що до нього надходить маса.

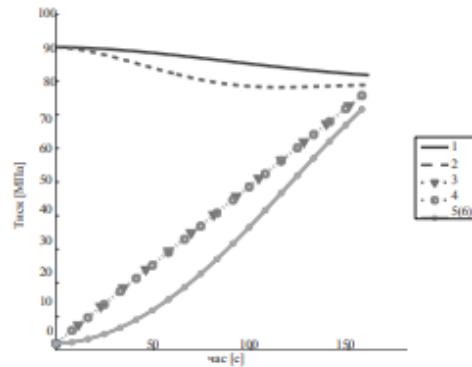
На рисунку 3.8 (с) показано масовий потік водню і потребу в охолодженні для охолодження водню до -40°C . Оскільки система заправляється APRR, масовий потік змінюється в залежності від протитиску в системі зберігання водню. Потреба в охолодженні є функцією масового потоку і ентальпії. Вона дуже схожа на криву масового потоку, хоча і досягає піку раніше через вищу ентальпію. Ентальпія є найвищою на початку і зменшується під час заправки, оскільки маса покидає бак на водневій заправній станції, зменшуючи тиск і знижуючи температуру.

На рисунку 3.8(d) показано зміну температури газу в баку на водневій заправній станції і в баку в системі зберігання водню протягом години, починаючи з моменту заправки. Під час заправки температура або швидко зростає, або швидко знижується. Теплопровідність обгортки з вуглецевого волокна є низькою, і тому проходить багато часу, перш ніж резервуари повертаються до умов навколишнього середовища після заправки (без виходу або входу маси). Сталеві резервуари мали б вищу

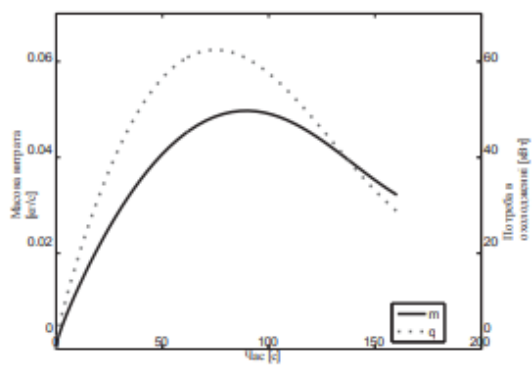
теплопровідність і, відповідно, швидше поверталися б до температури навколишнього середовища, але через високий тиск (> 500 бар) використовувати сталеві резервуари неможливо.



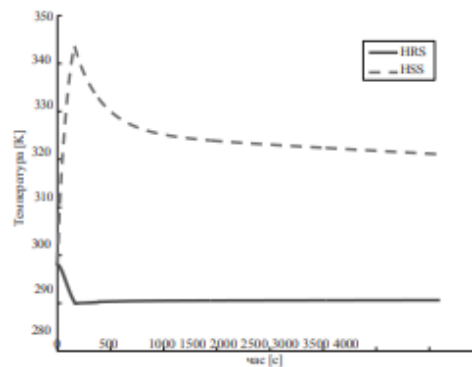
(a) Температура в системі



(b) Тиск у системі



(c) Масова витрата та потреба в охолодженні



(d) Зміна температури в резервуарі на водневій заправній станції (HRS) та температура в резервуарі в системі зберігання водню (HSS) під час заправки та через 1 годину після неї

Рис. 3.8: Термодинаміка заправки воднем.

Розділ 4. МОБІЛЬНА ЗАПРАВНА СТАНЦІЯ

4.1. Мобільна заправна станція на водні

Проект бортової енергетичної системи мобільного паливозаправника передбачає інтегровану 30-кіловатну (кВт) електростанцію на паливних елементах для забезпечення енергії, необхідної мобільному паливозаправнику під час заправки. Конструкція бортової енергетичної системи дозволила забезпечити заправку без потреби у зовнішньому джерелі живлення або підключенні до станції.

Інтегрована енергосистема, що працює на паливних елементах, забезпечувала привід двигуна гідравлічного компресора змінним струмом 110 вольт при частоті 60 герц (Гц). Вона також забезпечувала живлення постійним струмом 27,6 вольт, необхідним для зберігання водню, а також для системи дозування і захисту. Крім того, інтегрована конструкція системи електроживлення забезпечувала живлення для водневої системи охолодження та інших функцій автомобіля, включаючи зовнішнє світлодіодне (LED) освітлення, за допомогою 24-вольтового (В) живлення.

Проект системи передбачав інтеграцію та автономне живлення водневої системи охолодження. Також було передбачено засоби для блокування роботи транспортного засобу під час мобільного заправлення. Пристрій блокування запалювання (IID) переривав зв'язок між стартером і запалюванням. У конструкції використовується бортова літій-іонна батарея для забезпечення додаткового живлення для підтримки роботи під час транспортування та принаймні однієї заправки під час зупинки електростанції на паливних елементах. На рисунку 4.1 показано, як бортова система живлення на паливних елементах була інтегрована з іншими компонентами.

Платформою для заправника стало шасі Ford F-650 зі спеціальною конструкцією боксу для розміщення силової установки, сховища водню, заправної колонки та системи захисту. Команда проекту побудувала спеціальну приміщення на стандартному шасі, щоб розмістити довгу платформу для інтеграції силової установки. Команда проекту модифікувала систему управління транспортним засобом та інтерфейс водія, щоб гарантувати, що транспортний засіб буде нерухомим під час заправки, а також розмістити інтерфейс водія, здатний відображати інформацію про заправку та режим руху. На рис. 4.1 показана схема бортової системи живлення паливних елементів.

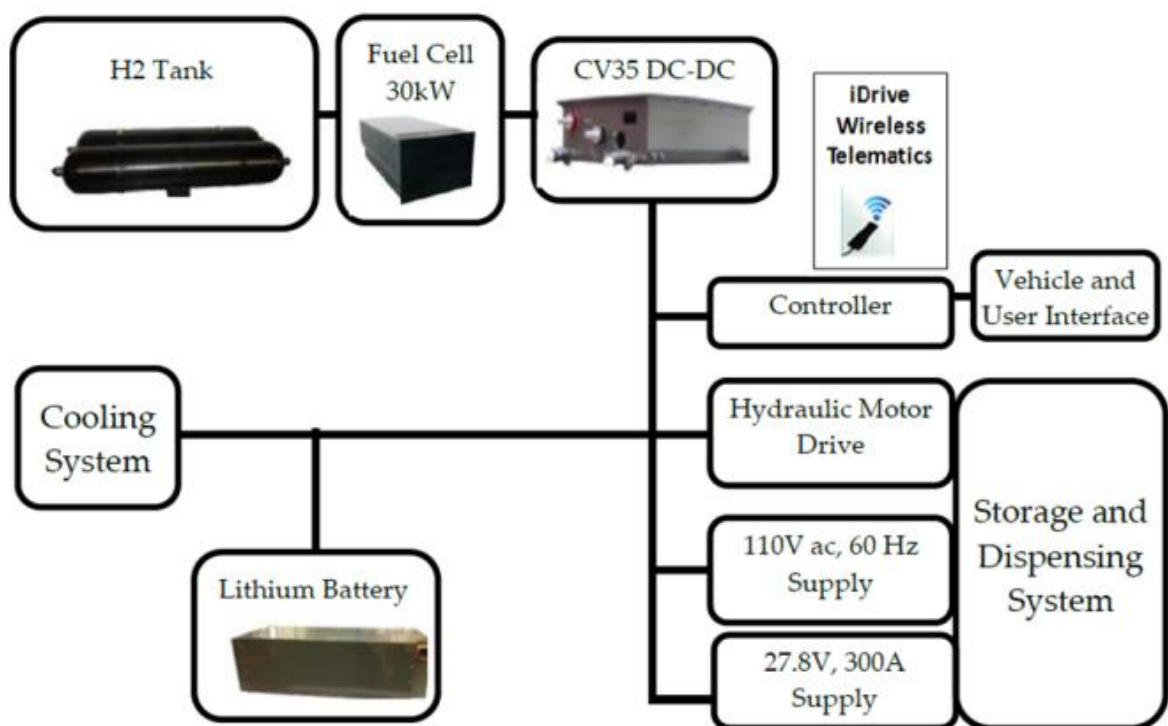


Рис. 4.1: Схема бортової системи живлення паливних елементів

На наступних рисунках 4.2 та 4.3 показано конфігурацію шасі та вигляд збоку і зверху, а також технічні характеристики автомобіля. Було спроектовано кузовний відсік на задній осі, щоб вона відповідала відповідним нормам і стандартам безпеки, а також належним чином упаковувала систему живлення, зберігання та роздачі (включаючи блок попереднього охолодження та компресор).

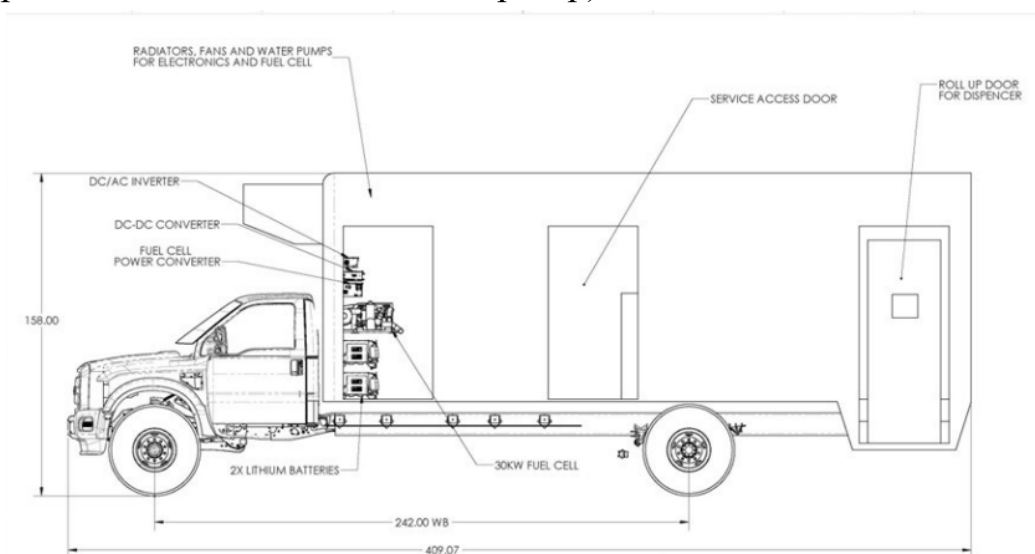


Рис. 4.2: Загальний вигляд мобільної станції на водні

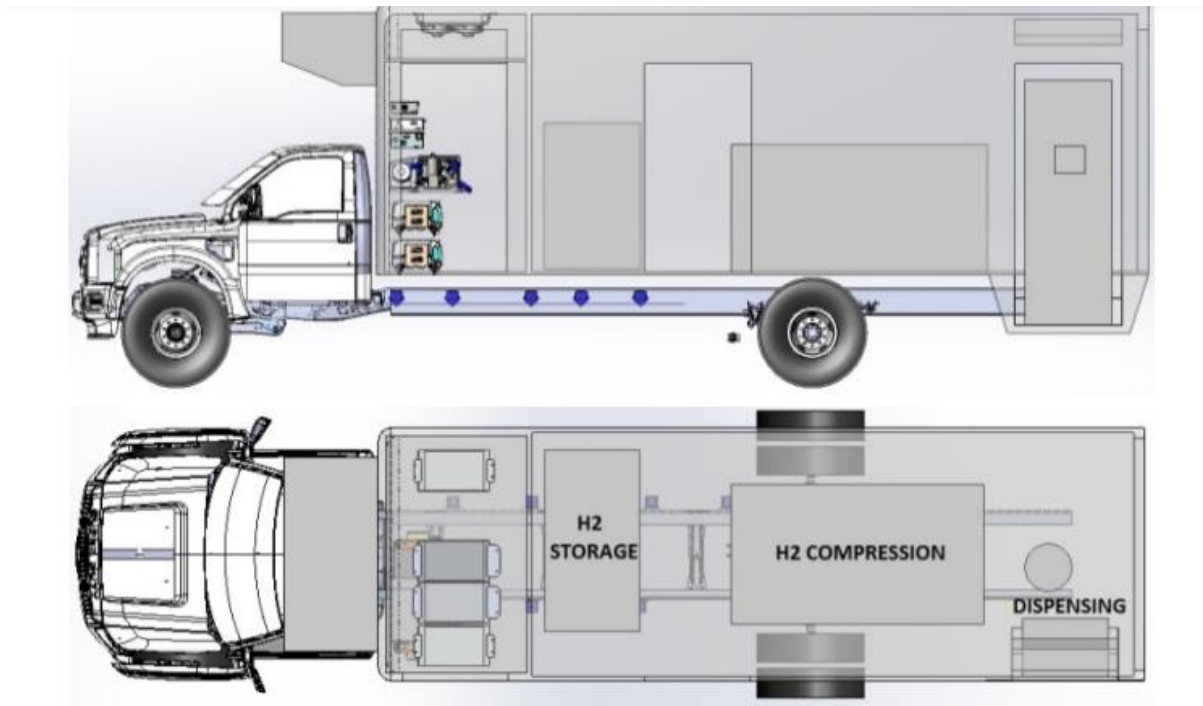


Рис. 4.3: Вигляд збоку і зверху мобільної станції на водню

В таблиці 4.1 показані технічні характеристики мобільного паливозаправника.

Табл.4.1: Технічні характеристики мобільного паливозаправника

Категорія	Специфікація
Паливна ємність	50 галонів
Тип приводу	4x2 Здвоєне заднє колесо
Двигун	Двигун Ford 6.8 л V10
Кінські сили (к.с.) і крутний момент	320 к.с., 460 фунт-фут (lb.-ft)
Передача	Ford TorqShift® HD 6-ступінчаста автоматична коробка передач
Колісна база	158"-242" F-650 газодизельний, підйомна рама, звичайна кабіна
Максимальна допустима повна маса автомобіля	26 000 фунтів, навантажувач F-650 Pro

На рисунку 4.4 показані результати аналізу навантаження на вісь.

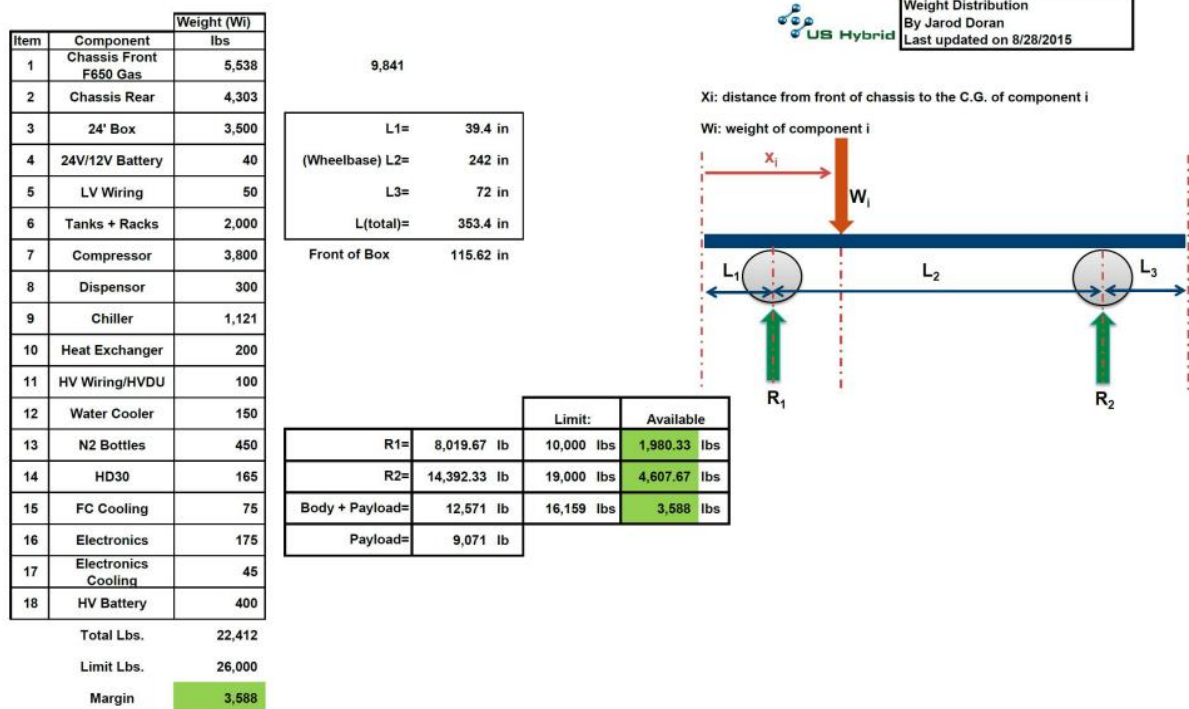


Рис. 4.4 Результати аналізу навантаження на вісь

Альтернативний варіант мобільної заправної станції показаний на рис. 4.5.

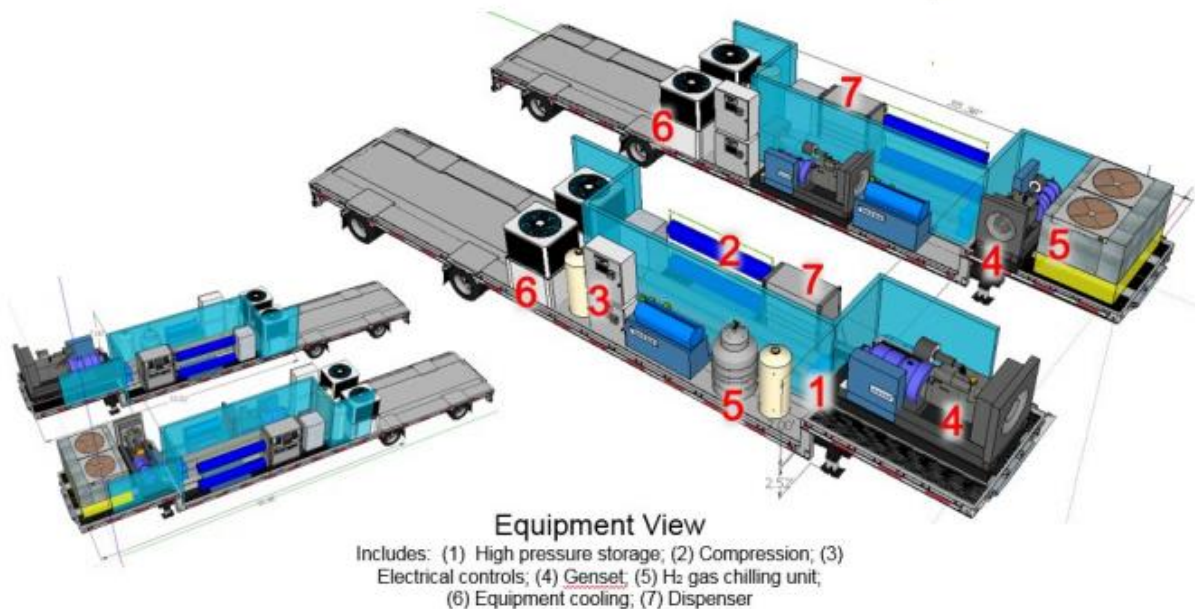


Рис. 4.5. Вид обладнання заправної станції на водню

1. Сховище високого тиску
2. Компресор
3. Система електричного управління(блок управління)

4. Генераторна установка
5. Установка охолодження газу H₂
6. Обладнання для охолодження
7. Диспенсер

В таблиці 4.2. описані існуючі проблеми та їх вирішення для мобільної заправної станції на H₂.

Таблиця 4.2. Проблеми та їх вирішення для мобільної заправної станції на H₂

	Труднощі	Вирішення
Заборона зберігати під високим тиском H ₂	Не можна транспортувати АНMF з воднем під повним тиском. Це призведе до тривалого часу налаштування/демонтажу	Спроба отримати спеціальний дозвіл Міністерства транспорту США (DOT) на транспортування H ₂ при повному тиску
Роздрібний продаж водню	Правила щодо роздрібного продажу (обліку), не встановлені державними регуляторами за межами Каліфорнії	Розмістити АНMF на одному майданчику, що дозволяє роздрібний продаж H ₂ . Співпрацювати з іншими штатами для розробки механізму продажу H ₂
Заправка без нагляду	Заправка без нагляду вимагає значних конструктивних змін, які вплинуть на "мобільний" аспект АНMF	Інтерфейс користувача вимагає мінімального навчання. Виберіть сайти, які мають певний нагляд, але все ще залишаються публічними
Товари які довго виготовляються для установки	Тривалий час виготовлення компонентів може призвести до затримок	Спростити архітектуру системи, використавши існуючий проект станції. Виконати додаткові роботи з САПР, щоб уникнути втручання в будівництво

АНMF - це автономна, повнофункціональна мобільна воднева станція. Проект АНMF завершив стадію проектування і готовий до початку будівництва.

Проект має деякі бар'єри, пов'язані з експлуатацією та вибором ділянки Команда розробила план з Міністерством енергетики та іншими зацікавленими сторонами для зменшення ризиків.

Порівнюючи два описаних вище варіанти мобільних заправних станцій на водні, була вибрана мобільна станція, яка зображена на рис. 4.3. розглянемо також структуру стаціонарної станції для заправки воднем, приклад якої показаний на рис. 4.6.

4.2. Газоводнева заправна станція

Як правило, рух газоподібного водню від джерела до бортового бака проходить процес стиснення для досягнення 950 бар у буферному сховищі високого тиску або 500 бар у буферному сховищі середнього тиску, потім проходить теплообмінник і досягає дозатора для автомобіля на паливних комірках.

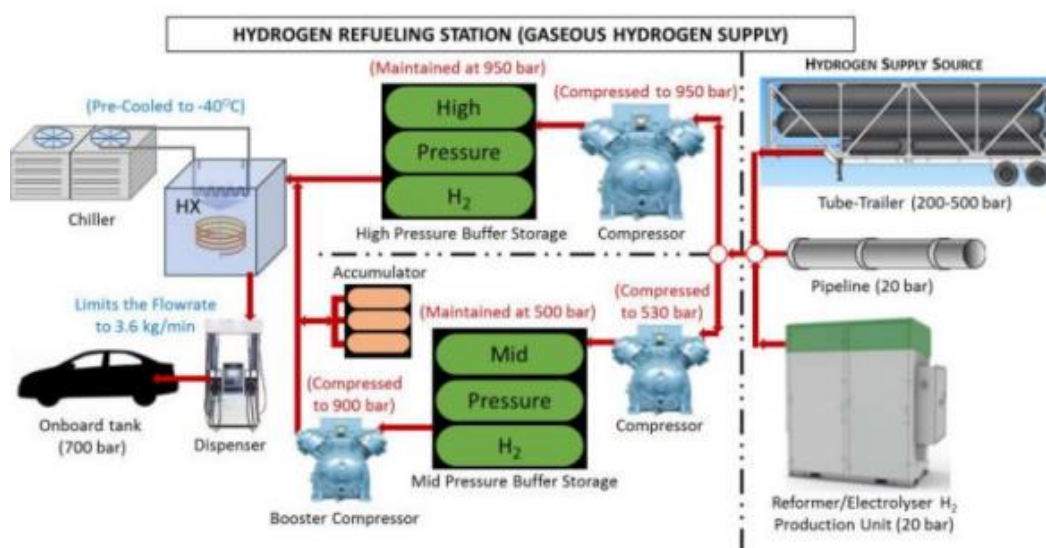


Рис. 4.6. Зображення прикладу станції заправки газоподібного водню

У даній роботі розглядається станція, що використовує газоподібний водень. Порівняння станції на рідкому і газоподібному водні показано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Порівняння станції на рідкому і газоподібному водні.

Тип станції	Станція на рідкому водні	Станція з газоподібним воднем
Зберігання	Рідкий водень, криогенна температура (-240°C),	Газоподібний водень, температура

	низький тиск (до 10 бар)	навколишнього середовища, високий тиск (від 200 до 500 бар)
Заправка станції	Перекачування рідкого водню з причепа до сховища	В основному підкачка(= повний для порожнього)
Створення тиску водню	Рідинний насос і випарник, необхідні для подачі газоподібного H ₂	Компресор

4.3. Обладнання для станцій

Буферні ємності високого або низького тиску призначені для зберігання стисненого водню, який може бути розташований між генератором водню та компресором для рівномірного потоку газу до компресора або між компресором та системою дозування для накопичення газу під тиском для заправки паливом транспортного засобу. Ємності для зберігання газоподібного водню повинні бути виготовлені відповідно до загальноприйнятих національних/регіональних стандартів і розраховані на очікуваний термін служби.

Буферне сховище може включати водень, абсорбований у системі зберігання металогідридів. Якщо буферні накопичувачі з різним конструктивним тиском з'єднані між собою, вони повинні бути захищені таким чином, щоб посудини, розраховані на низький тиск, не могли отримати надлишковий тиск через будь-яку несправність. Конструкція буферної сховищної установки повинна передбачати відповідні засоби для запобігання виходу з ладу в разі пожежі, коли це визнається необхідним шляхом оцінки ризику.

Відповідні методи профілактики можуть включати один або кілька наступних:

- Системи вентиляції продукту, такі як TPRDs;
- Тепловий екран або протипожежний бар'єр;
- Неможливість накопичення легкозаймистої рідини під посудиною;
- Фіксований захист від пожежі;

Варто зауважити, що композитні ємності для зберігання можуть вимагати підвищеного захисту в порівнянні з металевими посудинами. Посудини повинні бути закріплені на фундаменті, при цьому фундамент і опори здатні витримати сили, які можна передбачити для місця розташування.

Конструкція компонування резервуарів для зберігання газового водню та трубопроводів повинна враховувати ризик від прямого потрапляння струменя полум'я з потенційних точок витоку або

вентиляційних отворів на сусіднє судно. Оцінка ризику станції повинна включати міркування щодо пом'якшення наслідків детонації у зоні стисненого водню. Кожна група буферних ємностей для зберігання, які можуть бути ізольовані ручними або автоматичними клапанами, повинна бути обладнана власним набором запобіжних пристроїв.

При доставці водню в транспортабельних балонах, трубчастих причепах або багатoeлементних газових контейнерах (MEGCs)¹ захисні пристрої в циліндрі/групі суден не завжди включені. Однак, коли транспортабельні циліндри, трубчасті причепа або MEGC вбудовуються в заправну станцію, після відповідної оцінки ризиків, яка враховує потенційно різні конструктивні міркування, зокрема циклічність під тиском, будь-яка система стиснення на місці, яка може стикувати водень у такій системі, повинна включати набір захисних пристроїв для захисту трубок для зберігання від надмірного тиску.

Температура після завершального етапу стиснення або температура після охолоджувача, якщо він встановлений, повинна контролюватися індикатором/перемикачем температури з системою керування, що ініціює сигналізацію та/або вимкнення за необхідності при заданій максимальній температурі. Тиск після завершального етапу стиснення повинен контролюватися індикатором, при цьому система управління ініціює сигналізацію та/або відключення, якщо це необхідно, або ініціювати альтернативні дії, такі як повторна переробка, при заздалегідь визначеному максимальному тиску, який є нижчим за тиск захисту від надлишкового тиску.

4.3.1. Водневий компресор

Кожен компресор повинен бути оснащений пристроями для скидання тиску або еквівалентними безпечними системами для запобігання надлишковому тиску. Компресор і допоміжні системи, де це застосовано, повинні відповідати використанню в системі трубопроводів. Достатня компенсація потенційної вібрації або руху компресора повинна бути забезпечена таким чином, щоб системи трубопроводів не були пошкоджені та не виникало витоків. Компресори повинні бути розроблені з особливою увагою до служби водню та для мінімізації внесення забруднюючих речовин.

Слід завжди уникати потрапляння повітря на вході в компресор, щоб запобігти утворенню легкозаймистих сумішей.

Ризики, пов'язані з монтажем, технічним обслуговуванням та експлуатацією компресорів, повинні бути оцінені, а також визначені та

впроваджені контрзаходи для захисту обладнання та запобігання виникненню потенційно небезпечних подій.

Кожен компресор повинен бути оснащений засобами для повного скидання тиску у всіх частинах системи з метою технічного обслуговування.

Якщо перевірка зниження ризику компресорної системи рекомендує використовувати інертну продувку, повинні бути передбачені засоби для продування компресора інертним газом перед операціями з технічного обслуговування, включаючи письмову процедуру, для забезпечення ефективної інертності.

Достатня компенсація вібрації та руху повинна бути забезпечена між взаємопов'язаними системами на водневій заправній станції, а також між трубопроводом подачі газозводню та всмоктувальним трубопроводом компресора, щоб уникнути витоків, спричинених вібрацією та рухом. Будь-які вібрації, які можуть вплинути на міцність трубопроводу, фітінга та компонента, не повинні передаватися на роботу трубопроводу.

Контроль безпеки повинен бути встановлений для забезпечення того, щоб рівні температури та тиску не перевищували або не опускалися нижче встановлених робочих рівнів, наприклад, для тиску на вході, температури нагнітання та тиску, при цьому система керування ініціює сигналізацію та/або вимкнення, якщо це необхідно, або відповідні альтернативні заходи. На додаток до приладів і засобів управління, які зазвичай передбачені для систем стиснення газу, слід розглянути наступні конкретні гарантії для водню.

Слід завжди уникати потрапляння повітря на вхід до компресора, щоб запобігти утворенню легкозаймистої суміші. Якщо ця умова більше не гарантована, компресор слід зупинити.

Наприклад, тиск на вході слід контролювати за допомогою індикатора/перемикача тиску, при цьому система керування ініціює сигналізацію та/або вимкнення за необхідності, щоб уникнути вакууму у впускній лінії та, як наслідок, потрапляння повітря. Цей індикатор/перемикач тиску повинен спричинити вимкнення компресора до того, як тиск на вході досягне атмосферного тиску. Якщо існує ймовірність забруднення киснем за нормальних умов експлуатації через низький тиск на вході, вимірювання вмісту кисню у водні може розглядатися як захід щодо пом'якшення наслідків під час оцінки ризику. Наприклад, якщо вміст кисню досягає об'ємної частки 1%, компресор

може бути автоматично вимкнений. Для запобігання критичних ситуацій можна прийняти альтернативні засоби.

Температура після завершального етапу стиснення або температура після охолоджувача, якщо він встановлений, повинна контролюватися індикатором/перемикачем температури з системою керування, що ініціює сигналізацію та/або вимкнення за необхідності при заданій максимальній температурі. Тиск після завершального етапу стиснення повинен контролюватися індикатором, при цьому система управління ініціює сигналізацію та/або відключення, якщо це необхідно, або ініціювати альтернативні дії, такі як повторна переробка, при заздалегідь визначеному максимальному тиску, який є нижчим за тиск захисту від надлишкового тиску.

Система охолодження води повинна контролюватися індикатором/перемикачем, при цьому система керування ініціює сигналізацію та/або вимкнення за необхідності у разі низького тиску, витрати або високої температури. Якщо двигун і допоміжне обладнання продуваються інертним газом або захищаються стисненим повітрям або інертним газом, низький тиск/витрата повинні бути позначені сигналом, який повинен бути організований для вимкнення двигуна та допоміжних засобів відповідно до вимог ІЕС 60079-2. Якщо картер компресора продувається інертним газом або захищений тиском стисненим повітрям або інертним газом, низький тиск/витрата повинен бути позначений сигналом, який повинен бути організований для відключення компресора.

4.3.2. Пристрій попереднього охолодження

Попереднє охолодження - це процес охолодження температури водневого палива перед дозуванням. Вартість блоку попереднього охолодження становить близько 10% від загальної вартості обладнання GHRS і більш глибоке розуміння його складової вартості необхідне для досягнення максимально можливого зниження вартості GHRS.

На відміну від досліджень компресорних і накопичувальних систем, відносно обмежена інформація доступна про блок попереднього охолодження. Попереднє охолодження водневого палива перед його подачею в бак автомобіля має вирішальне значення для запобігання перегріву бака. Протокол заправки SAE J2601 встановлює обмежений процес заправки для забезпечення безпечного та швидкого наповнення FCV. Протокол заправки SAE J2601 встановлює діапазон температур

попереднього охолодження водню для кожного типу водневої заправної станції; наприклад, станція T40 потрібна для попереднього охолодження водню до -33 до -40°C перед його подачею на FCV.

Розташований між буферним сховищем високого тиску та дозатором, блок попереднього охолодження попередньо охолоджує газоподібний водень до температури не менше -33°C протягом 30 с після початку заправки. Потім він підтримує температуру в цьому встановленому діапазоні протягом усього часу заправки. Швидкість, з якою можна заправляти FCV, безпосередньо пов'язана з температурою попереднього охолодження водню, температурою навколишнього середовища та початковим тиском у бортовому баку серед інших факторів.

Чим вище температура навколишнього середовища, тим більше часу буде потрібно для заповнення бака, і навпаки. Однак серед цих трьох ключових факторів попередній охолодження має найбільш значний вплив на час заправки. Оскільки час заправки є одним із критичних параметрів, який впливає на досвід заправки FCV, система попереднього охолодження повинна бути розроблена таким чином, щоб забезпечувати необхідну швидкість заправки та потужність в екстремальних умовах і з найменшими можливими витратами. Типовий блок попереднього охолодження в GHRS використовує термодинамічний цикл охолодження; він циркулює холодоагент через двоступеневий компресор, конденсатор, термостатичний розширювальний клапан і теплообмінник випарника.

Цей холодильний цикл включає підохолодження холодоагенту для максимізації холодильного ефекту у випарнику шляхом циркуляції частини холодоагенту, що виходить із конденсатора через розширювальний клапан, теплообмінник субохолоджувача та другий ступінь компресора. Дозований водень попередньо охолоджується шляхом виділення енергії до низькотемпературного холодоагенту через теплообмінник випарника. Теплообмінник випарника може бути сконструйований з великою тепловою масою (в основному для виконання ролі буфера і тим самим для зниження необхідної холодопродуктивності), або він може мати компактну конструкцію для цілей упаковки. На рис. 4.7. показана принципова схема роботи блоку попереднього охолодження на ГРС.

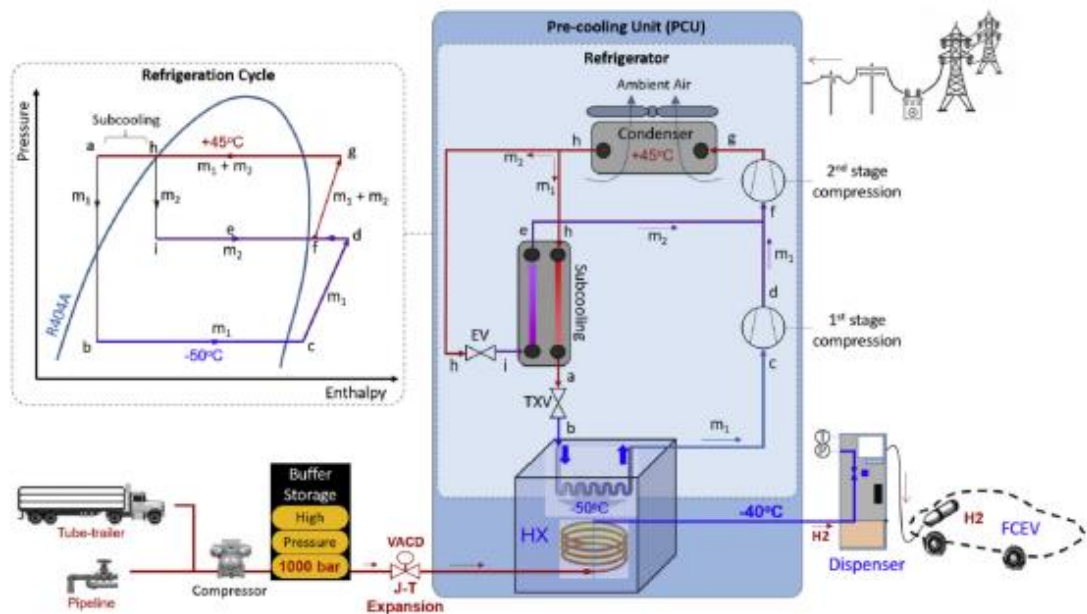


Рис. 4.7. Принципова схема роботи блоку попереднього охолодження на ГРС, що складається з компресора, буферного сховища високого тиску, блоку попереднього охолодження і дозатора.

Два основні фактори впливають на продуктивність холодильного обладнання та розмір блоку попереднього охолодження: процес розширення J-T на пристрої керування змінною площею (VACD) перед теплообмінником попереднього охолодження та вимога станції бути здатною заповнювати задану кількість транспортних засобів один до одного (B2B).

Ефект J-T пов'язаний з температурою на вході водневого палива, що надходить в блок попереднього охолодження, тоді як потреба в заповненні B2B пов'язана з піковою погодинною потребою в паливі на дозаторі. Ефект J-T відноситься до зміни температури газу, коли він протиснується через клапан при постійній ентальпії (адіабатичному розширенні). Всі гази мають «температуру інверсії», нижче якої вони відчують падіння температури в процесі розширення J-T. Температура інверсії безпосередньо корелює з критичною температурою газу.

Речовини з надзвичайно низькою критичною температурою (наприклад, водень, гелій і неон) мають температуру інверсії, яка значно нижча за температуру навколишнього середовища, і тому їх температури зростають при ізоентальпичному розширенні вище температур інверсії ($< 224 \text{ K}$ для водню). Коли водень високого тиску з буферного сховища

протікає через VACD, він відчуває падіння тиску при розширенні. Розширення водню та падіння тиску у VACD призводять до підвищення температури газоподібного водню, оскільки водень має негативні коефіцієнти JT при тиску розширення та температурі (приблизно $-0,05$ К/бар при 900 бар та $-0,03$ К/бар при 1 бар та 25°C). Тим не менш, максимальний перепад тиску на VACD теоретично може призвести до підвищення температури водневого палива на 40°C , перш ніж воно потрапить у теплообмінник попереднього охолодження. Це значне підвищення температури може створити додаткове навантаження на блок попереднього охолодження, так що для компенсації більшого необхідного перепаду температури в теплообміннику буде потрібно більше потужності охолодження.

Подібним чином, збільшення кількості заповнень B2B, які станція повинна задовольняти, може збільшити потужність, необхідну для блоку попереднього охолодження, оскільки теплообмінник буде розрахований на піковий попит B2B, навіть якщо попит протягом більшої частини дня набагато нижчий. Бажана кількість заправок B2B сильно впливає на потужності та вартість заправних компонентів. При заправці B2B один FCV за іншим підтягується до дозатора для заправки, з невеликою перервою приблизно в 2 хв між заправками. Відсутність простою під час серії B2B заправок забезпечує мало часу для відновлення та перезарядки компонентів GHRS. Велика кількість наповнювачів B2B (наприклад, 5) збільшить навантаження на теплообмінник так, що здатність його теплової маси утримувати температуру водню нижче -33°C буде поставлена під загрозу. У таких випадках холодильна система може мати недостатній час для охолодження теплообмінника між заливками. Без урахування пікового попиту, пов'язаного з B2B заправкою в конструкції заправних компонентів, блок попереднього охолодження може виявитися негабаритним, що ставить під загрозу продуктивність заправки і задоволеність клієнтів.

На додаток, до ефекту J-T та заправки B2B, важливо враховувати компроміс між різними концепціями конструкції блоків попереднього охолодження. Блок попереднього охолодження може використовувати теплообмінник з більшою тепловою масою, який здатний підтримувати невелику зміну температури при охолодженні потоку водню, тим самим вимагаючи меншої потужності охолодження від холодильної системи. З іншого боку, компактний теплообмінник повинен бути підібраний до

холодильної потужності, яка відповідає миттєвому навантаженню на охолодження (тобто забезпечує охолодження на вимогу). Крім того, через менший буферний ефект (через меншу теплову масу) холодопродуктивність компактного теплообмінника буде більш чутливою до факторів, що впливають на температуру на вході, таких як температура навколишнього середовища та ефект J-T перед теплообмінником.

При більш високих температурах навколишнього середовища температура водню на вході в теплообмінник буде збільшуватися, тому для підтримки його температури в межах проектного діапазону може знадобитися блок теплообмінника з більшою тепловою масою. Однак у компактній системі теплообмінника вищій температурі навколишнього середовища необхідно компенсувати вищу потужність охолодження на вимогу. Одним з термодинамічних недоліків наявності теплообмінника з великою тепловою масою є те, що він споживає більше енергії для верхнього охолодження (для підтримки теплообмінника при -40°C), ніж його компактний аналог з теплообмінником. З іншого боку, компактна конфігурація охолодження з теплообмінником на вимогу потребує потужнішого холодильника, але споживає менше енергії для верхнього охолодження. Іншими словами, існує компроміс між холодопродуктивністю та тепловою масою теплообмінника.

З точки зору вартості, компактний теплообмінник, як правило, має більш складну конструкцію для швидкої передачі тепла на вимогу, тому вартість його виготовлення, швидше за все, вища, ніж теплообмінник з великою тепловою масою. Тим не менш, невеликий розмір системи забезпечує низькі витрати на матеріал, доставку та монтаж компактних теплообмінників у порівнянні з великими теплообмінниками з тепловою масою. Якщо використовується попереднє охолодження відпущеного водню, система дозування повинна бути оснащена засобами для підтвердження правильної температури палива в попередньо охолодженому дозаторі та відповідності контролю як верхнім, так і нижнім температурним межам протоколу заправки. Якщо протокол заправки використовує повідомлення про температуру бака на транспортному засобі та зазнає збою зв'язку, протокол повинен виконати вимкнення або продовжити заправку без зв'язку, якщо це дозволено протоколом.

4.3.3 Відновлювальне паливо HVO для мобільної заправної станції на водню.

HVO, що виготовляється з пальмової олії, було отриманим в процесах гідрування, розкислення та ізомеризації. HVO може бути альтернативним паливом звичайному дизельному паливу, так як цетанове число досить високе, при цьому густина трохи нижче, ніж дизельного палива. На таблиці 4.3 показана специфікація тестового автомобіля.

Таблиця 4.3. Специфікація тестового автомобіля

Vehicle type	Cargo truck
Vehicle model	Isuzu ELF
Vehicle mass	3 530 kg
Maximum pay load	3 000 kg
GVW	6 585 kg
Length x width x height	6 600 mm x 2 220 mm x 2 450 mm
Transmission	6MT
Engine type	Inline 4-cylinder turbo diesel
Engine model	4JJ1-TCH
Displacement	2 999 cm ³
Maximum power	110 kW / 2 800 rpm
Maximum torque	375 Nm / 1 400~2 800 rpm
Aftertreatment	DOC, DPF
Emission regulation	Japanese 2009 regulation

На таблиці 4.4 показані властивості тестових плив

Таблиця 4.4. Властивості тестових палив

Fuel	ULSD	FAME	HVO	BTL
Density@15 deg.C [g/cm ³]	0.8295	0.8853	0.7798	0.8142
Kinematic viscosity [mm ² /s]	3.655 (30 deg.C)	4.605 (40 deg.C)	3.708 (30 deg.C)	5.258 (30 deg.C)
Flash point [deg.C]	68.0	176.0	91.0	10.0
Sulfur content [ppm]	8	2	<1	<1
Cetane number	54.6	55.3	85.8	67.7
Pour point [deg.C]	-22.5	-2.5	-15.0	-10.0
Distillation temp. [deg.C]	IBP	168.0	207.0	153.5
	10%	210.0	353.0	267.5
	50%	279.5	353.0	281.5
	90%	337.5	358.0	294.0
	EP	358.5	486.0	303.5
CHO [mass%]	C	86.3	77.1	84.8
	H	13.7	12.1	15.1
	O	<0.1	10.8	<0.1
Lower heating value [kJ/kg]	43 170	37 340	44 110	43 440

В якості змінних в моделі використовувалися середня частота обертання двигуна, N_e [об/хв] і середній крутний момент двигуна, T_e [N·m]. Крім того, в якості факторів, що пояснюють дорожню обстановку, використовувалася середня швидкість руху транспортного засобу, V [км/год]. Що стосується умов навколишнього середовища, то середня температура, T_a °C. Середній парціальний тиск водяної пари, P_w [kPa]. При цьому передбачалося, що вплив кожної змінної не завжди виявляється в лінійному відношенні, і тоді до пояснювальних змінних додаються квадратичні члени кожної змінної. На основі змінних, підібраних вищезазначеним методом, були проведені результати вимірювань викидів NOx в множинному регресійному аналізі, і таким чином була отримана формула наступним чином.

$$\begin{aligned}
\text{Nox[g/kWh]} = & -4.441 \cdot 10^{-6} \cdot N_e^2 + 1.472 \cdot 10^{-2} \cdot N_e \\
& + 9.793 \cdot 10^{-4} \cdot T_e^2 - 2.358 \cdot 10^{-1} \cdot T_e \\
& - 4.062 \cdot 10^{-2} \cdot V^2 + 1.575 \cdot 10^0 \cdot V \\
& + 4.021 \cdot 10^{-3} \cdot T_a^2 - 2.620 \cdot 10^{-1} \cdot T_a \\
& - 9.576 \cdot 10^{-2} \cdot P_w^2 + 7.333 \cdot 10^{-1} \cdot P_w \\
& - 8.875 \cdot 10^0
\end{aligned}$$

Зміни в викидах NOx при фактичному русі по дорозі можуть бути в значній мірі пояснені змінами таких факторів, як середня частота

обертання двигуна і середній крутний момент двигуна при позитивному значенні крутного моменту двигуна, а також середня швидкість автомобіля, середня температура навколишнього середовища і середній парціальний тиск водяної пари під час випробувань. Потім характеристики викидів NOx у реальному водінні по дорозі були оцінені після розуміння впливу відмінностей у вищезазначених факторах з кожною зміною тестів на викиди NOx за допомогою множинного регресійного аналізу.

4.3.4. Реальні характеристики викидів при використанні біопалив.

Реальні характеристики викидів при використанні FAME (біодизель), HVO і BTL були оцінені за допомогою описаного вище методу. Для оцінки при зміні звичайного дизельного палива в кожне біопаливо до пояснювальних змінних для множинного регресійного аналізу були додані фактори, що впливають з властивості палива. Зокрема, до пояснювальних змінних було додано нижнє значення нагріву на одиницю об'єму, H_f [кДж/л] та співвідношення Н/С. Загалом, перше, H_f [кДж/л] є фактором, що впливає на стан контролю горіння, і він має високу щільність, з тенденцією, що чим вищий вміст кисню в паливі, тим нижчий значення. Останній, співвідношення Н/С є фактором, що впливає на стехіометричне співвідношення палива в повітрі та температуру адіабатичного полум'я, і має тенденцію до того, що чим вищий вміст парафінових вуглеводнів, тим вище значення. У попередніх роботах було з'ясовано, що обидва фактори були важливими факторами, що впливають на викиди NOx, і тому було визнано доцільним додати їх до пояснювальних змінних для множинного регресійного аналізу.

За допомогою розрахункової формули для викидів NOx, отриманої вищезазначеним методом множинного регресійного аналізу, були прийняті ті ж умови, що і в реальному світі, а потім порівнювалися характеристики викидів NOx серед видів палива. Було підготовлено чотири типи умов для порівняння: стан А і В передбачалися як спекотний і вологий літній час в Токіо, а А не усвідомлював екологічного водіння, а В був свідомим екологічного водіння, умови С і D припускалися як холодний і низько вологий зимовий час в Токіо, а С не усвідомлював екологічного водіння, а D був свідомим екологічного водіння. У цих умовах було проведено порівняння, і в таблиці 3 наведені середні обороти двигуна і крутний момент двигуна при позитивному значенні крутного моменту двигуна, а також середня швидкість руху автомобіля, середня

температура навколишнього середовища і середній парціальний тиск водяної пари під час випробувань.

Розрахункова формула викидів NO_x, [г/кВт·год], отримана шляхом множинного регресійного аналізу з даними з використанням ULSD та HVO.

$$\begin{aligned} \text{Nox[g/kWh]} = & -3.734 \cdot 10^{-6} \cdot N_e^2 + 1.356 \cdot 10^{-2} \cdot N_e \\ & + 3.407 \cdot 10^{-4} \cdot T_e^2 - 7.774 \cdot 10^{-2} \cdot T_e \\ & - 8.693 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + 2.632 \cdot 10^{-1} \cdot V \\ & + 8.802 \cdot 10^{-4} \cdot T_a^2 - 2.993 \cdot 10^{-2} \cdot T_a \\ & + 1.675 \cdot 10^{-1} \cdot P_w^2 - 7.705 \cdot 10^{-1} \cdot P_w \\ & + 1.418 \cdot 10^{-2} \cdot H_f + 8.932 \cdot 10^{-1} \cdot H/C \\ & - 6.854 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

H_f - lower heating value per unit volume of fuel [kJ/L] (нижча теплотворна здатність на одиницю об'єму палива)

H/C - ratio of hydrogen atom number and carbon atom number in the fuel (співвідношення кількості атомів водню і кількості атомів вуглецю в паливі).

Для відновного палива HVO розраховуємо:

- Відношення кількості атомів водню у паливі до кількості атомів вуглецю:

$$H/C = 84.8/15.1 = 0.178 \text{ (по масі)}$$

- Нижча теплота згоряння палива HVO складає 44100 кДж/кг.

Для того щоб перевести це значення в теплоту згоряння на одиницю об'єму палива, потрібно це значення помножити на густину палива HVO, що складає 779.8 кг/м³.

$$(1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ літрів})$$

$$H_f = 44100 \cdot 779.8 / 1000 = 34389.18 \text{ кДж/л.}$$

Перевірка моделі показала, що це рівняння містить помилки. Отже, для розрахунків оксидів азоту HVO

Викиди оксидів азоту для різних типів альтернативних палив і їх сумішей можна оцінити

$$\begin{aligned} \text{Nox[g/kWh]} = & -1.466 \cdot 10^{-6} \cdot N_e^2 + 6.768 \cdot 10^{-3} \cdot N_e \\ & + 3.520 \cdot 10^{-4} \cdot T_e^2 - 8.109 \cdot 10^{-2} \cdot T_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -7.476 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + 2.183 \cdot 10^{-1} \cdot V \\
& + 3.292 \cdot 10^{-4} \cdot T_a^2 - 5.699 \cdot 10^{-2} \cdot T_a \\
& + 1.247 \cdot 10^{-1} \cdot P_w^2 - 6.784 \cdot 10^{-1} \cdot P_w \\
& - 1.536 \cdot 10^{-4} \cdot H_f - 9.043 \cdot 10^{-1} \cdot H/C \\
& - 5.361 \cdot 10^0
\end{aligned}$$

Викиди оксидів азоту для автомобільного транспорту, що працює на різних видах альтернативного палива підраховані і показані на рисунку 4.8.

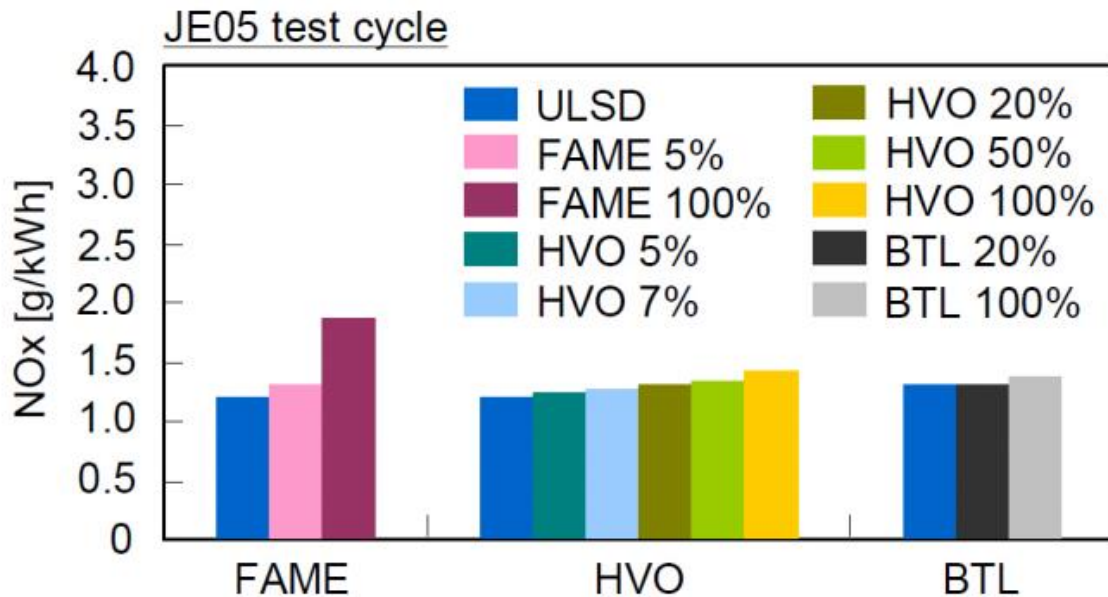


Рис 4.8. Викиди оксидів азоту для автомобільного транспорту, що працює на різних видах альтернативного палива.

Висновки до 4 розділу:

1. Було проаналізовано різні схеми мобільних станцій для заправки автомобілів воднем і виконано моделювання викидів оксидів азоту для різних альтернативних палив для мобільної станції.
3. В роботі було запропоновано використовувати альтернативне паливо HVO для мобільної станції на водні, як заміну дизельного палива.
4. Було проаналізовано специфіку роботи обладнання для заправних станцій на водні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Використання водню як палива для автомобілів з паливними комірками позитивно вплине на енергетичну безпеку, покращить екологію (за рахунок відсутності шкідливих викидів в порівнянні з автомобілями з ДВЗ). Покращить енергетичну незалежність від держав, які добувають корисні копалини (нафту, газ), із-за того що його можна отримати із відновлювальних джерел енергії. Таким чином, водень може стати заміном нафти і її продукції в виді палива для автомобілів. Найбільш привабливим є зелений водень, який не утворює викидів CO₂, якщо використовувати вітрову станцію чи сонячні панелі.

В роботі було проаналізовано різні схеми мобільних станцій для заправки автомобілів воднем і проаналізовано специфіку роботи обладнання для заправних станцій на водні. Було запропоновано використовувати альтернативне паливо HVO для мобільної станції на водні, як заміну дизельного палива, а також виконано моделювання викидів оксидів азоту для різних альтернативних палив для мобільної станції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кольори водню | Белферівський центр науки та міжнародних відносин | липень 2024
2. Roadmap to a Single European Transport Area—Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System COM; 144 Final, 28/3/2011; European Commission: Brussels, Belgium, 2011.
3. IEA, The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities, Report prepared by IEA for the G20, Japan, June 2019. pg. 126.
4. IHS Markit [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ihsmarkit.com/research-analysis/ihs-forecasts-fcev-production-to-reach-69000-upa-by-2027.html>.
5. <https://www.reuters.com/article/us-gm-honda-idUSKBN15B2EK>, and, Why Fuel Cells Help Meet State Policy Goals, FCHEA Presentation. <https://www.naseo.org/Data/Sites/1/events/regional/northeast/2017/FCHEA--Fuel-Cells.pdf> and Press Release <https://www.honda.ca/newsdetails/nca/en/news/release/GM-Honda-to-Collaborate-on-NextGenerationFuel-Cell-Technologies> xx Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, pg. 29.
6. Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, pg. 29.
7. Developments of Electric cars and Fuel Cell Hydrogen Electric Cars, Wilberforce, Tabbi et al., International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), 25695-25734.
8. Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector, Amela Ajanovic, Reinhard Haas, Energy Policy 123 (2018), pg. 286.
9. Japanese Government Official Website [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.japan.go.jp/_src/217878/spring15_30-31.pdf.
10. DOE [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.energy.gov/eere/articles/5-fast-facts-about-hydrogen-and-fuel-cells>.
11. Wand G. Fuel Cell History, Part One, pg.14 in Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, “A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research,” Applied Energy, vol. 88
12. Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, “A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology,

- applications, and needs on fundamental research,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 981–1007, 2011, pg. 982.
13. H2 Mobility Europe [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://h2me.eu/about/fcevs/>.
 14. 2023 NEXO Fuel Cell Our hydrogen-powered SUV. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hyundaiusa.com/nexo/index.aspx>.
 15. Fuel Economy Guide, Model Year 2019, DOE, EPA, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy
 16. IEA, World Energy Outlook, 2018.
 17. IRENA, Hydrogen from Renewables, 2018, pg.28.
 18. California Fuel Cell Partnership [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cafcp.org/content/cost-refill>.
 19. Беркерт. Дані Листок. 2013. [http : //www.burkert.dk/productsdata/datasheets/DS2836](http://www.burkert.dk/productsdata/datasheets/DS2836) - 10 червня 2013 року.
 20. Ченгель Ю., Цимбала Я. Механіка рідини: основи та застосування. 1 ed. Нью-Йорк McGraw-Hill; 2006, с. 321-354.
 21. Дейні Д.Е. Турбулентна природна конвекція рідкого дейтерієвого водню та азоту в закритих посудинах. *Int J Heat Mass Tran* 1976;19:431-441.
 22. Dicken CBJ, Mérida W. Вимірний вплив часу заповнення та початкової маси на розподіл температури в балоні з воднем під час заправки. *J Power Sources* 2006;165:324-336.
 23. Фарзанех-Горд М., Деймі-Даштебаяз М., Рахбарі Х., Ніазманд Х. Вплив типів та умов зберігання на продуктивність заправних станцій стисненого водню. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:3500-3509.
 24. Фарзанех-Горд М., Деймі-Даштебаяз М., Рахбарі Х., Ніазманд Х. Вплив геометрії та непостійної масової витрати на температуру в балоні під тиском під час заправки. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:6043-6052.
 25. Mobile Hydrogen Refueler Gavin Newsom, Governor April 2021 | CEC-600-2021-006
 26. Hydrogen refueling station analysis model (HRSAM). Argonne National Laboratory. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>.
 27. Gaseous hydrogen – Fuelling stations. Part 1: General requirements. BSI Standards Publication. BS ISO 19880-1: 2020.

- 28.Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:21855-21865.
- 29.Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:16675-16685.